

ÇELİK SEKTÖRÜNDE KARBONSUZLAŞMA SEÇENEKLERİ

MUAMMER BİLGİÇ
DURSUN BAŞ

İPM
İSTANBUL POLİTİKALAR MERKEZİ
SABANCI ÜNİVERSİTESİ
STIFTUNG MERCATOR GİRİŞİMİ

ÇELİK SEKTÖRÜNDE KARBONSUZLAŞMA SEÇENEKLERİ

MUAMMER BİLGİÇ, DURSUN BAŞ

Kasım 2024

İstanbul Politikalar Merkezi Hakkında

İstanbul Politikalar Merkezi (İPM) demokratikleşmeden iklim değişikliğine, transatlantik ilişkilerden çatışma analizi ve çözümüne kadar, önemli siyasal ve sosyal konularda uzmanlığa sahip, çalışmalarını küresel düzeyde sürdüren bir politika araştırma kuruluşudur. İPM araştırma çalışmalarını üç ana başlık altında yürütmektedir: İstanbul Politikalar Merkezi-Sabancı Üniversitesi-Stiftung Mercator Girişimi, Demokratikleşme ve Kurumsal Reform, Çatışma Çözümü ve Arabuluculuk. İPM, 10 yılı aşkın süredir, karar alıcılara, kanaat önderlerine ve paydaşlara uzmanlık alanına giren konularda tarafsız analiz ve yenilikçi politika önerilerinde bulunmaktadır.

www.ipc.sabanciuniv.edu

Editör:

Dr. Ümit Şahin

Yazarlar:

Muammer Bilgiç, Dursun Baş

Kapak görseli: Avusturyalı çelik üreticisi voestalpine şirketinin Donawitz şehrindeki Technikum Metallurgie adlı mini çelik araştırma ve üretim tesisindeki üretiminden bir görüntü. Tesiste yapılan bu üretim, Hyfor pilot tesisinden elde edilen hidrojen kullanılarak indirgenen demirin ve bir miktar hurdanın kullanılması yoluyla dünyanın ilk yüksek kaliteli “yeşil” filmaşin üretimi olarak kamuoyuna duyurulmuştur.

KISALTMALAR LİSTESİ (SEÇİLMİŞ)

OBF	Açık Banyo Ocağı
REA	Avrupa Araştırma Yürütme Ajansı
AB	Avrupa Birliği
EUROFER	Avrupa Çelik Üreticileri Birliği
ESTEP	Avrupa Çelik Teknolojisi Platformu
AKÇT	Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu
RFCS	AB Kömür ve Çelik Araştırma Fonu
CSP	AB Temiz Çelik Ortaklığı
BOF	Bazik Oksijen Fırını
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
Fe	Demir
Fe_xO_y	Demir oksitler
DR	Doğrudan indirgeme
DRI	Doğrudan indirgenmiş demir
worldsteel	Dünya Çelik Üreticileri Birliği
EAF	Elektrik Ark Ocağı
ESF	Elektrikli İzabe Ocağı
ETS	Emisyon Ticareti Sistemi
MOE	Ergiyik Oksit Elektrolizi
HPR	Hidrojen Plazma İndirgemesi
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
CCS	Karbon Yakalama ve Depolama
CCU	Karbon Yakalama ve Kullanım
CCUS	Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama
MPP	Mission Possible Partnership
Mt	Milyon ton
IPCEI	Ortak Avrupa Menfaatine Yönelik Önemli Projeler
STB	Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
SKDT	Sınırda Karbon Denkleştirme Tüzüğü
TRL	Teknolojik Hazırlık Seviyesi
Horizon	Ufuk Avrupa Programı
UKB	Ulusal Katkı Beyanı
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
BF	Yüksek Fırın

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR LİSTESİ (SEÇİLMİŞ) 3

Şekiller Listesi 6
Tablolar Listesi 8
Kutu Listesi 9

YÖNETİCİ ÖZETİ 10

1 GİRİŞ 11

2 MEVCUT HAM ÇELİK ÜRETİMİ TEKNOLOJİLERİ VE CO_2 EMİSYONLARI 13

2.1 Ham çelik üretiminde mevcut teknolojiler ve üretimdeki payları 13
2.2 Mevcut ham çelik üretimi teknolojilerine ait teknik bilgiler 16
2.2.1 BF-BOF çelik üretim rotası 16
2.2.2 Hurda Çelik - EAF çelik üretim rotası 17
2.2.3 DRI-EAF çelik üretim rotası 18
2.3 Küresel karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmada çelik üretimi için öngörülen karbon bütçesi 19

3 ÇELİK ÜRETİMİNDE KARBONSUZLAŞMANIN METALURJİK PROSES YÖNÜ 21

3.1 Demir metalurjisi teknik detayları 21
3.2 Geleneksel BF-BOF üretim rotasındaki kömüre bağımlılık ve değişim 21
3.3 EAF'deki metalurjik proseste CO_2 emisyonu parametresi 26
3.4 DRI üretimi teknolojileri 28
3.4.1 Geleneksel DRI üretimi prosesleri ve teknik detayları 28
3.4.2 Doğal gaz esaslı DRI-EAF üretim rotasına ilişkin önemli proses detayları 33
3.4.3 Yeşil Hidrojen esaslı DRI-EAF üretim rotası 34

4 ÇELİK ÜRETİMİNDE KARBONSUZLAŞMA İÇİN YENİLİKÇİ TEKNOLOJİLER 36

4.1 Çelik üretiminde karbonsuzlaşmanın temel konuları 36
4.2 Döngüsel çelik yapımı 37
4.2.1 Çelik üretim sektörünün karbonsuzlaşmasında arz ve talebin etkisi 40
4.2.2 Çelik sektörünün emisyonlarını azaltmada yenilikçi teknolojiler ihtiyacı 43
4.3 Çelik üretiminde yenilikçi teknolojilerin sınıflandırılması 44
4.3.1 Yenilikçi çelik üretimi teknolojilerinde mevcut durum 45
4.3.2 Yenilikçi çelik üretimi teknolojilerinin olgunlaşmasına dair beklentiler 46

5 ÇELİK ÜRETİMİNDE YENİLİKÇİ TEKNOLOJİ UYGULAMA ÖRNEKLERİ 48

5.1 Çelik üretiminde hidrojen kullanımı 48

5.1.1 Geleneksel BF - BOF üretim rotasında hidrojen kullanımı 48

5.1.2 Çelik üretiminde hidrojen esaslı pilot projeler 52

5.1.3 H_2-DRI-EAF üretim rotasında karşılaşılan sorunlar 59

5.2 Demir cevheri elektrolizi ile üretim 64

5.2.1 Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen metal oksit elektrolizi 65

5.2.2 Düşük sıcaklıkta gerçekleşen metal oksit elektrolizi 66

5.3 Hidrojen plazma yöntemi ile üretim 67

5.4 Karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin çelik üretiminde kullanımı 69

6 ÇELİK SEKTÖRÜNDE KARBONSUZLAŞMA YATIRIMLARININ FİNANSMANI 72

6.1 Sektörün genel finansman ihtiyacı 73

6.1.1 Çelik sektöründe dönüşüm için uluslararası finansman kuruluşlarının önemi 73

6.1.2 Çelik sektörü karbonsuzlaşma hedefleri için ihtiyaç duyulan yatırım 76

6.2 Çelik sektöründe dönüşüme yönelik finansman mekanizmaları – AB örneği 79

7 EKLER 82

EK 1. AB çelik sektörü destek programları 82

AB Kömür ve Çelik Araştırma Fonu (RFCS) 82

AB Temiz Çelik Ortaklığı (Clean Steel Partnership - CSP) 83

AB'nin Ortak Avrupa Çıkarına İlişkin Önemli Projeleri (IPCEI) 84

EK 2. Çelik sektöründeki karbonsuzlaşma örnekleri 85

Önde gelen çelik üreticilerinin karbonsuzlaşma seçeneklerine yönelik tercihleri ve dönüşüm takvimleri 85

Avrupa demir ve çelik sektöründe yeşil hidrojen, elektrik ve DRI kullanım stratejileri 87

AB çelik endüstrisi tarafından geliştirilmekte olan düşük CO_2 emisyonlu çelik üretimi projeleri 88

EK 3. EAF'li çelik üreticilerinden örnek karbonsuzlaşma uygulamaları 94

Acciaieria Arvedi - İtalya 94

Commercial Metals Company (CMC) - ABD 96

Beltrame AFV - İtalya 97

EK 4. İndüksiyon ocağı ile çelik üretimi rotası 98

EK 5. Sanayide kullanılan hidrojene dair genel bilgiler 99

EK 6. Çelik endüstrisinde geleneksel karbon kaynakları yerine biochar ve biyokütle kullanımı 100

EK 7. Çelik üretiminin karbonsuzlaşmasında hammadde kaynaklı sınırlamalar 101

EK 8. Çelik sektörü kaynaklı sera gazı emiyonları ve bunların kaynakları 103

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 - Mevcut ham çelik üretim rotaları 13

Şekil 2 - Birincil ve ikincil çelik üretim proseslerine ait CO_2 emisyonu yoğunluğu değerleri (tCO_2 /ton-çelik) 15

Şekil 3 - BF-BOF çelik yapım rotasında CO_2 emisyonu kırılımları 17

Şekil 4 - Hurda-EAF çelik yapım prosesinde oluşan doğrudan CO_2 emisyonlarının kırılımı 18

Şekil 5 - IPCC 1,5°C hedefi karbon bütçesi ve çelik sektörüne ait bütçe (2020-2050) 20

Şekil 6 - IEA 2050 net sıfır senaryosuna göre çelik sektörü Kapsam 1 ve Kapsam 2 emisyonları ($MtCO_2e$; 2020-2050) 20

Şekil 7 - Demir metalürjisi ile ilgili olan elementlerin indirgenebilme özellikleri - Ellingham diyagramı 21

Şekil 8 - COREX üretim rotası 22

Şekil 9 - FINEX üretim rotası 23

Şekil 10 - En yaygın çelik üretimi olan BF-BOF rotasında demir cevherinin indirgenmesi 25

Şekil 11 - Şaft fırınında hidrojen kullanılarak demir cevherinin doğrudan indirgenmesi 25

Şekil 12 - EAF çelik yapım prosesi ısı enerji dengesi 27

Şekil 13 - EAF'de gerçekleşen dekarbürizasyon reaksiyonları 27

Şekil 14 - Yaygın olarak kullanılan doğrudan indirgeme prosesleri teknik detayları 29

Şekil 15 - Küresel düzeyde DRI üretim miktarı (1970-2022) 30

Şekil 16 - DRI kullanılarak yapılan ham çelik üretiminde kullanılan teknolojilerin payı 31

Şekil 17 - EAF'deki çelik yapım prosesinde Karbon (C) ve Fe_xO_y ilişkileri 33

Şekil 18 - Yeşil hidrojene dayalı üretim yapan DRI-EAF rotası ve diğer geleneksel üretim rotaları 34

Şekil 19 - Kaynaklarına göre endüstriyel hidrojen türleri 35

Şekil 20 - EAF'li bir işletmede metalik fireler ve EAF'deki enerji dengesi 38

Şekil 21 - Küresel çelik üretimi ve üretimden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının gelişimi 41

Şekil 22 - Yüksek döngüsellik senaryosunda 2020 – 2050 dönemi çelik talebinin değişimi öngörüsü 42

Şekil 23 - Çelik üretiminde teknolojik alternatiflerin olgunlaşma yılı ve emisyon yoğunluğuna dair tahminler (ST-STSM) 46

Şekil 24 - 2020-2050 döneminde çelik üretiminin seyri ve üretim teknolojilerin payındaki değişimler (Mt/yıl) 47

Şekil 25 - BF-BOF üretim rotası ile Hybrit üretim teknolojisi rotası karşılaştırması 53

Şekil 26 - İsveç'teki BF-BOF üretim rotası referans CO_2 emisyonu değerleri 54

Şekil 27 - HYBRIT üretim teknolojisi CO_2 emisyonu öngörüleri 54

Şekil 28 - FINEX çelik yapım prosesinden HyREX prosesine dönüşüm 56

Şekil 29 - EAF ve ESF proses detaylarının karşılaştırılması 58

Şekil 30 - H_2 üretim maliyeti tahminleri 62

Şekil 31 - Çelik sektöründe DRI-EAF rotasında kullanılacak hidrojen için 2030 yılında ihtiyaç duyulacak yenilenebilir enerji miktarı 64

Şekil 32 - Boston Metalics'e ait pilot ölçekli MOE teknolojisi 65

Şekil 33 - SuSteel projesi pilot tesis akış diyagramı 68

Şekil 34 - 2000 ile 2021 yılları arasında bölgelere göre çelik projelerine yapılan IFI yatırımlarının hacmi 74

Şekil 35 - 2000-2021 yılları arasında çelik projelerine farklı amaçlar için tahsis edilen IFI yatırımlarının dağılımı 74

Şekil 36 - Sürdürülebilir tahvil türleri ve yıllara göre değişimi 75

Şekil 37 - 2050 Net Sıfır hedefi için çelik endüstrisinin yapması gereken yatırımın dağılım öngörüsü (Milyar ABD doları) 77

Şekil 38 - Çelik üretimi karbon azaltma çalışmalarının yatırım ve operasyonel maliyetlerinin tahmin edilen ABD doları/ton değerleri 78

Şekil 39 - AB'nin 2021-2030 dönemi için öngördüğü fon programlarına ait bütçeler (2021) 80

Şekil 40 - Önde gelen çelik üreticilerinin karbonsuzlaşma seçeneklerine yönelik tercihleri 86

Şekil 41 - Önde gelen çelik üreticilerinin düşük karbonlu çelik üretimi projelerinin takvimi 86

Şekil 42 - AB çelik endüstrisi tarafından geliştirilmekte olan düşük CO_2 emisyonlu çelik üretimi projeleri (Kasım 2022 itibariyle) 90

Şekil 43 - Acciaieria Arvedi çelik yapım proses zinciri emisyon değerleri 95

Şekil 44 - Endüstrinin küresel hidrojen talebi, 2015-2030 99

Şekil 45 - Operasyonel ve planlı düşük emisyonlu hidrojen kullanılarak yapılması beklenen çelik üretimi, 2015-2030 99

Şekil 46 - Hurda türlerinin iz element içerikleri ve üretilebilecek çelik türüne etkisi 102

Şekil 47 - EAF ve Smelter + BOF üretim rotası için cevher kalitesine (Fe içeriği) göre toplam maliyet değişimi 103

Şekil 48 - Küresel sera gazı emisyonlarının farklı sektörlere göre dağılımı 104

Şekil 49 - Çelik sektörü Kapsam 1,2 ve 3 kategorisine giren süreçlerin detayı 104

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1 - Küresel düzeyde çelik sektörünün CO_2 emisyonları 15

Tablo 2 - Mevcut fosil yakıtlı DRI üretimi teknolojileri 29

Tablo 3 - EAF ile ESF'nin karşılaştırılması 58

Tablo 4 - Seçilmiş düşük karbonlu çelik teknolojilerinin tahmini sermaye yatırımı ve emisyon azaltma potansiyeli 78

Tablo 5 - IPCEI kapsamında desteklenen programların detayları 85

Tablo 6 - Avrupalı çelik üreticilerin düşük karbonlu çelik üretimi için takip ettiği hidrojen ve yenilenebilir elektrik kullanımı stratejileri 87

Tablo 7 - AB ülkelerinden seçilmiş hidrojen bazlı çelik karbonsuzlaştırma projeleri 91

Tablo 8 - AB ülkelerinden seçilmiş CCUS bazlı çelik karbonsuzlaştırma projeleri (Eylül 2021 itibarıyla) 93

Tablo 9 - CMC şirketine ait çelik üretimi emisyon değerleri 96

Tablo 10 - Beltrame AFV şirketine ait çelik üretimi emisyon değerleri, 2021 97

Tablo 11 - Çeliğin kullanım alanları, geri dönüşüm oranları ve çelik ürünlerin kullanım ömürleri 101

KUTU LİSTESİ

Kutu 1 - Ham çelik üretiminden kaynaklanan küresel CO_2 emisyonları ve üretim rotalarındaki emisyon yoğunluğu 14

Kutu 2 - Yüksek fırın üretim rotasında kömür bazlı alternatif teknolojiler 22

Kutu 3 - DRI üretimi verileri 30

Kutu 4 - Sanayide kullanılan hidrojen türleri 35

Kutu 5 - Çelik sektöründe karbonsuzlaşma çalışmalarının itici güçleri 36

Kutu 6 - Düşük karbonlu çelik üretimi 37

Kutu 7 - EAF'lerde baca gazı atık ısı geri kazanımı 39

Kutu 8 - Karbonsuzlaşma paradigmasının ana unsurları 39

Kutu 9 - Çelik sektörü emisyon yoğunluğunda iyileşme ve kümülatif emisyonlar 41

Kutu 10 - Dünya Çelik Üreticileri Birliği'nin yenilikçi-atılımcı teknolojiler sınıflandırması 45

Kutu 11 - Yüksek fırınları bekleyen dönüşüm süreci 50

Kutu 12 - Elektrikli izabe ocağı (Electrical Smelting Furnace-ESF) teknolojisi 57

Kutu 13 - Hidrojen üretimi fiyat tahminleri, 2020-2050 dönemi 62

Kutu 14 - Hidrojen üretiminde ve Yeşil-H_2-DRI üretim rotasındaki yenilenebilir elektrik ihtiyacı 63

Kutu 15 - Karbon yakalama projeleri 70

Kutu 16 - EAF'li tesisleri bekleyen dönüşüm süreci 71

Kutu 17 - Yeşil tahvil türleri ve karbonsuzlaşmaya destek veren finansman mekanizmaları 75

Kutu 18 - AB'de Sanayi Politikası Stratejisi ve emisyon ticareti gelirleri kullanımı 79

Kutu 19 - Yeşil Mutabakat Sanayi Planı ve Geçici Kriz ve Geçiş Çerçevesi 81

Kutu 20 - AB Çelik sektör karbonsuzlaşma yatırım ihtiyaçları 89

YÖNETİCİ ÖZETİ

İnsan kaynaklı sera gazlarının atmosferde artan birikimiyle hızlanan iklim değişikliğiyle mücadele için sadece enerji sektörünün karbonsuzlaşması yeterli değildir. Karbonsuzlaşmanın, küresel ekonomi ölçeğinde tüm sektörlerden (sanayi, ulaşım, binalar, tarım vb.) kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması ile başarılabileceği bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu doğrultuda birçok ülke, sanayi sektörleri için de karbonsuzlaşma yol haritalarını ve ilgili azaltım, teknoloji ve finansman kullanım hedeflerini açıklamıştır.

Türkiye'nin Kasım 2022'de Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) 27. Taraflar Konferansı'nda (COP27) açıklanan güncellenmiş ulusal katkı beyanında (NDC) sanayi sektörü için genel bazı eylemler yer almaktadır. Kasım 2024'te BMİDÇS'ye sunulan 2053 *Uzun Dönemli İklim Değişikliği Stratejisi* (LTS) belgesinde ise sanayi sektörü başlığı altında çelik, çimento ve alüminyum sektörleri için 2040 ve 2053 yılları için hedefler tanımlanmıştır. Ancak emisyon-yoğun sanayi sektörleri için bağlayıcı azaltım hedefleri içeren yasal bir düzenleme henüz hayata geçirilmemiştir.

Kısa bir süre önce 2053 Net Sıfır hedefini açıklayan Türkiye'nin de emisyon-yoğun sanayi sektörlerine yönelik azaltım hedeflerini belirlemesi beklenmektedir. Bu hedeflere erişilmesini kolaylaştıracak finansal programlar ile enerji altyapısı yatırımlarının planlanmasına ve düzenleyici koşullar için gerekli ortamın yaratılma için gerekli çalışmalara bir an önce başlanması gerekmektedir. Bu süreç planlanırken, sera gazlarının yönetimi dışında, verimlilik ve kaynak kullanımına (enerji, hammadde, su vb.) ilişkin düzenlemelerin de hayata geçirilmesi ve etkin bir şekilde uygulanması için benzer koşulların sağlanması tamamlayıcı bir unsur olacaktır.

Bu kapsamda, Türkiye ekonomisi ve sanayisi için stratejik bir sektör olarak kabul edilen demir-çelik sektörünün karbonsuzlaşması için gerekenlerin daha iyi tanımlanması adına ilgili kamu kurumları ve sivil toplum kuruluşları tarafından çeşitli projeler son yıllarda hayata geçirilmiştir.

Bu çalışmalardan biri olan "*Türkiye Çelik Sektörü Karbonsuzlaşma Projesi*" kapsamında hazırlanan "***Çelik Sektörü Karbonsuzlaşma Seçenekleri***" raporu, ham çelik üretimi faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarının azaltılmasını sağlayacak teknolojilere ilişkin teknik bilgileri ortaya koymaktadır. Proje kapsamında 2023 içerisinde "*Türkiye Çelik Sektörünün Karbonsuzlaşması: Mevcut Durum*" adlı bir rapor da yayımlanmıştır.

Çalışmanın amacı, dünya çelik endüstrisinde karbonsuzlaşma dönüşümüne dair teknolojileri örneklemek ve Türkiye'ye özgü çözüm tartışmaları için arka plan bilgisi oluşturmaktır. Konunun tüm yönlerinin tek bir çalışma içinde ele alınması mümkün değildir, bu nedenle teknik konulara dair bir kılavuz metin oluşturulması amaçlanmıştır. Çelik sektörü özelinde söz konusu teknolojik ve ekonomik dönüşümün planlanmasında bu ve benzeri çalışmaların karar alıcılara ve sektöre yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

1 GİRİŞ

İnsan kaynaklı sera gazlarının atmosferde artan birikimiyle hızlanan iklim değişikliğiyle mücadele için sadece enerji sektörünün karbonsuzlaşması yeterli değildir. Karbonsuzlaşmanın, küresel ekonomi ölçeğinde tüm sektörlerden (sanayi, ulaşım, binalar, tarım vb.) kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması ile başarılabileceği bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu doğrultuda birçok ülke, sanayi sektörleri için de karbonsuzlaşma yol haritalarını ve ilgili azaltım, teknoloji ve finansman kullanım hedeflerini açıklamıştır.[1]

Türkiye'nin Kasım 2022'de Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) 27. Taraflar Konferansı'nda (COP27) açıklanan güncellenmiş ulusal katkı beyanında (NDC) sanayi sektörü için genel bazı eylemler yer almaktadır. Kasım 2024'te BMİDÇS'ye sunulan 2053 *Uzun Dönemli İklim Değişikliği Stratejisi* (LTS) belgesinde ise sanayi sektörü başlığı altında çelik, çimento ve alüminyum sektörleri için 2040 ve 2053 yılları için hedefler tanımlanmıştır. Ancak emisyon-yoğun sanayi sektörleri için bağlayıcı azaltım hedefleri içeren yasal bir düzenleme henüz hayata geçirilmemiştir.

Kısa bir süre önce 2053 Net Sıfır hedefini açıklayan Türkiye'nin de emisyon-yoğun sanayi sektörlerine yönelik azaltım hedeflerini belirlemesi beklenmektedir. Bu hedeflere erişilmesini kolaylaştıracak finansal programlar[2] ile enerji altyapısı yatırımlarının planlanmasına[3] ve düzenleyici koşullar için gerekli ortamın yaratılma için gerekli çalışmalara bir an önce başlanması gerekmektedir. Bu süreç planlanırken, sera gazlarının yönetimi dışında, verimlilik ve kaynak kullanımına (enerji, hammadde, su vb.) ilişkin düzenlemelerin de hayata geçirilmesi ve etkin bir şekilde uygulanması için benzer koşulların sağlanması tamamlayıcı bir unsur olacaktır.

Bu kapsamda, Türkiye ekonomisi ve sanayisi için stratejik bir sektör olarak kabul edilen demir-çelik sektörünün karbonsuzlaşması için gerekenlerin daha iyi tanımlanması adına ilgili kamu kurumları ve sivil toplum kuruluşları tarafından çeşitli projeler son yıllarda hayata geçirilmiştir.[4]

Bu çalışmalardan biri olan "*Türkiye Çelik Sektörü Karbonsuzlaşma Projesi*" kapsamında hazırlanan "***Çelik Sektörü Karbonsuzlaşma Seçenekleri***" raporu, ham çelik üretimi faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarının azaltılmasını sağlayacak teknolojilere ilişkin teknik bilgileri ortaya koymaktadır. Proje kapsamında 2023 içerisinde

1 ABD örneği, "*U.S. Department of Energy's Industrial Decarbonization Roadmap, 2022*". https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/Industrial%20Decarbonization%20Roadmap.pdf, Birleşik Krallık örneği: "*Industrial Decarbonisation Strategy*", *HM Government*, 2021, https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6051cd04e90e07527f645f1e/Industrial_Decarbonisation_Strategy_March_2021.pdf
AB ülkeleri örneği: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_en

2 Çeşitli finansman ve teşvik araçları hayata geçirilmesine karşın destek miktarları dönüşüm için ihtiyaç duyulan rakamlar ve AB ülkeleri destek bütçeleri kıyaslandığında hala çok düşük kalmaktadır.

3 Yenilenebilir enerji (güneş ve rüzgar) ve elektrik şebekesi yatırımlarında ilerlemeler sağlanmasına karşın, nihai enerji tüketiminde yenilenebilir enerji miktarı hedefi hala istenen düzeyde değildir.

4 Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı *Türkiye Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası* (2023), Çelik İhracatçılar Birliği *Çelik Sektörü Sürdürülebilirlik Eylem Planı Raporu* (2023), SEFIA *Türkiye Çelik Sektörü Raporu: Üretim, Ticaret ve Karbonsuzlaşma Süreci Raporu* (2022)

"*Türkiye Çelik Sektörünün Karbonsuzlaşması: Mevcut Durum*" adlı bir rapor da yayımlanmıştır.[5]

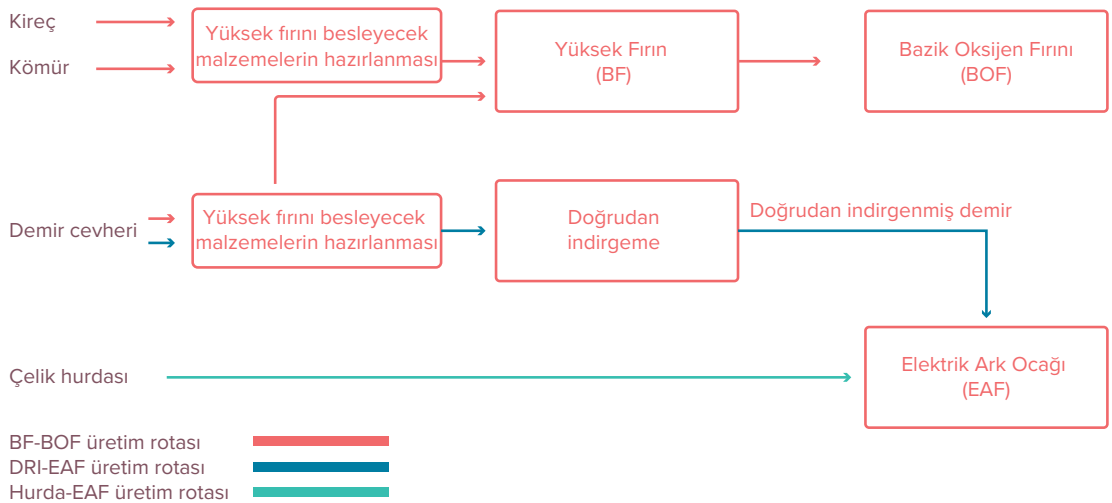
Çalışmanın amacı, dünya çelik endüstrisinde karbonsuzlaşma dönüşümüne dair teknolojileri örneklemek ve Türkiye'ye özgü çözüm tartışmaları için arka plan bilgisi oluşturmaktır. Konunun tüm yönlerinin tek bir çalışma içinde ele alınması mümkün değildir, bu nedenle teknik konulara dair bir kılavuz metin oluşturulması amaçlanmıştır. Çelik sektörü özelinde söz konusu teknolojik ve ekonomik dönüşümün planlanmasında bu ve benzeri çalışmaların karar alıcılara ve sektöre yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

5 "*Türkiye Çelik Sektörünün Karbonsuzlaşması: Mevcut Durum*", 2023. https://ipc.sabanciuniv.edu/Content/Images/CKeditorImages/20230704-09073528.pdf

2 MEVCUT HAM ÇELİK ÜRETİMİ TEKNOLOJİLERİ VE CO_2 EMİSYONLARI

2.1 HAM ÇELİK ÜRETİMİNDE MEVCUT TEKNOLOJİLER VE ÜRETİMDEKİ PAYLARI

Şekil 1 - Mevcut ham çelik üretim rotaları[6]



2023 yılı itibarıyla toplam 2 milyar tona yaklaşan yıllık küresel ham çelik[7] üretiminde üç temel üretim rotası[8] aşağıdaki paylara sahiptir (**Şekil 1)**:

- *BF (Yüksek Fırın) - BOF (Bazik Oksijen Fırını) rotası:* %71
- *Hurda çelik - Elektrik Ark Ocağı (EAF) rotası:* %24
- *Doğrudan İndirgenmiş Demir (DRI) - Elektrik Ark Ocağı (EAF) rotası*[9]*:* %5

Ham çelik üretimi BF-BOF ve DRI-EAF rotalarında yapıldığında ***birincil çelik üretimi*** Hurda-EAF rotası ile yapıldığında ***ikincil çelik üretimi*** olarak adlandırılmaktadır.

6 "*Steelmaking: Part 1 #42 How the backbone of our society is made*", 2022. https://www.survivaltech.club/newsletter/steelmaking-part-1

7 Ham çelik; sıvı çeliği veya üretilen sıvı çeliğin katı (veya kullanılabilir) ilk formunu ifade eder. Ham çelik, ileri bir işleme tabi tutulmakta veya doğrudan yarı mamuller (kütükler, blum, slab) şeklinde satışa sunulmaktadır.

8 Ülkemizde de yaygın bir biçimde bulunan hurda esaslı indüksiyon ocaklı tesisler EAF'li tesisler altında sınıflandırılmıştır. Bu tesislerin kapasiteleri EAF'li tesislere göre daha düşüktür. İndüksiyon ocağı ile çelik üretimi rotası detayları için bakınız **Ek 4.**

9 Doğrudan indirgenmiş demir (DRI): Kömür, doğal gaz veya hidrojen kullanılarak demir cevherinden üretilen demiri ifade etmektedir. DRI, "sünger demir" olarak da adlandırılır. Dünya çapında kullanımda olan ve farklı indirgeyici gaz kaynakları (doğal gaz veya kömür) ve demir cevheri beslemesi türleri (pelet veya ince cevherler) kullanabilen birkaç DRI işlemi türü vardır. Çelik tüm dünyada üretilirken, DRI üretimi, başta İran olmak üzere Orta Doğu›da (küresel üretimin yaklaşık %40›ı) ve Hindistan›da (yaklaşık %30) yoğunlaşmıştır.

Demir cevherinin metalurjik kömür kullanılarak indirgendiği (cevherdeki oksijenin uzaklaştırılması) BF-BOF, ham çelik üretiminde en yaygın üretim rotasıdır (BF-BOF üretim rotası, sektörün neden olduğu CO_2 emisyonlarında en fazla paya sahiptir. Detaylar için bkz. **Kutu 1**). Demir cevherinin metalurjik kömür kullanılmadan karbon bazlı diğer indirgeyiciler (H_2 ve CO gazları karışımı) kullanılarak doğrudan indirgendiği DRI-EAF rotası ile Hurda-EAF üretim rotasının paylarının ise gelecek yıllarda artması beklenmektedir.

KUTU 1 - HAM ÇELİK ÜRETİMİNDEN KAYNAKLANAN KÜRESEL CO_2 EMİSYONLARI VE ÜRETİM ROTALARINDAKİ EMİSYON YOĞUNLUĞU

Ham çelik üretiminden kaynaklanan küresel CO_2 emisyonları

Emisyon yoğun sektörlerden biri olan demir-çelik sektörü, sanayide tüketilen enerjinin büyük bir kısmından sorumludur. Yaygın çelik üretim rotalarında ortalama enerji tüketimleri BF/BOF rotasında 5.500 kWh/ton-ham çelik, hurda kullanan EAF rotasında 750-800 kWh/ton-ham çelik ve %100 H_2 kullanan DRI-EAF rotasında 4.000 kWh/ton-ham çeliktir.

Çelik üretiminde indirgeyici enerji/ısı kaynağı ve/veya proses girdisi olarak kullanılan fosil yakıtların (kömür ve doğal gaz) yanması sonucunda ve kimyasal prosesler sırasında oluşan CO_2 emisyonları, sektörün karbon yoğun bir sanayi sektörü olarak sınıflandırılmasına neden olmuştur.

Tipik bir ham çelik üretim tesisindeki emisyonların iki temel kaynağı vardır: *ham çeliğin üretildiği bölüme kadar olan kısım* ve *ham çelikten nihai ürünlerin üretildiği yere kadar olan kısım*.

Entegre tesislerde ham çelik üretim aşamasına kadar olan emisyonlar toplam emisyonların büyük bir kısmını oluştururken, EAF'li tesislerde (çok değişken olmakla birlikte) ham çelik üretiminden kaynaklanan emisyonlar ile nihai çelik ürünlerinin imalatından kaynaklanan emisyonların dağılımı yarı yarıya kabul edilebilir.

Demir çelik endüstrisi, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %7'sinden ve küresel CO_2 emisyonlarının %11'inden sorumludur. **Tablo 1**'de, farklı çelik üretim rotalarına ait CO_2 emisyonları verilmektedir. Küresel ölçekteki ham çelik üretiminin %70'ten fazlasının elde edildiği BF - BOF rotası, sektördeki emisyonların büyük bir kısmından (%86) sorumludur.

10 "*Iron and Steel Technology Roadmap*", 2020. https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

11 "*Steel Climate Impact - an International Benchmarking of Energy and* CO_2 Intensities." Global Efficiency Intelligence. Accessed September 5, 2022. https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co_2-intensities.

KUTU 1 - (DEVAM)

Tablo 1 - Küresel düzeyde çelik sektörünün CO_2 emisyonları

CO_2 Emisyonları 2019 Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Verileri[10]		**CO_2 Emisyonları 2019, Global Efficiency Intelligence Verileri[11]**	
Emisyonlar	Giga ton (Gt) CO_2	Üretim rotası	Giga ton (Gt) CO_2
Doğrudan emisyonlar	2,6 (%70)	BF – BOF çelik üretimi rotası	3,1 (%86)
Dolaylı emisyonlar	1,1 (%30)	EAF çelik üretimi rotası	0,5 (%14)
Toplam	3,7 (%100)	Toplam	3,6 (%100)

Ham çelik üretimi rotalarındaki CO_2 emisyonu yoğunluğu değerleri

Yukarıda listelenen ham çelik üretimi rotalarına ait Kapsam 1 ve Kapsam 2 CO_2 emisyonu yoğunluğu değerleri **Şekil 2**'de gösterilmiştir.[12] Detaylı bilgi için bakınız **Ek.8**.

Şekil 2 - Birincil ve ikincil çelik üretim proseslerine ait CO_2 emisyonu yoğunluğu değerleri (tCO_2 /ton-çelik)



(Hurda-EAF üretim rotasının emisyon değerinde alt sınır verilmiştir.)

12 "*New From Old: The Global Potential for More Scrap Steel Recycling Mature*, Cost-competitive and Lower-emissions Technology Is Primed for Expansion", 2021. https://ieefa.org/sites/default/files/resources/The-Global-Potential-for-More-Scrap-Steel-Recycling_December-2021_2.pdf



2.2 MEVCUT HAM ÇELİK ÜRETİMİ TEKNOLOJİLERİNE AİT TEKNİK BİLGİLER

2.2.1 BF-BOF çelik üretim rotası

BF-BOF çelik üretim rotası fosil yakıtlara (başta kömür olmak üzere) bağımlı olması nedeniyle birim üretimde en fazla emisyona neden olan üretim biçimidir (Kapsam 1 ve 2'de 2,2 ton-CO_2/ton-çelik).

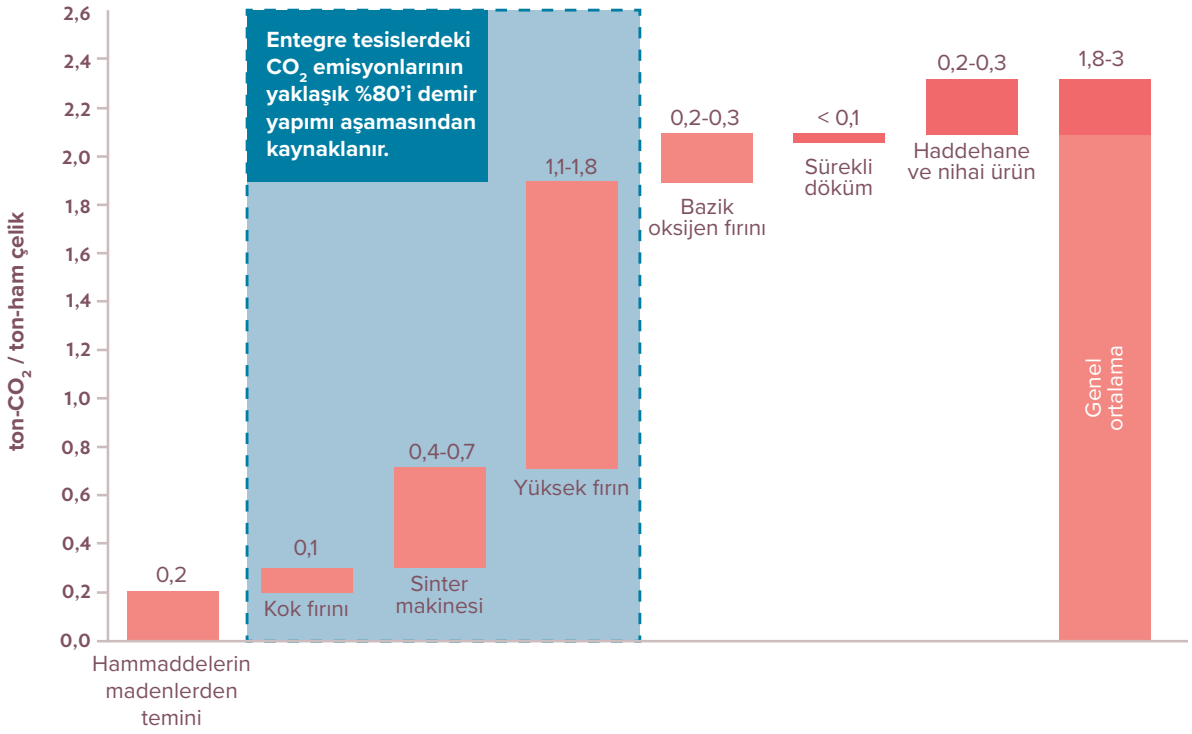
Bu teknolojide, yüksek fırın (BF) değişik formlardaki demir cevheri -ısıl işlemlerden geçmiş veya geçmemiş- ile beslenir. BF'yi besleyen demir cevheri, indirgeyici ve enerji kaynağı olarak metalurjik kömür (kok) kullanan bir proses ile pik demire dönüştürülür. BF'deki reaksiyonlar ve bu aşamada kullanılan metalurjik kömürün hazırlanması, CO_2 emisyonunun en çok ortaya çıktığı süreçlerdir.

BF'ler, üstten bir sıra halinde demir cevheri ve metalurjik kömür ile beslenirken, reaksiyonlar için gerekli olan sıcak hava fırının alt kısmındaki tüyerlerden üflenir. Reaksiyon sonucu oluşan ısı ve CO, demir cevherini indirgemek ve ergitmek için kullanılır. Böylece üretilen sıvı ham demir ve cüruf, BF'nin en alt kısmındaki hazne bölümünden alınır. Takip eden BOF ünitesinde oksidasyon/dekarbürizasyon[13] enerjisi kullanılarak çelik elde edilirken, BF aşamasına göre daha az miktarda sera gazı emisyonu salınır (**Şekil 3**).

Entegre tesislerde kömür dışında kullanılan doğal gazdan kaynaklanan doğrudan emisyonlar ile tüketilen elektrikten kaynaklanan dolaylı

13 Dekarbürizasyon, yüksek fırında üretilen ergiyik sıvı metalin karbon içeriğinin bazik oksijen fırın ünitesine saf oksijen verilmesi yoluyla yaklaşık %4'ten %1'in altına düşürülmesi işlemidir.

Şekil 3 - BF-BOF çelik yapım rotasında CO_2 emisyonu kırılımları[15]



emisyonlar da azımsanmayacak ölçüdedir.[14] **Şekil 3**'te, BF-BOF çelik yapım rotasında oluşan CO_2 emisyonlarının kırılımı sunulmuştur.

2.2.2 Hurda Çelik - EAF çelik üretim rotası

EAF sisteminin hurda metalle beslendiği ***Hurda Çelik – EAF üretim rotası,*** emisyon yoğunluğu bakımından son sırada gelmektedir. Bu rotada, ark ocağında tüketilen elektrikten kaynaklanan dolaylı emisyonlara ek olarak süreç boyunca kullanılan fosil yakıtlar (doğal gaz, kömür-antrasit vb.) nedeniyle de emisyon oluşmaktadır.

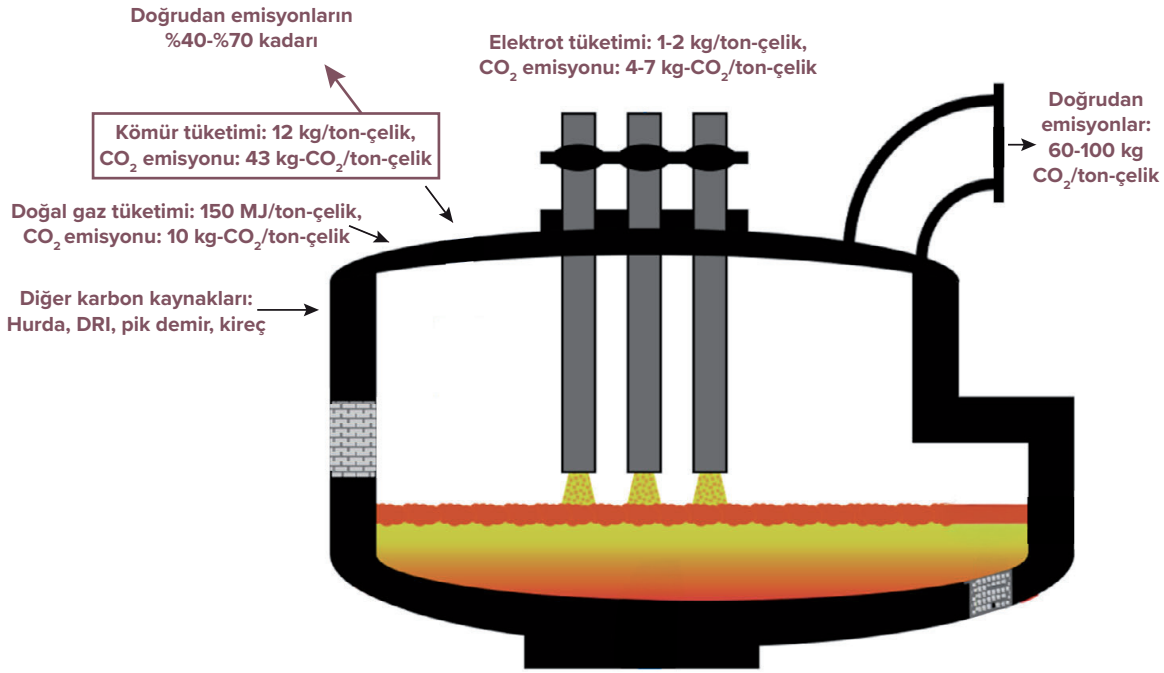
EAF'li tesislerde Kapsam 1 ve 2 CO_2 emisyonu değeri 0,30-0,45 ton-CO_2/ton-çelik olarak kabul edilmesine karşın kullanılan elektrik enerjisinin CO_2 yoğunluğuna bağlı olarak emisyon değeri 0,6 ton-CO_2/ton-çelik değerine kadar çıkabilmektedir.

Şekil 4'te hurdanın ergitildiği ark ocağında oluşan doğrudan CO_2 emisyonlarının kırılımı verilmiştir. Hammaddenin karbon içeriği ile karbon enjeksiyon malzemesi (antrasit) ve doğal gaz kullanımı doğrudan CO_2 emisyonunun ana unsurlarıdır. EAF için tipik Kapsam 1 emisyonu değerleri 60-100 kg/

14 Yüksek fırınlardaki işlemler, klasik cevher ve kömür esaslı demir çelik yapımının en yüksek emisyona sahip proses aşaması olmasına rağmen entegre tesislerdeki üretim zincirinin diğer aşamaları da azımsanmayacak düzeyde emisyona sahiptir.

15 GREen INnovation in Steelmaking Project, Tackling CO_2 Reduction in the Steel Industry, 2024. https://www.greins.jp/en/technology/technology02/

Şekil 4 - Hurda-EAF çelik yapım prosesinde oluşan doğrudan CO_2 emisyonlarının kırılımı



ton-çelik olarak kabul edilebilir. Ancak bu değer, BF'lerde olduğu gibi tesisten tesise ve birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Tipik değerlerin kırılımları, karbonsuzlaştırma çabaları için hangi noktalarda çalışmalar yapılması gerektiği konusunda da fikir vermektedir.

2.2.3 DRI-EAF çelik üretim rotası

Emisyon yoğunluğunda ikinci sırada, ***Doğrudan İndirgenmiş Demir (DRI) - Elektrik Ark Ocağı (EAF)*** çelik üretim rotası gelmektedir. Bu rotada, demir cevheri, demirin ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda katı halde (doğrudan) indirgenerek metalik demir elde edilir. Demir cevherinin doğrudan indirgenmesinde indirgeyici olarak doğal gaz veya kömürden elde edilen karbon monoksit (CO) ve hidrojenden (H_2) faydalanılır. Doğrudan indirgenmiş demir (DRI), "**sünger demir**" olarak da adlandırılmaktadır.

DRI-EAF rotası, BF-BOF rotasına kıyasla %30-60 daha az CO_2 yaymaktadır.[16] Doğal gaz kullanan DRI-EAF üretim rotasının emisyon yoğunluğu 1,3-1,4 ton-CO_2/ton-çelik arasındadır.

Üretim kapasitesinin modül başına 2,5 Mt/yıla ulaşması ve BF-BOF ile üretim yapan entegre tesisler ile kapasite anlamında kıyaslanabilecek büyüklüklere erişmesi, DRI teknolojisinin BOF-BF rotasına alternatif bir seçenek olarak düşünülmesine neden olmuştur.

16 "*Clean Ironmaking and Steelmaking Processes*", 2019. (Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement) || Direct Reduced Iron: Most Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement, https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-21209-4

Günümüzde ticari olarak özellikle Hindistan, Kuzey Afrika, Rusya, ABD ve Orta Doğu ülkelerinde[17] yaygın bir şekilde kullanılan DRI-EAF rotasında fosil yakıt kaynaklı "*syngas-sentez gazı*" (doğal gaz veya kömürden üretilen hidrojen ve karbon monoksit gazları karışımı) yardımıyla indirgenen demir cevheri, EAF sistemini genellikle hurda ile beraber değişik oranlarda besleyerek çelik üretilmektedir.

DRI'nın özel bir formu olup, lojistiği daha kolay olan *sıcak briketlenmiş demir* (HBI[18]) ise çoğunlukla EAF'lerde kullanılsa da BF ünitelerinde de kullanılabilmektedir.[19] Üretilen DRI'nın kalitesi, üretim sırasında kullanılan demir cevherinin kalitesiyle yakından ilişkilidir.[20] Bu nedenle DRI üretiminde yüksek kaliteli demir cevheri tercih edilmektedir. DRI endüstrisinde beklenen büyümenin, muhtemelen önümüzdeki on yıl içinde yüksek kaliteli cevher talebinde artışa yol açarak arzda yetersizliğe yol açması beklenmektedir.[21]

17 Bol ve ucuz doğal gaz ihtiyacı nedeniyle, şaft fırınlı DRI tesislerinin çoğu doğal gaz açısından zengin ülkelerde bulunmaktadır. Doğal gaz bazlı DRI üretiminde İran en başta gelmektedir.

18 Yüksek gözenekli yapısı nedeniyle sünger demirin oksidasyonu yüksek reaktiviteye yol açmaktadır. Bu güçlüğü aşmak için HBI formu geliştirilmiştir.

19 Yüksek fırındaki metalizasyondaki %10›luk bir artış, kullanılacak kok oranında %7›lik bir düşüşe neden olabilmektedir. Bu da CO_2 emisyonlarını azaltmaktadır. 100 kg HBI/ton-sıcak-metal kullanıldığı durumda indirgeyici oranı yaklaşık 25 kg kok/ton-sıcak-metal kadar azaltılabilmektedir. Kaynak: https://www.midrex.com/commentary/hot-briquetted-iron-the-multi-purpose-metallic/

20 DRI-EAF rotasında, BF-BOF üretim rotasından farklı olarak, indirgeme süresince katı kalır ve BF-BOF'taki düzeyde cüruf metalurjisi gerçekleşmez. Bu durum cevherden gelen safsızlıkların giderilmesini zorlaştırır ve tüm gang elementlerin (metalik demirin yapısını bozan istenmeyen elementler) üretilen DRI'de kaldığı anlamına gelir. Sonuç olarak DRI kalitesi, kullanılan demir cevherinin kalitesiyle yakından ilişkili hale gelir.

21 "*New, green technologies will increase the use of DRI*", 2021. https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-dri-dilemma-could-raw-material-shortages-hinder-the-steel-industrys-green-transition

2.3 KÜRESEL KARBONSUZLAŞMA HEDEFLERİNE ULAŞMADA ÇELİK ÜRETİMİ İÇİN ÖNGÖRÜLEN KARBON BÜTÇESİ

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), küresel ısınmayı %50 olasılıkla 1,5°C ile sınırlamak için küresel karbon bütçesini 2020'den itibaren 500 Gt CO_2 olarak öngörmüştür. Çelik üretiminden kaynaklanan emisyonların azaltılması, bütçe içerisinde kalmak için kritik önemdedir.

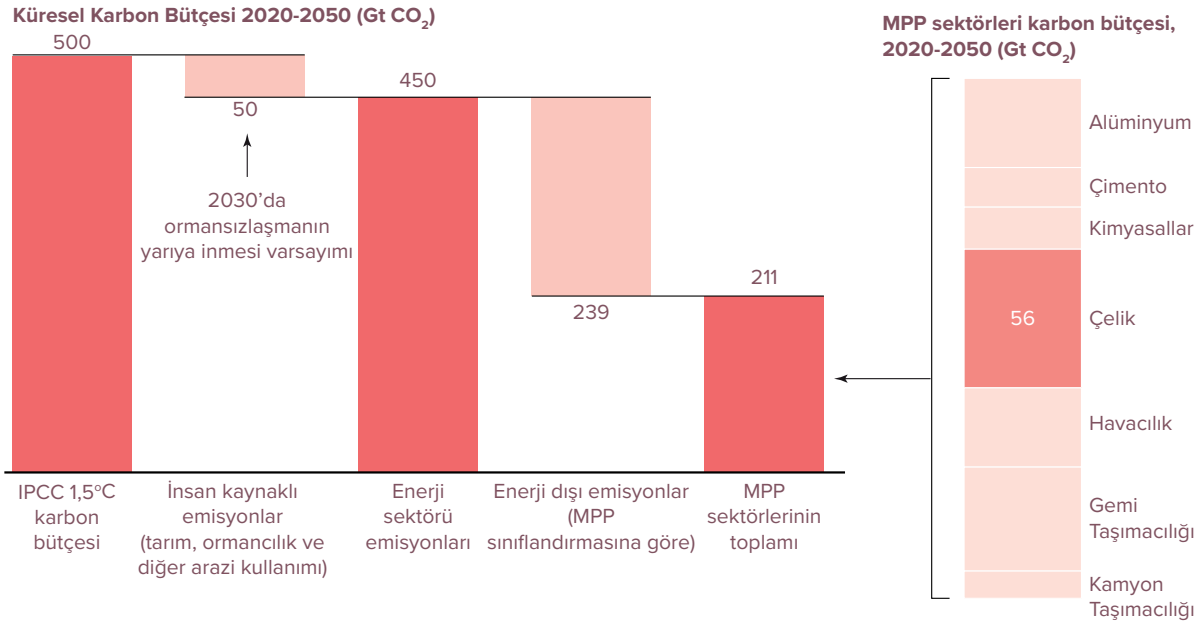
Paris Anlaşması'nın küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlandırma hedefine ulaşabilmek için çelik üretiminden kaynaklanan emisyonların 2050 yılına kadar 2020 seviyesine göre %95 oranında azaltılması öngörülmüştür.[22]

Mission Possible Partnership (MPP) girişiminin, IPCC 1,5°C ve IEA 2050'de Net Sıfır raporlarını temel alarak hazırladığı analize göre, emisyon yoğun sanayi sektörleri ile hava, gemi ve karayolu yük taşımacılığı sektörleri için 2020-2050 döneminde kalan karbon bütçesi 211 Gt CO_2 olarak hesaplanmıştır. Çelik endüstrisinin, bu miktar içerisindeki payı ise 56 Gt'dir (**Şekil 5**).

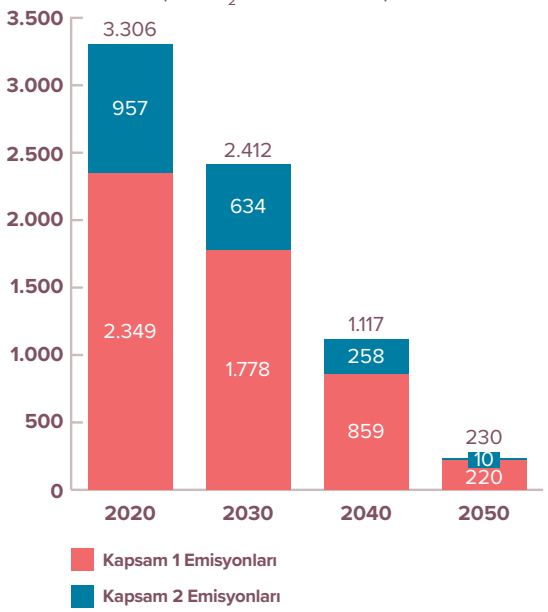
Sektörün kalan karbon bütçesinin sınırları içerisinde kalması için emisyonlarını 2050'de 2020'ye göre %90-95 azaltması zorlu bir hedef olarak karşımıza çıkmaktadır (**Şekil 6**).

22 "*1.5C Steel: decarbonising the steel sector in Paris-compatible pathways*", 2021. https://www.e3g.org/publications/1-5c-steel-decarbonising-the-steel-sector-in-paris-compatible-pathways/

Şekil 5 - IPCC 1,5°C hedefi karbon bütçesi ve çelik sektörüne ait bütçe (2020-2050)[23]



Şekil 6 - IEA 2050 net sıfır senaryosuna göre çelik sektörü Kapsam 1 ve Kapsam 2 emisyonları ($MtCO_2e$; 2020-2050)



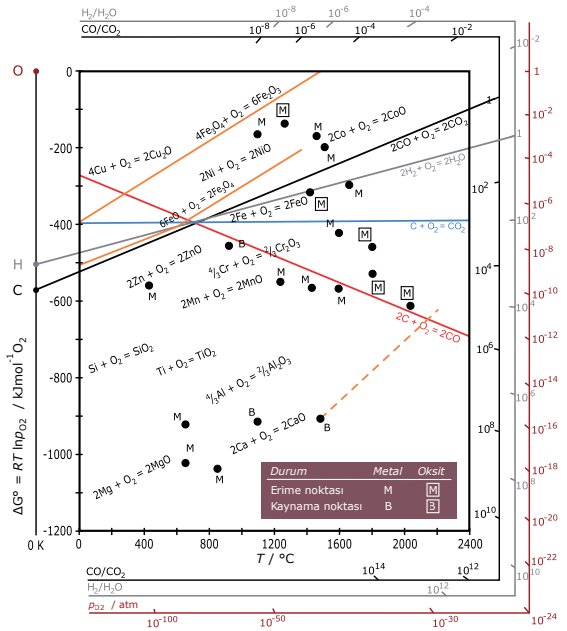
23 "*Making Net-Zero Steel Possible*", 2022. https://3stepsolutions.s3-accelerate.amazonaws.com/assets/custom/010856/downloads/Making-Net-Zero-Steel-possible-steel.pdf

3 ÇELİK ÜRETİMİNDE KARBONSUZLAŞMANIN METALURJİK PROSES YÖNÜ

3.1 DEMİR METALURJİSİ TEKNİK DETAYLARI

Çelik üretiminin ana girdisi olan metalik demirin doğada beraber bulunduğu bileşiklerinden elde edilmesi bakır ve kalay metallerine göre geç tarihlerde başarılabilmiştir. Bunun nedeni, demirin yüksek ergime noktasına sahip olması ve indirgeme reaksiyonlarının zorluğudur (**Şekil 7**). Demir yer kabuğunda yaygın dağılım gösterirken oksijen ve kükürt ile bileşikler oluşturma eğilimi nedeniyle metalik halde nadiren bulunmaktadır.[24]

Şekil 7 - Demir metalürjisi ile ilgili olan elementlerin indirgenebilme özellikleri - Ellingham diyagramı[25]



24 Volkanik aktivite ile bağlantılı kimyasal süreçlerin etkisiyle oldukça tesadüfi bazı durumlar dışında, metalik demirin başlıca oluşumu bazı göktaşlarındadır. http://iron.atomistry.com/

25 DerSilberspiegel, Ellingham Richardson-diagram english, E.R.-d. english, Editor. 2016, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International: Wikimedia Commons

Çelik üretimi için metalik demirin elde edilmesinde, demir oksitlerdeki (Fe_xO_y) oksijenin demirden ayrılıp demirin serbest duruma (Fe) geçebilmesi için indirgeyici element olarak karbonun kullanılması (geçmişte olduğu gibi günümüzdeki gelişmiş teknolojilerde de hem indirgeyici hem de enerji kaynağı olarak kömürden faydalanılması), antik çağlardan beri demirin **karbonsuz** (**kömürsüz**) düşünülememesine neden olmuştur.

Ancak, çelik üretimi sırasında bu ilişkinin sonucu oluşan karbondioksit (CO_2) bir sera gazı olduğu için küresel ısınmayı artırmaktadır. Yine demir-çelik üretimi süreçlerinde ortaya çıkan karbon monoksit (CO) ise kendisi sera gazı olmasa da sera etkisi yaratan troposferik (yer seviyesindeki) ozon gazının oluşumuna neden olduğu için dolaylı olarak küresel ısınmayı şiddetlendirir.

3.2 GELENEKSEL BF-BOF ÜRETİM ROTASINDAKİ KÖMÜRE BAĞIMLILIK VE DEĞİŞİM

Bölüm 2'de belirtildiği üzere geleneksel BF-BOF üretim rotasının en önemli emisyon kaynağı, yüksek fırınlardaki karbona (metalurjik kömür) dayalı indirgeme reaksiyonlarıdır. Cevherdeki demir oksitlerin (Fe_xO_y), yüksek fırında C/CO ile reaksiyona girmesi ile oluşan indirgeme reaksiyonunun ekzotermik olması ve yüksek fırınlardaki ergitme enerjisini de sağlaması nedeniyle BF-BOF rotası çelik üretimindeki en ekonomik üretim biçimi olmuştur (**Şekil 10**). Bu üretim rotasında hayata geçirilen değişimlerden önemli bir tanesi metalurjik kömür yerine normal kömürün kullanıldığı teknolojiler olmuştur (**Kutu 2**).

KUTU 2 - YÜKSEK FIRIN ÜRETİM ROTASINDA KÖMÜR BAZLI ALTERNATİF TEKNOLOJİLER

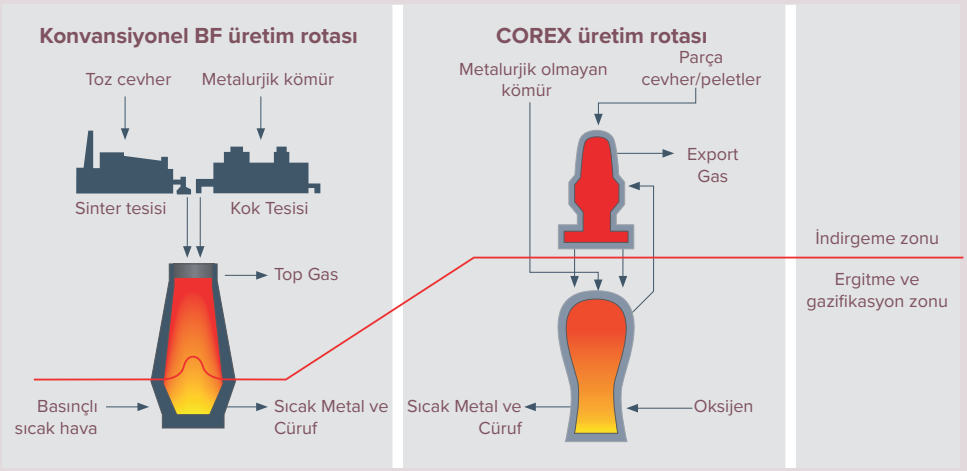
Entegre tesislerdeki (BF-BOF), kömüre bağlı geleneksel üretim biçimleri büyük bir değişim geçirmeden varlıklarını sürdürmüşlerdir. ***COREX*** ve ***FINEX*** teknolojileri yüksek fırın üretim rotasındaki metalurjik kömüre alternatif olarak geliştirilmiş yine kömür bazlı ticari çözümlerdendir. Her iki üretim yönteminde de metalurjik kömür yerine normal kömür kullanılabilmektedir. Bu nedenle kok tesisi ihtiyacını ortadan kaldırırlar. Bu teknolojilerde, düşük ve orta kaliteli cevherden demir üretimi yapılabilmektedir (**Şekil 8** ve **Şekil 9**).

COREX teknolojisi

Primetals Technologies[26] tarafından geliştirilen *COREX* teknolojisi, koklaştırma ve sinter tesislerine olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Bu teknolojide kömür, koklaştırma prosesine tabi olmadan doğrudan indirgeyici madde ve enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Demir oksitlerin %80'e kadar parça cevher şeklinde işleme alınabildiği yöntemde; sinterleme işlemine de ihtiyaç yoktur. Ayrıca, yüksek saflıkta oksijen kullanıldığı için neredeyse nitrojensiz "top gas" sisteme sunulmuş olmaktadır. *COREX* teknolojisinde, demir cevherinin indirgenme işlemi iki aşamada gerçekleşmektedir: 1) *Parça cevheri veya peletleri doğrudan indirgeyen şaft fırını (reduction shaft)* ve 2) *Doğrudan indirgenen demiri ergitip saflaştıran ve ayrıca kömürün gazifikasyonunun gerçekleştiği ikinci şaft fırını (melter/gasifier).*

İndirgeme işlemi, melter/gasifier reaktöründe oluşan indirgeyici gazlar tarafından gerçekleştirilir. İlk *COREX* prosesi, 1988 yılında Güney Afrika'da kurulmuştur.[27]

Şekil 8 - COREX üretim rotası



26 Primetals Technologies. https://www.primetals.com/

27 COREX, Efficient And Environmentally Friendly Smelting Reduction, https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/1_ironmaking/corex/COREX.pdf

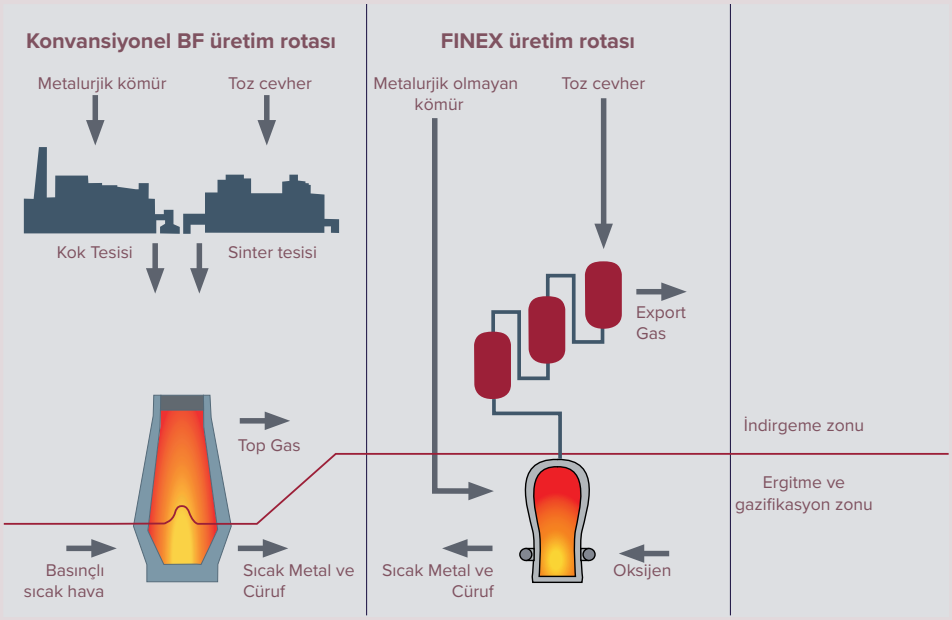
KUTU 2 - (DEVAM)

FINEX teknolojisi

POSCO[28] ve Primetals Technologies ortaklığı tarafından geliştirilen *FINEX* teknolojisi, BF rotasına alternatif diğer bir kömür bazlı çelik üretim prosesidir. *FINEX*, geleneksel yüksek fırın işlemi için en kritik aşamalar olan koklaştırma ve sinterleme işlemlerini ortadan kaldırırken toz halindeki demir cevheri ve kömürün doğrudan kullanımına dayanır. Bu teknolojide üretim maliyeti ve emisyonlar geleneksel yüksek fırın rotasına kıyasla daha düşüktür.[29]

Bu süreç, esas olarak *FINMET*'in[30] akışkan yataklı reaktör teknolojisi ile *COREX* teknolojisinin kombinasyonu olması nedeniyle "*FINEX*" olarak adlandırılmıştır. Bu üretim rotasında demir cevherlerinin doğrudan indirgenmesinde bir dizi akışkan yataklı reaktör ve gasifier/melter reaktör bulunur.

Şekil 9 - FINEX üretim rotası



28 POSCO şirketinin, 1992 yılında FINEX teknik gelişiminin başlatmasından ve 2007 yılında teknolojinin ticarileştirilmesinden bu yana FINEX tesisinde toplam 34 Mt ergiyik metal üretimi gerçekleştirmiştir. https://www.posco.com/

29 The FINEX Process Economıcal And Envıronmentally Safe Ironmakıng, https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/1_ironmaking/finex/THE_FINEX_R__PROCESS.pdf

30 FINMET, cevherin indirgenmesinde doğal gaz kullanılarak DRI üreten akışkan yatak tipli bir teknolojidir. Bu teknoloji, Primetals Technologies'in selefi olan VAI şirketi tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde, toz demir cevheri dört aşamalı akışkan yatak sisteminden geçer ve son yatakta 800°C sıcaklığa ulaşır. Toz cevher yerçekimiyle yataklardan geçerken, doğal gaz tarafından kademeli olarak indirgenir.



Geliştirildiği dönemden beri kömüre dayalı olan BF-BOF üretim biçiminde radikal bir değişikliğin gündeme gelmesi 2020'lerde mümkün olmuştur. Entegre tesislerde kömürden vazgeçilerek alternatif indirgeyiciler kullanılması ile düşük karbonlu çelik üretiminin hayata geçmesinde hükümetlerin, özellikle AB bölgesinde, 2020'den sonra daha da sıkılaştırdığı karbonsuzlaşma politikaları önemli bir itici güç olmuştur.

Demir oksitlerdeki (Fe_xO_y) "oksijene" afinitesi olduğu bilinen, ancak değişik uygulama güçlükleri ve serbestleşme maliyeti nedeni ile kullanıma girmesi kolay olmayan "hidrojen", özellikle son yıllarda çelik sektörü özelinde pilot uygulamalar düzeyinde de olsa, ülkelerin iklim politikalarındaki yerini iyice sağlamlaştıran bir seçenek olarak öne çıkmıştır (**Şekil 11**).[31]

31 Nisan 2024 itibariyle 60'ın üzerinde ülke hidrojen stratejilerini veya yol haritası dokümanlarını hazırlamıştır.
Kaynak: "National Hydrogen Strategies and Roadmap Tracker", 2024. https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/national-hydrogen-strategies-and-roadmap-tracker/

Şekil 10 - En yaygın çelik üretimi olan BF-BOF rotasında demir cevherinin indirgenmesi



$C + O_2 \rightarrow CO_2$ (+ısı)
$C + CO_2 \rightarrow 2\ CO$

$3\ Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2\ Fe_3O_4 + CO_2$
$Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3\ FeO + CO_2$
$FeO + CO \rightarrow 3\ Fe + CO_2$

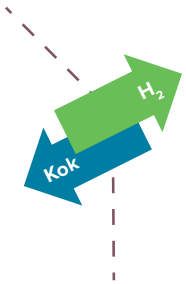
Fe_xO_y'nin, C/CO ile klasik indirgeme reaksiyonu, ekzotermik olması ve yüksek fırınlardaki ergitme enerjisini de sağlaması nedeniyle çelik üretimindeki en ekonomik üretim biçimi olmuştur.

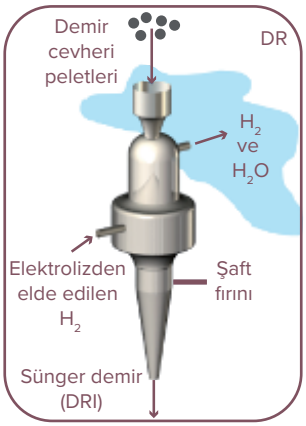
Benzer şekilde yüksek fırında üretilen sıvı metalin içerdiği karbon da bir sonraki adımda bazik oksijen fırınındaki prosesinin de enerji kaynağı olmuştur.

Tipik olarak BF'lerde Fe_xO_y indirgemesinin %70-80'i CO, %20-30'u ise H_2 tarafından yapılır.

Şekil 11 - Şaft fırınında hidrojen kullanılarak demir cevherinin doğrudan indirgenmesi

$3\ Fe_2O_3 + H_2 \rightarrow 2\ Fe_3O_4 + H_2O$
$Fe_3O_4 + H_2 \rightarrow 3\ FeO + H_2O$
$FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O$





Hidrojeni indirgeyici olarak kullanan çelik üretimi süreci, fosil yakıtlar yerine hidrojeni ikame eden yenilikçi bir teknolojidir. Kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların demir cevheri ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda karbondioksit (CO_2) oluşurken, hidrojenin kullanıldığı durumda su (H_2O) ortaya çıkmaktadır.

Henüz pilot projelerde kendine yer bulan yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojeni kullanan çelik üretiminin olgunlaşması durumunda çelik sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarının önemli ölçüde azalması beklenmektedir.

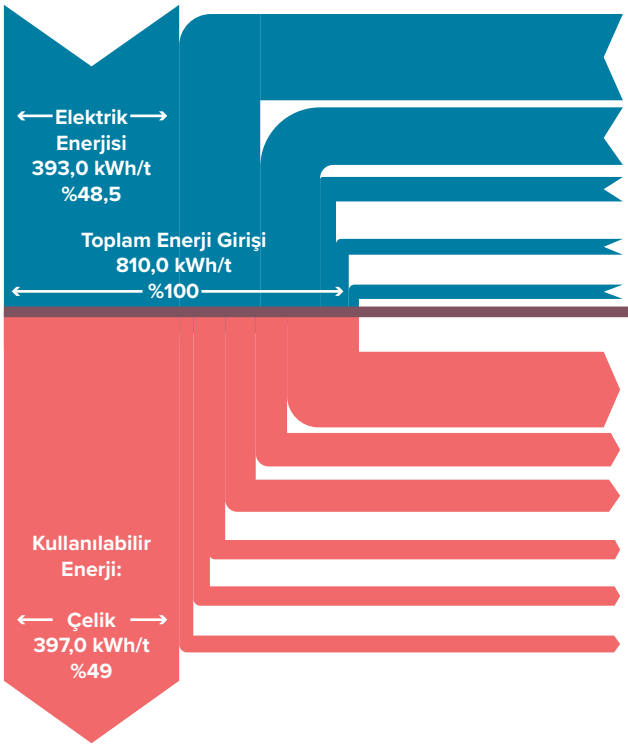


3.3. EAF'DEKİ METALURJİK PROSESTE CO_2 EMİSYONU PARAMETRESİ

Karbonsuzlaşma süreçleri, EAF metalurjik prosesine de yeni bir bakışı gerektirmektedir. Temel olarak üretkenlik ve toplam enerji için değilse de elektrik için düşük tüketim esasına göre dizayn edilmiş olan EAF metalurjik proses değerlendirmelerine yakın tarihlerde CO_2 emisyonu düzeyi ve bunun maliyeti de yeni bir parametre olarak eklenmiştir.

Çelik sektörünün karbonsuzlaşma tartışmalarında büyük ölçekli yenilikçi teknolojik çözümler öne çıktığından bu yana, bunları mümkün kılacak yatırım ihtiyacı yaygın olarak gündeme gelmektedir. Buna karşın, metalurjik proses tercihlerinin CO_2 emisyonları (Kapsam 1 ve 2) üzerindeki belirleyiciliği gözden kaçabilmektedir. Üretim prosesinin adı elektrikli ark ocaklarıyla çelik yapımı olsa da EAF'li tesislerde çelik üretiminde tüketilen enerjinin yaklaşık %35-50'si kimyasal enerji kaynaklarından sağlanır (**Şekil 12**).

Şekil 12 - EAF çelik yapım prosesi ısı enerji dengesi[32]

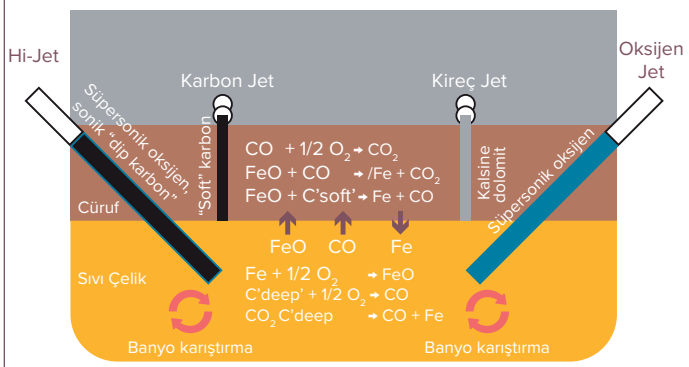


	kWh/	%
Karbon Taşıyıcılar	191,0	23,6
Kimyasal Reaksiyonlar	123,0	15,2
Brülörler	50,0	6,2
Elektrot Oksidasyonu	28,0	3,4
ΔC Çelik	25,0	3,1

	kWh/t	%
Baca Gazı	168,0	20,7
Gövde Soğutma	71,0	8,8
Diğer Isı Kayıpları	69,0	8,5
Kapak Soğutma	37,0	4,6
Denge Farkı	37,0	4,6
Cüruf	31,0	3,8

EAF'li çelik üretiminde kullanılan kimyasal enerjinin önemli bir kısmı, ergitme hızının artırılması amacıyla değişik sistemler tarafından uygulanır. Diğer bir kısmı ise sıvı çeliğin dekarbürizasyon süreçlerindeki (oksidasyon yoluyla karbon miktarının azaltımı) oksidasyon enerjisinden kaynaklanır (**Şekil 13**).

Şekil 13 - EAF'de gerçekleşen dekarbürizasyon reaksiyonları



32 *"A review of mathematical process models for the EAF process"*, 2021. Steel Research International 92.

Ark ocağındaki üretim sırasında kimyasal enerjinin dışarıdan uygulanma nedeni ergitme hızını artırmak kadar, "*kimyasal enerjinin*" birim maliyetinin birçok durumda elektrikten elde edilen enerji maliyetinden daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Ancak oksidasyon enerjisinin kaynağının hammaddenin metalik bileşenleri olan Fe, Si, Al, Mn gibi elementlerinin oksidasyonu olması, pratikte çok daha pahalı bir "enerji üretimi" anlamına gelmektedir.

Üretim sırasındaki bu değerli elementlerin kaybı kritik olmakla beraber, ek olarak bu kayıplar kaynaklı oluşan emisyonlar da üretim sırasındaki CO_2 proses emisyonu oluşumuna katkıda bulunur. Üstelik, demir (Fe) kaybı, metalik verimlilik kaybı anlamına gelmekte ve çelik yapım zincirindeki en temel kayıp olarak öne çıkmaktadır.

Kimyasal enerji kullanımının, termodinamik modellemeler ve bu modellere veri sağlayan gelişmiş enstrümantasyon ve dijital ikiz proses uygulamaları ile yeniden değerlendirilmesi bu nedenle önemlidir.

EAF üretim prosesindeki en önemli CO_2 emisyonu kaynaklarından biri de karbon enjeksiyonu uygulamasıdır. Grafit elektrotlarla metal arasında oluşan arkın yansıması nedeniyle oluşabilecek yan etkileri azaltmak için cüruf ve sıvı metal arası ara yüzeye karbon içerikli malzeme enjekte edilmektedir. Enjekte edilen malzeme ile cürufun reaksiyonu sonucunda oluşan CO kabarması ocakta kalın bir cüruf tabakası oluşturur. Bu köpüklü cüruf, arkın cüruf içinde gizlenmesini sağlayarak EAF soğutma panelleri ve refrakter malzeme üzerindeki ısıl ark yansımasının olumsuz etkilerini azaltır. Karbon enjeksiyonunun bir diğer fonksiyonu da cüruftaki demir oksitlerin indirgenmesidir. Özetle, bu olumlu katkılara rağmen karbon enjeksiyon malzemesi, kullanım miktarına bağlı olarak EAF prosesinin en önemli CO_2 emisyonu kaynaklarından birini oluşturur.

3.4 DRI ÜRETİMİ TEKNOLOJİLERİ

3.4.1 Geleneksel DRI üretimi prosesleri ve teknik detayları

Bölüm 2.2'de özetlendiği üzere, mevcut durumda ticari olarak kullanılan DRI-EAF rotasında, doğal gaz veya kömür kullanılarak demir cevherinin indirgeme işlemi gerçekleştirilir (demirin ergime noktasının altında, yaklaşık 900°C sıcaklıkta). Elde edilen katı haldeki DRI daha sonra çelik yapımı için oksijen, kireç ve hurda metalinin beslendiği EAF'de sıvı çeliğe dönüştürülür.

Çelik üretimi için bir hammadde görevi gören DRI'nın 2022'de yaklaşık 130 milyon ton (Mt) kadar üretimi yapılmıştır 2050'ye doğru DRI üretiminin 400 Mt'ye yaklaşacağı öngörülmektedir. (Bkz. **Kutu 3**). Bu miktarın yarısının, yenilenebilir enerjiyle üretilen elektriğin kullanıldığı suyun elektrolizi sonucu elde edilen yeşil hidrojene dayalı DRI üretimi olması beklenmektedir.

Demir cevherinin doğrudan indirgeme (DR) prosesleri, indirgeyici türüne göre gaz ve kömür bazlı olarak sınıflandırılmaktadır (**Tablo 2**). Gaz bazlı proseslerde **şaft fırın tipli** ve **akışkan yataklı reaktörler** kullanılmaktadır. Kömür bazlı DRI proseslerinde ise döner fırınlar ve çoklu ocaklar yaygındır.[33] **Şekil 14'**te demir cevherinin doğrudan indirgenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan teknolojilere ait özet sınıflandırma sunulmuştur.

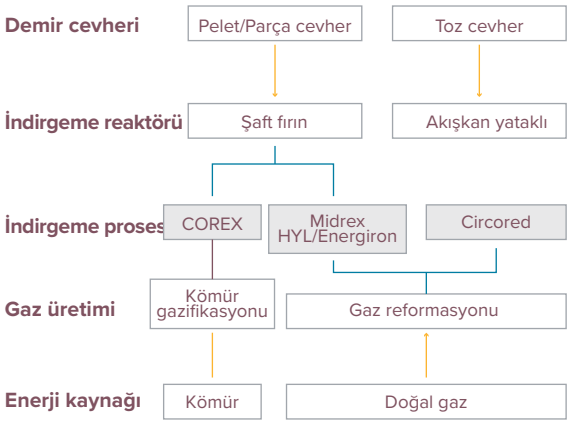
33 "*History, developments and processes of direct reduction of iron ores*", 2022. Dr.-Ing. Hans Bodo Lüngen, Neuss, Germany Prof. Dr.-Ing. Peter Schmöle, Dortmund, Germany Presented at the 8th European Coke and Ironmaking Congress and the 9th International Conference on Science and Technology of Ironmaking in Bremen, Germany; https://vdeh.de/media/luengen_dri_ecic_2022.pdf



Tablo 2 - Mevcut fosil yakıtlı DRI üretimi teknolojileri

Kömürle çalışan DRI prosesleri	
Toz cevher	Parça cevher/Pelet
Döner tabanlı fırın (Rotary Hearth)	Döner fırın (Rotary Kiln)
- FASTMET, FASTMELT - ItMk3 - Redsmelt - PRIMUS (çoklu fırın)	- SL/RN - JINDAL - DRC - Diğer teknolojiler.
Doğal gazla çalışan DRI prosesleri	
Toz cevher	Parça cevher/Pelet
Akışkan yataklı reaktör	Şaft fırın
- FIOR, FINMET/FINORED - CIRCORED/CIRCOFER - FINEX	- MIDREX - HYL-Energiron - PERED - COREX

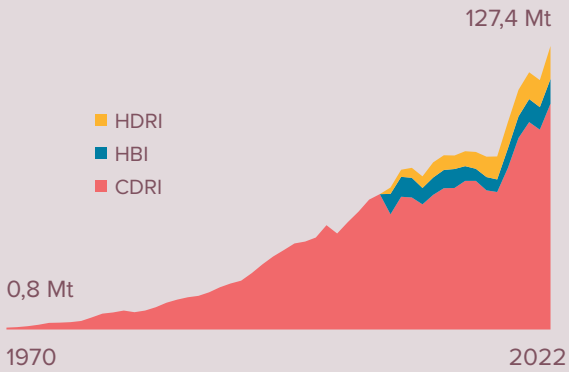
Şekil 14 - Yaygın olarak kullanılan doğrudan indirgeme prosesleri teknik detayları



KUTU 3 - DRI ÜRETİMİ VERİLERİ

2022'de küresel ölçekte yaklaşık 130 milyon ton (Mt) DRI üretilmiştir (**Şekil 15**). Son altı yılda, dünya çapındaki DRI üretimi, Hindistan'daki çoğunlukla kömür bazlı DRI üretimindeki %136'lık artış, İran'daki doğal gaz bazlı DRI üretiminin iki katına çıkması ve Cezayir, Mısır, ABD ve Rusya'daki yeni doğal gaz bazlı DRI tesislerinin devreye girmesiyle 55 Mt artmıştır. Hindistan ve İran, 2022 yılındaki DRI üretiminin %60'ından sorumludur. Üretilen DRI'nın büyük bir kısmı (102 Mt) soğuk DRI (cDRI) formundadır. Bunu sırasıyla sıcak-DRI (HDRI - 14 Mt) ve sıcak briketlenmiş demir (HBI - 11 Mt) takip etmektedir (**Şekil 15**.).[34]

Şekil 15 - Küresel düzeyde DRI üretim miktarı (1970-2022)



Yıl	CDRI	HBI	HDRI	Toplam
2009	52,54	6,93	4,86	64,33
2010	56,60	7,21	6,47	70,28
2011	59,41	7,60	6,20	73,21
2012	59,51	7,90	5,73	73,14
2013	62,50	6,17	6,25	74,92
2014	62,41	5,17	7,01	74,59
2015	58,43	5,66	8,55	72,64
2016	57,74	5,29	9,73	72,76
2017	67,88	8,16	11,06	87,10
2018	80,55	9,03	11,16	100,73
2019	87,16	9,67	11,27	108,10
2020	83,95	9,51	11,38	104,84
2021	94,97	10,39	13,79	119,16
2022	102,14	11,35	13,87	127,36

Üretim teknolojileri incelendiğinde DRI üretiminin yaklaşık %75'inin doğal gaz bazlı şaft fırın tesislerinde yapıldığı görülmektedir. Geriye kalan kısmı ise kömürle çalışan döner fırınlı (rotary kiln) (SL/RN Prosesi) üretim tesislerinde gerçekleşir. Bu küçük tesisler ağırlıklı olarak Hindistan[35] ve Çin'de kuruludurlar. Doğal gazla çalışan şaft fırına dayalı DRI üretim rotasında ***Midrex***[36] ve ***HyL/Energiron***[37] öne çıkan şaft fırın tipi reaktörlerdir.[38] Şaft fırın tipi tesislerdeki DRI üretiminin (89 Mt) %80'i *Midrex* teknolojisi ile yapılmaktadır (**Şekil 16**).

34 "*World Direct Reduction Statistics*", 2022. https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf

35 DRI üretiminde dünyada ilk sırada yer alan Hindistan'ın (43.5 Mt DRI) kömüre dayalı DRI üretim rotası kapasitesi (yaklaşık 300 küçük ölçekli tesis de dahil olmak üzere) ülkedeki toplam çelik kapasitesinin yaklaşık %20'sine karşılık gelmektedir. 2020 yılı içerisinde üretilen kömür bazlı DRI 35.4 Mt'dir.

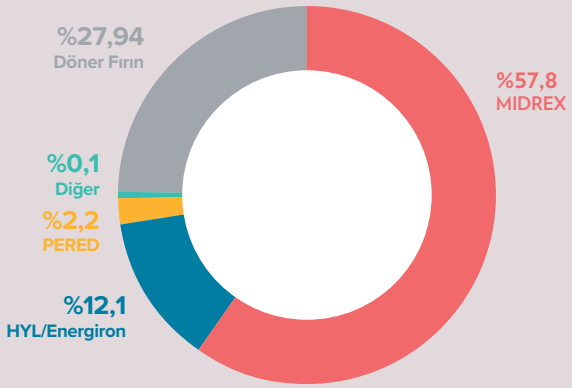
36 MIDREX teknolojisi, Midrex Technologies şirketi tarafından geliştirilmiştir. Midrex Technologies şirketi, Japonya'nın önde gelen çelik üreticilerinden biri olan Kobe Steel'in sahibi olduğu ABD merkezli bir şirkettir.

37 Tenova and Danieli şirketleri tarafından geliştirilmiştir.

38 Her iki teknolojide reaktörleri besleyen demir cevheri pelet ve parça cevher şeklindedir. Akışkan yataklı reaktörler ise (Finmed, Circored) toz cevheri doğrudan kullanabilmektedir.

KUTU 3 - (DEVAM)

Şekil 16 - DRI kullanılarak yapılan ham çelik üretiminde kullanılan teknolojilerin payı[33]



Toplam DRI üretimi: 127,4 Mt

	2020	2021	2022
MIDREX	%60,2	%59,5	%57,8
HYL/Energion	%12,4	%12,7	%12,1
PERED (*)	%2,9	%2,2	%2,2
Diğer	%0,2	%0,1	%0,1
Döner Fırın	%24,3	%25,4	%27,9

(*) tahmini

Kaynak: Midrex Technologies

DRI-EAF şaft tipli teknolojiler ile DRI üretimi - Midrex ve HYL/Energiron teknolojileri

Şaft fırınlarında öne çıkan iki ana teknoloji **Midrex** ve **HYL/Energiron**[39] uygulamalarıdır. Çoğunlukla doğal gazın indirgeyici olarak kullanıldığı bu iki teknoloji yüksek kaliteli pelet ile çalışmaktadır. Şaft fırın üretim rotasıyla yapılan DRI üretiminin %80›inine sahip olan Midrex ise pazarda hâkim paya sahiptir.

Demir cevherinin yeşil hidrojen kullanılarak doğrudan indirgenmesi ile çelik üretimi hammaddesi alternatifleri üretmeyi amaçlayan teknoloji geliştirme çabalarında da şaft fırını ile DRI üretimi teknolojisi öne çıkmıştır. Pek çok Batılı ve Asyalı çelik üreticisinin yöneldiği bu seçenek ile yüksek fırınların yerini alacak şaft fırınlarının inşa edilmesi öngörülmektedir. Planlanan tesislerin başlangıçta doğal gaz ile çalışacağı ve hidrojenin maliyetleri rekabet edebilir düzeye geldiğinde tümüyle hidrojen kullanımına dönüşeceği beklenmektedir.

Günümüzde, doğal gaz kullanarak üretim yapan *Midrex* ve *HYL/Energiron* DRI proses uygulamaları yaygın olmasına rağmen, yüzde yüz hidrojen gazı beslemesiyle çalışan ticari ölçekli DRI tesisi bulunmamaktadır. Buna rağmen hem Midrex hem de Energiron[40] prosesi bazında bir dizi yatırım projesi açıklanmıştır.

Pilot uygulamalar dışında hidrojenin yüksek oranda (%70) kullanıldığı DRI üretimine ilişkin ilk uygulama Çin'de Hebei Iron and Steel Group (HBIS) tarafından hayata geçirilmiştir. Toplam 0,6 Mt/yıl kapasiteli *Energiron* prosesini kullanan tesis 2022 yaz başında devreye alınmıştır.

İndirgeyici olarak doğal gaz kullanan bir şaft fırınlı DRI-EAF üretim rotasında üretilen her bir ton ham çelik için yaklaşık 13 GJ enerji gerekmektedir. DRI

39 *Energiron*, Emirates Steel 1 (2 Mt yıl), Emirates Steel 2 (2 Mt /yıl), Suez Steel (2 Mt /yıl), Nucor (2,5 Mt/yıl) ve Ezz Rolling Mill (2 Mt / yıl) tesislerinde kullanılmaktadır. *Energiron* DRI, EAF'deki işlemlerde kimyasal enerji üreten %1,5 ila %4,0 aralığında karbon içeriğinde metalize bir üründür.

40 "*Circored Fine Ore Direct Reduction – a proven process to decarbonize steelmaking*", https://www.mogroup.com/portfolio/circored-hydrogen-based-reduction/



üretimi için 10 GJ/ton-DRI miktarı kadar doğal gaz enerjisi ve EAF ünitesinde 3 GJ/ton-DRI miktarı kadar elektrik enerjisi tüketilir. Bu rakam, hidrojenin indirgeyici olarak kullanıldığı şaft tipi DRI tesisinde 8,6 GJ/ton-DRI olarak hesaplanmıştır.[41]

H_2-DRI-EAF akışkan yataklı teknolojiler ile DRI üretimi - Circored teknolojisi

Circored teknolojisi, akışkan yataklı DRI prosesinin en eski uygulamasıdır. Metso&Outotec'in 1999'lardan bu yana Trinidad'da[42] üzerinde çalıştığı, herhangi bir maliyetli cevher peletleme işlemine ihtiyaç göstermeyen, akışkan yataklı DRI prosesi geliştirme çalışmalarının vardığı son noktadır.[43] Akışkan yatak prosesi, maliyetli cevher aglomerasyon işlemlerini devre dışı bırakma özelliği ile öne çıkmaktadır. İlk sıfır karbonlu endüstriyel DRI üretimi (300.000 ton) bu tesiste yapılmıştır. Üretilen DRI'nin ergitilme işlemi, North Star Steel Texas'ta 2001'de yapılan deneme EAF uygulamasında gerçekleştirilmiştir. Bu deneme ile hidrojen esaslı DRI'nın EAF çelik yapımındaki davranışları konusunda ilk metalurjik operasyon bilgileri elde edilmiştir.[44]

41 "*Modeling and simulation of the use of direct reduced iron in a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions*", 2017. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617314713

42 İlk ticari Circored ünitesi 1998 yılında Cliffs and Associates Ltd. tarafından Trinidad›daki Point Lisas sanayi kompleksinde inşa edilmiştir. Tesis şu anda aktif değildir.

43 Klasik DRI üretim tesislerinde MIDREX daha yaygınken, H_2-DRI pilot tesislerinde ENERGIRON daha fazla tercih edilmektedir. "*Circored Fine Ore Direct Reduction – a proven process to decarbonize steelmaking*", 2021. https://www.mogroup.com/insights/blog/mining-and-metals/circored-fine-ore-direct-reduction-a-proven-process-to-decarbonize-steelmaking/

44 "*Impact of Hydrogen DRI on EAF Steelmaking*", 2021. https://www.midrex.com/tech-article/impact-of-hydrogen-dri-on-eaf-steelmaking/

Circored+ varyantı, indirgeme işlemi ve ısıtma amaçları için yenilenebilir kaynaklardan üretilen yeşil hidrojen ve elektriği kullanabilmektedir. Bu teknolojinin klasik doğal gazlı versiyonunda gaz enerjisi tüketimi 11,5 GJ/ton çelik ve elektrik tüketimi 901 kWh/ton-çelik olarak raporlanmıştır. CO_2 emisyonları 2 ton-CO_2/ton-çelik mertebesindedir.[45]

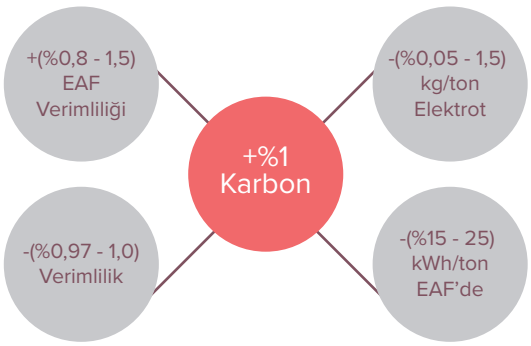
3.4.2 Doğal gaz esaslı DRI-EAF üretim rotasına ilişkin önemli proses detayları

Günümüzde ticari olarak kullanılan doğal gaz esaslı DRI-EAF üretim rotasına ilişkin önemli proses detayları aşağıda sunulmuştur:

- Doğal gaz ile çalışan şaft reaktör teknolojisine sahip DRI tesislerinde halihazırda indirgemenin %60-70'i hidrojen ile yapılırken geriye kalan miktarı ise CO kullanılarak yapılmaktadır.
- Üretimi yapılan DRI'nın karbon içeriği, üretim prosesi tipine ve kullanıcının tercihine göre DRI-EAF üretim rotasında %1-4 aralığında değişmektedir. Klasik Hurda-EAF ve DRI-EAF uygulamasında DRI'nın karbon içeriği proses verimliliğinin belirleyicisidir.
- Klasik DRI-EAF rotasında DRI içeriğinde bulunan karbon, DRI üretim prosesinde indirgenememiş demir oksitlerin (Fe_xO_y) EAF ünitesinde indirgenmesi ve EAF ünitesi içerisindeki metalurjik işlemler için kimyasal enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.
- DRI üretim prosesinde indirgenememiş demir oksitlerin (Fe_xO_y) EAF prosesinde indirgenmesi sırasında oluşan CO çelik yapımında cürufun kabarmasını sağlar. "Köpüklü cüruf" olarak adlandırılan bu pratik EAF metalurjik prosesinin en önemli adımlarından biridir.
- Demir oksitlerin demire dönüşmesi, çelikte nitrojen giderimi, refrakter dostu cüruf kompozisyonu oluşumunu sağlaması, köpüren cürufun ark yansımalarını gizlemesi, metalik verimi artırması ve yansıma nedenli enerji kaybı ve refrakter aşınmasının engellenmesi gibi vazgeçilmez EAF prosesi gerekliliklerin yerine getirilmesi karbonsuz mümkün değildir.
- Bölüm 3.3'te özetlendiği üzere, oksi&gaz brülörler, oksijen lansları, enjeksiyon üniteleri ve toz karbon enjeksiyonu proses enstrümanlarından oluşan tipik EAF prosesinde toplam enerji girdisinin %45-50'si kimyasal enerjisidir. Bu uygulamanın sonucu olarak önemli miktarda ekzotermik oksidasyon enerjisi, yüksek dereceli atık gaz sıcaklıkları ve hacimleri oluşur. Değişik oranlarda karbon (C) içeren DRI da bu prosesin gereklerine uygun kullanılmaktadır.

Şekil 17'de şematik olarak DRI içeriğindeki her %1 oranındaki karbonun prosese etkisi hakkında bilgiler sunulmuştur.

Şekil 17 - EAF'deki çelik yapım prosesinde Karbon (C) ve Fe_xO_y ilişkileri



45 *"Metso:Outotec- Fine Ore Direct Reduction CircoredTM"*, https://www.mogroup.com/globalassets/pdfs-and-other-downloads/circored---fine-ore-direct-reduction.pdf

3.4.3 Yeşil Hidrojen esaslı DRI-EAF üretim rotası

Gelişen yeni teknolojilerin DRI üretim rotasında indirgeyici olarak tamamen **yeşil hidrojen** kullanılarak da ticari boyutlarda çelik üretimini mümkün kılması beklenmektedir (Sanayide kullanılan hidrojen türleri bakınız **Kutu 4**).

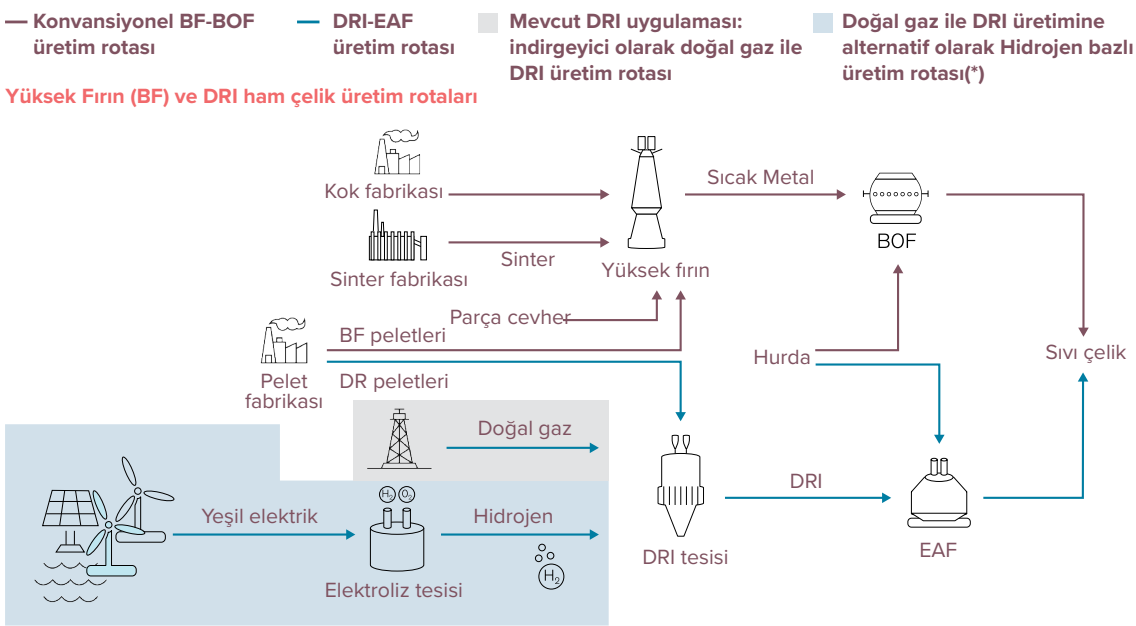
Son beş yılda şirketlerce duyurulan karbonsuzlaştırma çabalarının ve pilot projelerinin en popüler metalik hammadde seçeneği olan yeşil hidrojen esaslı H_2-DRI ise proses gereği sıfır karbonlu DRI içermektedir.

Yeşil hidrojen, çelik üretiminde karbon yoğunluğunun büyük bir kısmını oluşturan indirgeme prosesi emisyonlarının ortadan kaldırılmasında önemli bir alternatif olarak görülmektedir.

Şekil 18'de henüz ticari olarak yaygınlaşmamış olan bir üretim rotası olan yeşil hidrojene dayalı doğrudan indirgeme işlemini takiben EAF ile ham çelik üretiminin geleneksel üretim rotalarından farkı sunulmuştur.

Literatürde, H_2-DRI prosesi için hidrojen ihtiyacı 1 ton çelik için 50-70 kg H_2 olarak raporlanmıştır.[46]

Şekil 18 - Yeşil hidrojene dayalı üretim yapan DRI-EAF rotası ve diğer geleneksel üretim rotaları[47]



46 "*Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking*", 2018. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618326301

47 "*The DRI dilemma: Could raw material shortages hinder the steel industry's green transition?*", 2021. https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-dri-dilemma-could-raw-material-shortages-hinder-the-steel-industrys-green-transition

KUTU 4 - SANAYİDE KULLANILAN HİDROJEN TÜRLERİ

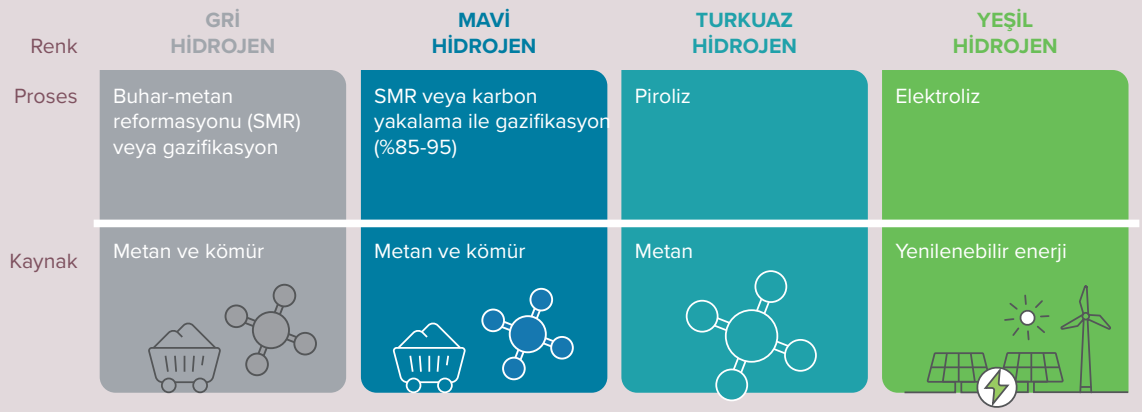
Metalurjik kullanımından ziyade daha çok bir enerji kaynağı/taşıyıcısı olarak hep gündemde olan hidrojen, özellikle yoğun CO_2 emisyonuna sahip sektörler (çimento, demir-çelik, kimyasallar, deniz ve hava taşımacılığı, ağır hizmet araçları vb.) için açıklanan küresel ve ulusal karbonsuzlaşma taahhütlerinde ve yol haritalarında yer alan azaltım alternatiflerinin gözdesi haline gelmiştir.

Üretiminde kullanılan enerji kaynaklarına göre farklı endüstriyel hidrojen türleri bulunmaktadır:

- **Gri hidrojen:** Buhar-metan reformasyonu veya gazifikasyon prosesi ile fosil gaz (metan) veya kömürden elde edilen hidrojen.
- Mavi hidrojen: Mavi hidrojenin gri hidrojenden tek farkı süreç sırasında ortaya çıkan karbonun tutulup kalıcı olarak depolandığı varsayımıdır.
- **Turkuaz hidrojen:** Piroliz prosesi ile metandan elde edilen hidrojen.
- **Yeşil hidrojen:** Yenilenebilir enerji kullanılarak sudan elektroliz yoluyla elde edilen hidrojen.

Şekil 19'da farklı hidrojen türlerini tanımlayan özellikler (hidrojen kaynağı ve kullanılan proses) sunulmuştur:

Şekil 19 - Kaynaklarına göre endüstriyel hidrojen türleri[48]



48 *"Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs"*, 2021. International Renewable Energy Agency

4 ÇELİK ÜRETİMİNDE KARBONSUZLAŞMA İÇİN YENİLİKÇİ TEKNOLOJİLER

4.1 ÇELİK ÜRETİMİNDE KARBONSUZLAŞMANIN TEMEL KONULARI

İklim değişikliği ile mücadele politikalarının, özellikle 2020'den sonra, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin kalkınma planlarında daha fazla yer bulması ile enerji kaynakları ve endüstriyel prosesler ile ulaşım, ısınma vb. sektörlerdeki hizmetlerde ve fiziksel altyapılarda değişim daha görünür olmuştur. Çelik sektörü de değişimin başladığı alanlardan biridir (**Kutu 5**).[49]

Gerek uluslararası iklim/enerji/çevre mevzuatı uygulamalarına uyum için gerekse de düşük karbonlu ürün talebinin ve sürdürülebilir çevre bilincinin artması sonucu oluşan müşteri baskısı nedeniyle geleneksel enerji kaynağı olarak fosil yakıt kullanan entegre tesislerin ve fosil kaynaklı elektrik kullanan ark ocaklı tesislerin ve bunların içinde olduğu ekosistemin farklı düzeylerde karbonsuzlaşma süreçlerine tabi olması beklenmektedir (Düşük karbonlu çelik detayları için bakınız **Kutu 6**).[50]

KUTU 5 - ÇELİK SEKTÖRÜNDE KARBONSUZLAŞMA ÇALIŞMALARININ İTİCİ GÜÇLERİ[49]

İklim değişikliğine karşı küresel mücadele ekseninde yeni bir dünya düzeninin kurulmaya başladığı söylenebilir. Uluslararası finansman, ticaret ve hukuk düzeni düşük karbonlu süreçleri güçlendirmek amacıyla yeniden yapılanmaktadır. Bu yeni dünya düzeni, özellikle çelik üretimi gibi küresel ölçekteki bir endüstri kolunu yeni kurallara ve yaptırımlara uymak zorunda bırakacaktır. Bu dönüşüm, -şimdilik daha çok AB ile sınırlı olsa da- kısa bir süre içinde tüm dünyada benzer uygulamalar ile daha da hızlanması beklenmektedir.

Müşteri talebinde değişim

Nihai mamul ya da yarı-mamul çelik ürünü kullanan müşteri firmaların (otomotiv, inşaat, makine sanayi, altyapı vb.) düşük karbonlu çelik ürünlerine olan talebi son yıllarda artış göstermektedir. Bu eğilimde büyük otomotiv üreticisi firmalar başı çekmektedir.[50]

Karbon emisyon düzenlemelerinin daha da sıkılaştırılması

Yürürlükte olan yasal mevzuattaki karbon bütçeleri daha da sıklaştırılmaktadır. Ayrıca, çelik üreticilerinin kendi ülkelerindeki düzenlemeler haricinde ihracat yapılan ülkelerin tanımlayacağı sınırda karbon vergisi benzeri karbon fiyatlandırma mekanizmaları da "maliyet" unsuru olarak üretici hanesine yansıyacaktır.

49 *"Decarbonization challenge for steel"*, 2020. https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel

50 *"The use of Green Steel in the Automotive Industry"*, 2024. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/ED18758-TE-Final-report_To-PUBLISH.pdf

KUTU 6 - DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK ÜRETİMİ

Yapısı itibariyle karbon (C) ve demir (Fe) alaşımı olan çelik üretim prosesini, "karbonsuz çelik" yapımı şeklinde tanımlamak teknik olarak sorunlu bir betimlemedir. "Karbon nötr", "fosil yakıtsız" veya "düşük karbonlu çelik" yapımı ifadeleri süreci daha doğru ifade etmektedir.

Çelik yapım ekosisteminin değer zincirinde, kaynak verimliliğinin daha fazla önemsenmesi, yaşam döngüsü analizinin yaygınlaşması, enerji verimliliğin ve yenilenebilir enerji kullanımının artırılması, çevresel, sosyal ve yönetişim ilkelerinin hayata geçirilmesi, ürün tasarımında ve üretim kapasitesi kriterlerinde döngüselliğe önem verilmesi, üretim miktarı ve kapasitelerin yeniden düzenlenmesi gibi hususlar düşük karbonlu çelik üretimini destekleyecektir.

Düşük karbonlu çelik üretimi;

- yeni proses ve teknolojilerin teknik uygunluğu,
- altyapının yeterliliği,
- enerji kaynaklarına yakınlık ve tesisin konumu,
- yüksek kalite cevher ve hurdanın bulunabilirliği,
- yenilenebilir elektrikle üretilmiş hidrojenin bulunabilirliği,
- işletme maliyetleri (örn. yenilenebilir elektriğin, hidrojenin, hurdanın ve yüksek kaliteli cevherin fiyatı),
- piyasa talepleri,
- düzenleyici ortam koşulları,
- uluslararası finans sisteminin zorlamaları,

vb. parametrelere bağlı bir süreç olacaktır.

Çelik üretiminde karbonsuzlaşmanın temel konuları da aşağıdaki başlıklar altında özetlenebilir:

- *Enerji kaynaklarının* değişmesiyle çelik ve elektrik üretiminde fosil yakıtların tümüyle terk edilmesi,
- Bu yeni enerji kaynaklarının zorunlu kıldığı *hammadde* türlerinin, *refrakter* malzemelerin, *kimyasal* girdilerin, *indirgeyici* element, *metalurjik proses* ve *teknolojilerin* değişmesi,
- Üretimdeki tüm proseslerin *elektrifikasyonu*,
- Mevcut *teknolojik altyapının* iyileştirilmesi, *verimliliğinin* artırılması ve teknolojik seçeneklerin bir program dahilinde mevcut altyapıya kısmen veya tamamen adapte edilmesi.

4.2 DÖNGÜSEL ÇELİK YAPIMI

Döngüsellik, ürünün tasarımında ve üretiminde yaşam döngüsü analizinin temel alındığı, malzeme ve enerji verimliliğinin temel performans parametresi olduğu, tüm atıkların/yan ürünlerin bir diğer prosesin girdisine dönüştüğü, *Azalt-Yeniden Kullan-Geri Dönüştür* (3R) felsefesinin tüm endüstriyel ve ürünlerin kullanılma biçimini belirleyen tüm toplumsal süreçlere hakim olduğu üretim ve tüketim biçimi olarak özetlenebilir. Mevcut durumda, dünya genelinde çelik üretiminde bu yaklaşımın hakim olduğunu söylemek mümkün değildir.

Toplumsal ve ekonomik tercihlerin sonucu olan iklim krizinin oluşmasında şimdiye kadar uygulanan doğrusal nitelikte ve tüketimin artışına dayalı ekonomik büyüme modeli belirleyici olmuştur. Malzeme tüketimini azaltmayı hedeflemeyen, geri dönüşümü ve doğru kaynak kullanımını yeterince dikkate almayan, üretim sırasındaki fire ve kayıpları doğal sayan doğrusal çelik üretiminin de sera gazı emisyonlarına etkisi ciddi boyutlardadır.

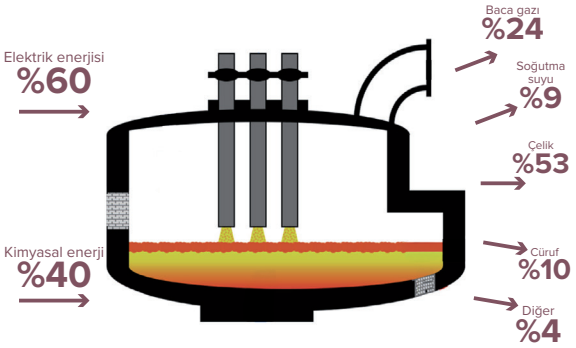
Karbonsuzlaşma süreçleri kısmen yanlış bir şekilde sadece büyük yatırımlar gerektiren geniş ölçekli enerji türü değişimi ve teknoloji dönüşümü ile yeni hammadde tipleri gerektiren çok maliyetli bir süreç olarak görülmektedir. Teknoloji tedarikçileri de çoğunlukla mevcut çelik üretim proseslerinin metalurjik yönünü aynı tutarak teknolojik yatırımlar önermektedirler. Oysa karbonsuzlaşma için tek çözüm olmadığı gibi takip edilecek tek "teknolojik" doğru da yoktur.

Şekil 20'de görüleceği gibi, Türkiye'nin de baskın çelik üretim biçimi olan EAF'li tesislerdeki ark ocaklarında ve takip eden proseslerde önemli miktarda ısı ve metalik kayıplar söz konusudur. Döngüsel çelik yapımını sistematik bir biçimde uygulayacak tesislerin tüm bu kayıpları geri dönüşüm sürecine sokma, tekrar kullanma ve başka bir biçime dönüştürme fırsatları vardır. Türkiye'deki tesislerde dönüşüm teknolojileri henüz çok yaygınlaşmamış olsa da belirli tesislerde Ar&Ge çalışmaları devam etmektedir.[51]

Ayrıca, EAF'deki işlemlerde kullanılan enerjinin %50'sine yakın bir kısmı atık ısı olarak değişik ortamlara yüksek bir maliyetle aktarılmaktadır. Örneğin, %33 gibi bir oranı oluşturan baca gazı ısı içeriği ve soğutma suyuna aktarılan enerji miktarı, tercih edilen çelik yapım prosesi parametrelerinin fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Termodinamik modellemeler ve farklı tercihlerle hem prosese giren kimyasal enerji hem de çıkan gaz ve sudaki enerji miktarı azaltılabilir. Tüm bu önlemler alındıktan sonra bile çıkan gaz ve sudaki enerji dönüştürülebilir. Döngüsel çelik yapımında soğutma işlemi, ısıyı sistemden alıp ortama aktarmaktan ibaret olmayıp teknolojik imkanlar dahilindeki bir verimlilikle başka bir enerji türüne dönüştürmeye öncelik verir.

EAF'lerde yaklaşık 300 kWh/ton düzeyinde bir enerji proses esnasında çevreye atılmaktadır. Döngüsel çelik yapımı pratiğinde ise bu kayıp enerji farklı amaçlarla kullanılmak üzere dönüştürülebilecek enerjidir (**Kutu 7**).

Şekil 20 - EAF'li bir işletmede metalik fireler ve EAF'deki enerji dengesi



Şirketler, karbonsuzlaşma dönüşümündeki engellerden biri olarak maliyet unsurunu öne çıkarmaktadır. Ancak, "*Döngüsel Çelik*" yapımında gözden kaçırılmaması gereken husus sadece yeni yatırımlar yapılmasından ziyade mevcut teknolojik altyapının da farklı bir biçimde kullanılmasıdır. Mevcut altyapı kullanılarak elde edilecek kazanımlar maliyet çıkarmak bir yana mevcut maliyetleri de düşürebilecektir.

Döngüsel çelik yapımındaki verimlilik parametreleri, geleneksel çelik üretimi uygulamalardan farklıdır. Bu yeni parametrelerin takip edilmesi durumunda üreticilerin çok önemli miktarda enerji ve malzeme kaybını normal sayan geleneksel yaklaşımı sonlandırması gerekmektedir (**Kutu 8**).

51 Örneğin baca gazındaki tozu tutan ve cürufu yeniden değerlendiren çalışmalar.

KUTU 7 - EAF'LERDE BACA GAZI ATIK ISI GERİ KAZANIMI

Ark ocağındaki baca gazından dışarı yayılan ısı enerjisi, üretim sırasında %20-24 oranında enerji kaybına neden olur. Baca gazının hacmi, sıcaklığı ve taşıdığı enerji üretim sırasında kullanılan kimyasal enerji miktarı ile doğrudan orantılıdır. Kaybedilen enerjinin büyüklüğü ve kullanılan doğal gaz, karbon verici ve oksijenin sonucu oluşan CO_2 emisyonunu gözetildiğinde EAF'lerdeki karbonsuzlaşma sürecinin bu gözle yeniden değerlendirilmesi önemi ortaya çıkmaktadır.

Baca gazındaki atık enerjinin hurdanın ön ısıtması için veya başka yöntemlerle kullanılması üzerinde çalışmalar mevcuttur. Ancak emisyon maliyetlerinin değerlendirmelere dahil olması ile yeni metalurjik modellemelerde kimyasal enerjinin sadece dekarbürizasyon için gerektiği ölçüde minimum kullanılması, hatta daha farklı dekarbürizasyon proseslerinin geliştirilmesi güçlü bir olasılık olması öngörülmektedir.

KUTU 8 - KARBONSUZLAŞMA PARADİGMASININ ANA UNSURLARI

Karbonsuzlaşma paradigmasının ana unsurları;

- Enerji, proses ve malzeme verimliliği artışı,
- Fosil yakıtlardan tümüyle çıkış ve elektrifikasyon,
- Her türlü girdi ve çıktıda döngüsellik ve sıfır atık,
- Dijital dönüşüm üstüne inşa edilecek yeni bir yönetim ve proses felsefesi
- Çevresel, Sosyal ve Yönetişim ilkelerinin tüm endüstri ve sosyal yaşamda hayata geçirilmesi

olacaktır.

Döngüsellik, prosesteki malzeme ve enerji kullanımının payını azaltırken üretim döngüsünde atık olarak muamele gören malzemeyi (enerji dahil) tekrar kullanıma sokarak kaybı azaltmaktadır.

Tüm proses atıkları; ısı, refrakter, tufal, cüruf, toz ve tüketim malzemeleri, başka bir prosesin veya bizatihi çelik yapım prosesinin girdisi olabilir ve yeniden kullanım ve/veya başka bir malzemeye/enerjiye dönüşüm sağlanabilir.

EAF'lerin en önemli girdisi olan hurda da bir döngüsel üründür. Hurdanın metalurjik prosesinde döngüselliğin artması, çelik üretiminde karbon ayak izi ve maliyetin azalması anlamına gelecektir. Hurda verimliliğinin artırılması ile maliyet düşüşü her çelik üreticisinin ana hedeflerinden biridir. Bu noktada yeni olan, döngüselliğin öne çıkarılmasıdır. Daha fazla döngüsel girdi ve enerji, daha düşük maliyet ve karbon ayak izi ile sonuçlanacaktır.

Dijital dönüşüm, döngüsel çelik üretimi için de önemli bir enstrümandır. Ancak dijital dönüşümün önemi bir teknolojik yatırım olmasından ziyade veri analizinin ve bilgi üretiminin proseslerin her aşamasında verimlilik artışı sağlayacak yeni bir anlayışla uygulanmasından kaynaklanmaktadır.

Özetle, döngüselliğin artırılması, verimliliğin iyileştirilmesi ve atıkların sıfırlanması, bilinen iş yapma ve yönetim süreçlerinden fazlasını, tüm süreçlerde döngüselliği önceleyen yeni bir paradigmayı gerektirmektedir.



Atık ısı dönüşüm teknolojileri, termodinamik modelleme ve dijitalleşme ile daha verimli ve belirsizliği azalmış daha optimize metalurjik prosesin mümkün hale gelmesi, tüm enerji ihtiyacının elektrik ile karşılanma olanakları, döngüsel çelik yapımını destekleyecek yeni gelişmelerdir.

Kutu 8'de döngüsellik ile beraber karbonsuzlaşma paradigmasının ana unsurları özetlenmiştir.

4.2.1 Çelik üretim sektörünün karbonsuzlaşmasında arz ve talebin etkisi

Çelik üretimindeki karbonsuzlaşma stratejileri çoğunlukla proses geliştirmeleri, teknolojik değişimler ve enerji kaynağı değişimleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Diğer taraftan, sadece arz tarafındaki teknolojik uygulamalar sayesinde net sıfır hedefinin mümkün olmayacağı da bir gerçektir (**Kutu 9**).

BF-BOF çelik üretimi rotasının emisyon yoğunluğu 1970-1995 yılları arasında 4,5 ton-CO_2/ton-çelik iken, 1995'ten sonra 2,6 ton-CO_2/ton-çeliğe düşmüştür. 1995-2015 döneminde, çelik üretimindeki artıştan kaynaklanan sera gazı emisyonu 23 Gt olurken, aynı dönemde verimlilik artışından dolayı sera gazı emisyonları 6,9 Gt azalmıştır.[52] Dolayısıyla teknolojik gelişmelerin sağladığı emisyon azaltımı ile üretim artışı nedeniyle artan emisyonlar arasındaki yarışta üretim artışı önde gitmektedir. Özellikle son yirmi yılda, küresel üretim artışının ağırlıklı olarak Çin, Hindistan gibi ülkelerde ve BF-BOF rotası ile olması bu makası daha da açmıştır.

52 "*Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts*", 2021. https://www.nature.com/articles/s41467-021-22245-6)

KUTU 9 - ÇELİK SEKTÖRÜ EMİSYON YOĞUNLUĞUNDA İYİLEŞME VE KÜMÜLATİF EMİSYONLAR

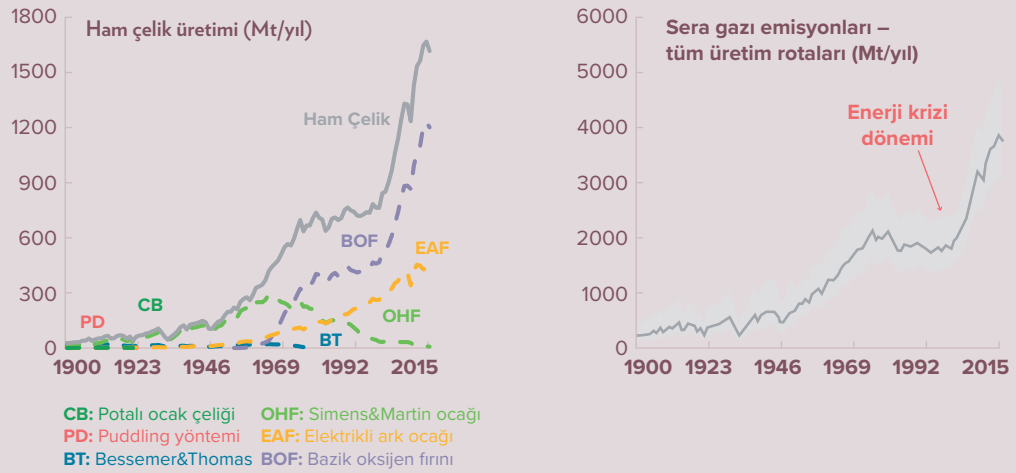
Emisyonları azaltacak teknolojik gelişme hızı ile çelik üretim artış hızı arasındaki dengesizlik 2050 net sıfır hedefinin önündeki en büyük engeldir. 1900-2015 arasında çelik endüstrisinin neden olduğu 147 Gt emisyon, aynı dönemdeki toplam küresel emisyonların yaklaşık %10'udur. Bunun da 132 Gt'si birincil çelik yapımından kaynaklanmıştır. Sektörün 1900 yılında 0,22 Gt/yıl olan sera gazı emisyonu değeri 2015 yılında 3,7 Gt/yıl düzeyine çıkmıştır.

1970 ile 1995 yılları arasında birincil çelik yapımının emisyon yoğunluğu *4,5 ton CO_2/ton çelik* değerinden 2,6 ton CO_2/ton çelik değerine düşmüş olsa da sektörün 2000 sonrası hızla artan üretimi nedeniyle kümülatif emisyonlara katkısı artmıştır. Bir diğer deyişle, sera gazı yoğunluğunda teknolojik gelişmeye bağlı azalma çelik üretim miktarındaki artış nedeniyle emisyonlarda azaltım sağlayamamıştır.

1995'te çelik endüstrisinin toplam sera gazı emisyonu içindeki %5,2'lik payı, teknolojik gelişmeler ile birim çelik üretimi için sera gazı emisyonu azalmış olmasına rağmen, 2015'te %7,7'ye çıkmıştır. Çelik endüstrisinin emisyon yoğunluğu tarihsel olarak 3,2 kat azalmış olsa da, artan çelik üretimi nedeniyle toplam emisyonlar 17 kat artmıştır.

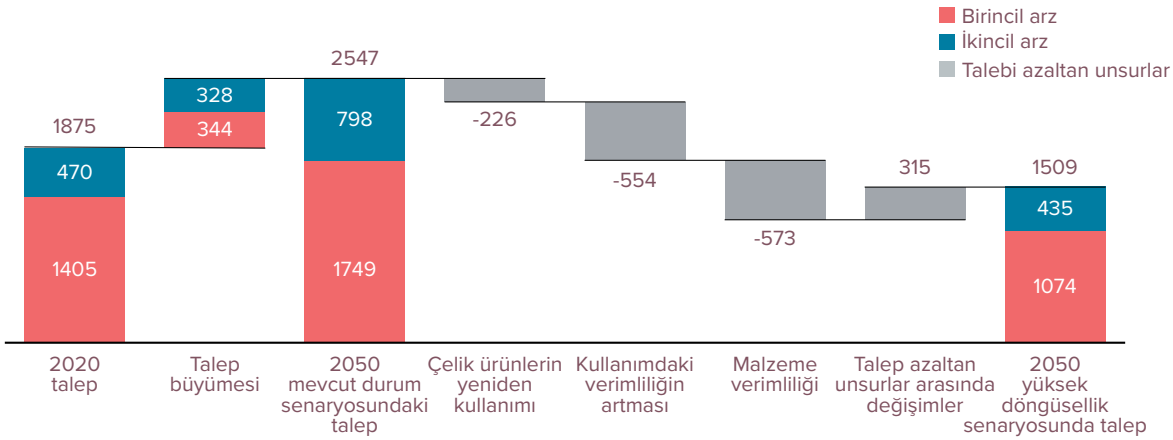
Bu artış özellikle 1990'lardan sonra, Çin ve Hindistan'da dünya ortalamasının üzerinde gerçekleşen üretim artışının hemen tümünün birincil çelik üretimi ile ilgili olmasına bağlıdır. Bu bölgede 1995'te 129 Mt/yıl olan çelik üretimi, 2015'te 914 Mt/yıl düzeyine yükselmiştir (**Şekil 21**).

Şekil 21 - Küresel çelik üretimi ve üretimden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının gelişimi[mi52]



CB: Potalı ocak çeliği **OHF:** Simens&Martin ocağı
PD: Puddling yöntemi **EAF:** Elektrikli ark ocağı
BT: Bessemer&Thomas **BOF:** Bazik oksijen fırını

Şekil 22 - Yüksek döngüsellik senaryosunda 2020 – 2050 dönemi çelik talebinin değişimi öngörüsü



Çelik talebinde, IEA 1,5°C senaryosunda 2050 yılına kadar yaklaşık %12, mevcut durum senaryosunda ise daha fazla artış beklenmektedir. Sektörün toplam üretimi artmaya devam ederken sera gazı emisyonlarını azaltmak önemli bir zorluk yaratmaktadır.

Bu nedenle 2050'de net sıfır hedefine erişilmesi için çelik tüketen sektörlerde talebin azaltılması için gerekli girişimlerin önümüzdeki on yılda yaygınlık kazanması gerekecektir. IEA'nin yaptığı çalışmalara göre yaşam döngüsü esaslı analizler, daha yüksek ömür ve daha düşük çelik tüketimini öngören ürün ve bina tasarımları ve imalatı ile daha yüksek mukavemetli çelik ürünlerinin geliştirilmesi, talebin azaltmasında önemli bir role sahiptir.

Çelik tüketimini azaltan bu gelişmeler sayesinde (örneğin AB için 2050'de, 2019'a göre %20 daha az çelik üretimi) endüstriyel ürünlerin kalitesinde ve toplumsal konfor düzeyinde kayıp olmadan emisyon azaltımı mümkün görünmektedir.

Küresel çelik talebinde yüksek döngüsellik senaryosunu dikkate alan bir talep projeksiyonuna göre mevcut durum senaryosunda 2,6 milyar tona ulaşması beklenen talep, yüksek döngüsellik senaryosunda 1,5 milyar ton olarak tahmin edilmiştir (**Şekil 22**). Talebin azalmasında, çelik ürünlerinin yeniden kullanımı, kullanımdaki verimliliğin artması ve üretimdeki malzeme verimliliği gibi gelişmeler öne çıkmıştır.[53]

Küresel çelik üretiminin ve tüketiminin aşağıdaki tedbirler ve eğilimler nedeniyle önümüzdeki yıllarda azalması beklenebilir:

- Daha kaliteli çelik üretimi ile çelik ürünlerinin kullanım ömrünün uzaması ve artan geri dönüşüm oranı sayesinde talebin düşürülmesi[54],
- Yaşam döngüsü analizinin yaygınlaştırılması,
- En büyük çelik tüketicisi sektörlerden yapı/inşaat ve otomotivde, daha kaliteli ancak daha az çelik kullanımı ve motorlu araçların

53 "*Making Net-Zero Steel Possible*", 2022. https://3stepsolutions.s3-accelerate.amazonaws.com/assets/custom/010856/downloads/Making-Net-Zero-Steel-possible-steel.pdf

54 Daha verimli malzeme kullanımı ile günümüzde tüketilen çelik miktarı 2050'li yıllarda büyük miktarlarda azaltılabilir (Örneğin IEA'ya göre AB için daha verimli malzeme kullanımı ile 2050 yılında 2020'nin %22'si oranında daha az çelik kullanımı söz konusu olabilecektir),

kullanım biçimlerindeki dönüşümün talebi düşürmesi,

- Artan enerji fiyatları ile karbonsuzlaşma maliyetleri sonucunda oluşan yüksek ürün fiyatlarının talebi etkilemesi,
- Artan toplumsal farkındalığın günlük yaşamdaki tüketim alışkanlıklarını ve talep biçimlerini etkilemesi,
- Yeşil ürünlere yönelimin sadece düşük emisyonlu proseslerle üretilmiş ürünlerle sınırlı kalmayıp daha az çelik ile üretilmiş ürünlere doğru gelişmesi.

Sonuç olarak karbonsuzlaşma sadece düşük karbon teknolojisi ve proseslerinin uygulanması ile mümkün olmayacaktır. Talep taraflı değişimler en az teknolojik dönüşümler kadar etkili olabilir. Döngüsel ekonomi uygulamaları, miktar ve nitelik olarak değişen talep, artan yatırım maliyetleri ile karbonsuzlaşma ve enerji maliyetleri, çelik talebini ve üretim artış hızını düşürebilir. Hatta belirli bölgeler dışında çelik endüstrisinde negatif büyüme görülmesi de beklentiler arasındadır. Aynı negatif büyümenin diğer emisyon ve enerji yoğun sektörlerde de olması şaşırtıcı olmayacaktır.

4.2.2 Çelik sektörünün emisyonlarını azaltmada yenilikçi teknolojiler ihtiyacı

Gelişmiş çelik endüstrilerine sahip ülkelerde ve Türkiye'de proses, enerji ve hammadde verimliliğine yatırım yapan ham çelik üreticileri 1990'lı yıllardan bu yana spesifik enerji tüketimlerinde (1 ton ham çelik üretmek için harcanan enerji) ve birim üretim başına sera gazı emisyonunda önemli miktarda azalma sağlayabilmişlerdir. Buna karşın artan çelik üretimi nedeniyle küresel çelik sektörü emisyonlarındaki artış da devam etmektedir.

Halihazırda, fiziksel uygulamalara (elektrifikasyon, enerji kaynağı ikameleri, uygun bileşimde optimal yakıt kullanımı, ısı geri kazanımı, hammadde kalitesinde iyileştirme ve alternatif hammadde, ileri kalite refrakter) ve dijital teknolojiye (izleme kontrol, otomasyon, dijital ikiz, yapay zekâ ve simülasyon vb.) yatırım yapan öncü çelik üreticileri, mevcut ticari çözümlerle üretim süreçlerinde azami optimizasyon seviyelerine ulaşma yolundadırlar.

Ancak, ham çelik üretiminde hızlı ve etkin bir karbonsuzlaşma süreci için mevcut iyileştirmelerin ve geleneksel üretim teknolojilerinin ötesine geçen yenilikçi teknolojilerin önümüzdeki on yıl içerisinde ticarileşerek yaygınlık kazanması gerekecektir.[55]

Buna karşın, çeliğin karbondan arındırılması girişimleri (şirket ölçeğinde net sıfır taahhütleri, temiz/yeşil çelik, sıfır emisyonlu çelik, düşük emisyonlu çelik, sıfıra yakın emisyonlu çelik[56], sıfıra yakın veya düşük-karbonlu çelik vb.), özellikle 2020'den bu yana hızlanarak artsa da istenen düzeyde ve olgunlukta yenilikçi teknolojiler hayata geçirilememiştir.

Mevcut çalışmalar, 2030'larda ticari olarak olgunlaşması beklenen yenilikçi teknolojilerin daha hızlı bir şekilde ticarileşmesi için, kamu ve özel sektör iş birliği ile Ar-Ge ve finansman çalışmalarının artması gereğine vurgu yapmaktadır. Buna karşın, dünya genelinde teşvik mekanizmaları, ABD ve AB bölgesi istisna olmak üzere, yatırımların başlaması ve hızlanması için istenen düzeye ulaşamamıştır.

55 2021 yılı itibariyle düşük emisyonlu çelik üretim patikasıyla uyumlu Hurda-EAF üretim rotası toplam ham çelik üretiminin %20-25'ine tekabül etmektedir. Bu üretim rotasının - hurda çeliğe erişim sorunu ve istenen kalitede çelik üretimini sağlayamaması nedeniyle – sektörün 2050 hedefine ulaşmasında tek başına yeterli olamayacağı belirtilmektedir.

56 IEA tarafından yapılan tanımlamaya göre, "**Sıfıra yakın emisyonlu çelik üretimi**", emisyon yoğunluğu 2050 yılı küresel net sıfır patikasıyla uyumlu olan ham çelik üretimini ifade eder. Bu gereksinime uyan çelik üretim rotalarını belirlemek için, IEA emisyon yoğunluğu için belirlediği nicel eşikleri kullanılır.

Çelik sektöründe 2025'ten önce yaklaşık 90 Mt yeni yüksek emisyonlu yüksek fırın yatırımı öngörülürken, sıfıra yakın emisyonlu yeni çelik tesisleri için açıklanan yatırımlardaki üretim miktarı 13 Mt olmuştur. Bu rakam, 2030 yılına kadar ihtiyaç duyulan 100 Mt sıfıra yakın emisyonlu çelik üretimi hedefinin çok altındadır.[57]

Küresel çelik sektörünün karbonsuzlaşma yol haritasında yenilikçi-atılımcı teknolojilere ek olarak; çevresel-sosyal-kurumsal yönetişimini (ESG) ilgilendiren süreçler, yaşam döngüsü analizi uygulamaları, verimlilik artışı ve enerji geri kazanımı çalışmaları, talep yönetimi, altyapı inşası[58], sermaye-finansman sağlanması ve uygun politika ortamı yaratılmasına dair önlemlerin birbiri ile uyumlu bir şekilde ele alınması sürecin başarısını doğrudan etkileyecektir.

4.3 ÇELİK ÜRETİMİNDE YENİLİKÇİ TEKNOLOJİLERİN SINIFLANDIRILMASI

Mevcut geleneksel ham çelik üretimi teknolojileri BF-BOF, Hurda-EAF ve fosil yakıtlı DRI-EAF üretim rotaları olarak sıralanırken, çelik üreticisi şirketler tarafından geliştirilen yenilikçi-atılımcı çelik üretim teknolojileri aşağıdaki iki başlık altında toplanabilecektir:

1. **Karbon emisyonlarının oluşmasını doğrudan önleme teknolojileri -** (Carbon Direct Avoidance - CDA): Bu teknolojiler, çelik üretiminde karbonsuz veya fosil yakıt kullanılmadan üretilen elektrik ve/veya hidrojen kullanımını kademeli olarak en üst düzeye çıkaran yeni süreçleri kapsar. Amaç, fosil yakıtlara ve fosil hammaddelere dayalı mevcut metalurjinin büyük ölçekli olarak değiştirilmesidir. Bu seçenek, hidrojen ve elektrik bazlı metalurjiyi içermektedir:
   - Yeşil hidrojen kullanan **H_2-DRI-EAF** üretim rotası, (ek olarak fosil gaz yerine H_2 ve biyogaz kullanımı),
   - Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik kullanarak **demir cevherinin elektrolizi**,
   - **Hidrojen plazma izabe** reaksiyonu.
2. **Akıllı karbon kullanımı teknolojileri -** (Smart Carbon Use - SCU): Bu teknoloji alternatifi, mevcut çelik üretim rotaları büyük ölçekli olarak değiştirilmeden uygulanacak proses entegrasyonu ve optimizasyonu, fosil gazlardan hidrojene dönüşüm uygulamaları, alternatif karbon kullanımı seçenekleri ile karbon yakalama ve kullanım (CCU) ve karbon yakalama ve depolama (CCS) yöntemlerini içerir.[59]

Yenilikçi teknolojiler farklı kurumlar tarafından değişik biçimlerde kategorize edilmiştir. Dünya Çelik Üreticileri Birliği (worldsteel) yenilikçi teknolojileri, karbon yönetimi, hidrojen ve elektrik esaslı

57 IEA net sıfır senaryosunda, 2050 yılında net sıfır hedefine ulaşılması için 2030 yılına kadar çelik sektörü emisyonlarının yaklaşık %25 oranında düşmesi gerekmektedir. Kaynak: https://iea.blob.core.windows.net/assets/d7e6b848-6e96-4c27-846e-07bd3aef5654/THEBREAKTHROUGHAGENDAREPORT2023.pdf

58 Üretim varlıklarına yapılan yatırımların yanı sıra, karbonsuzlaşma teknolojileri (yeşil hidrojen üretimi, karbon yakalama ve depolama ve düşük emisyonlu elektrik üretimi) en az 2 trilyon dolarlık altyapı yatırımı gerektirecektir. Sadece düşük emisyonlu elektrik ihtiyacı 921 GW olarak tahmin edilmektedir. Bu miktar AB toplam kurulu güç kapasitesine eşdeğerdir. Kaynak: "*Net Zero Industry Tracker*", 2022, https://www3.weforum.org/docs/WEF_NetZero_Industry_Tracker_2022_Edition.pdf

59 *Karbon Yakalama ve Depolama (CCS)* teknolojisi ham çelik üretim proseslerinde büyük bir teknolojik değişim gerektirmeden sadece ortaya çıkan CO_2 emisyonlarını yakalandıktan sonra kalıcı olarak depolanması sürecini içermektedir. Bu özelliği ile diğer yenilikçi-atılımcı teknolojilerden ayrışmaktadır.

KUTU 10 - DÜNYA ÇELİK ÜRETİCİLERİ BİRLİĞİ'NİN YENİLİKÇİ-ATILIMCI TEKNOLOJİLER SINIFLANDIRMASI[60]

IPCC, IEA ve diğer uluslararası kurumlarca yapılan çalışmalarda sektördeki emisyonlarda derin azaltım sağlanması için başta yenilenebilir enerjiden elde edilmiş hidrojen temelli üretim rotaları olmak üzere, demir cevherinin elektrolizi, plazma ergitme, karbon yakalama ve depolama teknolojisi gibi yenilikçi-atılımcı teknolojiler önerilmekte olup bu teknolojileri ticarileştirmenin önemi vurgulanmıştır. Başta Avrupa Birliği (AB) olmak üzere ABD[61], Japonya[62], Güney Kore[63], Avustralya ve Çin'de düşük karbonlu çelik üretim süreçlerine yönelik geliştirme çalışmaları yürütülmektedir.

Worldsteel, yenilikçi teknolojileri üç ana grup altında toplamıştır:

- **Karbon yönetimi esaslı**: ArcelorMittal Northern Lights I BAO-CCU I Aço Verde do Brasil I Carbon 2 Chem I Emirates CCS I HIsarna I Steelanol
- **Hidrojen esaslı**: COURSE50 I HBIS **& Tenova** I HYBRIT I Novel flash oxide smelting I Salcos I SuSteel
- **Elektrik esaslı**: Boston Metals I Siderwin
- **Hidrojen ve Elektrik esaslı**: GrinHy I H2FUTURE

Yukarıda bahsedilen teknolojilere dair bilgiler **Bölüm** 4.3'te detaylı olarak sunulmuştur.

üretim olarak üç gruba ayırmıştır. **Kutu 10**'da, örnek teknolojiler, worldsteel'in yenilikçi-atılımcı teknoloji sınıflandırmasına göre özetlenmektedir.

Bölüm 5'te yukarıdaki iki başlık altında toplanan yenilikçi teknolojilere ait uygulama örnekleri sunulmuştur.

4.3.1 Yenilikçi çelik üretimi teknolojilerinde mevcut durum

2022 ortası itibariyle, dünya çapında 40'a yakın sıfıra yakın emisyonlu çelik üretim projesi başlatılmıştır. Bu projeler, doğal gaz ve hidrojen bazlı DRI-EAF, karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) veya doğrudan demir cevheri elektrolizi teknolojilerine dayalı tesisleri içermektedir. DRI teknolojisi, 2022 ortası itibariyle bu projelerin yaklaşık %75'ini oluşturan ana üretim rotasıdır. Avrupa ülkeleri, proje portföyünün yaklaşık %65'ini, Çin yaklaşık %15'ini ve Kuzey Amerika ise %8'ini oluşturmaktadır.[64]

60 Breakthrough technologies. https://worldsteel.org/climate-action/breakthrough-technologies/

61 ABD'de teknoloji geliştirme çalışmaları, *Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü* (AISI) ile *ABD Enerji Bakanlığı* (DOE) ve *Office of Industrial Technology* arasında 'kamu özel ortaklığı' ile yürütülmektedir.

62 Japonya'da teknoloji geliştirme çalışmaları, çelik ve mühendislik kuruluşları, *Japonya Demir ve Çelik Federasyonu* ve *Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Örgütü*'nü içeren *COURSE50* programı kapsamında yürütülmektedir.

63 Güney Kore'de POSCO, RIST, POSLAB ve POSTECH'i içeren teknoloji geliştirme çalışmaları yürütülmektedir.

64 *"Assessing steel decarbonisation progress: ready for the decade on delivery?"*, 2022. https://www.oecd.org/industry/ind/assessing-steel-decarbonisation-progress.pdf

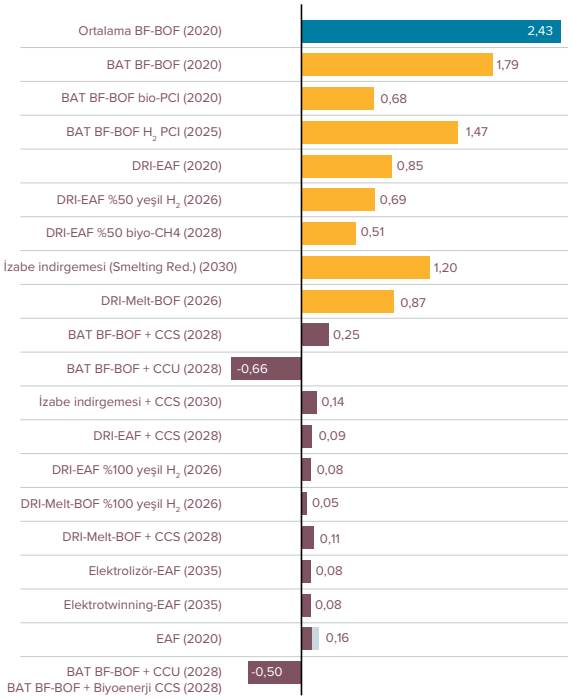
Özellikle Avrupa'da yürütülen kamu destekli çalışmalarda yeşil hidrojeni kullanarak yapılacak çelik üretimi (Yeşil H_2-DRI teknolojisi) karbon nötr çelik üretimine ulaşmak için en uygun uzun vadeli çözüm olarak kabul görmüş durumdadır. Bu teknolojinin başarısı için ekonomik ölçekte yeşil hidrojene erişim sorununun ortadan kaldırılması beklenmektedir.

Hidrojen bazlı teknolojiler dışında, demir ve çelik üretimi sırasında oluşan CO_2'nin yakalanıp çeşitli kimyasal girdilere dönüştürüldüğü teknoloji geliştirme çalışmaları da mevcuttur.[65] Diğer taraftan, düşük karbonlu çelik üretimi için önerilen yenilikçi-atılımcı teknolojilerden CO_2 yakalama ve depolama teknolojisinde, üretim esnasında oluşan CO_2'nin tutulduktan sonraki aşamada tesisten taşınıp kalıcı olarak yer altındaki formasyonlarda depolanması uygulaması pilot düzeyde dahi kendini yeterince ispatlayabilmiş değildir.

4.3.2 Yenilikçi çelik üretimi teknolojilerinin olgunlaşmasına dair beklentiler

MPP tarafından geliştirilen "*Çelik Sektörü Geçiş Stratejisi Modeli*" (Steel Sector-Transition Strategy Model:ST-STSM), çelik üreticilerinin gündeminde olan 20 teknoloji seçeneğini listelemiştir. Geliştirilen modelde, teknolojilerin ticari olarak olgunlaşma yılı ve emisyon yoğunluk değerleri de tahmin edilmiştir (**Şekil 23**).

Şekil 23 - Çelik üretiminde teknolojik alternatiflerin olgunlaşma yılı ve emisyon yoğunluğuna dair tahminler (ST-STSM)[66]

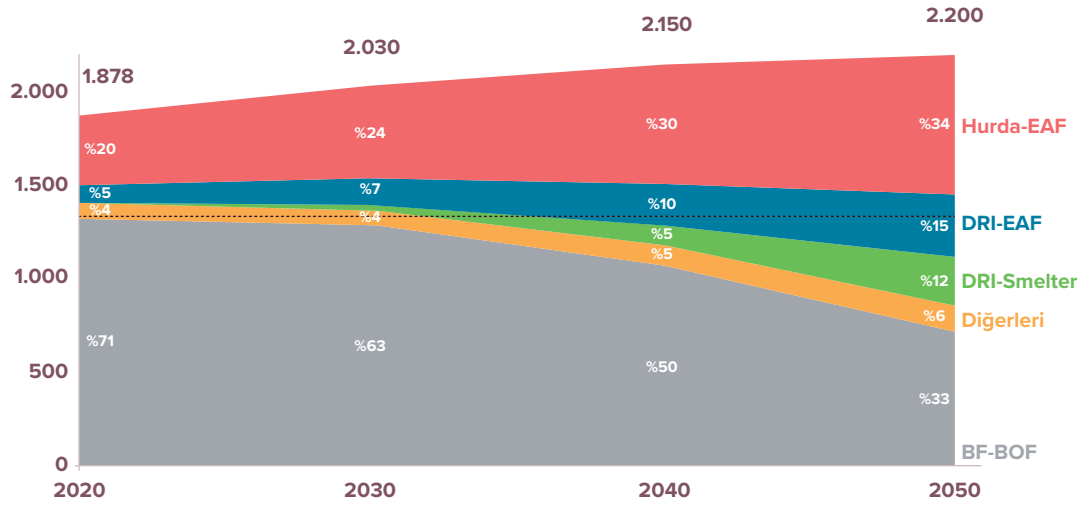


Önümüzdeki otuz yılda çelik endüstrisinin, üretim biçimi ve üretim miktarı açısından, 2020 başlarında olduğundan çok farklı bir duruma gelmesi beklense de, ne olacağını tam olarak öngörmek kolay değildir. Yine de çeşitli çalışmalarda farklı teknolojilere dayalı üretim projeksiyonları ortaya konmuştur. Primetals Technologies tarafından geliştirilen modelde, 2050'de çelik üretim miktarı 2,2 milyar ton olurken bunun yarısından fazlasının düşük karbonlu teknolojilerle üretileceği tahmin edilmiştir (**Şekil 24**).

65 Arcelor Mittal şirketinin Gehnt'teki tesisinde LanzaTech pilot projesi 125.000 ton CO_2/yıl kapasite ile 2023 Mayıs ayında devreye girmiştir.

66 "*Making Net-Zero Steel Possible*", 2022. https://3stepsolutions.s3-accelerate.amazonaws.com/assets/custom/010856/downloads/Making-Net-Zero-Steel-possible-steel.pdf

Şekil 24 - 2020-2050 döneminde çelik üretiminin seyri ve üretim teknolojilerin payındaki değişimler (Mt/yıl)[67]



67 *"Green Steel in Motıon – Iron Feedstock Meets Renewable Energy", WSA - Breakthrough Technology Conference, Primetals Technologies*, 2023. https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Presentation_Alexander-FLEISCHANDERL-Primetals-Technologies.pdf

5 ÇELİK ÜRETİMİNDE YENİLİKÇİ TEKNOLOJİ UYGULAMA ÖRNEKLERİ

5.1 ÇELİK ÜRETİMİNDE HİDROJEN KULLANIMI

Hidrojen değer zincirinin kurulması ve pilot projelerin olgun uygulamalara dönüştürülmesi için ülkeler çeşitli tedbirleri[68] hayata geçirmişlerdir (Mevcut durumda sanayide kullanılan hidrojene dair genel bilgiler **Ek 5'te** sunulmuştur).

Bugüne kadar planlanan düşük karbonlu çelik üretim tesislerinde tercih edilen hidrojen bazlı çelik üretimi çoğunlukla Avrupalı şirketlerce geliştirilmiştir (bakınız **Ek 2**).

Çelik yapımında hidrojen:

i. Doğrudan indirgenmiş demirin (DRI) üretiminde,

ii. Yüksek fırınlara yapılan H_2 enjeksiyonunda ve

iii. Ham çelikten nihai ürünün elde edildiği yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulan üretim (ör: haddehane tarafında) aşamalarında yanma gazı olarak kullanılır.

Daha detaylı örnek vermek verirse, hidrojen türünden bağımsız olarak şu şekillerde kullanılabilir:

- **BF rotasında indirgeyici olarak:** Mevcut yüksek fırın altyapısında indirgeyici olarak belirli bir oranda kullanımı;
- **BF rotasında toz kömüre alternatif olarak:** Toz cevher ile toz kömürün akışkan yatak prensibi ile çalıştığı *FINEX* üretim yöntemine alternatif olan *HyREX* (bakınız Bölüm 6.1.2) teknolojisinde toz kömüre alternatif olarak kullanımı;
- **DRI üretiminde**: DRI üretiminde doğal gaz içindeki hidrojenin veya tümüyle yeşil hidrojenin kullanımı[69] (*Midrex* ve *Energiron* şaft tipli reaktörler ile *Circored* ve *HYFOR* akışkan yataklı reaktörler, örnekler için bakınız Bölüm 6.1.2);
- **EAF rotasında**: EAF'li tesislerde doğal gaza alternatif yakıt olarak kullanımı;
- **Çelik şekillendirme proseslerinde**: Doğal gazın ve CO içeren diğer proses gazlarının kullanıldığı çelik şekillendirme proseslerinde, alternatif ısıtma kaynağı olarak kısmen veya tümüyle hidrojenin kullanımı.

5.1.1 Geleneksel BF - BOF üretim rotasında hidrojen kullanımı

BF-BOF üretim rotasının emisyon hedeflerine yönelik olarak değişime uğramak zorunda kalması, çelik üretimi açısından en zorlu karbonsuzlaşma konusudur (**Kutu 11**).

Bu üretim rotasındaki emisyonların büyük bir kısmı indirgeyici ve ısı enerjisi kaynağı olarak kullanılan koklaşabilir taş kömürünün (metalurjik kömür) hazırlanması ve bu kömürün demir cevheri ile beraber beslendikleri yüksek fırın işlemleri sırasında oluşmaktadır. Bu nedenle bu üretim rotasındaki alternatif indirgeme süreci arayışları yenilikçi teknoloji geliştirme çabalarının odaklandığı bir alan olmuştur.

Halihazırda birçok entegre çelik üretim tesisi hidrojeni yüksek fırın aşamasında destekleyici bir indirgeyici element olarak kullanılabilmektedir.

68 *AB'nin Ortak Avrupa Çıkarına İlişkin Önemli Projeleri (IPCEI), ABD Enflasyon Azaltma Yasası (IRA)* ve *Alman H_2 Global Girişimi*

69 Oksijenin katı haldeki demir cevherinden doğal gaz veya hidrojen tarafından uzaklaştırılması ile elde edilen DRI üretim süreçlerinin daha fazla yaygınlaşması beklenmektedir.

Yeşil hidrojenin yüksek fırına enjeksiyonunun, emisyonları yaklaşık %21 oranında azaltabildiği tespit edilmiştir.[70] Temel termodinamik dengeleri bozmadan 27,5 kg-H_2/ton-sıcak metal ısıtılmış hidrojen enjeksiyonu ile ton çelik başına yaklaşık 300 kg CO_2 emisyonu azaltılması mümkündür.[71]

Entegre demir-çelik tesisleri için önerilen yenilikçi teknolojiler içerisinde BF-BOF rotasından DRI-EAF rotasına geçecek şekilde yapılacak yatırımlar ya da BF'de yakıt harmanlama/değiştirme yatırımları yaygınlık kazanmaya başlamıştır.[72] Ayrıca, bazı entegre tesisler yeni yatırım planlarında EAF yapımına öncelik vermeye başlamışlardır.[71]

BF'lerde hidrojen kullanımı kaynaklı sorunlar ve zorluklar

BF'ye karbon yerine daha fazla hidrojen enjeksiyonu, üzerinde çalışılan bir karbonsuzlaşma seçeneğidir, ancak aşağıda özetlenen bazı sorunların çözülmesi gerekmektedir:

- **BOF için karbon yetersizliği**: Hidrojenin kullanım oranına bağlı olan sıvı metalin karbon içeriğinin görece düşmesi BOF prosesinde sorun yaratmaktadır. Karbon içermeyen sıvı demir, BOF'larda işlem göremeyecektir. BOF'ların devrede kalabilmesi için eksilen karbon kadar yeşil karbonun prosese ilave edilmesi gerekecektir. BF-BOF rotasında hidrojen kullanılması sonucu oluşan düşük karbon komplikasyonları, BF'lerde Hidrojen-DRI briket kullanılması halinde de geçerlidir. BF'lerde hidrojen kullanım oranını, teknolojik ve metalurjik güçlükler belirleyecektir. Toplam CO_2 emisyonunu azaltmayı amaçlayan hidrojen kullanımı, birçok kapsamlı proses modifikasyonu yapmayı gerektirecektir.
- **Kok fırın gaz geçirgenliği ihtiyacı:** Yüksek fırın prosesi için kokun sağladığı gaz geçirgenliği proses sürekliliği açısından kritiktir. Bu nedenle, yüksek fırının mevcut yapısıyla koktan tümüyle hidrojene dönüş mümkün değildir. Diğer alternatif karbon kaynakları da (biyokütle vb.) bu gaz geçirgenliği fonksiyonunu gerçekleştirememektedir (Biyokütle kullanımı detayları için bakınız **Ek 6**).
- **Isı/Enerji ihtiyacı:** Metalurjik olarak, demir oksitlerin hidrojen tarafından indirgenmesi mümkündür, ancak karbon ile yapılan indirgeme reaksiyonu ekzotermik iken, hidrojen ile demir oksit reaksiyonu endotermiktir. Ayrıca düşük sıcaklıklarda karbon ile indirgeme güçlü iken, hidrojen ile indirgeme, yüksek sıcaklıklarda daha güçlüdür. Artan hidrojen enjeksiyonu, prosesin enerji ihtiyacının artmasına neden olup oksijen enjeksiyonunun artırılması da bu ihtiyacı karşılamayabilir. Hidrojenin indirgeme potansiyelini artırmak için ısıtılarak enjeksiyonu söz konusudur. Koşullar uygun olduğunda hidrojenin indirgeme hızı, CO ile yapılan indirgemeye göre daha hızlı olabilir, ancak sözü edilen sorunlar hidrojen uygulamasını engelleyen etmenlerdir.

70 "*Modeling and simulation of the use of direct reduced iron in a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions*", 2017. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617314713

71 The 2021 AIST Howe Memorial Lecture – "*Why Both Hydrogen and Carbon Are Key for Net-Zero Steelmaking*", Carl De Maré, Iron & Steel Technology

72 Örnekler: Hybrit (İsveç), SALCOS (Almanya), Liberty Steel DRI tesisi (Fransa), Iberdrola – H_2 Green Steel (Iberya yarımadası), Green Steel - H_2V CAP (Şili). AB'deki örnekler için bakınız: **Ek 2.**

KUTU 11 - YÜKSEK FIRINLARI BEKLEYEN DÖNÜŞÜM SÜRECİ

BF'lerin ortalama küresel yaşı 15 civarında olup henüz ömürlerini tamamlamadan başka bir teknoloji ile değiştirilmeleri büyük maliyetlere neden olacaktır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na (IRENA) göre, işletmedeki yüksek fırınların %71'i, 2030 yılına kadar büyük bir yenilemeye ("relining") ihtiyaç duyacaktır. Tesis sahiplerinin mevcut fırınları aynı teknolojiler ile yenilemek ile DRI ve EAF üretim rotalarına geçmek arasında seçim yapması beklenmektedir. Halihazırda, BF/BOF üretim teknolojilerinin yerine geçmeye aday teknolojilerin tam anlamıyla kendilerini kanıtlayamaması ve yüksek maliyetler getirmesi arzu edilen dönüşümün ötelenmesine neden olmaktadır.

Üreticilerin, uluslararası/ulusal yeni yasal düzenlemeler, CO_2 fiyatları, ticari ve finansal kısıtlamalar, mevcut altyapının yaşı ve değişim ihtiyacı, talep tarafı baskıları, teknolojik uygunluk, yeni ve eski proseslerin CAPEX ve OPEX değerleri, yenilenebilir enerjiye erişim, "green premium" gerçekleşme oranları vb. birçok parametreyi göz önüne alarak karar vermesi gerekmektedir.



Tüm bu nedenlerle, geleneksel çelik üretim süreçlerinde yeni teknolojilerin hızlı bir şekilde tümüyle mevcut teknolojinin yerine geçmesi beklenmezken, uzun bir süre daha eski ve yeni teknolojinin iç içe bulunacağı öngörülmektedir. Mevcut durumda, H_2-HBI kullanımı, BF'lerde daha fazla hidrojen enjeksiyonu, BOF'larda daha fazla hurda kullanımı, daha yüksek demir içerikli pelet kullanımı ve gelişmiş PCI uygulamalarının biochar&biyokütle vb. değişik kombinasyonlarının kullanılmasıyla beraber entegre tesislerde önemli düzeyde karbonsuzlaşma sağlanabilmektedir.

5.1.1.1 Yüksek fırınlara hidrojen beslemesi ile CO_2 emisyonunu azaltmayı hedefleyen projeler

COURSE50 ve Super COURSE50 Pilot Projeleri

Japonya'nın büyük çelik şirketlerinden oluşan bir konsorsiyum[73] tarafından 2008 yılından bu yana geliştirilen COURSE50 (*CO_2 Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50*) pilot teknoloji uygulaması, BF'lerde oluşan atık gazlarda bulunan hidrojenin indirgeyici olarak tekrar kullanılması ile CO_2 emisyonlarını azaltmayı hedeflemiştir.

Japonya *Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Örgütü* (NEDO) tarafından desteklenen ve ulusal nitelikte bir proje olan COURSE50, 2013 seviyelerine göre BF'de oluşan CO_2 emisyonlarını %30 oranında azaltmayı hedeflemektedir. Hedeflenen azaltımın, yalnızca %10'luk kısmının geri

73 Japon çelik şirketi Nippon Steel, Mart 2021'de duyurduğu Karbon Nötr Vizyon 2050 planında 2030 yılına kadar CO_2 emisyonlarını 2013 seviyesine göre %30 azaltmayı ve 2050 yılında karbon nötrlüğe ulaşmayı hedeflemiştir. Bu plandaki hedeflere ulaşılması için EAF'lerde yüksek kaliteli çelik üretimi, BF'lere hidrojen enjeksiyonu (Super-COURSE50), demirin hidrojenle doğrudan indirgenmesi ve CCS gibi teknolojilerinin geliştirilmesi öne çıkmıştır.

dönüştürülmüş hidrojen kullanımından, %20'sinin ise CCS'ten sağlanacağı belirtilmektedir. Pilot projeye ilişkin doğrulama deneylerinin 2026'da başlaması planlanmaktadır.[74]

Ayrıca, 2022'de, Nippon Steel Corporation, JFE Steel Corporation ve Kobe Steel çelik şirketleri, Japonya Metaller Araştırma ve Geliştirme Merkezi ile birlikte *Hidrojen Çelik Üretim Konsorsiyumu*'nu kurmuştur. NEDO'nun *Yeşil İnovasyon Fonu* desteğini almaya hak kazanan *Super COURSE50* projesiyle de tesis dışından tedarik edilecek hidrojenin ısıtılarak BF'yi beslemesiyle CO_2 emisyonlarının yarıya indirilmesi hedeflenmiştir.

Super-COURSE50 pilot projesi kapsamında Mayıs 2022'den bu yana Doğu Nippon Works Kimitsu Bölgesi'nde hidrojen enjeksiyonu için test çalışmalarına başlanmıştır. Pilot ölçekli iç hacmi 12 m^3 olan bir test fırınında, cevherin indirgenmesinde kısmen ısıtılmış hidrojen kullanılarak CO_2 emisyonlarını azaltma denemeleri yapılmaktadır.[75] 2040 yılına kadar Super COURSE50 pilot projesinin ticarileştirilmesi amaçlanmaktadır.

COURSE50 ile Süper COURSE50 pilot projeleri arasındaki fark, Süper COURSE50'de tesisteki atık gazlardan yakalanıp elde edilen hidrojene ek olarak, BF'lere enjeksiyon için ayrıca dışarıda üretilen hidrojenin kullanılmasıdır. Şirket tarafından yapılan 2024 Şubat tarihli açıklamada, ısıtılmış hidrojenin yüksek fırına enjekte edildiği pilot uygulamada %33'lük CO_2 emisyonu azaltımı sağlandığı bildirilmiştir.[76]

74 "*The Road to Net Zero with Green Steel*", 2024. https://www.japan.go.jp/kizuna/2024/03/net_zero_with_green_steel.html

75 Super-COURSE50 programının öncülü olan COURSE50 çalışmalarında, yüksek fırına sadece tesis içerisindeki süreçlerden gelen hidrojenin enjeksiyonu uygulaması yapılmıştır. Ayrıntılı bilgi için: https://www.carbon-neutral-steel.com/en/vision/

76 Verified the World's Highest Level of CO_2 Emissions Reduction at 33% by Heated Hydrogen Injection in the Super COURSE50 Test Furnace, https://www.nipponsteel.com/en/news/20240206_100.html



Pilot projede, verimlilik olarak üst düzeydeki bir yüksek fırında mevcut çalışan altyapıyı daha verimli hale getirerek düşük yatırım maliyetli çözümleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Hidrojenle demir cevheri indirgeme reaksiyonlarının endotermik karakteri nedeniyle hidrojenin reaksiyon sıcaklığına kadar ısıtılarak enjekte edildiğinin altı çizilmelidir (BF'de hidrojenin demiri indirgemesi sırasında kullandığı enerjiyi telafi etmek için ek enerjiye ihtiyacı vardır). Geliştirilen bu teknolojide hidrojen indirgeyici olarak BF'lerdeki kömürün tamamen yerini almamaktadır ve hala önemli miktarda kok kullanılmaya devam etmektedir.

JFE Steel çelik şirketi – Metanizasyon Projesi

JFE Steel çelik şirketi yıllık 25 Mt ham çelik üretimine sahip yedi BF ünitesinde, temel olarak BF'de metanizasyon ile karbon geri dönüşümü, DRI ve EAF tesislerinin kurulumundan oluşan bir dönüşüm programını tanımlamıştır. Bu üç teknoloji için pilot ölçekli çalışmaların 2030'a doğru uygulamaya geçmesi planlanmıştır.

Şirketin BF ünitesi için geliştireceği karbon geri dönüşüm teknolojisinde, BF gazı (CO, CO_2, H_2O ve H_2 içeren), gaz metanizasyon reformer ünitesine gönderilmekte ve reformerde H_2 ilavesi ile metana (CH_4) dönüştürülen gaz O_2 ile zenginleştirilerek BF'ye indirgeyici olarak enjekte edilmektedir. Bu çalışma ile BF'den kaynaklanan emisyonlarda %30 oranında azaltım beklemektedir.

Pilot tesiste deneme işlemlerinin 2025-2026 döneminde başlayacağı duyurulmuştur. Bu teknolojinin, ticari uygulamasının orta büyüklükte bir BF'de 2030 yılında gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.[77]

Tata Steel çelik şirketi – Metanizasyon Projesi

BF gazının metanizasyonu prensibine dayalı bir diğer proje de SMS/Paul Wurth[78] teknoloji şirketi ile Tata Steel çelik şirketi ortaklığında Hindistan'ın Jamshedpur şehrindeki Tata Steel şirketine ait tesisteki BF'de uygulanması düşünülen EASyMelt (Electrically Assisted Syngas Melter) teknolojisinin pilot uygulamasıdır.

Kok yerine indirgeyici olarak sentez gazının kullanıldığı pilot projede, JFE çelik şirketinin örneğinde olduğu gibi, mevcut sistem korunarak modifiye edilen BF'ye enjeksiyon yapılması veya BF benzeri yeni bir şaft fırınının sentez gazıyla çalıştırılması öngörülmüştür.

SMS Group teknoloji şirketinin geliştirdiği kuru reformer fırını (stove) olarak tanımladığı reformer ünitesinde, BF gazı ve dışarıdan yeşil H_2 gazı ilavesi ile elde edilen indirgeyici sentez gazı elektrikle ısıtılıp bir plazma torçu gibi BF'deki şaft altı bölgeye yüksek sıcaklıkta (950°C) enjekte edilmektedir.

Bu yöntem ile BF'lerde hem atık gazın döngüselliğinin sağlanması hem de BF kaynaklı CO_2 emisyonunun %30 oranında azaltılması hedeflenmektedir.[79]Mevcut altyapının kullanılması, düşük kalite cevher kullanımına izin vermesi ve yatırım maliyetinin görece düşüklüğü geliştirilen pilot uygulamanın avantajları olarak sıralanabilir.

5.1.2 Çelik üretiminde hidrojen esaslı pilot projeler

5.1.2.1 HYBRIT Pilot projesi üretim teknolojisi (LKAB, SSAB ve Vattenfall)[80]

2016 yılında İsveçli çelik üreticisi SSAB, LKAB (Avrupa'nın en büyük demir cevheri üreticisi) ve Vattenfall (Avrupa'nın en büyük enerji şirketlerinden biri), çelik üretiminde fosil yakıtsız bir süreci hedefleyen bir girişim olan HYBRIT'i (*Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology)* oluşturmak için bir araya gelmiştir.

Şaft tipi DRI teknolojisi kullanacak olan HYBRIT projesi, cevher bazlı çelik üretimi için gerekli olan metalurjik kömürü fosil yakıt kullanmadan üretilen elektrik ve hidrojenle değiştirmeyi hedeflemektedir (**Şekil 25**, **Şekil 26** ve **Şekil 27**). Proje, AB İnovasyon Fonu'ndan 143 milyon avro destek almıştır.

Girişim, neredeyse sıfıra yakın karbon ayak izi olan, dünyanın ilk fosilsiz çelik üretim teknolojisi olma iddiasındadır. Proje ile, İsveç'in CO_2 emisyonlarının %10 ve Finlandiya'nın ise %7 oranında azaltılması amaçlanmıştır.

77 "*2024 Sustainability Report Updates: JFE Holdings*", 2024. https://transitionasia.org/2024-sustainability-report-updates-jfe-holdings/

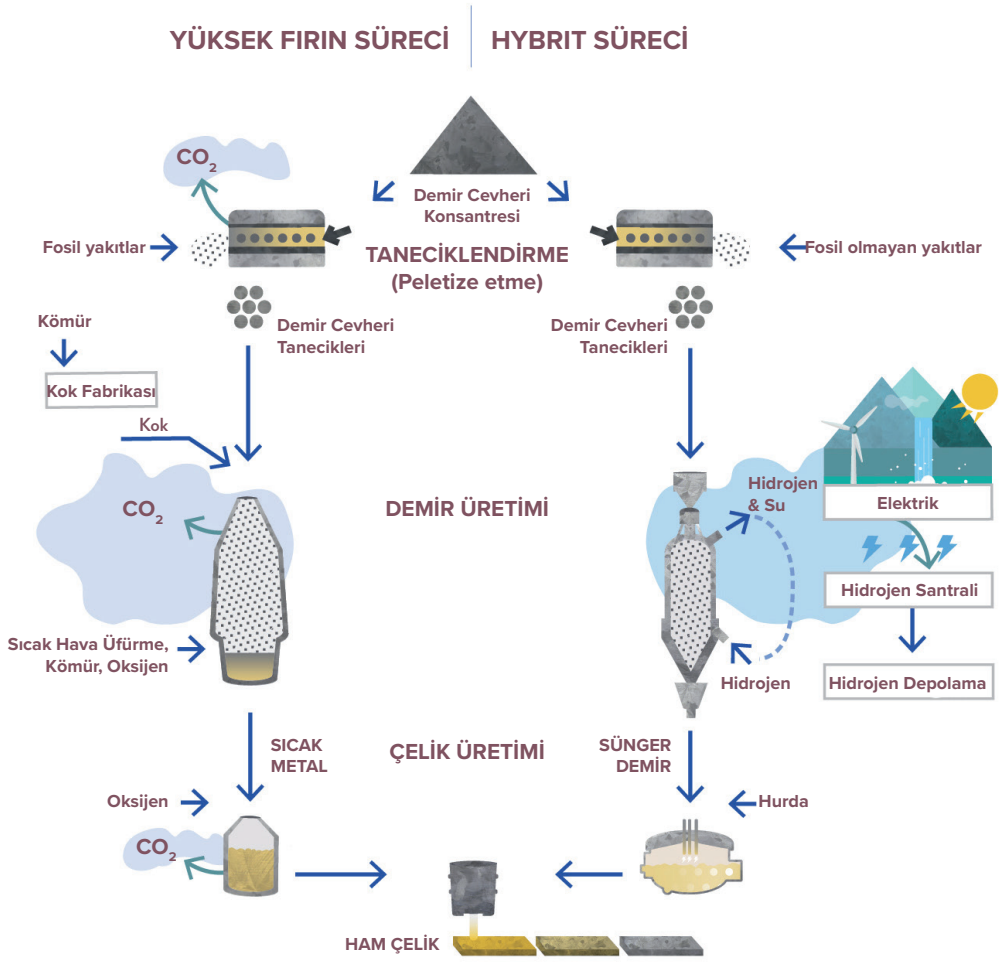
78 Paul Wurth, https://www.paulwurth.com/en/

79 "*The steel industry in 2050*", 2024. https://www.sms-group.com/insights/all-insights/the-steel-industry-in-2050

80 "*Fossil-free steel – a joint opportunity!*", https://www.hybritdevelopment.se/en/

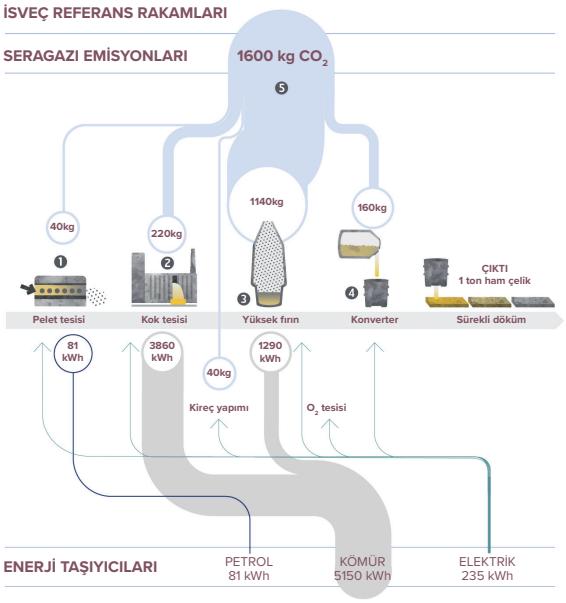
Fosil içermeyen çeliğe yönelik ilk adım, SSAB'nin Luleå'daki çelik üretim sahasında HYBRIT pilot tesisi inşası ile başlamıştır. 2020 yılında devreye alınan ve türünün ilk örneği olan tesis, yeşil hidrojen kullanarak demir cevherinin indirgenmesi sürecinin geliştirildiği yerdir. Luleå'daki pilot tesiste bugüne kadar 5.000 tondan fazla DRI üretmiştir. Mayıs 2021'de ise Gällivare'de endüstriyel ölçekte DRI için planlanan demonstrasyon tesisinin inşasına başlanmıştır. Bunlara ek olarak, 2022'de faaliyete girmiş olan hidrojen depolama amaçlı bir yer altı pilot tesisi bulunmaktadır.

Şekil 25 - BF-BOF üretim rotası ile Hybrit üretim teknolojisi rotası karşılaştırması[81]



81 HYBRIT projesi, Görsele ait çeviri: Arif Cem Gündoğan - https://www.iklimhaber.org/celik-uretiminde-sera-gazi-emisyonlarina-dur-diyebilecek-proje/

Şekil 26 - İsveç'teki BF-BOF üretim rotası referans CO_2 emisyonu değerleri[80]

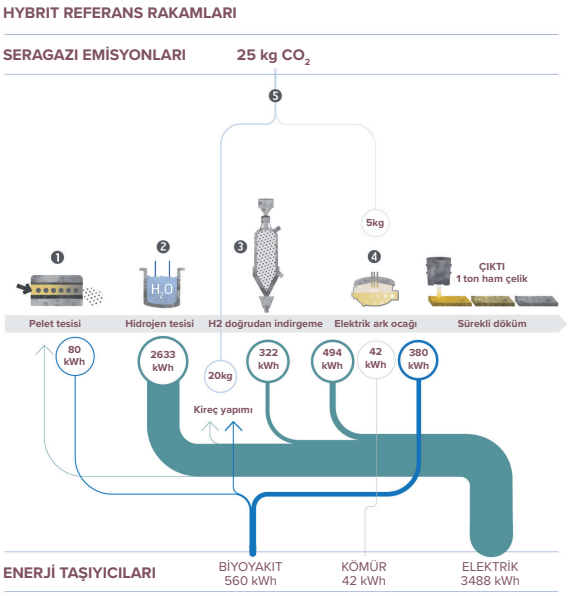


Rakamlar 1 ton ham çelik üretimi için İsveç'te ilgili ortalamalardır ve herhangi spesifik bir üretim tesisini veya sürecini yansıtmamaktadır.

Ağustos 2024 itibariyle, deneme tesisinin performans sonuçları yayımlanmıştır[82] ve pilot tesis aşamasından endüstriyel üretimin planlandığı bir sonraki aşamaya geçilmiştir. Proje takvimine göre, deneme tesisinin 2025 yılında tamamlanması öngörülmüştür. Bunun dışında, SSAB'nin Oxelösund'daki BF ünitesinin EAF'ye dönüştürülmesi planlanmaktadır. Böylece, SSAB›nin 2026 yılında ticari ölçekte cevher bazlı, sıfır emisyona yakın çelik üretebileceği öngörülmüştür.

82 DRI prosesi performans sonuçları, DRI kalitesi, hidrojen üretimi ve stoklanması vb. proses sonuçlarına ait veriler kamuoyu ile paylaşılmıştır. https://www.hybritdevelopment.se/en/media/hybrit-broschure-fossil-free-steel-production-ready-for-industrialisation/

Şekil 27 - HYBRIT üretim teknolojisi CO_2 emisyonu öngörüleri[80]



Rakamlar 1 ton ham çelik üretimi için HYBRIT'teki tahmin edilen ilgili ortalamalardır.

5.1.2.2 H_2 Green Steel Pilot projesi (STEGRA)[83]

2020'de kurulan H_2 Green Steel, Kuzey İsveç'teki Boden yakınlarında bulunan dünyanın ilk yenilenebilir hidrojen bazlı entegre çelik tesisi olma hedefiyle yola çıkmıştır.[84] Eylül 2024 itibarıyla, *H_2 Green Steel* girişimi isim değişikliğine gitmiş ve "***STEGRA***" adını almıştır.

Projede, Midrex teknolojisine dayalı pilot DRI tesisinde yüksek kaliteli cevherin sadece yeşil hidrojen kullanılarak indirgendiği ve üretilen DRI'nın EAF'yi beslediği bir ham çelik üretimi hedeflenmiştir. Ayrıca, nihai ürünün üretildiği haddehanelerde fosil gaz yerine elektrik enerjisi kullanımı ve indüksiyon destekli ısıtma uygulamaları da projedeki diğer karbonsuzlaşma yatırımlarıdır.

83 H_2 Green Steel (STEGRA). https://stegra.com/

84 İskandinav bölgesindeki bir diğer benzer proje için bakınız: Blastr Green Steel - https://www.blastr.no/



Toplam 300 hektarlık alana yayılan projenin ilk fazında 2025 yılına kadar yılda 2,5 Mt çelik üretimi planlanmıştır. Proje kapsamında, tesiste tüketilecek elektrik yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanacak ve 2.800 MW kapasiteli elektrolizörlerle yeşil hidrojen üretimi de yapılacaktır. Projede, geleneksel çelik üretimine kıyasla CO_2 emisyonlarının %95'e kadar azaltılacağı belirtilmektedir.

Tesis, üretilen çeliğin otomotiv çeliği kalitesinde olmasına imkan verecek proses ekipmanlarını da içerecek şekilde tasarlanmıştır.[85] 2024 itibarıyla, önde gelen Avrupalı otomobil üreticileri, H_2 Green Steel ile yüksek kaliteli çelik şerit tedariki konusunda uzun dönemli anlaşmalar imzalamış durumdadır.[86]

85 "*The world's first carbon-neutral steel plant*". https://www.sms-group.com/plants/projects/stegra

86 "*The use of Green Steel in the Automotive Industry*", 2024. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/ED18758-TE-Final-report_To-PUBLISH.pdf

5.1.2.3 HyREX teknolojisi

HyREX teknolojisi[64], Güney Koreli çelik üreticisi POSCO tarafından geliştirilen akışkan yataklı *FINEX* üretim rotasında indirgeyici olarak kullanılan toz kömürün hidrojen ile değiştirildiği, melter-gasifier ve EAF'nin yerine de elektrik izabe ocağının (Electrical Smelting Furnace - ESF) kullanıldığı bir pilot üretim rotasıdır (**Şekil 28**, ESF hakkında detaylı bilgi için bakınız **Kutu 12**).[87]

Bu üretim yönteminde, kömür yerine yeşil hidrojen ile indirgenen toz cevherden düşük karbonlu

87 Güney Koreli çelik üreticisi POSCO, HyREX teknolojisini ilk kez 2021 yılında düzenlenen HyIS Forum (Hybrid International Forum 2021) etkinliğinde tanıtmıştır. 2022'de ise POSCO ve Primetals Technologies, test tesisi kurmak üzere bir mutabakat zaptı imzalamıştır.

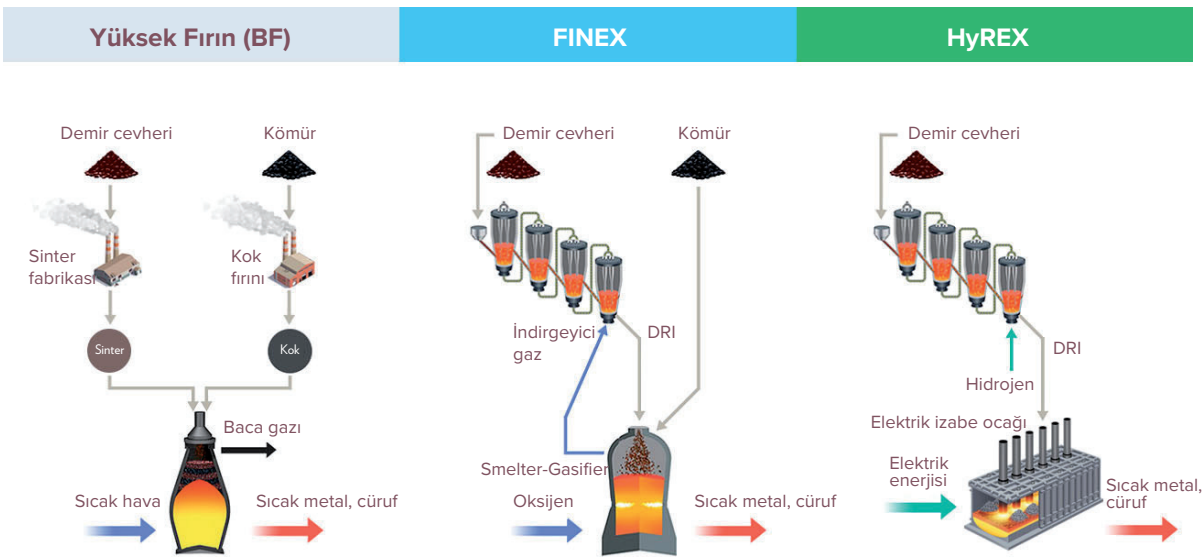
sıvı metal üretilmesi hedeflenmektedir.[88] *FINEX* teknolojisinde akışkan yataklı reaktörlerde toz cevherin %75'i CO ve %25'i H_2 tarafından indirgenmekteyken bu oran *HyREX* teknolojisinde %100'e ulaşmaktadır.[89]

HyREX teknolojisinin ticarileştirilmesi planı dahilinde, temel teknolojinin geliştirilmesinin 2025 yılına kadar tamamlanması, 2030'de Pohang'da yıllık 1 Mt üretime sahip bir deneme tesisi inşa edilmesi ve 2040 yılına kadar 3 Mt'lik bir ticari tesis inşa edilmesi hedeflenmektedir.

Son olarak da, tüm yüksek fırınların 2050 yılına kadar karbon nötr hedefine ulaşmak için yeşil H_2-DRI tesisleriyle değiştirmesi planlanmıştır.[90] Şirket, 2024 yılı içerisinde *HyREX* pilot tesisinde ilk sıcak metal üretiminin denemesini gerçekleştirmiştir.[91]

Ayrıca, Gwangyang tesisinde yıllık 2,5 Mt kapasiteli bir EAF inşasına da başlamıştır. 2025 yılı sonuna kadar tamamlanması planlanan tesisin 2026 yılında faaliyete geçmesi beklenmektedir.

Şekil 28 - FINEX çelik yapım prosesinden HyREX prosesine dönüşüm[92]



88 Bu yöntemde, peletleme işlemine ihtiyaç duyulmadığı için de CO_2 azaltımı sağlanır. Yüksek fırını besleyecek 1 ton kadar peletin üretiminde yaklaşık 50 - 150 kg CO_2 salınmaktadır.

89 *[Exploring Hydrogen with POSCO #3] The Future of Steel — Hydrogen-based Steelmaking*. 2021. http://product.posco.com/homepage/product/eng/jsp/news/s91w4000120v.jsp?SEQ=441

90 2050 yılına kadar, Güney Kore'nin sadece HyREX teknolojisini geliştirmek ve ticarileştirmek için en az 14,8 milyar ABD dolarına (20 trilyon KRW) ihtiyaç duyulacağı tahmin edilmektedir. Mevcut durumda, hükümetin 2023'ten 2025'e kadar onaylanan finansmanı ise yaklaşık 20 milyon ABD doları (26,9 milyar KRW) tutarındadır. Kaynak: "*Enabling the Green Steel Future - Unlocking Government-led Investment in Core Technology Development for Carbon Neutrality*", 2024. https://forourclimate.org/research/521

91 "*POSCO gears up for carbon-free steelmaking with hydrogen*", 2024. https://www.kedglobal.com/steel/newsView/ked202406260014

92 "*Breakthrough hydrogen reduction ironmaking technology with near-zero emission*", https://www.posco.co.kr/homepage/docs/eng7/jsp/hyrex/

KUTU 12 - ELEKTRİKLİ İZABE OCAĞI (ELECTRİCAL SMELTİNG FURNACE-ESF) TEKNOLOJİSİ

Doğrudan indirgenmiş demirle beslenen EAF'lerin özellikle cüruf miktarı ve prosesleri açısından yüksek kaliteli cevher gerektirmesi, üreticilerin EAF yerine düşük kalite cevherden üretilmiş DRI'ların da ergitilebileceği ESF veya Açık Banyo Ocağı (Open Bath Furnace - OBF) teknolojilerini tercih etmesine neden olmaktadır. Aşağıdaki bölümde ESF teknolojisine dair teknik detaylar özetlenmiştir.

ESF teknolojisi, demir dışı ve ferroalyaj endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.[93] Ham çelik üretimi için kullanımı ise henüz ticari seviyeye ulaşmamıştır.[94] Günümüzde, *Iron Dynamics* tarafından kullanılan döner ocaklı fırın (RHF)-ESF üretim teknolojisi, sıcak metal üreten tek aktif ticari ESF esaslı demir üretim işlemidir.[95] ESF'nin demir cevherlerinin işlenmesinde kullanıldığı uygulamalar da mevcuttur.[96] ESF teknolojisinin, BF'lerin yerini almak üzere çeşitli pilot projelerde kullanılacağı yakın zamanlarda kamuoyu ile paylaşılmıştır.[97] EAF'ye çok benzer şekilde, ESF prosesi de ergimiş metale karşı dirençli refrakter bir ocaktan oluşmaktadır.[98] ESF teknolojisinde EAF'lerdeki gibi ısıtma, ergitme ve gerekli izabe reaksiyonlarını elde etmek için elektrotlardan sağlanan elektrik gücü kullanılmaktadır. Ancak, tasarım ve operasyonel açıdan EAF'lerden büyük farklılıklar göstermektedir. ESF, birçok yönden bir EAF'den daha çok bir BF gibi çalışmaktadır (Şekil 29 ve Tablo 3).

ESF teknolojisinin demir ve çelik üretimine uygulanmasına yönelik ilginin son zamanlarda artması, mevcut DRI-EAF üretim rotası için gerekli olan düşük gang elementlere sahip demir cevherinin sınırlı bulunabilirliği ile ilgilidir. Yüksek gang elementlere sahip demir cevherlerinin DRI-EAF üretim rotasında kullanılması durumunda, cevherden gelen tüm gang malzemesi EAF'de çelik üretim cürufuyla sonuçlanır. Bu durum, cürufun yüksek hacmi ve demir içeriği nedeniyle verimsiz bir üretime (çok yüksek düzeyde enerji tüketimine ve verim kaybına) yol açmakta ve üreticiler tarafından tercih edilmemektedir. ESF, tam da bu noktada, düşük kalitedeki demir cevherinden elde edilen DRI ile sıcak metal üretimini mümkün kılma potansiyeli nedeniyle çeşitli üreticilerin ve teknoloji geliştiricilerin gündemine girmiştir.

93 Büyük cüruf hacimleri ile çalışabilme, daha yüksek sıcaklıklara uyum sağlama ve farklı ocak tipleri için özelleştirmesindeki çok yönlülüğü sayesinde ESF, FeNi, FeCr, FeSi, silikon metal ve PGM'ler (Platin Grubu Metalleri) üretmek için kullanılan baskın teknolojidir.

94 Geçtiğimiz on yıllarda Kobe'nin FASTMELT süreci ve Inco'nun Inmetco süreci de dahil olmak üzere çeşitli DRI-ESF demir üretim süreci geliştirilmiştir.

95 *Furnaces International, Haziran 2023*. https://furnaces-international.com/issues/june-2023

96 Buna, New Zealand Steel'de vanadyum titanyum cevherlerinin işlenmesi ve artık faaliyette olmayan Highveld Steel'de pik demir ve TiO2 açısından zengin cüruf üretilmesi dahildir.

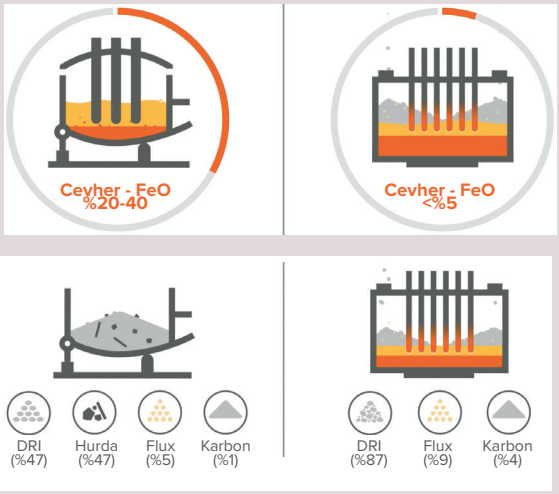
97 Tata Steel Netherlands ve Almanya'nın Thyssenkrupp ESF teknolojisine dayalı pilot projeler hayata geçirmiştir.

98 EAF ve ESF teknolojileri, William Siemens'in 1879'da Paris Expo'da hurda ergitme için kullandığı ilk elektrikli fırındaki 19. yüzyıla dayanan aynı kökleri paylaşır.

KUTU 12 - (DEVAM)

Geliştirilen pilot projelerin sahibi üreticiler, BF'leri aşama aşama ESF'lerle ikame ederek ve mevcut BOF'ları bu ocaklardan gelecek sıvı metal ile besleyerek yine aynı özel nitelikteki çelik üretimlerini sürdürmeyi hedeflemektedirler. ESF teknolojisinin, DRI-EAF yoluyla üretilmesi zor olan özel çelik sınıflarının (örneğin, düşük nitrojenli çelik) üretilmesi avantajına sahip olduğu ifade edilmiştir.[99]

Şekil 29 - EAF ve ESF proses detaylarının karşılaştırılması[100]



Tablo 3 - EAF ile ESF'nin karşılaştırılması[101]

Özellik	Tipik AC EAF	Tipik AC ESF
Çalışma biçimi	Kesikli besleme, ergitme prosesi ve döküm alma	Sürekli besleme ve ergitme prosesi ve yarı-sürekli döküm alma
Konfigürasyon	3 elektrotlu dairesel yapı	3 elektrotlu dairesel veya dikdörtgen yapı
Fırın tasarımı	Eğimli fırın ve döner çatı	Sabit fırın ve sabit çatı
Elektrot tipi	Pre-baked veya grafit	Soderberg
Refrakter ömrü	ömrü Kısa (ay)	Uzun (yıl-on yıllar)
Ocak güç yoğunluğu (Hearth power density)	çok yüksek (>3000 kW/m^2)	Orta ila Düşük (<600 kW/m^2)
Ocak alanı (Hearth area)	Küçük (-40 m^2)	Büyük (400+ m^2'ye kadar)
Hot heel (ton sıvı demir veya çelik başına)	Küçük (-50 t)	Büyük (-1000-1500 t)
Baca gazı çıkışı debisi	Yüksek (-200.000 Nm^3/saat)	Düşük (<20.000 Nm^3/saat)
Cüruf davranışı	Açık banyo köpüren cürufu	Uygulamaya bağlı olarak değişken

99 EAF'ye eklemeden önce sıcak metal ön işlem adımı (örneğin, defosforizasyon ve karbürizasyon), daha kazançlı çelik kalitelerinin üretimine de imkan verme potansiyeline sahiptir.

100 *Prospects - Electric Smelter Furnace*, https://www.youtube.com/watch?v=s3rgCP7AnHk&t

101 Furnaces International, Haziran 2023. https://furnaces-international.com/issues/june-2023

5.1.2.4 HYFOR ve Hy4Smelt

Akışkan yataklı HYFOR (*Hydrogen-Based Fine-Ore Reduction*) teknolojisi, Primetals Technologies, Avusturyalı çelik şirketi Voestalpine, Leoben Üniversitesi ve K1-MET tarafından 2021 sonundan bu yana Avusturya'nın Donawitz şehrinde pilot proje olarak deneme üretiminin devam ettiği hidrojen esaslı, HyREX benzeri, DRI üretimi geliştirme çalışmasıdır.

HYFOR pilot tesisinde, herhangi bir demir cevheri aglomerasyonu aşaması (sinterleme veya peletleme) gerektirmeyen bir üretim sürecinde toz cevherden (ultrafine[102]) DRI üretimi gerçekleştirilmektedir.[103] Tesiste, yenilenebilir enerjiden elde edilen %100 hidrojen veya alternatif olarak doğal gaz pirolizi veya geleneksel buhar reformerları gibi diğer gaz kaynaklarından H_2 açısından zengin gazların kullanılabileceği belirtilmiştir. Pilot teknolojinin, büyük boyutlardaki çelik tesislerinde kullanıma imkan verecek modüler bir tasarıma sahip olması planlanmıştır. Projenin bir sonraki adımında, HBI üretmek amacıyla HBI test tesisi de inşa edilecektir.

Yürütülen çalışmalar kapsamında, 2024 yılı içerisinde, Voestalpine şirketinin Donawitz'deki HYFOR pilot test tesisinde hidrojen kullanılarak toz demir cevherinin doğrudan indirgenmesiyle saf demir elde edilmiştir. Doğrudan indirgenen demir, şirketin Technikum Metallurgie (TechMet) araştırma tesisinde tümüyle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik kullanılarak bir miktar hurda ile beraber ergitilmiştir. Takip eden aşamada bu sıvı çelikten filmaşin üretimi yapılmıştır.

2024 Nisan ayında şirket tarafından yapılan açıklamada yapılan bu üretim, hidrojen kullanılarak elde edilen saf demir ile hurda kullanılarak yapılan ilk yüksek kaliteli "yeşil" filmaşin üretimi olarak duyurulmuştur.[104]

HYFOR teknolojisi ile elde edilen DRI'nın yenilenebilir kaynaklardan sağlanan elektrikle çalışacak Hy4Smelt adlı izabe ünitesinde ergitilmesiyle endüstriyel ölçeklerde üretim yapılması da şirketin planları arasındadır. Linz'de, sürekli bir proseste saatte 4 tona kadar pik demir üretebilecek Hy4Smelt pilot tesisi inşa edilecektir.

5.1.3 H_2-DRI-EAF üretim rotasında karşılaşılan sorunlar

H_2-DRI-EAF üretim rotasında karşılaşılan teknik sorunlar[105]

Karbonsuzlaşma sürecinin, demir metalurjistleri için en zorlu konusu, karbonun minimize edildiği bir çelik yapım prosesinde metalurjik açıdan ihtiyaç duyulan sonuçları elde etmek için nasıl bir proses tasarlanması gerekliliğidir.

Demir cevherinin hidrojen kullanılarak doğrudan indirgenmesi sonucu üretilen DRI'nın EAF'lerde kullanıldığı ham çelik üretimi prosesinin (H_2-DRI-EAF) metalurjik yönü de birçok sorunu barındırmaktadır. Buna karşın milyarca dolarlık yatırım kararları açıklanmış bir teknolojik dönü-

102 Cevher girdisi için partner kuruluşu cevher tedarikçisi Fortescue'nun Pilbara düşük kaliteli toz cevher ürünleri üzerinde çalışılmaktadır.

103 *HYFOR*, partikül boyutu 0,15 mm'den küçük demir cevheri konsantre ince taneciklerini ve hematit ve manyetit gibi çok çeşitli cevherleri işleyebilmektedir.

104 *greentec steel: Landmark melting at voestalpine site Donawitz - World's first high-quality "green" wire rod produced from hydrogen-reduced pure iron and scrap*
https://www.voestalpine.com/wiretechnology/en/company/news-events/quality-wire-rod-from-hydrogen-reduced-pure-iron-and-scrap/

105 Çelik üretiminin karbonsuzlaşmasında hammadde kaynaklı sınırlamalara dair **Ek 7**'de detaylar sunulmuştur.

şümün metalurjik prosesindeki güçlükler ile ilgili detaylar yeterince tartışılmaya başlanmamıştır (Örneğin ihtiyaç duyulacak hammaddelerin niteliği, endotermik reaksiyonların yönetilmesi, şaft boyutunun optimizasyonu, sadece H_2-DRI ya da hibrit H_2-NG-DRI tercih edilmesi, DRI'ye karbon eklenmesi, uygun refrakter ihtiyacı vb.).

Yukarıda özetlenen zorluklarla ilgili cevaplanmamış soruların fazlalığı bu konuda yeterince endüstriyel üretim yapılmamış olması nedeniyledir. Akışkan yataklı reaktör teknolojisine sahip *Circored* uygulaması ile Trinidad'daki North Star Texas H_2-DRI-EAF ve HYFOR pilot tesisi denemeleri haricinde ticari boyuta ulaşmış bir sıfıra yakın karbonlu çelik üretim teknolojisi mevcut değildir.

Klasik doğal gaz esaslı DRI uygulamasına kıyasla Yeşil-H_2-DRI kullanımının ilk sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Cürufta daha yüksek miktarda demir oksitlerin bulunması ve düşük metalik verimlilik riski, bunun gerektirdiği daha yüksek karbon enjeksiyonu zorunluluğu;
- Hammaddedeki karbon yerine, enjeksiyon ile karbon verme zorunluluğu nedeniyle artan karbon tüketimi ve bunun neden olacağı emisyon artışı (artacak karbon ihtiyacı nedeniyle alternatif fosil esaslı olmayan karbon kaynakları daha önemli hale gelecektir);
- Çelik banyosu hareketini, azot giderimini ve karbonsuzlaşmayı destekleyecek karbon kaynaması eksikliği ve bu nedenle farklı çelik banyosu hareketi sağlama tekniklerinin uygulanma zorunluluğu ve artacak olan proses süreleri ile ilgili yeni sorunlar;
- Artan proses süresi, düşen üretkenlik, yüksek demir oksit miktarı nedeniyle artacak elektrik, refrakter ve elektrot tüketimleri ve azot gideriminde yetersizlik;
- Kabarık cüruf prosesinin ve refrakter dostu cüruf kompozisyonunun sıfır karbonlu DRI ile elde edilmesindeki güçlükler;
- Daha düşük kimyasal enerji uygulaması nedeniyle düşecek CO_2 emisyonuna karşın daha yüksek elektrik tüketimi ve buna bağlı CO_2 emisyonu artışı;
- Hem hidrojen üretimi için hem de EAF prosesinde artacak elektrik tüketiminin yenilenebilir elektrik kaynakları ile karşılanma zorunluluğu nedeniyle artacak yenilenebilir elektrik üretimi ihtiyacı;
- Daha yüksek demir içerikli cevher kullanma zorunluluğunun artması;
- Mevcut uygulamalarda fosil yakıttan elde edilen DRI, karbürizasyon reaksiyonu nedeniyle bir miktar karbon içerir. DRI'de karbon bulunması durumunda, demirin ergime noktasını düşürülerek ergime daha kolay hale gelmektedir. Öte yandan, %100 hidrojen kullanılarak üretilen DRI hiç karbon içermez ve bu nedenle de ergitilmesi daha yüksek miktarda enerji gerektirir.

Yukarıda söz edilen metalurjik güçlükler nedeniyle, tümüyle hidrojen kullanan Hidrojen-DRI üretim proseslerinde %0,5-2,0 arasında karbon eklemek için 0,34-1,30 GJ/ton DRI değerinde doğal gaz enjekte edilmesi bir seçenektir. Kuşkusuz, yapılan bu enjeksiyon da belirli bir karbon emisyonuna neden olacaktır. Bu sorunlara rağmen, termodinamik modellemelerle, yeni proses tercihleri ve uygulama teknikleri ile H_2-DRI-EAF kullanımının optimize edilmesinin mümkün olduğu söylenebilir.

HyREX[106], *H_2DRI*[107], *Hybrit*[108], *HYFOR*[109] ve *Circored*[110] vb. demir cevherinin indirgenmesinde hidrojen kullanan birincil çelik üretim proseslerinin ikinci aşaması olan sıvı çelik üretimi işlemi için yaygın metalurjik fırınların EAF, OBF ve ESF olması beklenmektedir. OBF ve ESF, düşük kalite demir cevherinin neden olacağı yüksek cüruf miktarının daha kolay yönetilebileceği ocaklar olması nedeniyle BOF'ları devrede tutmak isteyen tesisler için öne çıkan seçenek olmaktadır. ThyssenKrupp ve POSCO çelik şirketleri bu tercihi yapmışlardır.[111]

Tüm bu yeni proseslerin az veya sıfır karbonlu olması, metalurjik açıdan en önemli zorluğu teşkil etmektedir. Bu nedenle önümüzdeki süreç içerisinde fosil esaslı olmayan karbon kaynaklarının optimize edilmiş çelik yapım ocaklarında kullanılmaya devam etmesi beklenmektedir.

Emisyon nötr alternatif karbon kaynakları başlangıç olarak umut verici seçenekler olsa da bulunabilirlik ve bu kaynakların üretim zincirinin diğer aşamalarının neden olacağı çevre etkileri nedeniyle sorunlu olabileceği akılda tutulmalıdır.

106 "*Breakthrough hydrogen reduction ironmaking technology with near-zero emission*". https://www.posco.co.kr/homepage/docs/eng7/jsp/hyrex/

107 "*Feasibility study looking at hydrogen direct reduction of iron – Pilot furnace and steelmaking*". https://www.mpiuk.com/research-project-h2dri.htm

108 "*Fossil-free steel – a joint opportunity!*". https://www.hybritdevelopment.se/en/

109 "*HYFOR – HYdrogen-based Fine-Ore Reduction*", 2022. https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e592/e592070.pdf

110 Circored™. https://www.metso.com/portfolio/circored-hydrogen-based-reduction/

111 ThyssenKrupp'un inşa halindeki ve 2026'da ilk aşaması devreye girecek olan 2.5 Mt/yıl kapasiteli ilk H_2-DRI projesinde ESF/OBF teknolojisi kullanılacaktır. ThyssenKrupp bu tercihinde, yüksek kaliteli demir cevheri arzındaki sorunlar ve BOF'ları hem yatırım maliyeti hem de metalurjik gerekçelerle devrede tutma isteği nedeniyle H_2-DRI çıktısı sıcak ürünün OBF'lerde sıvı metal haline dönüştürülüp mevcut BOF'larda sıvı çelik haline dönüştürüleceğini açıklamıştır.

DRI üretiminde indirgeyici olarak doğal gaz yerine hidrojen kullanılması emisyonları azaltma açısından akla ilk gelen seçenek olsa da çelik yapım prosesinde neden olacağı yeni metalurjik sorunlar, yeşil hidrojen kullanılmaması durumunda emisyon değerleri açısından hiçbir katkısının olmaması, ihtiyaç duyulan teknolojik altyapının yatırım maliyetinin ve özellikle elektroliz ile hidrojen üretiminin yatırım ve üretim maliyetinin mevcut teknolojilerle çok yüksek olması, bu seçeneğin önündeki en önemli sorunlardır.

Çelik yapımında kullanılacak hidrojenin üretim maliyeti sorunu ve yenilenebilir enerji altyapı ihtiyacı

Karbonsuzlaşması görece daha güç olan sektörlerin üretim süreçlerindeki zorlu dönüşümün hidrojenin kullanılması ile mümkün olacağına dair dünya genelinde hakim olan bakış açısı ülkemizde de yaygınlık kazanmaktadır. Oysa hidrojenin, üretim prosesi ve bu proseslerin emisyon değerine göre farklı türleri ve bu türlerin farklı maliyetleri olduğu gözden kaçmaktadır.

Mevcut durumda, hidrojen üretim prosesleri arasında en maliyetli olanı suyun yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik kullanılarak elektrolizi ile yapılan yeşil hidrojen üretimidir.

Bir önceki bölümde özetlenen teknik güçlükler dışında çelik yapımında kullanılacak yeşil hidrojenin üretim, iletim ve depolama maliyetlerinin olağanüstü düzeyde yüksek olması en temel zorluk olarak kabul görmüştür.

H_2 üretim maliyetinin %80'inin enerji kaynaklı olduğu hesaplanmıştır. Mevcut durumdaki elektrik

ve doğal gaz fiyatları dikkate alındığında, doğal gazdan buhar-metan reformasyonu ile elde edilen hidrojenin birim fiyatı, şebeke elektriği (85-95 ABD doları/MWh) kullanılarak yapılan suyun elektrolizi elde edilen hidrojenden 4-5 kat daha ucuz olmaktadır (**Kutu 13**).

Çelik üretiminde yeşil hidrojen kullanımının yaygınlaşmasında, elektrik fiyatları, CO_2 vergisi fiyatları, nihai üründeki maliyet artışının satış fiyatlarına yansıtılabilme oranları, Yeşil Prim (Green Premium) uygulamaları, ülke elektrik şebekesinde yenilenebilir kaynakların oranı ve ilk yatırım maliyetleri temel parametreler olacaktır.

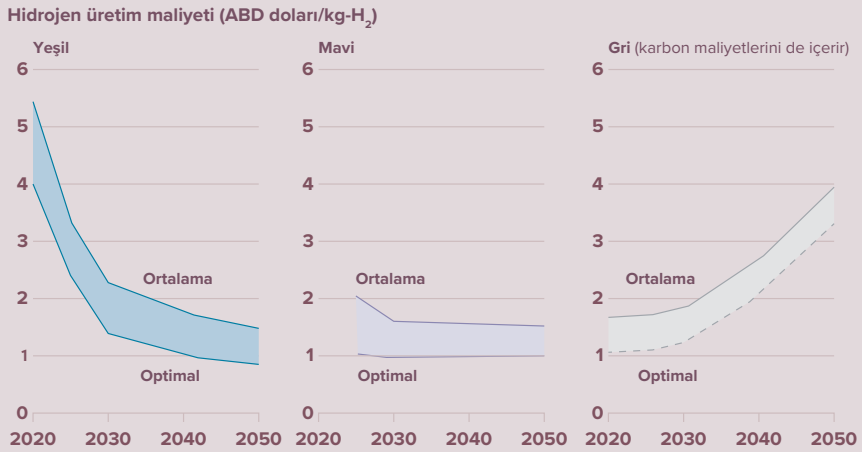
KUTU 13 - HİDROJEN ÜRETİMİ FİYAT TAHMİNLERİ, 2020-2050 DÖNEMİ

IEA'nın *2050 Net Sıfır Senaryosunda* güneş enerjisi kaynaklı elektrik kullanan elektrolitik hidrojenin üretim maliyetlerinin, Afrika, Avustralya, Şili, Çin ve Orta Doğu gibi bölgelerde 2030 yılına kadar 1,6 ABD doları/kg-H_2'ye düşebileceği ifade edilmiştir. Büyük ölçekli rüzgar kaynaklarına sahip bölgelerde ise hidrojenin seviyelendirilmiş maliyetinin Kuzeybatı Avrupa bölgesinde 2,1 ABD doları/kg-H_2'nin ve ABD'de 2,3 ABD doları/kg-H_2'nin altına düşebileceği tahmin edilmektedir.

IRENA'nın 2021 tarihli bir çalışmasına göre bölgeden bölgeye değişiklik göstermekle birlikte elektriğin şebekeden sağlandığı durumda yeşil hidrojen üretiminin 4-6 ABD doları/kg-H_2 gibi bir maliyete sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu rakam gri hidrojenin birim fiyatının 2-3 katıdır.[112]

2050 yılına doğru yeşil hidrojenin ortalama fiyatının 2 ABD doları/kg-H_2 değerinin altına düşeceği beklenmektedir (**Şekil 30**).

Şekil 30 - H_2 üretim maliyeti tahminleri[113]



112 "*Making The Breakthrough - Green hydrogen policies and technology costs*", 2021. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf

113 "*Five charts on hydrogen's role in a net-zero future*", 2022. "https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/five-charts-on-hydrogens-role-in-a-net-zero-future

Yeşil hidrojen üretiminde ihtiyaç duyulan yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik

Çelik sektöründe hidrojen esaslı karbonsuzlaşma süreçlerinin temel meselelerinden biri yenilenebilir kaynaklardan üretilmiş elektriğin arzı ve maliyetidir. Bu konuda atılacak adımlar birçok prosesin endüstriyel olarak önünü açacaktır.

Kutu 14'te yeşil hidrojen üretiminde ve Yeşil-H_2-DRI üretim rotasındaki ihtiyaç duyulacak yenilenebilir elektrik ihtiyacı miktarlarına ilişkin bilgiler sunulmuştur.

KUTU 14 - HİDROJEN ÜRETİMİNDE VE YEŞİL-H_2-DRI ÜRETİM ROTASINDAKİ YENİLENEBİLİR ELEKTRİK İHTİYACI

Mevcut teknolojilerle, elektroliz yoluyla yeşil H_2 üretimi için 50-80 kWh/kg-H_2 yenilenebilir elektrik ihtiyacı öngörülmüştür. Bu rakamla birlikte ark ocağında tüketilecek elektrik de hesaba katıldığında H_2-DRI-EAF üretim rotasında üretilen her bir ton sıvı çelik başına yaklaşık 3,5 MWh yenilenebilir kaynaklardan üretilmiş elektrik gerekecektir. Bu rakam, BF'lerdeki 4,2 MWh/ton sıvı metal olan enerji ihtiyacından düşük olmasına rağmen azımsanmayacak bir düzeydedir.[114]

Özellikle BF-BOF prosesine alternatif olarak düşünülen Yeşil-H_2-DRI yatırımlarının ortalama 2-3 Mt/yıl üretim kapasitesinde olması beklendiği gözetildiğinde yatırım finansman ihtiyacını ciddi boyutlara ulaştığı görülmektedir.[115]

Avrupa Parlamentosu tarafından hazırlanan raporda, AB çelik endüstrisinin %60'ının (yaklaşık 100 Mt üretimin) H_2 esaslı üretime dönüştürmesi için yapılacak yatırımların (elektrolizörler, yenilenebilir enerji kaynakları ve tesislerde yapılacak diğer yatırımlar) 180 milyar avronun üzerinde olacağı hesaplanmıştır.

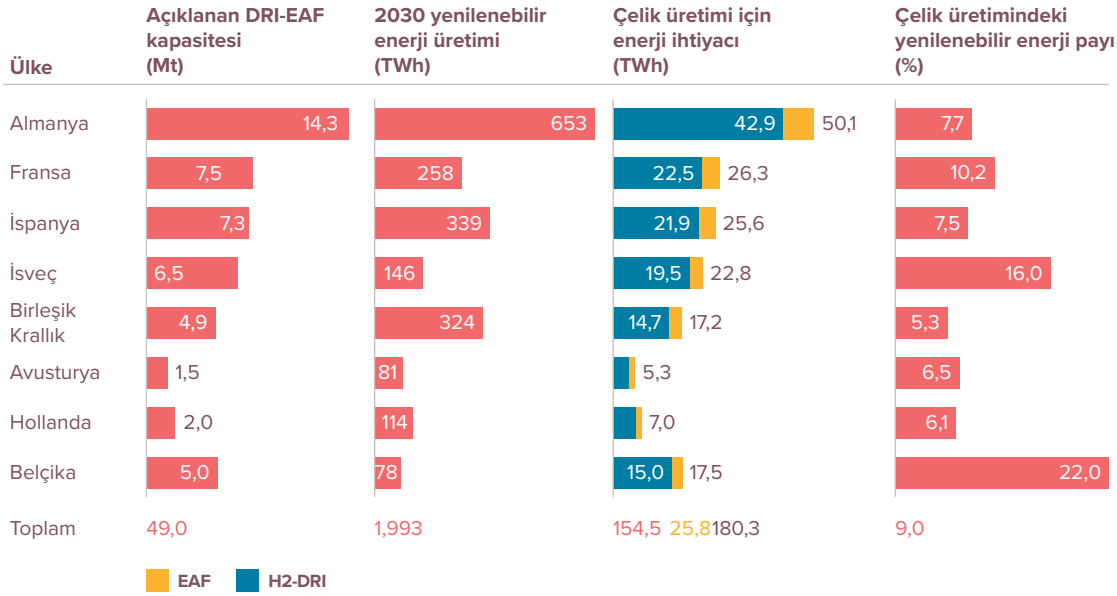
Bu üretimi gerçekleştirmek için 60 GW elektroliz kapasitesi ve yıllık 300 TWh yenilenebilir elektrik ihtiyacı olacağı tahmin edilmiştir. Söz konusu yenilenebilir elektrik ihtiyacı Türkiye'nin 2023 toplam yenilenebilir elektrik üretiminin iki katından fazladır.

Şekil 31'de AB ülkelerinde yeşil hidrojene dayalı çelik üretimi için gerekli yenilenebilir enerji ihtiyacına dair bilgileri özetlemektedir.

114 The 2021 AIST Howe Memorial Lecture – "Why Both Hydrogen and Carbon Are Key for Net-Zero Steelmaking", Carl De Maré, Iron & Steel Technology

115 Yenilenebilir kaynaklardan yeşil hidrojen elde edilmesi dahil olmak üzere, yıllık 1 Mt kapasiteli H_2-DRI yatırımının maliyeti yaklaşık 0,8-1,0 milyar avro olarak hesaplanmıştır.

Şekil 31 - Çelik sektöründe DRI-EAF rotasında kullanılacak hidrojen için 2030 yılında ihtiyaç duyulacak yenilenebilir enerji miktarı[116]



5.2 DEMİR CEVHERİ ELEKTROLİZİ İLE ÜRETİM

Yeşil hidrojenin indirgeyici olarak kullanıldığı yenilikçi teknolojiler dışında demir cevherinin elektrolizi yoluyla yapılacak çelik üretimi bir diğer öne çıkan pilot ölçekli karbonsuzlaşma seçeneğidir. Demir oksitlerin elektrolizi, doğrudan elektrik akımı kullanılarak metalik demir ve oksijen eldesi ile sonuçlanan elektro-kimyasal bir işlemdir.

Özellikle birincil alüminyum üretiminde yaygın olarak kullanılan metal oksit elektrolizi uygulaması demir metalürjisi için yenidir. Sıvı demirin, karbon kullanılmadan, sadece yeşil elektrik ile yapılan elektroliz sonucu üretilmesi ticari düzeyde endüstriyelleşmeden önce birçok adım atılması gereklidir.

Halihazırda pilot ölçekteki uygulamalarda, yüksek veya düşük sıcaklık koşullarında demir cevherinin doğrudan elektrolizi yapılabilmektedir:

- Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen ergiyik oksit elektrolizi (MOE) teknolojisi[117] (**Şekil 32**)
- Düşük sıcaklıkta alkali temelli elektroliz: *ULCOWİN*[118] (ULCOS projesi[119]) , *SIDERWIN*[120], *Volteron* ve *Electra*.

116 "*Closing Europe's green-metallics gap*", 2022. https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/closing-europes-green-metallics-gap

117 Boston Metalics MOE Teknolojisi - https://www.bostonmetal.com/wp-content/uploads/2022/10/Boston-Metal-FactSheet-20221026.pdf

118 Technology Factsheet, TNO. https://energy.nl/media/data/Ulcowin-Technology-Factsheet_080920.pdf

119 "*Low Emission Steelmaking*", 2016. https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-016-0065-5

120 SIDERWIN - Development of new methodologieS for InDustrial CO_2-freE steel pRoduction by electroWINning (2017-2023)

5.2.1 Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen metal oksit elektrolizi

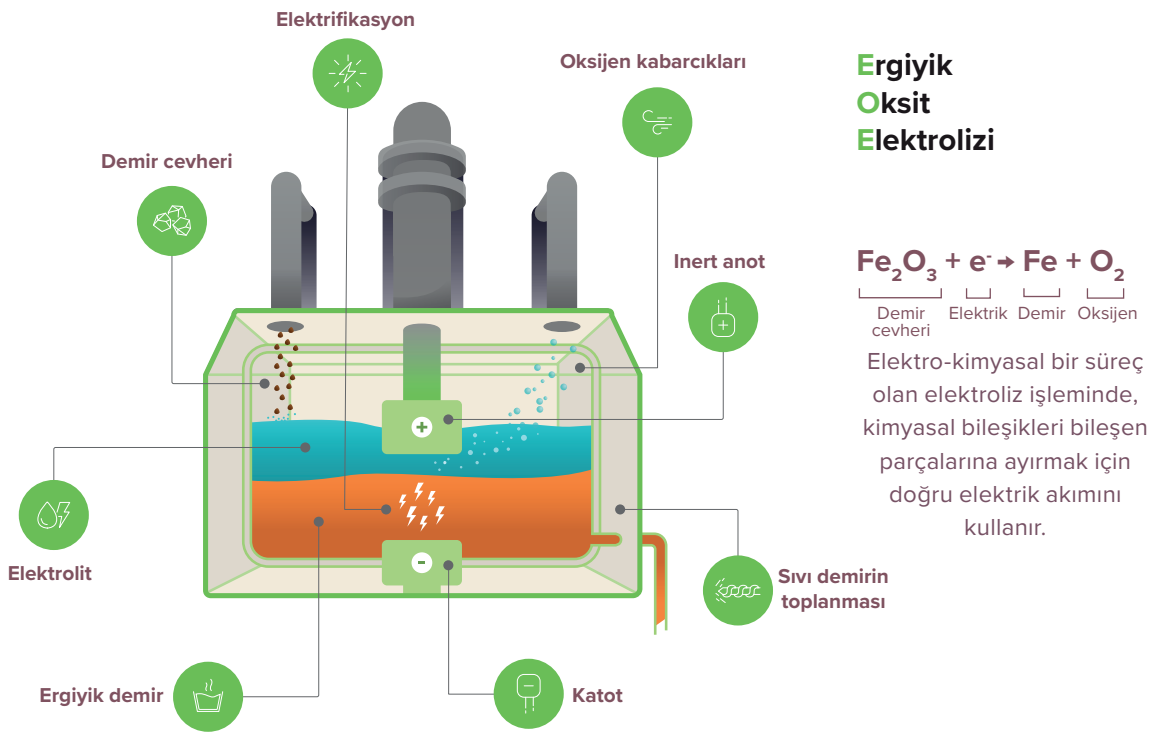
Ergiyik oksit elektrolizi (MOE)

Demir oksitlerin elektroliz yoluyla işleme alındığı çelik üretimi rotası farklı fırın/reaktör teknolojilerinin geliştirilmesini gerektirecektir. Bunlardan biri olan Boston Metallics şirketi patentli MOE teknolojisi, tek adımlı bir süreçle farklı zenginlikteki demir cevherini çeliğe dönüştürme ve yenilenebilir kaynaklı elektrik enerjisi kullanıldığı durumda da birincil ham çelik üretim sürecinin emisyon yoğunluğunu anlamlı bir şekilde azaltma iddiasındadır. Boston Metal şirketi, 2026 yılına kadar geliştirdikleri bu teknolojiyi ticarileştirmeyi hedeflemiştir.

Bu üretim rotasında büyük bir yolcu otobüsü büyüklüğündeki elektroliz hücrelerini kullanan modüler bir teknolojiden faydalanılmaktadır (Yıllık 1 Mt ham çelik üretim seviyelerine ulaşmak için bu modüler hücrelerden yüzlercesine ihtiyaç olacaktır). İç sıcaklıkları 1.500-1.600°C'ye ulaşabilen bu hücrelerin içinde bir pilin içindekine benzer üç ana bileşen vardır: katot, elektrolit ve anot (**Şekil 32**).

Bu pilot teknolojide, hücre içerisindeki inert bir anot, demir cevheri içeren elektrolite daldırılır ve ardından sisteme doğrudan elektrik verilir. Hücre 1.600°C'ye kadar ısıtıldığında, elektronlar demir cevherindeki bağları ayırır. Bu işlem sonucunda elde edilen yüksek saflıktaki sıvı metal yeniden ısıtma gerektirmeden doğrudan pota metalurjisine gönderilebilmektedir.

Şekil 32 - Boston Metalics'e ait pilot ölçekli MOE teknolojisi[114]





Hücrenin katot kısmı ergiyik haldeki demiri oluşturmaktadır. Sisteme eklenen demir cevherinin ince taneler, peletler veya sinter halinde olmasından bağımsız olarak bu kısımda demir cevheri ergiyik hale gelir. Kütle ve yoğunlukça büyük olan ergiyik demir hücrenin dibine çöker ve zamanla bu kısımda birikir. Oluşan oksijen atık gaz (exhaust) olarak uzaklaştırılır. Hücreye demir cevheri eklendiğinde en alt kısımdaki ergiyik demir üzerinde bulunan elektrolit kısmı içerisinde demir cevheri çözünerek erir.

Elektrolit kısmı homojen yapıdadır. Homojen yapıdaki bu elektrolit, demir oksit ve daha kararlı olan diğer oksitlerin bir karışımı haline gelir (Silika, alümina, magnezyum, kalsiyum gibi demir cevherinde bulunan kirleticileri ve diğer kirleticileri içerir). Bu sistemde demir oksitler, demir ve oksijene dönüşürken diğer oksitler elektrolitte kalır ve cüruf halinde ayrılır. Böylece, cüruf ve gang elementlerinin elektrolitte biriktirildiği saf metal üretimi başarılmış olmaktadır.

Sistemin işlemesini sağlayan şey ise elektrik akımıdır. Diğer bir ifade ile alt kısımdaki katot (sıvı metal), elektrolit içinde bulunan ve de sistemin anahtarı olan bir anot teknolojisi üzerinden elektrik geçirilmesi oluşan direnç sayesinde sistem 1.600°C'ye kadar ısıtılarak en az kararlı olan oksitlerin indirgenmesi sağlanır. Sistemde oluşan metal, yüksek fırındaki işlemlere benzer bir şekilde bir veya iki günde bir, döküm deliğinden geçirilerek hücre dışına çıkarılır. Bu teknolojiyi önemli kılan unsur, yaygın bir biçimde kullanılan karbon esaslı alüminyum anot yerine demirin ergitildiği çalışma ortamında uzun süre yapısını koruyabilen ve sürecin çalışmasına izin veren metalik bir anot geliştirilmesidir.[121,122]

Proje, çeşitli sektörlerden birçok yatırımcının ve çelik üreticilerinin desteğini almıştır.[123]

5.2.2 Düşük sıcaklıkta gerçekleşen metal oksit elektrolizi

ULCOWIN, SIDERWIN ve Volteron projeleri

Avrupa'nın en büyük çelik şirketi olan Lüksemburg merkezli ArcelorMittal[124], ilk olarak 2004 yılında geliştirilmeye başlanan *ULCOWIN* (electrowinning teknolojisi) adlı proses ile çelik üretiminde cevherin elektrolizi çalışmalarını uzunca bir süredir sürdürmektedir. Geliştirilen deneysel çalışmalarda demir oksitlerinin elektrolizi ile yaklaşık 100°C sıcaklıkta alkali bir elektrolit çözeltisinden bir akım geçirilerek oksijenin demir oksitlerden ayrılmasını sağlamaktadır. Bu işlem sonucu elde edilen metalik demir plakaların EAF'leri besleyecek kalitede olması amaçlanmıştır.

Takip eden ve şirketin ana yürütücüsü olduğu AB H2020 *SIDERWIN* projesi (2017-2023) ile pilot seviyede yürütülen çalışmaların teknolojik hazırlık seviyesi (TRL) yükseltilmiştir. Proje ile pilot teknolojinin TRL 6 seviyesinde doğrulanması amaçlamıştır.

121 "*Boston Metal wants green steel for all"*, 2022. https://www.mining-magazine.com/innovation/news/1437132/boston-metals-wants-green-steel-for-all

122 "*Decarbonizing steelmaking for a net-zero future*", https://www.bostonmetal.com/green-steel-solution/

123 Avrupalı çelik üreticisi ArcelorMittal de destekçileri arasındadır.

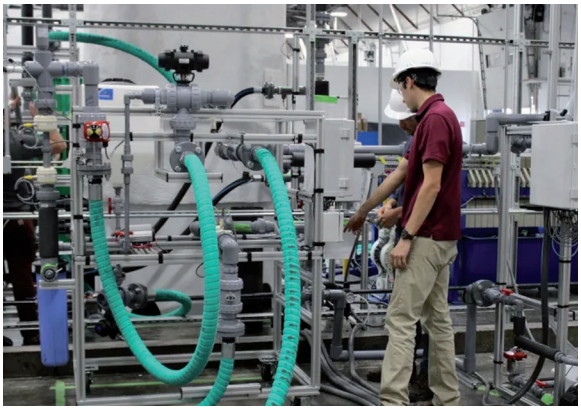
124 ArcelorMittal - https://corporate.arcelormittal.com/

2023 yılı içerisinde, ArcelorMittal, *John Cockerill*[125] teknoloji firmasının iş birliği ile, endüstriyel ölçekli düşük sıcaklıkta çalışması beklenen *Volteron* adlı pilot projesinin yatırımı kararını duyurmuştur.[126] *SIDERWIN*'den elde edilen deneyimin üzerine kurulan pilot ölçekli projenin ilk aşamasında hematit demir cevherinden yılda 40.000 ila 80.000 ton metalik demir levha üretilmesi planlanmıştır. *Volteron* tesisinin 2027'de üretime başlaması hedeflenmiştir. Teknolojinin kendini bu ölçekte kanıtlamasının ardından, tesisin yıllık kapasitesinin 0,3 ila 1 Mt büyüklüğe çıkarılması amaçlanmaktadır.[127]

Electra[128]

ABD'li start-up *Electra*, EAF'leri hurda ile beraber besleyecek şekilde metalik demir üretmek üzere düşük sıcaklıkta elektrolize dayalı yenilikçi teknoloji geliştirmek için 2024 yılında ABD'de Colorado, Boulder'da pilot tesis kurulumunu tamamlamıştır.

Deneysel çalışmalarda, 60°C sıcaklıkta gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon sonucu çeşitli boyutlarda (2022'de 400 cm^2 büyüklüğünde levha şeklinde, yaklaşık 4 kg) metalik demir elde edilmiştir.[129] Kurulan yeni pilot projede elde edilen ilerlemeler sonucunda, 1 m^2'lik boyutta demir levhaların (yaklaşık 80 kg) ticari üretim seviyesine çıkarılması hedeflenmiştir.[130]



Ticari tesisin birinci aşamasının yılda 50.000 ton üretim kapasitesinde olması ve 2028'de hazır hale gelmesi planlanmıştır. Şirket, 2030 yılı sonunda tek bir lokasyonda 1 Mt kapasiteye erişmeyi amaçlamaktadır.[131]

Pilot proje, ABD'li çelik şirketi Nucor tarafından da desteklenmektedir.

5.3 HİDROJEN PLAZMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİM

Hidrojen plazma yöntemi ile doğrudan çelik üretimi, demir cevheri aglomerasyon işlemlerine ihtiyaç duymadan termal hidrojen plazması kullanılarak cevherin sıvı demire dönüştürülmesini sağlayan bir teknolojidir.

Termal hidrojen plazma indirgemesi (HPR) sırasında, elektrot ile demir cevheri arasında bir plazma ark bölgesi oluşturulur. Bu bölgede, cevher hem moleküler hem de plazma hallerinde

125 John Cockerill Group - https://johncockerill.com/en/

126 ArcelorMittal ve John Cockerill'e ek olarak, proje ortakları arasında EDF, Tecnalia, Quantis, Aveiro Üniversitesi, Atina Ulusal Teknik Üniversitesi, Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Dynergie, Recoy, CFD Numerics ve Mytilineos yer almaktadır.

127 "*ArcelorMittal and John Cockerill announce plans to develop world's first industrial scale low temperature, iron electrolysis plant*", 2023. https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-and-john-cockerill-announce-plans-to-develop-world-s-first-industrial-scale-low-temperature-iron-electrolysis-plant

128 "*Clean Iron for Green Steel*". https://www.electra.earth/

129 Electra'nın pilot teknolojisi, istenmeyen silikayı azaltacak bir asidik ortamda demir cevherini eloktrolize tabi tutar. Bu pilot üretim tipinde, reaksiyonlar sırasında pH-asitlik seviyesi ayarlamaları ile fosfor ve alümina kirleticilerin toplanıp yeni yan ticari ürünlere dönüştürülmesine olanak sağlanacağı ifade edilmektedir. İstenmeyen malzemeleri uzaklaştırma özelliği ile, Electra pilot teknolojisinin düşük kaliteli ve yüksek safsızlık seviyelerine sahip demir cevheri ile de çalışabileceği belirtilmiştir.

130 "*Pilot Plant*", 2023. https://www.electra.earth/pilot-plant/

131 "*Electra pilot to disrupt iron-making*", 2024. https://www.skarnassociates.com/insights/electra-disrupt-iron-making

ergitilebilir ve hidrojen tarafından indirgenebilir. Hidrojenin plazma halindeki indirgeme potansiyeli, gaz halindeki moleküler hidrojene kıyasla yaklaşık 15 kat daha yüksektir.

Demir cevherinin indirgenmesinde hidrojen plazması teknolojisi geliştirme çabalarına aşağıdakiler örnek verilebilir:

- - SuSteel projesi[132] - Voestalpine;
- - H_2PlasmaRed projesi[133] - Oulu Üniversitesi.

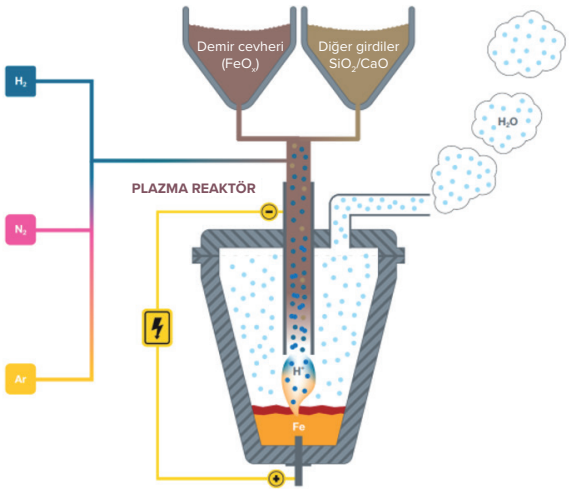
SuSteel projesi (Voestalpine) [134]

HPR teknolojisinin kullanıldığı SuSteel (Sustainable Steel Production) pilot projesi, K1-MET[135] tarafından yürütülmektedir. Projede, Voestalpine Stahl GmbH, Voestalpine Stahl Donawitz GmbH ve Montanuniversität Leoben ortaklar olarak yer almıştır. Pilot tesis, Donawitz'te inşa edilmektedir.

Projede, doğrudan akımla çalışan EAF formundaki tesiste hidrojen plazma teknolojisi kullanılarak tek bir işlem adımında (pik demir üretim aşaması atlanarak) ham çeliğin karbon nötr üretimi üzerine araştırmalar yapılması planlanmıştır.[136] Pilot uygulamada, hidrojen, demir cevheri için indirgeyici madde olarak kullanılırken plazma hali de metalurjik demirin ergitilmesi için gerekli ısı enerjisini sağlamaktadır (**Şekil 33**).

Yürütülen çalışmalarda, Montanuniversitaet Leoben'de yaklaşık 100 gr. ergiyik metal kapasitesine sahip ilk laboratuvar ölçekli deneme tesisi kurulup üretim yapılmıştır. Elde edilen bilgiler, yaklaşık 90 kg ergitme kapasitesine sahip bir reaktör ölçeğine (pilot ölçek) dönüştürülmüştür. Bu araştırmanın odak noktasının, hidrojen plazmasının daha büyük ölçekte üretimi ve devamlılığı, hidrojenin refrakter astar üzerindeki etkisi ve proses ve işletme parametreleri hakkındaki ayrıntıların ortaya konması olduğu belirtilmiştir.

Şekil 33 - SuSteel projesi pilot tesis akış diyagramı



132 SuSteel, 2023 yılına kadar Avusturya Araştırma Teşvik Ajansı (FFG) aracılığıyla K1-MET tarafından finanse edilen bir COMET projesidir. https://www.k1-met.com/non_comet/susteel

133 Oulu Üniversitesi tarafından yönetilen 2024'ten 2028'e kadar sürecek uzun vadeli bir proje olan H_2PlasmaRed, mevcut bir DC elektrik ark ocağını hidrojen plazması kullanan pilot ölçekli (5 tonluk ölçekli) bir çelik tesisine dönüştürerek HPSR'yi TRL5'ten TRL7'ye ölçeklendirmeye çalışıyor.

134 "*Project SuSteel Sustainable steel production utilising hydrogen*", https://www.k1-met.com/en/non_comet/susteel

135 K1-MET, Avusturya'da bulunan demir ve demir dışı metalurji alanında önde gelen ve uluslararası alanda tanınmış metalurjik yeterlilik merkezlerinden biridir. https://www.k1-met.com/en/

136 Hidrojen plazması yöntemiyle DC termal plazma indirgemesi üzerine araştırma, sıklıkla Hidrojen Plazma İzabe İndirgemesi (HPSR) olarak adlandırılır, ULCOS projesinin bir parçası olarak Montanuniversität Leoben'de ve ayrıca Max-Planck-Institutes für Eisenforschung GmbH (MPIE) ve K1-MET GmbH'de kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır.

5.4 KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİNİN ÇELİK ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Geleneksel çelik üretiminde mevcut teknolojilerin doğası ve işletme biçimleri gereği yatırım ömürleri çok uzundur. Örneğin, BF'lerde bir refrakter astar ile on yıllarca üretim yapmak mümkündür. 1995 sonrası çelik üretim kapasitesi yeni BF yatırımları ile artan Çin ve Hindistan'ın etkisiyle 2021 sonu dünya BF ortalama yaşı 15 civarındadır.[137] Görece bu kadar genç bir endüstrinin erken emekliye ayrılacak olmasının ekonomik olarak büyük sorunlar yaratması beklenmektedir.

Bu sorunları önleme iddiası ile -mevcut teknolojik yapının fosil yakıt alternatifleri ile kullanılır hale getirilmesi seçenekleri üzerinde çalışmalarına ek olarak- şirket sahiplerinin entegre demir çelik tesislerindeki üretim sürecinin sıfır karbon hedefini yerine getirmede umut bağladığı teknolojik ilerleme CCS teknolojilerinin geliştirilmesi olmuştur.

Uzunca bir süredir yapılan çalışmalara karşın, henüz umut vaat eden düşük karbon çelik üretimini sağlayacak ekonomik bir CCS çözümü geliştirilememiştir. Buna karşın IEA senaryolarında süreç içinde geliştirilecek teknolojiler ile 2050'de yılda 0,7 Gt CO_2'in yakalanıp depolanması öngörülmektedir.[138]

Çelik üretim sektöründeki CCS uygulamasının endüstriyel boyuttaki ilk örneği Abu Dhabi'de bulunan Emirates Steel tarafından işletilen DRI-EAF tesisinde (Al Reyadah CCUS facility) 2015 yılında devreye alınmıştır. Tesisin baca gazındaki CO_2 yakalanıp yine tesis yakınındaki petrol sahalarında geliştirilmiş petrol geri kazanımı (EOR) amacıyla kuyulara enjekte edilmektedir. 2023 yılında, tesis emisyonlarının sadece %27'si yakalanmış ve petrol üretimi için kuyulara gömülmüştür.[139]

2024 yılı itibariyle herhangi bir entegre tesiste BF emisyonlarını yakalamaya yönelik endüstriyel boyutta bir uygulama henüz hayata geçmemiştir. Bu sonucun ortaya çıkması başta teknik güçlükler nedeniyle olsa da ortaya çıkan yatırım ve operasyon maliyetlerinin astronomik boyutları da temel bir zorluktur.[140]

Bu teknolojinin enerji tüketim yoğunluğunda kaydedilecek ilerlemeyi, teknoloji gelişim sürecinin seyri kadar ulusal ve uluslararası düzenlemeler de belirleyecektir. Hangi konsantrasyonda gazın, hangi konsantrasyona ininceye kadar işlem göreceği ve depolama teknolojisinin gelişim seyri belirleyecektir.

IEA'nın 2021 tarihli *2050'ye Kadar Net Sıfır: Küresel Enerji Sektörü için Bir Yol Haritası* raporundaki net sıfır senaryosunda, karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) donanımlı proseslerin 2050'de küresel birincil çelik üretiminin %53'ünü oluşturacağı tahmin edilmekteydi. Ancak, IEA'nın net sıfır senaryosuna yönelik 2023 güncellemesinde bu oran düşürülerek, CCUS donanımlı proseslerin 2050'deki üretim payının %37 olacağı öngörülmüştür. Ayrıca, 2023 güncellemesinde hidrojen bazlı çelik üretiminin payına ilişkin de bir değişiklik yapılmıştır, 2021'deki %29 değeri %44'e yükseltilmiştir.

Kutu 15'te çelik sektöründe uygulanmakta olan çeşitli karbon yakalama pilot uygulamalarına dair bilgiler özetlenmiştir.

137 "*Lifetime and reinvestment cycles*", 2023. https://www.gem.wiki/Lifetime_and_reinvestment_cycles

138 "*An updated roadmap to Net Zero Emissions by 2050*", 2022. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/an-updated-roadmap-to-net-zero-emissions-by-2050

139 *Emirates Steel, Abu Dhabi Tesisi*, https://www.gem.wiki/GHC_Emirates_Steel_Industries_Abu_Dhabi_plant

140 Örnek olarak *ammonia scrubber* uygulamasının enerji ihtiyacı 3.2 Gj (890 Kwh)/ton-CO_2 düzeyindedir. Önümüzdeki 10 yılda, bu değerin 1.8 Gj/ton CO_2 düzeyine indirilmesi amaçlanmaktadır. *Ammonia scrubbing* dışında değişik sektörlerde uygulanan CCS'ler; fiziksel ve kimyasal seperasyonlar, membran teknolojileri, kısmi sıvılaştırma uygulamaları ve kısmen hidrojenin de içerildiği değişik prosesleri içerecek şekilde geliştirilmektedir.

KUTU 15 - KARBON YAKALAMA PROJELERİ

KM CDR karbon yakalama teknolojisi[141]

Çalışmaları devam eden karbon yakalama girişimlerinden; *Mitsubishi Heavy Industries Engineering* (MHIENG) şirketine[142] ait *KM CDR (Kansai Mitsubishi Carbon Dioxide Recovery Process)* pilot projesi, *amino scrubber* temelli yakalama teknolojisi ile toplanan CO_2 gazını yer altına enjekte etmekte veya diğer kimyasal ürünlerin üretiminde kullanabilmektedir. 2022 yılı içerisinde imzalanan finansman anlaşması ile ArcelorMittal, MHIENG, BHP ve Mitsubishi Development Pty Ltd, ArcelorMittal'in Belçika'nın Ghent kentindeki çelik tesisinde ve Kuzey Amerika'daki başka bir tesiste karbon yakalama ve kullanım ve/veya depolama teknolojilerini geliştirmek için girişimlerini başlatmıştır. KM CDR'ın 2030'lara kadar yaygınlaşması öngörülmektedir. Benzer teknoloji ile ilgili çalışmaların POSCO tarafından *FINEX* ve *COREX* proseslerine de uygulanması planlanmıştır.

Mevcut çelik yapım altyapısını kullanmaya izin vermesi CCS teknolojilerin büyük avantajıdır, ancak depolama hacminin büyüklüğü ve mevcut proseslerin karbon yakalama verimliliğinin düşük olması aşılması gereken sorunlardır. KM CDR'in, şimdilik sadece kömür santrallerinde uygulanmış olması ve çelik üretim tesislerinde yeni denenecek olması, toplanan ve dönüştürülen CO_2'nin karbon nötr bir sonucu sağlayamaması, mevcut teknolojilerin olağanüstü büyük alanlara ihtiyaç göstermesi, yatırım ve işletme maliyetleri en önemli sorunlar arasındadır.

Steelanol projesi[143]

ArcelorMittal firması, LanzaTech[144] teknoloji şirketinin geliştirdiği mikrobiyal fermantasyon prosesi ile CO_2-CO–H_2' yi etanol (*Steelanol*) veya diğer yakıtlara dönüştürmek için 2015 yılında başlayan Steelanol adlı bir H2020 projesini koordine etmektedir. ArcelorMittal Belçika Ghent tesislerinde çalışan pilot tesisin endüstriyel uygulamasında, ton çelik başına 200 kg etanol üretilmesi beklenmektedir. Bu yolla 400 kg-CO_2/ton çelik emisyonunun azaltılması mümkün olabileceği belirtilmiştir. Etanol, otomobillerde harmanlama yakıtı olarak akaryakıt ile beraber kullanılabilmektedir.

Endüstriyel olarak kullanılabilecek CO_2 ile, tutulması gereken CO_2 miktarları arasındaki fark şimdilik çok umut verici değildir. Ancak depolama yerine yakalanan CO_2'nin döngüsellik ilkesi ile başka bir ürüne dönüştürüleceği etanol üretimi gibi seçeneklerin uygulama potansiyeli daha yüksektir. Döngüsel karbon yakalama, gelecek açısından, depolama sorununu çözmesi ve üründen gelir elde edilmesi nedeniyle çekici görünmektedir.

Carbon2Chem projesi[145]

ThyssenKrupp çelik şirketinin pilot tesisi olarak çalışan *Carbon2Chem* prosesi, BF ve BOF baca gazlarından amonyak ve metanol sentezlemesi yapmaktadır. Öngörülere göre proje ile CO_2 emisyonu ton çelik başına 0,9 ton azaltılmaktadır. *Carbon2Chem* projesinde üretilen amonyak ve metanol için hidrojene ihtiyaç duyulmaktadır. Çelik üretimi sırasında baca gazlarından elde edilen hidrojen, amonyak sentezi için yeterliyken, metanol üretimi için ek hidrojene ihtiyaç gerekmektedir. İhtiyaç duyulan ek hidrojenin yeşil hidrojen olarak temin edilmesi planlanmaktadır.

141 "*CO_2 Capture Technology for Exhaust Gas KM CDR Process*", https://solutions.mhi.com/ccus/co$_2$-capture-technology-for-exhaust-gas-kmcdr-process

142 Mitsubishi Heavy Industries, https://www.mhi.com/

143 "*Steelanol recycles carbon into sustainable, advanced bio-ethanol*", http://www.steelanol.eu/en

144 "*Commercial Carbon Recycling with Biology*", https://lanzatech.com/

145 "*Carbon2Chem: when emissions become valuable substances*", https://www.thyssenkrupp.com/en/stories/carbon2chem-when-emissions-become-valuable-substances

KUTU 16 - EAF'Lİ TESİSLERİ BEKLEYEN DÖNÜŞÜM SÜRECİ

İklim değişikliğinin gündeme getirdiği etik gereklilikler, piyasa koşulları, artması gereken verimlilik performansları ve ticari rekabet baskıları hurda esaslı EAF'lerde de karbonsuz ve fosil yakıtsız prosese dönüşümü kaçınılmaz ve zorunlu kılmaktadır.

Metalurjik prosesteki verimlilik odaklı yeni anlayışın, önemli bir yatırıma neden olmayıp aksine diğer zorunlu teknolojik gelişmelerin finansmanı için kaynak yaratabilecek düzeyde bir getiri sağlaması da olası görünmektedir.

EAF'lerde kimyasal enerji (kömür ve doğal gaz) kullanımının azalması elektrik enerjisi tüketimini artıracaktır. Bu artışın toplam CO_2 emisyonuna etkisi, ulusal elektrik şebekesinin ortalama gr-CO_2/kWh değeri ile doğrudan ilişkilidir. Mevcut çelik üretimi yöntemleri arasında hurda esaslı EAF prosesinin en düşük emisyon ve enerji tüketimine sahip olduğu bir gerçektir, ancak ülke elektrik şebekesi emisyon düzeyi Kapsam 2 emisyonlarını, çelik yapım prosesindeki fosil yakıt kullanımı da Kapsam 1 emisyonlarını belirlemektedir.

Her ne kadar Hurda-EAF rotası cevher esaslı tesislerin %25'i kadar emisyona sahip olsalar da sıfır emisyon değerinden çok uzaktadır. Tüm proseslerde olduğu gibi özellikle kimyasal enerjinin yoğun kullanıldığı EAF proseslerinde de daha az enerji kullanımı ve malzeme verimliliği potansiyeli çok yüksektir.

EAF'lerdeki verimsizlik kimyasal enerji kullanımı ve proses tercihleri ile çok ilintilidir. Şekil 12'deki EAF ısı enerjisi dengesi grafiğinden de görüleceği gibi EAF enerji girdisinin hemen hemen yarısı atık ısı olarak kaybedilmektedir. Kaybedilen enerjinin büyüklüğü kimyasal enerji kullanım düzeyine bağlı olduğu kadar atık ısıyı başka tür bir enerjiye dönüştürme teknolojilerinin henüz yaygınlaşmaması ile de ilintilidir.

Önemli bir maliyet düşürme potansiyeli ile beraber önemli bir karbonsuzlaşma fırsatını da işaret eden bu gerçek diğer alanlarda olduğu gibi EAF'li sektör için de çalışma alanı olacaktır. Yalın üretim, dijitalleşme, termodinamik modelleme ve doğru proses tercihleri çok umut verici fırsatlar içermektedir. Özellikle tüm metalurjik prosesin yeni bir gözlükle optimize edilmesi, karbonsuzlaşma prosesinin yeniden dizaynı ve tüm bu değişikliklerin verimlilik çerçevesi dahilinde yapılması önemli bir fırsat olarak karşımıza çıkmaktadır.

EAF'li çelik üreticilerin geliştirdiği iyi uygulama örnekleri için bakınız **Ek 3**.

6 ÇELİK SEKTÖRÜNDE KARBONSUZLAŞMA YATIRIMLARININ FİNANSMANI

Son yıllarda, uluslararası ve ulusal finansman kuruluşları tarafından Paris Anlaşması hedeflerine odaklanmış finansman araçlarının ne kadar önemli hale geldiğini gösteren birçok uygulama ve standardizasyon geliştirilmekte ve firmaların karar alma süreçlerinde kendisine yer bulmaktadır. Daha fazla sayıda kurumsal ve özel yatırımcı da karbonsuzlaşma stratejileri olan varlıkları tercih etmeye başlamıştır.

Uluslararası ve ulusal finansman kuruluşlarının sanayi sektöründe karbonsuzlaşma hedefleri için çerçeve programları geliştirmeyi geç de olsa gündemlerine aldığı görülmektedir. *Breakthrough Agenda*[146] ve *Sustainable Steel Principles*[147] gibi kapsamlı sanayi sektörü karbonsuzlaşma programlarının, önümüzdeki yıllarda artması beklenebilir. Bu gelişmeler, büyük ölçüde finansmana ihtiyacı olan çelik sektörünü de yakından ilgilendirmektedir. Küresel ölçekte çelik pazarında düşük karbonlu ürünlere yönelik talebin artması da önemli bir itici güç olmuştur.[148]

Karbonsuzlaşma dönüşümünde sadece tekil projelerin finansmanına odaklanmak yetersiz kalacaktır.

Tüm dünyada, ticari olarak mevcut ve görece daha az maliyetli kaynak ve enerji verimliliği için fayda sağlayacak teknolojiler bile yeterince kullanılmamakta iken karbonsuzlaşmaya hizmet eden yeni teknolojilerin ve altyapıların hızlı bir şekilde ticarileşmesi zorlu bir süreç sayılabilir.

Bu nedenle, çelik sektörünün karbonsuzlaştırılmasında kayda değer ve kalıcı bir ilerleme sağlamak için finans kuruluşları, politika yapıcılar, endüstri oyuncuları ve tüketiciler dahil olmak üzere paydaşlar arasında iş birliğine dayalı bir çaba gerekmektedir. Tekil projelere verilen finansman destekleri, tüm değer zincirinin dönüşümünün dikkate alınmadığı durumlarda istenen etkiyi yaratamayacaktır.

Metalik verimlilik, enerji verimliliği ve karbon emisyonu yönetiminin kaynak yaratma potansiyeli

Enerji ve metalik hammadde fiyatlarındaki artışın ve karbon fiyatlandırma mekanizmalarından kaynaklanan maliyetlerin geleneksel çelik maliyeti profilini değiştirmesi beklenmektedir. Bu nedenle, çelik yapımında kullanılan enerji ve kütle dengesi hesaplarındaki metalik verimlilik, enerji verimliliği ve emisyon düzeyi parametrelerinin değerlendirilmesinde farklı bir perspektife ihtiyaç duyulacaktır.

146 Climate Investment Funds' (CIFs) new Industry Transition Programme, CIFs Capital Market Mechanism

147 2022'nin Eylül ayında, NYC İklim Haftası'nda Citi, Crédit Agricole CIB, ING, Société Générale, Standard Chartered ve UniCredit dahil olmak üzere imza sahibi altı banka, çelik sektöründe net sıfır hedefine yardımcı olmak için tasarlanmış, iklimle uyumlu bir finans anlaşması olan *Sürdürülebilir Çelik İlkelerini* (SSP) programını başlattı. Toplam özel sektör çelik kredilerinin %11'inden fazla bir pazar payını temsil eden imzacılar çelik portföylerinin 1,5°C hedefine uyumunu ölçmeyi ve bunların kamuoyu ile paylaşımını taahhüt etmişlerdir. https://steelprinciples.org/

148 "*Cleaning up steel in cars: why and how*?", 2024. https://www.transportenvironment.org/articles/cleaning-up-steel-in-cars-why-and-how

Metalurjik proseste karbonsuzlaşma çabaları ile paralel bu yeni anlayış, önemli bir yatırım giderine neden olmadan, aksine diğer zorunlu teknolojik gelişmelerin finansmanı için kaynak yaratabilecek düzeyde bir getiri sağlayabilecektir.

Gerekli finansmanın büyüklüğü; ülkelerin ve üreticilerin hangi altyapı ve emisyon değeri ile yola çıktığına, hangi tarihler için hangi hedefleri koyduklarına, seçilecek yol haritasına, yasal ve ticari sistemin zorlamalarına ve ekosistemin değişim hızına bağlı olacaktır.

Fosil yakıt esaslı BF-BOF üretim rotasındaki üreticilerin çok ciddi bir finansman ihtiyacı olduğu açıktır.[149]

Düşük emisyonlu çelik üretimi, kullanılan ekipmandan malzemelere kadar kapsamlı bir yatırım finansmanı programı geliştirilmesini gerektirir. Yapılan analizlerde, özellikle BF-BOF üretim rotasında kullanılan mevcut teknolojiler için büyük miktarda ek temiz enerjiye ihtiyaç duyulduğu ve tesislerdeki malzeme döngülerinin temelden etkileneceği belirtilmektedir. Sadece Almanya'da, çelik endüstrisinde entegre tesislerdeki yılda 30 milyon tonu bulan çelik üretiminin H_2-DRI-EAF'ye dönüşümü için gerekli yatırım 30 milyar avro olarak tahmin edilmiştir.

Takip eden bölümlerde, sektörün finansman ihtiyaçları, farklı finansal enstrümanlar ve AB finansman örneği özetlenmiştir.

149 Sadece Almanya'da, çelik endüstrisinde entegre tesislerdeki yılda 30 Mt'ye bulan çelik üretiminin H_2-DRI-EAF'ye dönüşümü için gerekli yatırım 30 milyar avro olarak tahmin edilmiştir

6.1 SEKTÖRÜN GENEL FİNANSMAN İHTİYACI

6.1.1 Çelik sektöründe dönüşüm için uluslararası finansman kuruluşlarının önemi

Çelik üretim sürecinin karbondan arındırılması, yeşil hidrojen, sıvı metal elektrolizi ve karbon yakalama gibi piyasada henüz tam olgunluğa ulaşmamış birçok yenilikçi teknolojinin devreye alınmasını gerektirir. Ancak mevcut durumda finans sektöründen, yenilikçi teknolojiler için çelik sektörüne sağlanan finansman düşük seviyededir. Çelik üretiminin tamamen karbondan arındırılması, diğer politik ve teknik ilerlemelerle beraber finans kurumlarının doğru çözümleri finanse etmek için adım atması durumunda mümkün olacaktır.

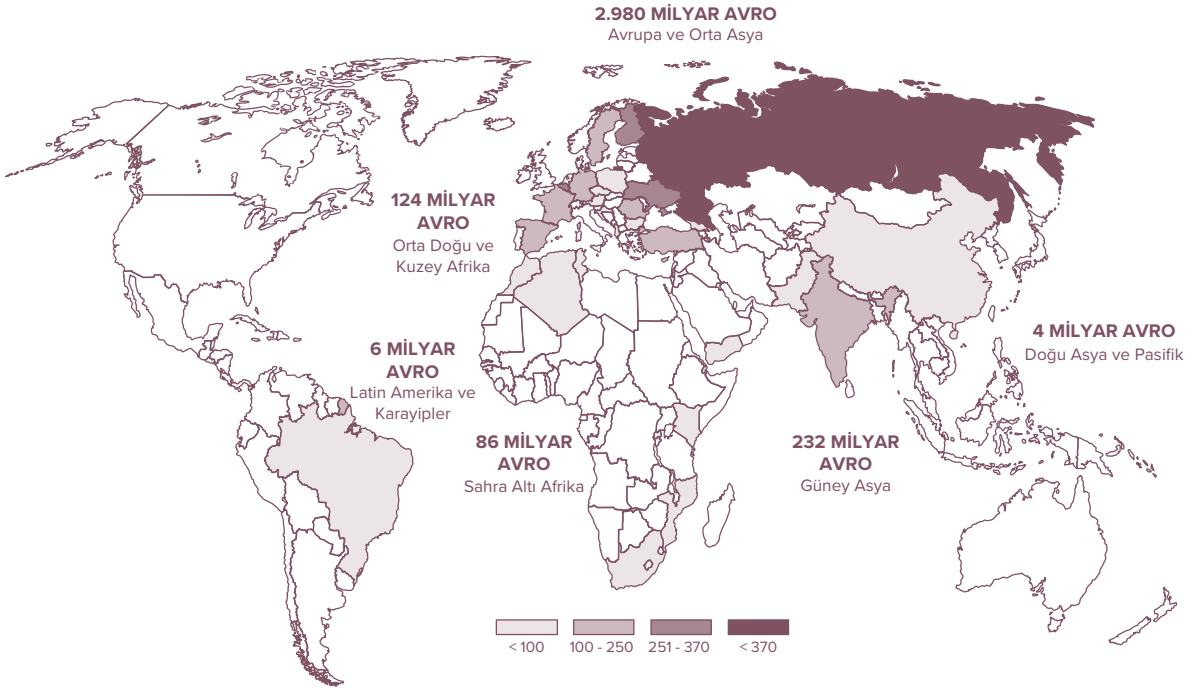
24 büyük IFI'nın proje veri tabanlarının incelenmesiyle erişilen bulgulara göre, 2000-2021 yılları arasında toplam 79 çelik projesine 9 IFI (ADB, BSTD, EBRD, EIB, GEF, IFC, NIB, OFID ve WB) tarafından 3,4 milyar avro finansman sağlandığı görülmüştür. [150]

Şekil 34, bu yatırımların çoğunun Avrupa ve Orta Asya'da yoğunlaştığını, bu bölgeleri Güney Asya ve Orta Doğu ve Kuzey Afrika ülkelerinin izlediğini göstermektedir. Ayrıca, **Şekil 35**'te gösterildiği gibi, çelik sektöründeki uluslararası finans kuruluşlarından gelen yatırımların çoğu, yeni haddehaneler, imalat ekipmanı ve kapasite artırımı dahil olmak üzere yeni ekipman yoluyla mevcut tesislerin modernizasyonuna odaklanmaktadır. Ancak, bu modernizasyon projeleri, iklim hedeflerine erişmek için yapılan modernizasyondan ziyade, maliyet düşürme odaklı olup, olağan iş iyileştirmeleri ve süreç optimizasyonlarıdır.

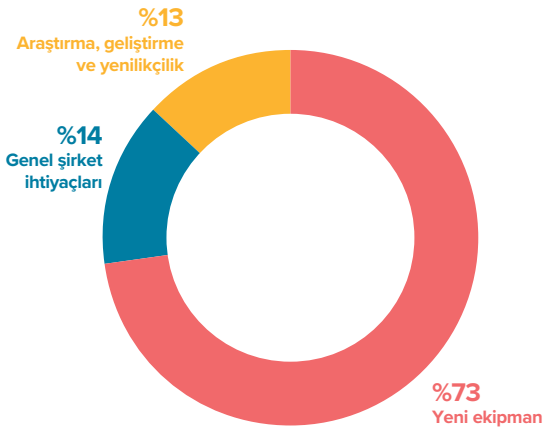
Kısacası, 2000-2021 yılları döneminde IFI'lar tarafından çelik sektörü yatırımlarının büyük çoğunluğu, üretim süreçlerinde karbonsuzlaşmaya yönelik dönüştürücü veya radikal değişikliklere yönelik olmamıştır.

150 "*The role of international finance institutions in the transition to low-carbon steel production*". https://www.industrytransition.org/insights/five-ways-ifis-can-support-green-steel/

Şekil 34 - 2000 ile 2021 yılları arasında bölgelere göre çelik projelerine yapılan IFI yatırımlarının hacmi



Şekil 35 - 2000-2021 yılları arasında çelik projelerine farklı amaçlar için tahsis edilen IFI yatırımlarının dağılımı



Not: Fizibilite çalışmaları toplamın %0,5'ten daha azını oluşturduğu için grafiğe dahil edilmemiştir.

Yeni süreç: Atılımcı-yenilikçi teknoloji geliştirme projelerinin IFI'ler tarafından finansmanı

Ekim 2022'de dünyanın ilk büyük ölçekli yeşil çelik tesislerinden birini kurmayı hedefleyen bir İsveç şirketi olan H_2 Green Steel (STEGRA) , aralarında *Sustainable Steel İlkelerini* imzalayan ING, UniCredit ve Société Générale'nin de bulunduğu bankalardan yeşil hidrojen teknolojisi kullanarak ticari çelik üretimini hedefleyen pilot tesisi için 3,3 milyar avro finansman desteği almıştır. Bu finansman, önde gelen bankaların pilot olarak devam eden bir yeşil çelik üretim projesinin ticari ölçekte güvenilirliğini kanıtlaması açısından örnek teşkil etmiştir.[151]

151 "*Banks Bet on Green Steel Green steel financing commitments offer a replicable model for climate-aligned finance*", 2022. https://rmi.org/banks-bet-on-green-steel

KUTU 17 - YEŞİL TAHVİL TÜRLERİ VE KARBONSUZLAŞMAYA DESTEK VEREN FİNANSMAN MEKANİZMALARI

Son beş yılda finansman kuruluşlarının ve kurumsal/bireysel yatırımcıların çeşitli adlara sahip yeni yatırım araçlarına (yeşil tahvil, sosyal tahvil, sürdürülebilirlik tahvili, vb.) daha fazla ilgi göstermesiyle birlikte sermaye piyasasında kurallar yeniden düzenlenmeye başlamıştır. Karbonsuzlaşmayı destekleyen yatırımlar da sermaye piyasalarında önemli bir hacme ulaşmıştır. Yatırımcıların ve finansal destek sağlayan kuruluşların politikalarında ve tercihlerinde gözlemlenen bu hızlı değişim, karbonsuzlaşma programı olmayan ve ESG performans değerleri yetersiz olan birçok şirket için dezavantajlı durum yaratabilecek hale gelmiştir.

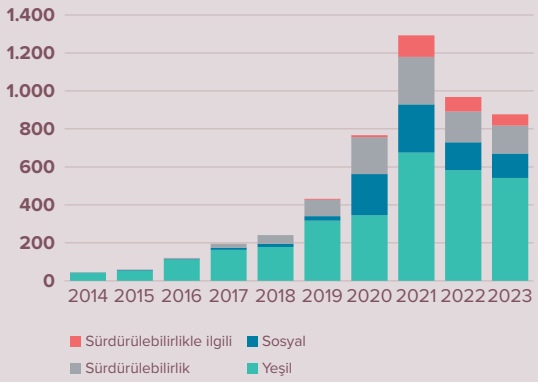
Karbonsuzlaşma finansmanı ile ilgili bir diğer not, fosil yakıtlı yeni yatırımlara artık finansman sağlanmamasına dair pozisyonun güçlenmesidir. COP 25, 26, 27 ve 28 süreçlerinde öncelikle uluslararası kamu bankaları, ardından bilinen büyük finansman kuruluşları bu doğrultuda kararlılıklarını belirtmişlerdir.

Yeşil tahvil süreçlerindeki gelişmeler 2007 yılında EBRD'nin "iklim farkındalığı" adıyla çıkardığı tahvillerle başlamıştır. Takip eden 2008 yılında Dünya bankası, 300 milyon ABD doları "yeşil tahvil" adıyla çıkardığı tahvillerle bu sürece "yeşil" ismini veren ilk yapı olmuştur.

2023 yılı sonu itibarıyla özel sektör ve kamu kesimine ait sürdürülebilir tahvillerinin toplam tutarı 4,3 trilyon ABD dolarına ulaşmıştır (bundan sadece beş yıl önce bu rakam 641 milyar ABD dolarıydı). 2021 itibarıyla 700 milyar ABD dolarına yaklaşan yeşil tahvil büyüklüğünün önümüzdeki yıllarda 1 trilyon ABD dolarını aşacağı tahmin edilmektedir. **Şekil 36**; sürdürülebilirlikle ilişkili, sürdürülebilirlik, sosyal ve yeşil kategorileri altında toplanan tahvil türlerinin 2014-2023 arasındaki küresel değişimini göstermektedir.[152]

EAF'li çelik üreticilerin geliştirdiği iyi uygulama örnekleri için bakınız **Ek 3**.

Şekil 36 - Sürdürülebilir tahvil türleri ve yıllara göre değişimi



"Yeşil tahvil" tanımlamasına sahip tahviller için finans piyasalarının şeffaflık ve amaca hizmeti vurgulamak amacıyla geliştirdiği aşağıdaki "yeşil tahvil prensipleri" benimsenmiştir:

- İklim değişikliğinin yavaşlatılması,
- İklim değişikliğine uyum,
- Doğal kaynakların korunması,
- Biyolojik çeşitliliğin korunması,
- Hava kirliliğinin önlenmesi ve kontrolü,
- ESG kurallarına uygunluk.

152 "*Global Debt Report 2024: Bond Markets in a High-Debt Environment*", 2024. OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/91844ea2-en.

KUTU 17 - (DEVAM)

Bir tahvilin yeşil veya yeşil olmadığını düzenleyen uluslararası ölçekte genel kabul görmüş bir otorite henüz yoktur. Bu tanımlamayı şimdilik tahvili ihraç eden kurum belirlemektedir. Uzun süreli, büyük bütçeli ve yukarıdaki koşulları sağlayan tahvillere bu ad verilmektedir. Yeşil tahvillerin diğer tahvillerden farkı hangi amaç için düzenlendiği ile ilgilidir ve ihraç eden, bu amaçla kullanılıp kullanılmadığını denetleme hakkına sahiptir.

Yatırımcı, risk ve getiri dengesini; çevresel fayda, sürdürülebilirlik, geleceğin teknolojilerinin, rekabet avantajı sağlayan dönüşümlerin ve döngüsel ekonomi uygulamalarının getiri potansiyeline güvenerek değerlendirmektedir. Bir diğer faktör ise, yeşil tahvilin ihraç edene prestij kazandırdığı yönündeki kabuldür.

Yeni finansman dünyası; ESG göstergelerinin, sürdürülebilirlik ve farklılaşmanın sadece teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda, politika, hukuk, insan hakları, eğitim, göç, nüfus hareketleri ve kaynakların yönetimi konularını da kapsaması gereken sistemsel bir değişiklik olduğunu öne çıkarmaktadır. Uygulamada tahvillerin yaklaşık %75'inin yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği projelerinde kullanılmış olması da mevcut duruma dair önemli bir nottur. Bu sonucun, karbonsuzlaşma süreçlerinin ana ekseninin yenilenebilir enerjiye geçiş, tüm endüstrinin elektrifikasyonu ve özellikle çelik üretimi için H_2 seçeneğinin doğrudan yenilenebilir elektriğe olan ihtiyacı ile paralel olduğu söylenebilir.[153]

153 "*Mainstreaming the green bond market, KPMG Report*", 2016. https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/lu/pdf/mainstreaming-the-greenbond-market-kpmg-wwf-2016.pdf)

6.1.2 Çelik sektörü karbonsuzlaşma hedefleri için ihtiyaç duyulan yatırım

Küresel çelik endüstrisinin elektrifikasyonu ve yeşil enerji ile üretilmiş H_2 kullanımına geçiş için 2050 maliyet öngörü rakamları astronomik düzeylerdedir ve kapasite ihtiyacı çok büyük boyutlardadır.[154]

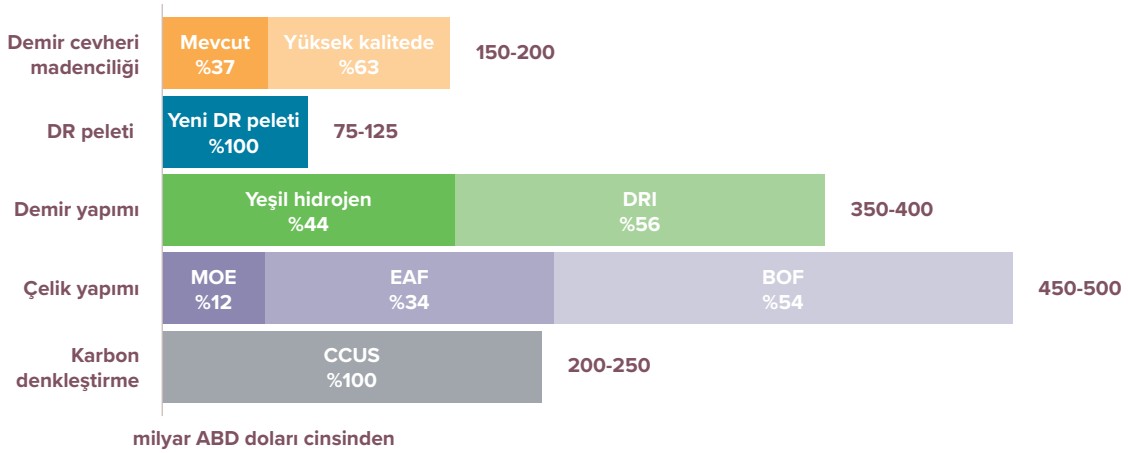
Yapılan tahminlerde çelik endüstrisinin Paris Anlaşması'na uyumlu bir şekilde karbonsuzlaşma çabalarını hayata geçirmek için (1,5°C Hızlandırılmış Enerji Geçiş Senaryosu - AET-1.5) yaklaşık 1,4 trilyon ABD doları yatırıma ihtiyaç duyacağı belirtilmiştir. Bu ihtiyacın yaklaşık %80'i demir ve çelik yapım aşamalarında (yeşil H_2 MOE, DRI, diğer teknoloji yatırımları da dahil), geri kalan kısmı ise demir cevheri madenciliği, DR peletleri hazırlanması ve karbon yakalama, kullanma ve depolama bileşenleri için öngörülmüştür (**Şekil 37**).

Şekil 37'de maliyetleri listelenmiş olan çelik endüstrisine dair karbonsuzlaşma hedeflerine erişimi mümkün kılacak hammadde, enerji altyapısı ve karbon teknolojisi için;

- Sadece yenilenebilir kaynaklarla üretilmiş **50 Mt/yıl üzerinde hidrojen** ve bu hidrojenin **2 ABD doları/kg değerinden daha düşük** bir maliyetle elde edilmesi;
- **2000 GW** büyüklüğünde yenilenebilir kaynaklardan üretilmiş elektrik (bu miktar mevcut küresel yenilenebilir elektrik üretiminin %66'sıdır);
- Tüm bu gelişmelere ve yeni yeşil teknolojilerin devreye girmesine rağmen **470 Mt/yıl CCS** kapasiteye erişilmesi;

154 "*Pedal to the metal: Iron and steel's US$1.4 trillion shot at decarbonisation*", 2022. https://www.woodmac.com/horizons/pedal-to-the-metal-iron-and-steels-one-point-four-trillion-usd-shot-at-decarbonisation/ Çeşitli öngörülere göre, 2050'ye kadar 700 milyar ABD doları miktarında hidrojen yatırımı gerekmektedir. Bu hedefin sadece 150 milyar ABD dolarlık kısmı açıklanmış yatırımlara aittir.

Şekil 37 - 2050 Net Sıfır hedefi için çelik endüstrisinin yapması gereken yatırımın dağılım öngörüsü (Milyar ABD doları)[154]



- **750 Mt/yıl** düzeyinde **yüksek kalite cevher** ihtiyacına karşılık verecek kapasite[155];
- Küresel **hurda** havuzunun **1,3 milyar ton/yıl** düzeyine ulaşması;
- En az **470 Mt yeni DRI kapasitesi** ve **1.100 Mt EAF** yatırımı gerekecektir.

Bu tür büyük ölçekli yatırımlar, diğer kolaylaştırıcı unsurların yaratıldığı bir piyasa ve düzenleyici ortam ile finansman riskini azaltıcı önlemlerin uygulanmasına dayanacaktır.

Yukarıda özetlenen bu öngörüler kuşkusuz tartışmaya açıktır ve bazı belirsizlikleri içerisinde barındırmaktadır. Yaklaşık 25 yıllık bir dönemi tarif eden önümüzdeki süreçte tüm endüstrinin aynı yolu izlemesi mümkün olmayacaktır. Ancak bu veriler, dönüşümün **yatırım** ve **operasyonel** (proses) maliyetine ilişkin öngörü sunması anlamında önem arz etmektedir.

Sektör için yapılan genel maliyet tahminlerine ek olarak seçilmiş bazı düşük karbonlu çelik teknolojilerinin tahmini sermaye yatırımı ve emisyon azaltma potansiyeli aşağıdaki tabloda (**Tablo 4**) sunulmuştur.

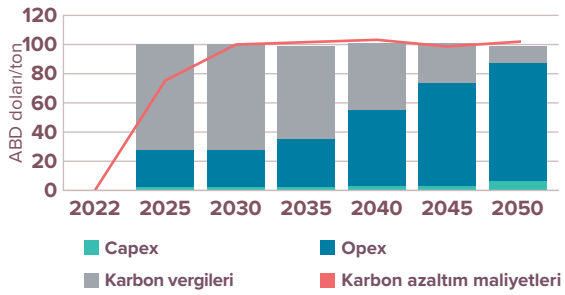
155 Demir cevheri madenciliği yatırımları, mevcut maden sahalarının karbondan arındırılmasına ve yeni yüksek kaliteli cevher madenlerinin geliştirilmesine yönelik sermaye yatırımlarını içerir. DR peletleme, doğrudan indirgenmiş demir üretimi için yüksek kaliteli pelet hazırlama kapasiteleri oluşturmak için sermaye yatırımlarını kapsar.

Tablo 4 - Seçilmiş düşük karbonlu çelik teknolojilerinin tahmini sermaye yatırımı ve emisyon azaltma potansiyeli[156]

Teknoloji	Sermaye yatırımı	CO_2 emisyon azaltma potansiyeli
Pulverize kömür enjeksiyonu (PCI)	15 ABD doları/ton pik demir	%6
Kuru kok söndürme (CDQ)	51 ABD doları /ton metalurjik kömür	%2,4
Top Gas geri kazanımı türbini (TRT)	2 ABD doları /W	%1,6
BF-BOF'da sinter soğutucudan atık ısı geri kazanımı	7 ABD doları/ton sinter	%1
Enerji üretimi için DRI ünitesinden atık ısı geri kazanımı	3,75 ABD doları/ton pik demir	%14
Demir cevheri ön ısıtması için DRI ünitesinden atık ısı geri kazanımı	0,5 ABD doları/ton pik demir	%14
Yüksek fırın Top Gas geri kazanımı ve karbon yakalama (TGR-BF)	100 ABD doları/ton ham çelik (TGR-BF) 150 ABD doları/ton ham çelik (TGR-BF ile karbon yakalama)	%22 (TGR-BF) %53 (TGR-BF ve karbon yakalama)
DRI'da %100 yeşil hidrojen kullanımı	200 ABD doları/ton ham çelik (elektroliz, depolama ve yakıt hücresi için)	%95

Maliyet projeksiyonlarındaki en ilginç ve altı çizilmesi gereken husus ise genellikle en büyük maliyet kalemi olarak düşünülen yatırım maliyetlerinin, operasyonel maliyetlere ve karbon vergilerine kıyasla görece süreç içinde çok düşük düzeylere inecek olmasıdır. Karbonsuzlaşma sürecinin başlangıcında en önemli maliyet olan karbon vergisi ve yatırım maliyeti sürecin ileri aşamalarında yerini proses maliyetine bırakacaktır **(Şekil 38)**.

Şekil 38 - Çelik üretimi karbon azaltma çalışmalarının yatırım ve operasyonel maliyetlerinin tahmin edilen ABD doları/ton değerleri[154]



156 "*Financing Steel Decarbonization – Instrument Analysis*", 2022. https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2022/10/FSD-report.pdf

6.2 ÇELİK SEKTÖRÜNDE DÖNÜŞÜME YÖNELİK FİNANSMAN MEKANİZMALARI – AB ÖRNEĞİ

Uluslararası finans sektörü içerisinde ve ulusal piyasalarda kendine yer bulan tahvil mekanizması dışında, ülkelerin geleneksel fon ve destek mekanizmalarının da çelik sektörünün karbonsuzlaşmasında kritik paya sahip olması beklenmektedir. Bu geleneksel finans/destek programlarının geliştirilip iklim değişikliği ile mücadele kapsamında uygulanmasında; karbonsuzlaşma politikalarına ve yasal mevzuat oluşturulması çabalarına öncülük eden AB iyi bir örnek olarak gösterilmektedir (**Kutu 18**).

KUTU 18 - AB'DE SANAYİ POLİTİKASI STRATEJİSİ VE EMİSYON TİCARETİ GELİRLERİ KULLANIMI[157]

10 Mart 2020 tarihinde kamuoyu ile paylaşılan "*Akıllı, Yenilikçi ve Sürdürülebilir Sanayiye Yatırım: AB için Yeni bir Sanayi Politikası Stratejisi*" AB'nin sanayi politikasına yön veren temel kaynaklardan biridir. Strateji, iklim-nötr ve dijital liderlik esaslarına göre dönüşümünü sağlayacağı Avrupa sanayisinin rekabet gücünü ve stratejik bağımsızlığını artırmayı amaçlamaktadır. Yeni Sanayi Stratejisi, üç temel önceliğe odaklanmaktadır:

- Avrupa sanayisinin küresel rekabet gücünü korumak ve hem Avrupa'da hem de küresel düzeyde eşit rekabet şartlarını tesis etmek,
- 2050 yılına kadar Avrupa ekonomisini iklim-nötr hale getirmek,
- Avrupa'nın dijital geleceğini şekillendirmek.

Dünya genelindeki örnekler incelendiğinde, AB bölgesindeki iklim politikası, sadece sanayi sektörüne (çelik sektörü de dahil) yönelik azaltım hedefleri ile değil aynı zamanda karbonsuzlaşma amaçlı teşvik/proje programları ile pilot teknolojilerin geliştirilmesine yönelik doğrudan desteklerle de öne çıkmıştır.

Bu desteklerin kaynaklarından biri de, AB'nin 2030'da 1990'a göre %55 azaltım ve 2050 yılında net sıfıra hedeflerine yönelik temel yasal düzenleme araçlarından biri olan Emisyon Ticareti Sistemi (ETS) Direktifi'dir.[158] AB ve üye ülkeler, 2005'ten bu yana uygulanan ETS programında ve buradan elde edilen gelirlerin kullanılmasında (AB bütçesi, ülke bütçeleri, İnovasyon Fonu, Modernizasyon Fonu ve Sosyal İklim Fonu mekanizmalarına aktarım) özel bir tecrübe edinmiştir.

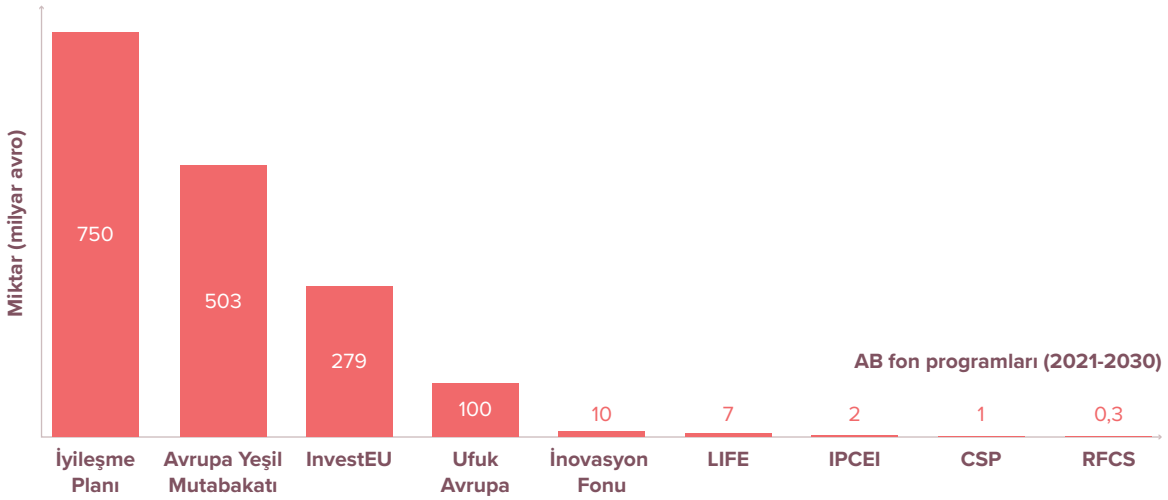
Birlik içerisindeki çelik üreticileri de emisyon ticareti kapsamında kendilerine tahsis edilen emisyon kotası doğrultusunda sera gazlarını azaltmakla yükümlü kılınmıştır. *Sınırda Karbon Denkleştirme Tüzüğü*[159] *(SKDT)* ise çelik sektörü de dahil olmak üzere yoğun emisyona sahip üreticilerin rekabetçiliğini korumak için önemli bir yasal araç olarak kabul edilmiştir.

157 *Fasıl 20- İşletme ve Sanayi Politikası*, 2023. https://www.ab.gov.tr/fasil-20-isletme-ve-sanayi-politikasi_85.html

158 *EU Emissions Trading System (EU ETS)*, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en

159 *Carbon Border Adjustment Mechanism*, https://taxation-customs.ec.euroa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en

Şekil 39 - AB'nin 2021-2030 dönemi için öngördüğü fon programlarına ait bütçeler (2021)



AB, işletmelere yönelik desteklerini finansal kurumlar ve kuruluşlar, mali iş birliği araçları ve Birlik programları aracılığı ile kullandırmaktadır. AB'nin 2021-2030 dönemi için öngördüğü fon programlarına ait bütçeler şunlardır: *InvestEU*, *Ufuk Avrupa Programı* (*Horizon*), *AB ETS İnovasyon Fonu* (*Innovation Fund*), *LIFE* programı, *Ortak Avrupa Menfaatine Yönelik Önemli Projeler* (*IPCEI*), *AB Kömür ve Çelik Araştırma Fonu* (*RFCS*) ve *AB Temiz Çelik Ortaklığı* (*CSP*).

Green Steel projesince[158] yapılan 2021 tarihli AB finansman programlarının analizine göre 2021-2030 dönemi için çelik sektöründe CO_2 emisyonunun azaltılması için yaklaşık 2 milyar avroluk mali desteğin etkin bir şekilde mevcut olacağını göstermiştir. Sadece 11 Avrupa ülkesi için yürütülen ulusal ve bölgesel finansman araçlarının analizinde ise, çelik sektöründeki CO_2 emisyonlarını azaltılmasına yönelik 2021-22 dönemi için yaklaşık 400 milyon avro ayrılmakta olduğu tahmin edilmiştir.[160] (**Şekil 39**).

Şekil 39'da sunulan rakamlar, 2021 sonrası değişen politik ve ekonomik sürecin de etkisiyle değişime uğramıştır. Değişiklikler doğrultusunda sektöre yönelik desteklerin kapsamı genişlemiş ve ölçeği büyümüştür (**Kutu 19**). Örneğin, IPCEI programının ikinci döneminde (IPCEI – Hy2Use), hidrojen teknolojileri ve altyapısı için toplam 35 proje (29 şirket, 13 AB ülkesi ve Norveç'te) için toplam 5,2 milyar avro destek onaylanmıştır.[160]

Ek 1'de, AB'nin RFCS, CSP ve IPCEI destek mekanizmalarına ilişkin bilgiler sunulmuştur.

160 *State Aid: Commission approves up to €5.2 billion of public support by 13 MS for the second IPCEI in the hydrogen value chain*". 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_5676
"*Funding Opportunities to Decarbonise the EU Steel Industry*", 2021 https://www.ceps.eu/wp-content/uploads/2021/07/Day-1_S2_Investment-financing_greensteel.pdf

KUTU 19 - YEŞİL MUTABAKAT SANAYİ PLANI VE GEÇİCİ KRİZ VE GEÇİŞ ÇERÇEVESİ

Avrupa Komisyonu tarafından, Rusya'nın Ukrayna'yı işgali nedeniyle oluşan ortamda üye ülkelerin ekonomilerini desteklemek için 23 Mart 2022'de kabul edilen "*Devlet Yardımları Geçici Kriz Çerçevesi*" 9 Mart 2023'te "***Yeşil Mutabakat Sanayi Planı***" kapsamında yeşil ekonomiye geçişte kilit öneme sahip sektörleri desteklemek üzere AB firmalarının finansmana erişimini hızlandırmayı amaçlayan "*Geçici Kriz ve Geçiş Çerçevesi (TCTF)*"ne dönüştürülmüştür. Yeni çerçevenin kapsamı genişletilmiş, uygulama süresi de uzatılmıştır.

Yeni çerçeveye ilişkin bilgiler aşağıda sunulmuştur:

- Yeni devlet yardımları mevzuatı, yenilenebilir enerji ve enerji depolamanın yaygınlaştırılması ve sanayi üretiminin karbondan arındırılmasına yönelik olarak üye ülkeler tarafından 31 Aralık 2025'ekadar oluşturulacak planları kapsamaktadır.
- İlgili alanlarda verilecek devlet yardımlarının daha etkin hale getirilmesi amacıyla, küçük projeler ve henüz tam olgunlaşmamış teknolojilere verilecek yardımlar için koşulların basitleştirildiği; her türlü yenilenebilir enerji kaynağının yayılımını desteklemek üzere destek olanaklarının genişletildiği; hidrojen türevi yakıtlara geçiş yapan sanayi süreçlerinin karbondan arındırılmasına yönelik destek imkanlarının artırıldığı; daha yüksek yardım tavanları ve basitleştirilmiş hesaplama yöntemleri geliştirildiği gözlemlenmektedir.
- Net sıfır ekonomiye geçiş için kilit sektörlerdeki yatırımların daha da hızlandırılması için, piller, güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, ısı pompaları gibi stratejik ekipmanlar ile bunların temel bileşenlerinin ve kritik hammaddelerin üretimine ve geri dönüştürülmesine yönelik yatırım desteği sağlanacağı belirtilmiştir.
- Üye ülkelerin, istisnai durumlarda, yatırımların Avrupa Ekonomik Alanı'ndan (EEA) başka bir yere yönlendirilmesi riskinin ortaya çıkması halinde, şirketlere daha yüksek destekler sağlayabileceği; bu durumda, üye ülkelerin, yararlanıcı firmanın üçüncü bir ülkede alabileceği destek tutarını ya da firmayı EEA içerisinde yatırım yapmaya teşvik edecek tutarı devlet yardımı olarak verebileceği; ancak söz konusu seçeneğin çok sayıda önleme tabi olduğu; bu kapsamda yatırımların bölgesel yardım haritası ile belirlenen alanda gerçekleştirilmesi, yararlanıcı firmanın çevresel emisyonlar açısından en son üretim teknolojisini kullanması ve verilecek yardımın üye ülkeler arasında yatırımların yer değiştirmesine neden olmaması gerektiğinin altı çizilmiştir.
- Öte yandan, yine 9 Mart 2023 tarihinde, üye ülkeler tarafından ön bildirim yapılmaksızın veya Komisyon onayı olmaksızın devlet yardımı verilebilmesine olanak sağlayan "*Genel Blok Muafiyet Tüzüğü'nün*[161]" yeşil ve dijital dönüşüm hedefleri çerçevesinde gözden geçirilmesine yönelik mevzuat değişikliği Komisyon tarafından kabul edilmiştir.

161 General Block Exemption Regulation https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/legislation/regulations_en

7 EKLER

EK 1. AB ÇELİK SEKTÖRÜ DESTEK PROGRAMLARI

AB Kömür ve Çelik Araştırma Fonu (RFCS)

RFCS, kömür ve çelik sektörlerindeki araştırma projelerini destekleyen bir AB finansman programıdır. Kendi yasal dayanakları olan fon AB'nin Çok Yıllı Mali Çerçevesinin dışındadır. RFCS, kömür ve çelik alanlarındaki araştırma ve yenilikçi projelere hibeler yoluyla eş-finansman sağlamaktadır. Fon, üniversiteler, araştırma merkezleri ve özel şirketler tarafından yürütülen projeleri desteklemektedir.

RFCS, Temiz Çelik Ortaklığı (CSP) kapsamında çelik endüstrisi sektörüne yönelik olarak, diğer AB programlarıyla, özellikle de Horizon Europe ile sinerji içinde de, araştırma projelerini desteklemektedir.

Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu (AKÇT) Anlaşması 2002'de sona erdiğinde, AKÇT kapsamında elde edilen gelirler, RFCS araştırma programını ve faaliyetlerini desteklemek için kullanılmak üzere AB'ye aktarılmıştır. Nice Antlaşması'na eklenen Protokol ile, AB'ye aktarılan AKÇT net kıymet varlıkları ve yükümlülükleri, RFCS'ye tahsis edilmiştir.

RFCS Araştırma Programını düzenleyen 3 temel yasal dayanak (2003/76/EC, 2008/376/EC ve 2003/77/EC) gözden geçirilerek 2021 yılı içerisinde yeni bir RFCS mevzuat paketi kabul edilmiştir. Bu düzenlemeler, fonun AKÇT varlıklarının bir kısmını 2021-27 dönemi için tasfiye halinde kullanarak yıllık 111 milyon avro RFCS tahsisi sağlamasına olanak tanımıştır. 1 Nisan 2021 itibariyle, RFCS uygulama faaliyetleri Avrupa Araştırma Yürütme Ajansı'na (REA) devredilmiştir.

RFCS Araştırma programında çelik için yeni araştırma hedefleri tanımlanmıştır:

- 8) Yeni, sürdürülebilir ve düşük karbonlu çelik üretimi ve nihai ürünler
- 9) Gelişmiş çelik kaliteleri ve uygulamaları
- 10) Kaynakların korunması, çevrenin korunması ve döngüsel ekonomi
- 10b) İş gücü ve çalışma koşullarının yönetimi.

REA'nın yönetimi altında fon kapsamında çelik ve kömür sektörleri için büyük bütçeli "Big tickets" çağrıları (toplam 71 milyon avronun 52 milyon avroluk kısmı yenilikçi-atılımcı çelik projelerine tahsis edilmiştir) ile yıllık çağrılar (ortak araştırmalar için toplam 40 milyon avro) yayınlanmaktadır.

Fon, 2030 yılına kadar neredeyse sıfır karbonlu çelik üretimini destekleyecek büyük temiz çelik üretimi araştırma projelerinin finansmanına katkıda bulunacaktır. Kömür sektörüne yönelik araştırma projeleri ise daha önce faaliyette olan veya kapanma sürecindeki kömür madenlerinin ve ilgili altyapının *Adil Geçiş Mekanizması* doğrultusunda devreden çıkmasına yardımcı olmaktadır.

RFCS tarafından finanse edilen projeler şunları kapsamaktadır:

- çelik üretim süreçleri,
- kaynakların optimize kullanımı ve korunması, enerji tasarrufu ve endüstriyel verimlilik iyileştirmeleri,

- iş sağlığı ve güvenliği,
- çevresel koruma,
- geçiş sürecindeki kömür bölgelerini destekleyen teknolojiler,
- çelik üretiminden kaynaklanan emisyon azaltımları.

Fon tarafından eş-finansman sağlanan projelere ait listeye aşağıdaki adresten erişilebilir:

- https://research-and-innovation.ec.europa.eu/system/files/2022-01/synopsis_of_rfcs_projects_2018-2021.pdf



AB Temiz Çelik Ortaklığı (Clean Steel Partnership - CSP)

CSP[162] uygulaması, RFCS ile sinerji içinde *Horizon* programı çerçevesinde Haziran 2021'de başlamıştır. Programın, karbon nötr çelik üretimi için yenilikçi-atılımcı teknolojilerin, pilot aşamadan tanıtım aşamasına kadar araştırma ve yenilik faaliyetlerini desteklemesi amaçlanmıştır.

CSP, Horizon programından gelen 350 milyon avro ve AKÇT tasfiye halindeki varlıklarından gelen 350 milyon avro desteğe sahiptir. CSP kapsamında 2021 – 2027/2030 dönemi için yaklaşık 1,7 milyar avro bütçe ayrılmıştır. CSP bütçesi, kabaca çelik üreticileri (1 milyar avro - %60) ve kamu tarafı (750 milyon avro - %40) şeklinde dağıtılmıştır.

RFCS araştırma programı, Aralık 2019'da Komisyon tarafından sunulan Avrupa Yeşil Mutabakatına uygun olarak iklim ve çevre ile ilgili zorluklarla mücadeleye olan katkısını artırmıştır. Avrupa Yeşil Mutabakatı yol haritasındaki kilit eylemlerden biri de 2030 yılına kadar sıfır karbonlu çelik üretim süreçlerini desteklemek olmuştur.

CSP girişimindeki taraflar olan kamu ve özel sektör temsilcileri 9 Ağustos 2021 tarihinde bir Mutabakat Zaptı çerçevesinde anlaşmışlardır. Kamu tarafı Avrupa Komisyonu Araştırma ve İnovasyon Genel Müdürlüğü (DG RTD) ile Ortak Pazar, Sanayi, Girişimcilik ve KOBİ'ler Genel Müdürlüğü (DG GROW) tarafından temsil edilirken, özel sektör tarafı ise *Avrupa Çelik Teknolojisi Platformu* (ESTEP) tarafından temsil edilmektedir. CSP için ana karar organı *Ortaklık Yönetim Kurulu*'dur.

Stratejik Araştırma ve İnovasyon Gündemi - Teknoloji Yol Haritaları ve Teknolojiler

Bu girişimin detaylarını sunan ana belge, *Stratejik Araştırma ve İnovasyon Gündemi'dir* (SRIA). Bu belge, karbonun oluşmasını doğrudan önleme, akıllı karbon kullanımı ve döngüsel ekonomi adlı 3 temel teknoloji yol haritası altında 6 müdahale alanı ve 12 temel teknoloji tanımlamıştır.[163]

- **Karbonun oluşmasını doğrudan önleme teknoloji yol haritası** (Yenilenebilir Elektrik ve Hidrojen kullanımı: DRI, demir cevheri elektrolizi vb.)
- **Akıllı karbon kullanımı teknoloji yol haritası**: Proses entegrasyonu ile daha az karbon emisyonu ve Karbon Yakalama ve Kullanma (CCU) (Örnekler: kömür yerine doğal gaz, hidrojen veya elektrik kullanımı, hurda kullanımın artırılması, proses gazlarının etkin yönetimi vb.)

162 "*About the Clean Steel Partnership*". https://www.estep.eu/clean-steel-partnership/

163 *CLEAN STEEL PARTNERSHIP, Strategic Research and Innovation Agenda*, 2021. https://www.estep.eu/assets/CSP/CSP_SRIA_Oct2021_clean.pdf

- **Döngüsel ekonomi teknoloji yol haritası**: Hurda geri dönüşümü, hurda kalitesinde iyileştirme ve kaynak verimliliği

CSP kapsamında takip edilen temel teknolojiler şunlardır:

1. Gaz enjeksiyonu,
2. Metal oksit indirgenmesi,
3. Melting teknolojisi,
4. Üretim uyarlaması,
5. CO_2 kullanımı ve depolama,
6. Hammaddeler,
7. Isı Üretimi,
8. Enerji,
9. Döngüsel ekonomi çözümleri,
10. Kolaylaştırıcılar,
11. Nihai ürün üretim prosesleri,
12. İnovasyon uygulaması.

CSP, AB'nin 2050'ye kadar iklim nötrlüğüne ulaşma hedefleri ile uyumlu olacak şekilde CO_2 azaltım teknolojileri geliştirerek bunları 2030'a kadar büyük ölçeklerde test edecektir. Bu teknolojilerin, AB çelik üretiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarını 1990'a kıyasla %80-95 oranında azaltması öngörülmüştür. CSP, çelik endüstrisinin iklim nötr bir sektöre dönüştürülmesinde Avrupa liderliğini desteklerken AB çelik endüstrisinin rekabet gücünü korumaya yönelik uzun vadeli vizyonu takip etmektedir. CSP kapsamında 10-100 milyon avro büyüklüğünde projeler desteklenmektedir. Destekler, teknoloji olgunluk seviyesini TRL 6'dan başlayıp TRL 8'e getirecek bir ilerleme sağlanacak şekilde planlanmıştır.

2027'ye kadar, ortaklık tarafından finanse edilen en az on iki alanda CO_2 emisyonlarını 1990 seviyelerine kıyasla %50 oranında azaltabilecek ve 2030'a kadar teknoloji olgunluk seviyesi 8'e ulaşabilecek en az iki demonstrasyon projesi uygulanması hedeflenmektedir. Yürütülen Temiz Çelik Ortaklığı projelerinin listesine aşağıdaki adresten erişilebilir:

- https://www.estep.eu/clean-steel-partnership/list-of-csp-projects

AB'nin Ortak Avrupa Çıkarına İlişkin Önemli Projeleri (IPCEI)

2018'den bu yana, dört endüstriyel sektörde (mikroelektronik, elektrikli araç bataryaları, bulut ve edge bilişim ve hidrojen) sekiz adet IPCEI programı başlatılmıştır. Bu programlar kapsamında, 37 milyar avroluk devlet yardımı ve 247 katılımcı firmadan 66 milyar avronun üzerinde ek özel yatırım içerilmiştir. Özellikle son 5 yılda, IPCEI'ler değer zinciri odaklı bir AB endüstriyel politikası içerisinde kendisine yer edinmiştir.[164]

IPCEI programları kapsamında ArcelorMittal[165], Tata Steel[166], HYBRIT projesi[167] ve çelik sektörü değer zincirinde yer alan birçok firma ile teknoloji üreticisi desteklenmiştir (**Tablo 5**).

164 "*EU Industrial Policy and Convergent Development in EU Peripheries: An Assessment of the 'Important Project of Common European Interest' (IPCEI) Template*", 2024. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jcms.13664

165 "*Commission approves €1.3 billion German State aid measure funded under Recovery and Resilience Facility to support ArcelorMittal decarbonise its steel production*", 2024. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_1009

166 "*HyCC - H_2ermes (NL30)*" https://ipcei-hydrogen.eu/page/view/bdac82d5-6531-4a93-95de-da6eda6b9549/hycc-h2ermes-nl30

167 "*HYBRIT H_2-DR Demonstration (SE12)*", https://ipcei-hydrogen.eu/page/view/e9bcdeee-e163-4cc4-b1dd-8a51d586f635/hybrit-h2-dr-demonstration-se12

Tablo 5 - IPCEI kapsamında desteklenen programların detayları[168]

Desteklenen değer zinciri/sektör	Yıl	Devlet yardımı (milyar avro)	Özel sektör Katkısı (milyar avro)	Desteklenen ülke sayısı	Firma sayısı	Proje Sayısı
Mikroelektronik I	2018	1,9	6,5	5	29	43
Bataryalar I	2019	3,2	5	7	17	22
Bataryalar II - EUBatIn	2021	2,9	9	12	42	46
Hidrojen I – HyTech	2022	5,4	8,8	15	35	41
Hidrojen II – HyUse	2022	5,2	7	13	29	35
Mikroelektronik II	2023	8,1	13,7	14	56	68
Bulut bilişim	2023	1,2	1,4	7	19	19
Hidrojen III – Hy2Infra	2024	6,9	5,4	7	32	33
Hidrojen III – Hy2Move	2024	1,4	3,3	7	11	13
Med4Cure	2024	1	5,9	6	13	14
Toplam	Tüm yıllar	37,2	66	22 üye ülke, Birleşik Krallık ve Norveç	283 (247*)	334

* Birden fazla kez yer alan firmalar çıkarıldığında.

EK 2. ÇELİK SEKTÖRÜNDEKİ KARBONSUZLAŞMA ÖRNEKLERİ

Önde gelen çelik üreticilerinin karbonsuzlaşma seçeneklerine yönelik tercihleri ve dönüşüm takvimleri

Çelik üreticisi firmaların tercih edecekleri karbonsuzlaşma seçenekleri için karar verme süreçleri aşağıdaki listelenen hususlar nedeniyle zorlu bir hal almaktadır:

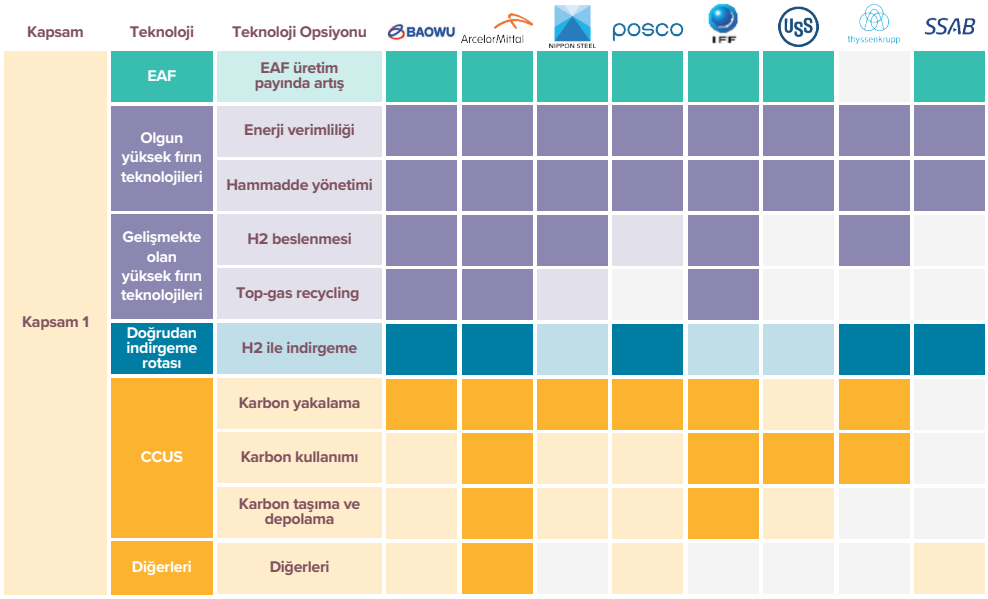
- Yatırım ve operasyon maliyetinin alışılmış değerlerin çok üstünde olması,
- Teknik olarak alternatiflerin henüz kendisini kanıtlamamış olması,
- Ulusal ve uluslararası düzenlemelerin değişim göstermesi,
- Finansman ve ticaret dünyasının çok köklü bir dönüşümden geçmesi,
- Yapılacak tercihlerin cevher, enerji ve hurda piyasasını doğrudan etkilemesi.

Yukarıdaki nedenler ve üreticilerin bulunduğu ülkelere özgü bir dizi diğer sebepten ötürü karbonsuzlaşma alternatifleri için üreticiler arasında bir ortaklaşma görülmemektedir.[169] **Şekil 40**, çelik dünyasındaki önde gelen üreticilerin karbonsuzlaşma stratejilerinin bir karşılaştırmasını vermektedir. **Şekil 41**'de ise büyük çelik üreticilerinden bazılarının düşük karbonlu çelik üretimi projeleri takvimleri sunulmuştur.

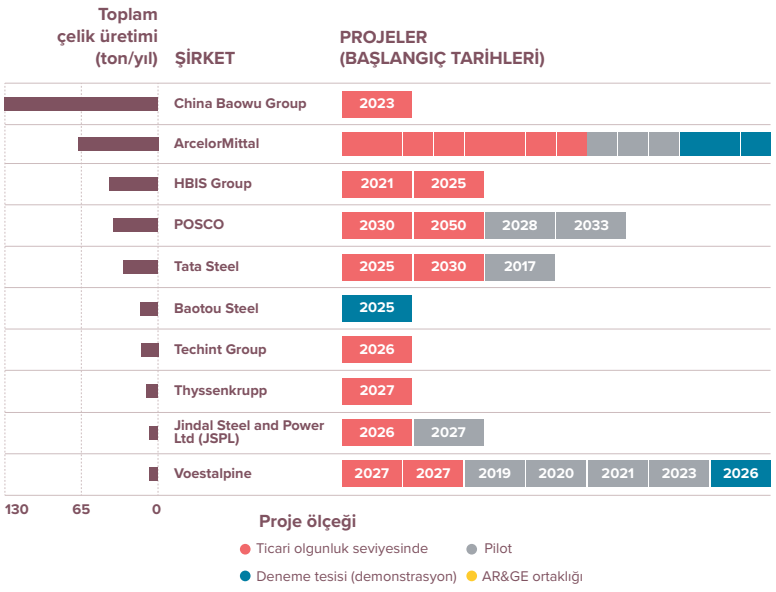
168 "*Approved integrated Important Projects of Common European Interest (IPCEI)*", https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei/approved-ipceis_en

169 Özellikle AB bölgesinde, hidrojen fiyatının belirli bir değere düşmesi durumunda anlamlı olabilecek maliyet öngörülerine rağmen- alınan milyarlarca Euro'luk yatırım kararları, bunlara ulusal kaynaklar tarafından hibe desteği verilmesi ve finans piyasası tarafından desteklenmesi özel bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şekil 40 - Önde gelen çelik üreticilerinin karbonsuzlaşma seçeneklerine yönelik tercihleri[170]



Şekil 41 - Önde gelen çelik üreticilerinin düşük karbonlu çelik üretimi projelerinin takvimi[171]



170 "*Steel decarbonization - The scale of the challenge*", 2023. https://worldsteel.org/wp-content/uploads/The-scale-of-the-challenge-Kwasi-AMPOFO.pdf

Avrupa demir ve çelik sektöründe yeşil hidrojen, elektrik ve DRI kullanım stratejileri

Leadership Group for Industry Transition (LeadIT) tarafından gerçekleştirilen araştırmada[171], Avrupalı on iki çelik üreticisi ve bir demir üreticisinin kamuya açık raporları ve çevrimiçi kaynakları incelenerek, yenilenebilir hidrojen, yenilenebilir elektrik ve DRI tedarik stratejileri özetlenmiştir (**Tablo 6**). Şirketlerden sekizi köklü üreticiler iken, beşi yeni girişimlerdir. İncelenen tüm çelik üreticisi şirketler, yeşil hidrojenin DRI üretimi için kullanımına ilgi göstermiştir. Bunlardan yedisi üretim tesislerine elektrolizör entegre ederek hidrojen üretmeyi planlamakta, üçü ise yenilenebilir hidrojeni dış kaynaklardan tedarik etmeyi öngörmektedir. Üreticilerden bazıları planlanan yatırımların, yeşil hidrojen projelerinin uygun maliyetli olmasına bağlı olduğunu açıklamıştır.

Tablo 6 - Avrupalı çelik üreticilerin düşük karbonlu çelik üretimi için takip ettiği hidrojen ve yenilenebilir elektrik kullanımı stratejileri

		Yenilenebilir hidrojen			Yenilenebilir elektrik		HBI
Şirket ismi	**Yenilenebilir H-DRI için kamuya açık bir planı var mı?**	**Şirket kendi H_2'yi üretmeyi planlıyor**	**Şirket H_2'yi dışarıdan tedarik etmeyi planlıyor**	**Şirket H_2 tedariki konusunda net bir pozisyon belirlememiştir**	**Yenilenebilir elektrik tedarik etme planı var**	**Yenilenebilir elektrik kaynakları hakkında bilgi yok**	**HBI tedarik etme konusunda kamuya açık bir planı var**
ArcelorMittal	■			■	■		
Tata Steel (Europe branch)	■		■		■		
Thyssenkruup	■		■		■		
Voestalpine Group	■	■			■		■
SSAB	■	■				■	■
Salzgitter Group	■	■			■		
Stahl Holding Saar GmbH	■		■		■		
LKAB	■	■				■	
Blastr Green Steel	■	■			■		
GravitHy	■	■				■	
Stegra (H2 Green Steel)	■	■					
Hydnum Steel	■	■		■		■	
Hylron	■			■		■	

171 "*Demands for renewable hydrogen and electricity to drive the EU's green iron and steel transition*", 2024. https://www.industrytransition.org/insights/a-question-of-demand-hydrogen-and-renewable-electricity-for-the-eu-steel-and-iron-transition/

Demir üretiminde yeşil hidrojen kullanımı yaklaşımı

Ekonomik bir alternatif olması için 1-1,2 ABD doları/kg fiyatının altına düşmesinin gerekmesi yeşil hidrojenin önündeki en önemli engeldir. Dünyadaki ve ülkemizdeki projeksiyonlar, bu hedefin mutlaka gerçekleştirileceği gibi bir varsayıma dayanması nedeni ile sorunludur. Hangi teknoloji ve hangi düşük maliyetli elektrik enerjisi ile olacağı kuşkulu bir teknolojik gelişme, karar vericileri karbon maliyeti ve hidrojen seçenekleri arasında sürekli bir optimizasyon ve gelgit pozisyonunda tutmaktadır.

Yenilenebilir elektrik temininin de şirketlerin dönüşüm stratejilerinin bir parçası olduğu ortaya konmuştur. Sekiz şirket, gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamak için enerji sağlayıcıları ve şebeke operatörleriyle anlaşmalar yaptıklarını açıklamıştır.

Çalışmada, HBI tedariki ve ticareti hakkındaki bilginin sınırlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yalnızca Voestalpine, HBI'yi Avrupa dışından ithal etmeyi planlarken, SSAB, İsveç'teki ortağı LKAB'dan tedarik etmeyi öngörmektedir.

AB çelik endüstrisi tarafından geliştirilmekte olan düşük CO_2 emisyonlu çelik üretimi projeleri

Avrupa Çelik Üreticileri Birliği (EUROFER), AB çelik endüstrisi tarafından geliştirilmekte olan düşük CO_2 emisyonlu çelik üretimi projelerini yakından takip etmektedir. TRL değeri en az 7/9 olan bu projelerin Avrupa çelik endüstrisinin doğrudan ve dolaylı CO_2 emisyonlarının üçte birinden fazla azaltım sağlayacağı belirtilmiştir (Projelerin haritası için bakınız **Şekil 42**).

Avrupalı çelik üreticilerinin düşük karbonlu çelik üretimi geliştirme çabaları iki grup altında sınıflandırılmaktadır:

- **Doğrudan karbon oluşumundan kaçınma (Carbon Direct Avoidance CDA):** CDA, karbonsuz veya fosilsiz elektrik ve/veya hidrojen kullanımını kademeli olarak en üst düzeye çıkaran yeni süreçleri kapsar. Amaç, fosil yakıtlara ve fosil hammaddelere dayalı mevcut metalurjinin büyük ölçekli olarak değiştirilmesidir. Bu patika, hidrojen bazlı ve elektrik bazlı metalurjiyi içermektedir.
- **Akıllı karbon kullanımı (Smart Carbon use -SCU):** Akıllı Karbon Kullanımı (SCU), mevcut çelik üretim rotalarının kapsamlı bir değişime uğramadan uygulanacak proses entegrasyonu ve optimizasyonu, fosil gazlardan hidrojene dönüşüm uygulamaları ve aynı zamanda Karbon Yakalama ve Kullanım (CCU) ve Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) gibi karbondioksit yakalama yöntemlerinin kullanıldığı uygulamaları içerir.

Şekil 42'deki projeler, çelik proseslerinin işletilmesi için yılda yaklaşık 75 TWh elektrik ve yaklaşık 2,1 Mt hidrojen (eğer hidrojen suyun elektrolizi yoluyla üretiliyorsa yaklaşık 90 TWh temiz elektrik ihtiyacına karşılık gelir) gerektirecektir. Bu da toplamda 2030 yılına kadar yaklaşık 165 TWh dekarbonize elektrik anlamına gelir. İhtiyaç duyulan bu miktar AB çelik endüstrisinin bugünkü elektrik tüketiminde %100'lük artışa karşılık gelmektedir. Şu anda AB çelik endüstrisi yılda yaklaşık 75 TWh elektrik tüketmektedir. Tüketilen elektrik kısmen harici şebekeden satın alınarak ve kısmen de çelik endüstrisinin proses gazlarını kullanan gaz santralleri ve top gas geri kazanım türbinleri aracılığıyla üretilmektedir.

KUTU 20 - AB ÇELİK SEKTÖR KARBONSUZLAŞMA YATIRIM İHTİYAÇLARI[173]

Avrupa çelik endüstrisi, 1990 seviyelerine kıyasla 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını %55 oranında azaltma (2018 seviyelerine kıyasla %30'un üzerinde) ve 2050 yılına kadar iklim nötrlüğüne ulaşma hedefine sahiptir. EUROFER, çelik sektörü için AB ölçeğinde 2050 yılına kadar ulaşılması gereken karbonsuzlaşma hedeflerine erişmek için tesislerin mevcut yatırımlarında %70 artış olması gerektiğini öngörürken, birincil çelik üretimi maliyetlerinde de %35-100 arasında değişen bir artış beklemektedir.[174] AB'de düşük karbonlu çelik üretiminin ticarileşmesi için alternatif üretim teknolojilerine ek olarak elektrik, hidrojen ve karbon depolama altyapılarına da büyük miktarlarda yatırım gerekecektir. 2030 yılına kadarki finansal ihtiyaçların, sermaye harcamaları (CAPEX) için 31 milyar avro ve işletme harcamaları (OPEX) için 54 milyar avro olduğu tahmin edilmektedir. Bu yatırımlar, 2050 yılı hedeflerine erişmeyi sağlayacak aşağıdaki gereksinimler için kullanılacaktır:

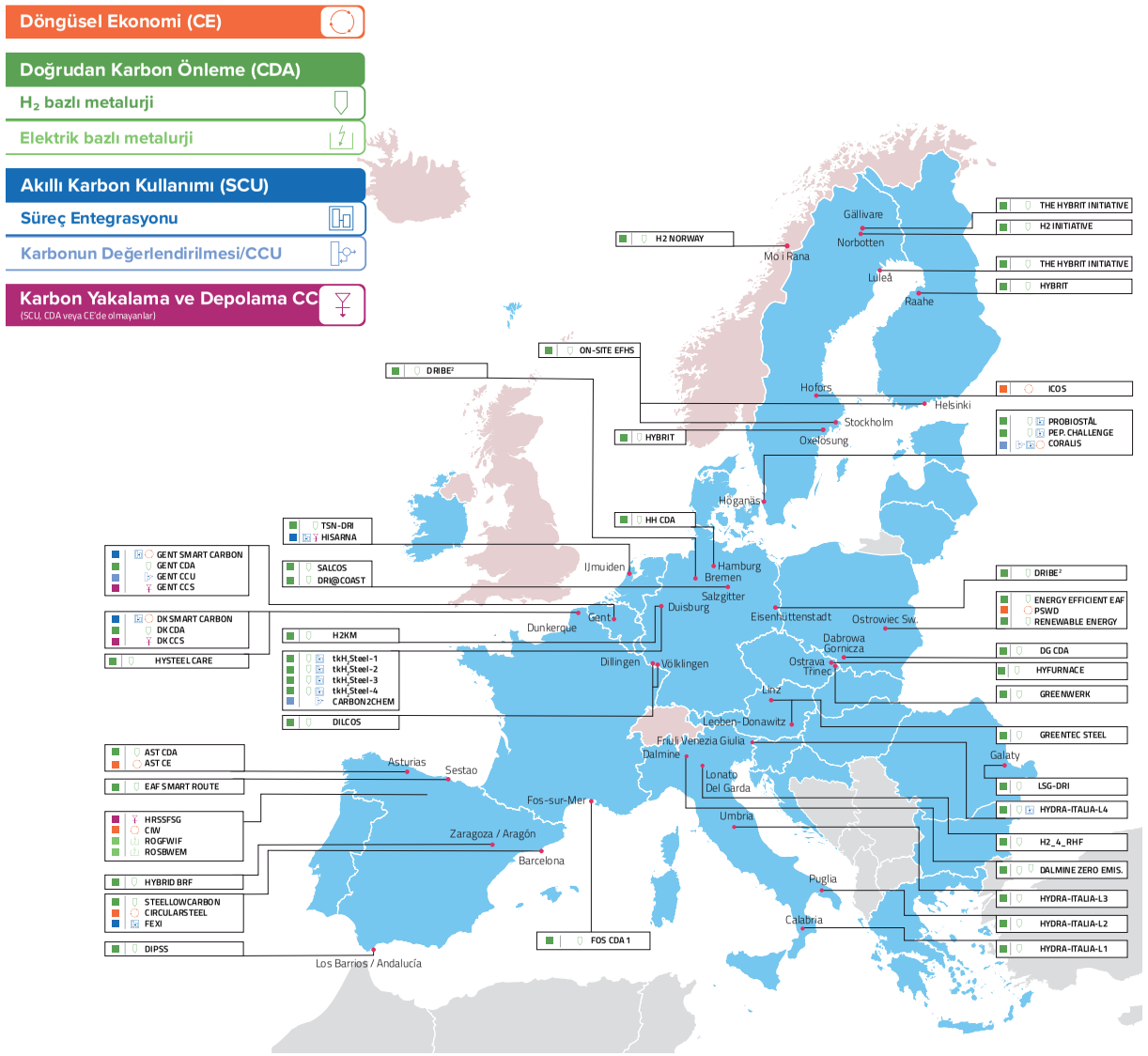
Şekil 42'deki harita, AB çelik endüstrisinde CO_2 emisyonlarında önemli bir azalma sağlamaya yardımcı olabilecek düşük emisyonlu çelik üretim projelerinin örneklerini göstermektedir. Bu projelerin (60 adet) büyük bir kısmının 2030'dan önce başlaması beklenmektedir. EUROFER, bahsi geçen projelerin hayata geçmesiyle, 2030 yılına kadar CO_2 emisyonlarında yılda 81,5 Mt azaltım olabileceğini belirtmiştir. Özetle, AB çelik endüstrisinin 2050 yılına kadar CO_2 nötrlüğüne başarılı bir şekilde geçişi, maliyet açısından rekabetçi düşük CO_2 enerji taşıyıcılarının (özellikle elektrik ve hidrojen) ve ilgili altyapının (CO_2'nin taşınması ve depolanması dahil) mevcudiyetine bağlı olduğunun altı çizilmelidir.

Tablo 7 ve **Tablo 8**, sırasıyla AB ülkelerinden seçilmiş hidrojen bazlı çelik karbonsuzlaştırma projeleri ile CCUS bazlı çelik karbonsuzlaştırma projelerine dair ayrıntıları sunmaktadır.

172 "*Low-CO_2 emissions projects in the EU steel industry*", 2024. https://www.eurofer.eu/issues/climate-and-energy/maps-of-key-low-carbon-steel-projects

173 "*Low Carbon Roadmap: Pathways to a CO_2-Neutral European Steel Industry*", 2019. https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO_2-neutral-European-Steel-Industry.pdf

Şekil 42 - AB çelik endüstrisi tarafından geliştirilmekte olan düşük CO_2 emisyonlu çelik üretimi projeleri (Kasım 2022 itibariyle) [175]



174 AB çelik endüstrisi tarafından geliştirilmekte olan düşük CO_2 emisyonlu çelik üretimi projeleri , https://www.eurofer.eu/issues/climate-and-energy/maps-of-key-low-carbon-steel-projects

Tablo 7 - AB ülkelerinden seçilmiş hidrojen bazlı çelik karbonsuzlaştırma projeleri[176]
(*Tabloda yer alan projelerin bir kısmının zaman planında güncellemeler yapılmıştır. Şirketler piyasa koşulları ve hidrojen maliyetleri nedeniyle ertelemeler açıklamıştır)

Ülke	Proje ve lokasyonu	Şirket	İndirgeyici / Yakıt	Teknoloji	Teknoloji açıklaması	Zaman planı	Durum
Avusturya	HYFOR (Donawitz)	voestalpine	H_2 (elektroliz)	H_2-DRI	Toz cevher kullanan H_2-DRI	2021: Pilot tesis çalışmaya başladı	Pilot tesis
Avusturya	H_2Future (Linz)	voestalpine	H_2 (elektroliz)	Elektroliz	6 MW H_2 Elektrolizör	2020: PEM 6MW elektroliz tesisi çalışmaya başladı	Pilot tesis
Belçika	(Ghent)	ArcelorMittal	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2	H_2-DRI	2,5 Mt DRI Tesisi ve İki EAF tesisi	2030: 2.3 Mt DRI operasyonel	Mutabakat anlaşması imzalandı
Fransa	(Dunkirk)	ArcelorMittal	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2	H_2-DRI	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2-DRI ve SAF	2021: Air Liquide ile mutabakat anlaşması	Mutabakat anlaşması imzalandı
Fransa	(Dunkirk)	Liberty Steel	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2	H_2-DRI	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2-DRI	2021: Mutabakat anlaşması imzalandı	Mutabakat anlaşması imzalandı
Almanya	H_2Steel (Duisburg)	Thyssenkrupp	H_2 (elektroliz)	H_2-DRI	SAF + BOF ile DRI	2024: İlk büyük ölçekli DRI üretimine başlama 2025: Yeşil H_2 ile 0.4 Mt çelik üretimi 2030: 3 Mt yeşil çelik üretimi	Duyurusu yapıldı
Almanya	H_2morrow (Duisburg)	Thyssenkrupp	Fosil H_2+ CCS	Fosil H_2+ CCS	Fosil H_2 + CCS (Denizin altında)	2021: Fizibilite çalışması tamamlandı	Fizibilite çalışması aşamasında
Almanya	H_2Hamburg	ArcelorMittal	Başlangıçta Gri H_2, sonra H_2 (elektroliz)	H_2-DRI	Önce Gri H_2, sonra yenilenebilir	2023: Gri H_2 ile 0.1 Mt DRI üretimi	Tesis tasarımına başlandı
Almanya	HyBit (Bremen)	ArcelorMittal	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2 (elektroliz)	Elektrolizör + H-DRI	24 MW H_2 Elektrolizör	2026: Ticari DRI üretimi	Mutabakat anlaşması imzalandı
Almanya	(Eisenhüttenstadt)	ArcelorMittal	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2 (piroliz)	H_2 piroliz+ H-DRI	Pirolizden H_2	2026: Pilot yenilikçi DRI	Duyurusu yapıldı

175 "*Technologies to decarbonise the EU steel industry*", 2022. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC127468

Tablo 7 - AB ülkelerinden seçilmiş hidrojen bazlı çelik karbonsuzlaştırma projeler (DEVAM)

Ülke	Proje ve lokasyonu	Şirket	İndirgeyici / Yakıt	Teknoloji	Teknoloji açıklaması	Zaman planı	Durum
Almanya	(Wilhelmshaven)	Uniper and Salzgittter	H_2 (elektroliz)	Elektrolizör + H_2-DRI	H_2 Elektroliz ve 2 Mt DRI tesis	N/A	Fizibilite çalışması aşamasında
Almanya	SALCOS (Salzgitter)	Salzgitter	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2	Rüzgar + Elektroliz + H_2-DRI	Rüzgâr parkı, elektroliz ve H-DRI	2020: 30 MW Rüzgâr Parkı ve Elektroliz 2022: DRI tesisi	İnşaat başladı
Hollanda	H_2ermes (IJmuiden)	Tata Steel	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2 (elektroliz)	Elektroliz + H_2-DRI	H_2-DRI için H_2 üretimi	2021: Nihai Yatırım Kararı 2025: H_2 üretimine başlangıç	Fizibilite çalışması aşamasında
Romanya	(Galati)	Liberty Steel	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2	H_2-DRI	Başlangıçta NG, sonra H_2-DRI	2023-2025: Doğal gaz ile ticari üretim (2.5 Mt)	Mutabakat anlaşması imzalandı
İspanya	(Gijon)	ArcelorMittal	Başlangıçta doğal gaz, sonra H_2 (elektroliz)	H_2-DRI	2,3 Mt DRI Tesisi ve 1,1 Mt EAF	2025: 2.3 Mt H_2-DRI üretim başlangıcı	Mutabakat anlaşması imzalandı
İsveç	Hybrit (Luleå)	SSAB	H_2 (elektroliz)	Elektroliz + H_2-DRI	Çelik üretim değer zincirinin tamamen karbonsuzlaştırılması	2021: Pilot tesis çalışmaya başladı 2026: Ticari üretim	Pilot tesis
İsveç	LKAB (Kiruna)	LKAB	H_2 (elektroliz)	Elektroliz + H_2-DRI	Cevher kullanımında H_2-DRI'ye geçiş	2029: Malmberget'te DRI tesisi kurulumu	Duyurusu yapıldı
İsveç	H_2green Steel (Svartbyn)	Northvolt team	H_2 (elektroliz)	Elektroliz + H_2-DRI	Yeşil hidrojen ve H_2-DRI	2030'dan önce: 5 Mt üretim kapasitesi	Duyurusu yapıldı

Tablo 8 - AB ülkelerinden seçilmiş CCUS bazlı çelik karbonsuzlaştırma projeleri (Eylül 2021 itibarıyla)[174]

Ülke	Proje (Lokasyon)	Şirket	Teknoloji türü	Teknoloji Tanımı	Zaman Planı	Durum
Belçika	C4U	Çok sayıda ortak	CCS /U	TRL7 seviyesindeki iki adet karbon yakalama teknolojisini (DISPLACE ve CASOM) geliştirmek. Çelik tesisinden kaynaklanan toplam emisyonun %90'ının yakalanması hedefleniyor.	2020-2024	Test tesisi
Belçika	Karbalist/ Steelanol (Ghent, Fos-sur-Me)	Arcelormittal	Biyokütle + CCU	Baca gazı ve etanolü yakalanmaktadır. Mevcut baca gazının yaklaşık %15'ini yakalanır.	2021: Test tesisi inşa edildi.	Test tesisi
Fransa	3D/DMX (Dunkirk)	Arcelormittal	CCU	2021 yılına kadar çelik üretiminden 0,5 ton CO_2/ saat miktarında yakalama. Projenin, Northern Lights ve Porthos CCS kümelenme projeleriyle entegre edilmesi planlanıyor.	2021-2023: Test tesisi 2026-2030: Tam Ölçekli CCS Tesisi (1 Mt CO_2/yıl)	Test tesisi
Fransa	IGAR (Dunkirk)	Arcelormittal	CCU	BF'den CO_2 ve atıkların yakalanması ve Syngas'a dönüştürülüp BF'ye yeniden enjekte edilmesi.	Emisyonları %20'ye kadar azaltma	Pilot
Almanya	Karbon2chem	Thyssenkrupp	CCU	Çelik yapım ünitesi gazlarından amonyak ve metanol üretilmesi. Yıllık 20 Mt CO_2'nin kullanılabilir hale gelmesi.	2025: Endüstriyel ölçekli tesis	Pilot
Hollanda	Initiate (eski Fresme/ Stepwise)	Çok sayıda ortak	CCU	TRL 7 seviyesinde olacak şekilde çelik yapımı ünitesi gazlarından üre üretimi.	2025: test tesisi	Pilot/Test tesisi
Almanya	Karbon4pur	Çok sayıda ortak	CCU	Çelik ve kimya endüstrisi arasındaki işbirliği, Baca gazındaki karbonun poliüretan olarak kullanımı.	Proje: 2017-2021	Pilot
Hollanda	Hisarna (ijmuiden)	Tata Steel	Hisarna Smelting+ CCU	Yeni smelting teknolojisi, CO_2 emisyonlarını BF-BOF'a kıyasla %20 oranında azaltabilir. CCS ile birlikte emisyonlar%80'e kadar azaltılabilir	2011: Ijmuiden'de pilot tesis	Pilot
İsveç	Fresme/ Stepwise	Çok sayıda ortak	CCU	Gemi yakıtı olarak kullanılan metanol üretmek için BF gazını yakalamak için TRL 6 seviyesinde "sorption-enhanced water-gas shift" teknolojisi geliştirilmesi.	Stepwise: 2015-2019 Fresme: 2017-2021	Pilot/Test tesisi

EK 3. EAF'Lİ ÇELİK ÜRETİCİLERİNDEN ÖRNEK KARBONSUZLAŞMA UYGULAMALARI

Acciaieria Arvedi - İtalya

Acciaieria Arvedi, Cremona'da yerleşik İtalya'nın önde gelen çelik üreticilerindendir. Şirket, Temmuz 2022 başı itibarıyla, akredite bir sertifikasyon kuruluşu olan RINA sertifikasyon şirketi tarafından Kapsam 1 ve 2 emisyonları açısından denetlendiğini ve dünyada ilk net sıfır emisyon değerine sahip çelik üreticisi olduğunu, bunun da ISO 14064 sertifikasyon sürecine uygun olarak teyit edildiğini kamuoyu ile paylaşmıştır.

Çelik şirketlerinin birçoğunda 2050 yılı için belirlenen net sıfır emisyon hedefinin 2022'de elde edilmiş olması, bu ölçekteki benzer teknolojileri kullanan üreticilere bu hedefin yapılabilirliğini göstermesi açısından önemlidir.

Şirket; 300 tonluk Consteel EAF, Laddle Furnace (LF), Vacuum Oxygen Decarburization (VOD) ve 2 yollu Endless Strip Production (ESP) döküm ve doğrudan kesintisiz haddeleme hattına sahiptir. Bu uygulama klasik döküm ve yassı haddeleme işlemlerini kesintisiz olarak birleştiren, haddeleme öncesinde tekrar ısıtmaya ihtiyaç göstermeyen, döküm ve haddeleme sürecinde çok yüksek malzeme ve enerji tasarrufu sağlayan, Arvedi/Siemens/VAI/PRIMETALS tarafından geliştirilmiş bir uygulamadır.

Şirket net sıfır hedefi kapsamında sadece Kapsam 1 ve 2 emisyonlarını dikkate almıştır. Emisyonların fiziksel kapsamı nihai ürüne kadar olan süreci kapsamaktadır. Kapsam 1 altındaki proses kaynaklı emisyon değerleri **Şekil 43**'te sunulmuştur.

Acciaieria Arvedi şirketi, Kapsam 2 emisyonlarının temel kaynaklarından biri olan satın alınan elektriğin tamamını yenilenebilir kaynaklardan temin etmiştir ve bu durum ENEL enerji şirketi tarafından doğrulanmış ve sertifikalandırılmıştır.

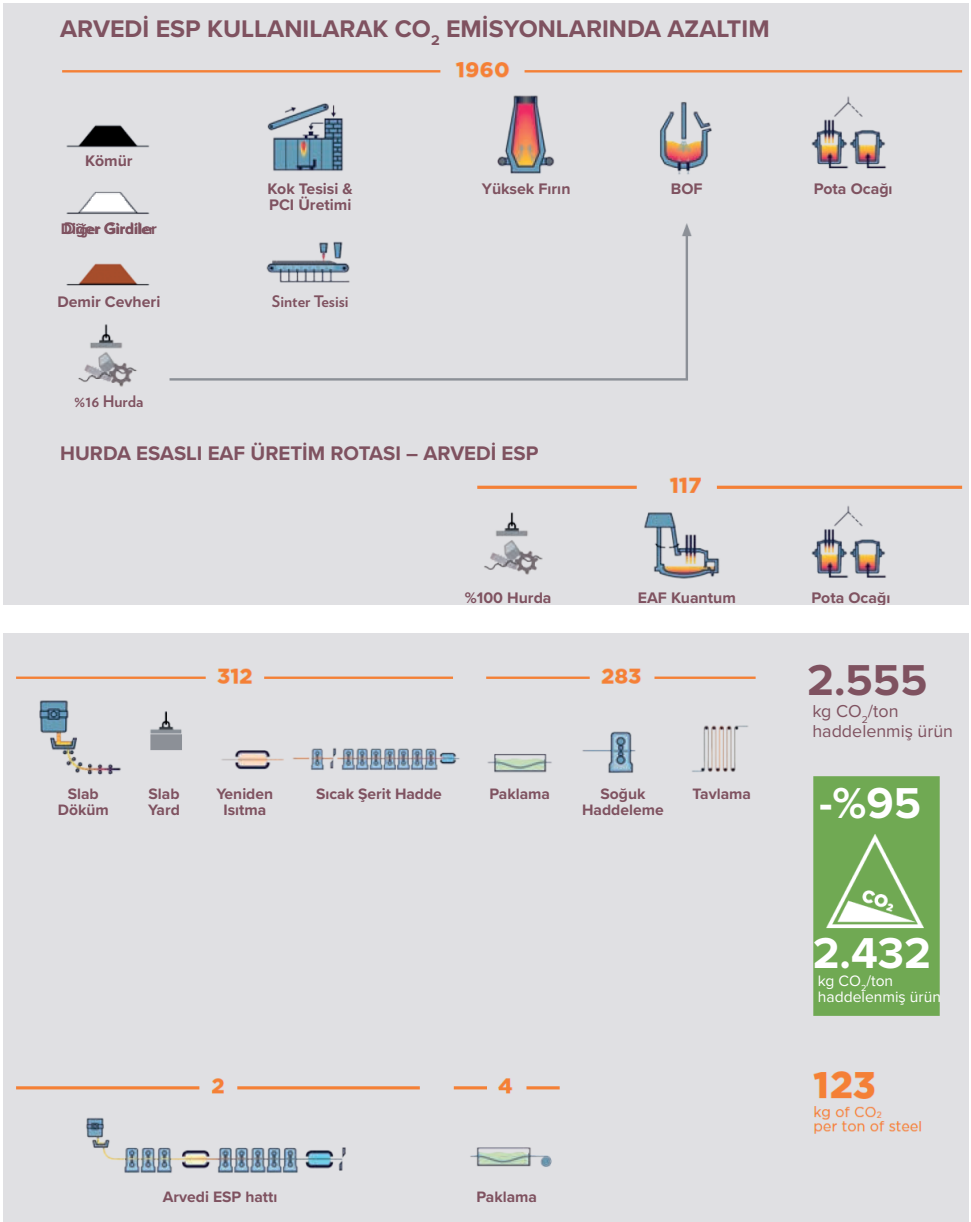
Hurda kompozisyonu içinde kullanılan HBI, dış kaynaklardan temin edildiği için HBI kaynaklı emisyonlar Kapsam 3 altında değerlendirilmiştir. Bu nedenle de HBI üretiminde oluşan emisyonlar dikkate alınmamıştır.

Firma, net sıfır emisyon değeri sonucunu elde ederken; EAF ve döküm ünitelerinde özel seçimler ve uygulamaları tercih etmiştir. Ergitme biçimi klasik hurda esaslı EAF olsa bile, seçilen EAF, hurda ön ısıtma sistemi, sıvı çelikte elektromanyetik karıştırıcı, elektrot regülasyonunda *Arcsave*, ocak çıkış gazında *Goodfellow*, sentetik biyolojik esaslı veya geri dönüştürülmüş polimerlerin karbon verici antrasit yerine enjekte edilmesi gibi, metalik verimlilik ve enerji verimliliği amaçlı özel uygulamalar da sisteme entegre edilmiştir. Tesis, EAF baca gazındaki atık ısı ile *Organic Rankine Cycle (ORC)* teknolojisini kullanarak 7 MWh düzeyinde elektrik üreten sektördeki ilk örneklerdendir.

Teknolojik seçimlere ilave olarak özellikle "döngüsel çelik" yapım ilkelerini çok öne çıkaran bir proses anlayışı da geliştirilmiştir. Kullanılmış tüm refrakterin geri dönüşümü, cürufun %98 oranında yan ürün olarak kullanılması, sıvı çelikte çözünmüş oksijenin klasik uygulamaya göre %17 düşürülmesi, metalik verimliliğin yüksek olması, sıfır atık hedefi, proseste metalik ve enerji kayıplarının azaltılması, atık su geri kazanımındaki uygulamalar, farklılaşmanın ana etmenleridir.

Tesis ve karbonsuzlaşmaya bakışı, hurda esaslı EAF sektörü için iyi bir örnektir. Bu örnek uygulamada, tesis altyapısında ve proseslerinde olağanüstü büyük bir teknolojik değişim olmamıştır. Ana üretim rotasına, sadece farklı bir bakışla karbonsuzlaşma ve verimlilik uygulamaları entegre edilmiştir. Dönüşümün getirdiği verimlilik artışı, firmanın hem karlılığını hem de yatırım finansmanı ihtiyacını olumlu etkilemiştir.

Şekil 43 - Acciaieria Arvedi çelik yapım proses zinciri emisyon değerleri[177]



176 "*Endless Production: Arvedi ESP Means Green Steel*", 2022. https://magazine.primetals.com/2022/10/07/endless-production-arvedi-esp-means-green-steel/

EAF prosesinde klasik metalurjik uygulamadan en önemli fark sıvı çelikteki çözünmüş oksijenin tipik değerlerden en az %20 daha düşük bir değeri bilinçli olarak hedeflemeleridir. EAF'ler için en önemli emisyon kaynağı olan elektrik enerjisinin yenilenebilir kaynaklardan satın alınması sorunun büyük kısmını zaten çözmüştür.

Yukarıda özetlenen bu uygulamalar iyi bir örnek olsa da çelik üretimindeki karbonsuzlaşma sürecinin tüm sorunlarını çözmemektedir. EAF'lerde hurdaya alternatif veya hurda ile beraber kullanılan cevher kökenli hammadde türleri karbonsuzlaşma süreçlerinin sorunlu kısmıdır.

Acciaieria Arvedi şirketi, EAF'den yassı çelik üretimi yapan AB'deki nadir tesislerden biridir. Üretilen yassı çelik türü gereği tesiste HBI kullanmaktadır. HBI üretimindeki emisyon ve karbon içeriğinin EAF prosesinin toplam emisyon düzeyine etkisi bu örnekte çözülmemiş sorun olarak durmaktadır.

Arvedi örneğinin bu aşamada en çok öne çıkan farklılığı karbonsuzlaşmaya "verimlilik" ve "döngüsel çelik" yapımı ile katkıda bulunmasıdır. Teknolojik seçimleri, inovasyon, dijitalleşme, verimlilik anlayışı ve atıkların minimizasyonu/geri dönüşümü konularında bu anlayış farkı net olarak görülmektedir.

Commercial Metals Company (CMC) - ABD

ABD'de yerleşik bulunan CMC, "Micro mill" adlı, üçüncüsü 2023'te devreye giren, çelik kütük döküm makinası ile haddehane ünitesini doğrudan birbirine bağlayan bir teknolojinin ilk kullanıcısıdır. Bu teknolojide haddehane tav ocağı bulunmamaktadır. Döküm makinası üretim hızı ile haddeleme hızı senkronize edilmekte ve önemli miktarda elektrik ve doğal gaz tasarrufu sağlanmaktadır. Şirketin raporladığı Kapsam 1, 2, 3 emisyonları toplamı 0,7 ton-CO_2/ton-haddelenmiş-ürün olarak kamuoyu ile paylaşılmıştır. Kapsam 1 ve 2 emisyonları 0,45 ton-CO_2/ton-haddelenmiş-ürün, Kapsam 3 emisyonları ise 0,25 ton-CO_2/ton-haddelenmiş-ürün civarındadır. Şirket 2021 yılında toplam 4 $MtCO_2e$ sera gazı emisyonu yapmıştır (**Tablo 9**).

Tablo 9 - CMC şirketine ait çelik üretimi emisyon değerleri[177]

Kapsam	Değer (ton-CO_2/ton hadde ürünü)
Kapsam 1 ve Kapsam 2	0,45
Kapsam 3	0,25
Kapsam 1,2 ve 3	0,70

Dünya genelinde %100 hurda kullanımlı EAF'ler arasında en iyi değerlerden biri olan bu örneğin farklılıkları şu şekildedir:

- Tesiste, yatay hurda ön ısıtma sistemine sahiptir. Döküm ve haddeleme bölümleri entegre olarak kesintisiz çalışmaktadır. Bu entegrasyon, sıvı çelik – nihai ürün zincirindeki metalik kayıpları ve enerji tüketimi minimize etmektedir.
- Yenilenebilir elektrik kullanımı %12 düzeyindedir. EAF'de güneş ve rüzgar enerjisinden üretilmiş elektriği kullanmanın önündeki teknik engeller, geliştirilen teknolojiler ile aşılmıştır. Tesis, 2023'te tümüyle şebekeden bağımsız güneş ve rüzgâr kaynaklı elektrik kullanılabilir hale gelecektir.
- CMC, ergitme, döküm ve haddeleme zincirindeki seçim farkı, döngüselliğe verilen önem ve sürdürülebilirlik vurgusu dışında, yeni bir proses, deneysel teknoloji veya birincil çelik yapım hammaddesi kullanımı gibi farklı tercihlerde henüz bulunmamıştır.

177 Performance Tables. https://esg.cmc.com/wp-content/uploads/CMC_Performance_Data_Tables_2023.pdf

Beltrame AFV - İtalya

Beltrame AFV, İtalya, Romanya, Fransa ve İsviçre'de çelik fabrikaları olan ve EAF esaslı çelik yapım prosesine sahip bir gruptur. Grup, RINA tarafından, ISO 14064-1'e uygun olarak 2021 yılı karbon ayak izi doğrulama denetiminden geçirilmiştir. Nihai hadde ürünü bazında, Kapsam 1, 2 ve 3 için yapılan doğrulama sürecinde elde edilen veriler **Tablo 10**'da sunulmuştur.

Tablo 10 - Beltrame AFV şirketine ait çelik üretimi emisyon değerleri[178], 2021

Kapsam	Değer (ton CO_2/ton hadde ürünü)
Kapsam 1	0,14
Kapsam 2	0,12
Kapsam 3	0,31
Kapsam 1, 2 ve 3	0,57

Şirketin elde ettiği 0,57 ton-CO_2/ton-haddelenmiş-ürün değeri etkileyicidir. Değerin çelik sektörü ve AB EAF'leri arasındaki yeri de çarpıcıdır. Grup 2030 yılı için 2015'e göre %40 emisyon azaltım hedefi taahhüt etmiştir.

Grup, 2030 sera gazı azaltım hedefini (2021'e göre %40 oranında azaltım); atıkların %90 oranında geri dönüşümü, yenilenebilir elektrik üretimi, hidrojen kullanımının doğal gaz ile beraber artırılması, elektrifikasyon, verimlilik ve döngüsellik artışları ve tüm değer zincirinin optimizasyonu ile mümkün olabileceğini belirtmektedir. Yenilenebilir enerji kullanımı ve üretimdeki verimlilik en büyük azaltımı sağlamaktadır.

178 "*Carbon neutral steel by AFV Beltrame Group*", 2021. https://gruppobeltrame.com/wp-content/uploads/2023/03/230227_Chalibria_technical-document_mod_EN_r3-002.pdf

Bu iyi uygulama örneği özellikle ülke elektrik üretim emisyon değeri ile Kapsam 3 emisyonun toplam içindeki paylarının ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

İyi uygulama örneklerin genel değerlendirmesi

EAF'lerden verilen en iyi uygulama örnekleri, aslında çelik üretiminin bu kısmı için henüz radikal dönüşümlerin yaşanmadığını, döngüsellik ve sürdürülebilirlik farkındalığının arttığını göstermektedir. Örneklerdeki EAF'li çelik üreticilerinin hayata geçirdiği karbonsuzlaşma çalışmaları yüksek maliyetli teknolojik dönüşümler değildir.

Çelik sektöründe beklenen karbonsuzlaşma sürecinin bu aşamasındaki örnekler; hurda bulunabilirliği, özel çelik türleri için birincil çelik yapım teknolojileri, gerekli olan hammaddeleri geliştirme, yeni hammadde ve proseslerin gerektireceği metalurjik uygulama performansı ile yatırım finansmanı/süresi gibi hususların henüz çok gündeme gelmediğini göstermektedir.

Hurda bulunabilirliği ve hurdanın kalitesinin üretilecek çelik cinsine uygunluğu açısından sorun olmadığı durumda yenilenebilir kaynaklardan üretilmiş elektrik kullanımı en önemli adımdır. Ancak EAF'ler için asıl sorunun hammadde türü, bulunabilirliği ve net sıfır hedefine yaklaşıldığında metalurjik proseste yapılması zorunlu hale gelecek dönüşümlerdir.

Metalurjik proses açısından en çarpıcı değişim Arvedi'nin sıvı çelik oksijen seviyesi, sentetik karbon kullanımı, atıkların döngüselliği, atık ısı geri dönüşümünde elektrik/buhar üretimi ve kullanımı, EAF tabanda kalan sıvı çelik seviyesi ve manyetik banyo hareketi vb. uygulamalarıdır.

Beltrame örneğinde görüldüğü gibi Kapsam 3 emisyonu çok ciddi bir paya sahiptir, tüm ekosistemin dönüşümünü gerektirmesi nedeniyle azalması en zorlu olacak bölüm budur.

EK 4. İNDÜKSİYON OCAĞI İLE ÇELİK ÜRETİMİ ROTASI

İndüksiyon ocağı üretim teknolojisi, önceleri dökümhanelerde metal ergitme ocağı olarak kullanılan bir ergitme ünitesi iken ilk olarak Hindistan, ardından da Körfez ülkeleri ve Türkiye'de yaygınlaşan bir metalik hurda ergitme ve çelik yapım sistemi halini almıştır.[179]

Bu üretim rotasındaki ergitme mekanizması; içi refrakter ile kaplı silindirik bir haznenin dışına döşenmiş su soğutmalı bakır bobinden geçen akımın yarattığı elektromanyetik alanın refrakter hazne içindeki metalik hurdada oluşturduğu indüksiyon akımlarına karşı metalin direncinin neden olduğu ısı enerjisinin, metali içten içe ergitmesi şeklinde çalışmaktadır.

Metalurjik olarak ve çelik sektörünün karbonsuzlaşması açısından örnek özelliklere sahip bir ergitme teknolojisidir. İndüksiyon ocağı ile yapılan çelik üretimine dair çeşitli unsurlar aşağıda özetlenmiştir:

- İndüksiyon ocağı ile yapılan ergitmede sadece elektrik enerjisi kullanılır. Kimyasal enerjinin kullanılmaması metalurjik olarak diğer hurda ergitme teknolojilerinden farklılaşmasına neden olur. Yapılan üretimde, hurdanın içerdiği karbon kaynaklı sınırlı emisyon dışında Kapsam 1 emisyonu oluşmaz.
- Kimyasal enerji kullanılmaması nedeniyle oksidasyon kaybı çok azdır. İndüksiyon ocağı ile yapılan üretim biçimi metalik verimi en yüksek ergitme teknolojisidir. Hurda içeriğine bağlı olarak; %95-99 oranında metal ergitme verimliliği tipik değerdir.
- İndüklenen akımın, metaldeki dirençle yarattığı ısı enerjisi ile ergitme gerçekleştiği için, EAF'deki enerji iletim verimliliğinden çok daha yüksek enerji verimliliğine sahiptir. Devre kayıpları, refrakter, cüruf ve ortama yayılan ısı kaybı dışında en büyük ısı kaybı bobin soğutma suyuna aktarılan enerjidir. %65-70 elektrik enerjisi verimliliği tipik orandır.
- İndüksiyon ocağı sıvı çelik çözünmüş oksijen seviyesi, klasik EAF prosesindeki değerden yaklaşık 20 kat daha azdır. Bu çok düşük çözünmüş oksijen seviyesi, düşük ferro alyaj tüketimine ve çok düşük deoksidasyon ürününe neden olur.
- Elektrot[180], karbon verici, doğal gaz, oksijen ve buna ilişkin ekipmanlar indüksiyon ocağında kullanılmaz.
- Baca gazı atık ısı miktarı ve sıcaklığı EAF tesisleri ile kıyaslandığında çok düşüktür ve filtre tozu ise yaklaşık 6 kat daha azdır.
- Özgün metalurjik ve çevresel etki özelliklerine karşın indüksiyon ocakları; ocak hacim ve güç giriş kapasitesinin kısıtlı olması, (en büyük ocak 65 ton büyüklüğündedir) bakım yoğun bir teknolojiye sahip olması, refrakter ömrünün diğer alternatiflere göre düşük olması, toz tutma teknolojilerinin gelişmeye ihtiyaç göstermesi, dekarbürizasyon miktarının sınırlı olması, birincil metalurjik işlemlerin sınırlı olması ve yolluklu döküm alma pratiği nedeniyle ikincil metalürji istasyonu öncesi pota cürufunun alınmasına ihtiyaç göstermesi gibi geliştirme konusu olacak özelliklere sahiptir.
- Mevcut hurda metal ergitme teknolojileri içinde en düşük karbon ve su ayak izine sahip ergitme ocağı olan indüksiyon ocağı, optimize edilmiş bir proses zinciri içinde ilgi çekici karbonsuzlaşma, enerji verimliliği ve metalurjik sonuçları elde etme potansiyeline sahiptir.

179 2023 yılı itibariyle Türkiye'de 11 adet indüksiyon ocağı teknolojisi ile üretim yapan tesis bulunmaktadır.

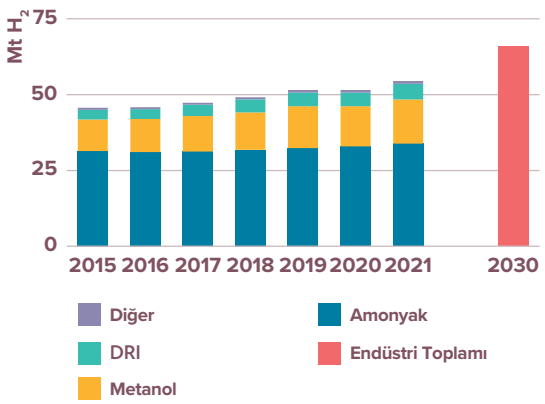
180 EAF'li tesislerdeki çelik üretim süreci boyunca üretilen ton çelik başına 1,5 kg ila 3 kg grafit elektrot tüketilir. *Joint Research Centre (JRC) (2017), Delgado Sancho, L., Roudier, S., Farrell, F., et al., Best available techniques (BAT) reference document for the non-ferrous metals industries: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control), Publications Office of the European Union, Luxembourg.*

EK 5. SANAYİDE KULLANILAN HİDROJENE DAİR GENEL BİLGİLER

Sanayide hidrojen talebi ve tüketimi

Küresel ölçekte toplam hidrojen talebi 2021 yılında 94 Mt'ye ulaşmıştır (küresel enerji tüketiminin %2,5'ine karşılık gelecek kadar enerji taşır.) Bu talebin 70 Mt kadarı saf hidrojen ve 20 Mt kadarı ise metanol ve çelik üretiminde kullanılmak üzere diğer gazlarla karıştırılmış hidrojendir. 94 Mt rakamına, endüstriyel proseslerde ısı ve enerji üretimi için kullanılan ve ilgili süreçlerde kendiliğinden oluşan 30 Mt hidrojen dahil değildir. Küresel ölçekte kullanılan hidrojenin sadece %0,1'i suyun elektrolizi yoluyla üretilmektedir[181]

Şekil 44 - Endüstrinin küresel hidrojen talebi, 2015-2030

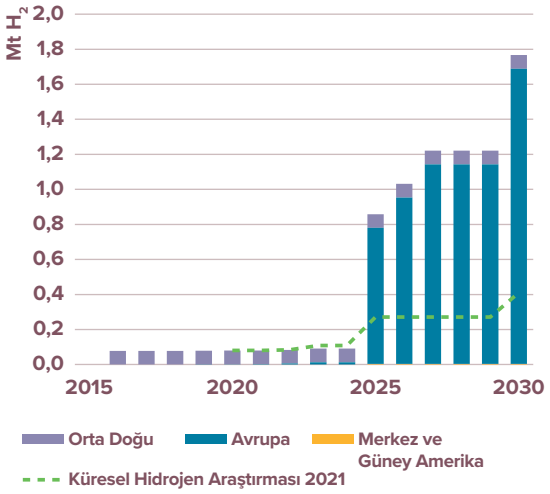


Notlar: Amonyak talebi rakamı yakıt uygulamalarını içermez. *Diğer* kategorisi altında, kimya sanayi alt kollarındaki küçük hacimleri ve diğer özel endüstriyel üretimi içerirken klor-alkali prosesleri, yüksek fırınlar, kok fırınları ve buhar kırıcılar gibi endüstriyel proseslerden yan ürün olarak üretilen hidrojeni içermez. 2021 değerleri tahmini miktarları içerir.

181 "*Global Hydrogen Review 2022*", IEA. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022

2021 yılında yaklaşık 65 Mt olan endüstriyel hidrojen talebinin 2030 yılına gelindiğinde IEA net sıfır senaryosunda yılda yaklaşık 70 Mt olacağı tahmin edilmiştir. 2021 yılındaki endüstriyel talebin dağılımı şu şekildedir: Amonyak üretimi – 34 Mt, Metanol üretimi – 15 Mt ve DRI temelli çelik üretimi[182] – 15 Mt (**Şekil 44**). Düşük emisyonlu hidrojen üretiminin (1 Mt) tamamına yakını CCUS altyapısına sahip fosil yakıt kullanan tesislerden gelmektedir (**Şekil 45**).

Şekil 45 - Operasyonel ve planlı düşük emisyonlu hidrojen kullanılarak yapılması beklenen çelik üretimi, 2015-2030



Notlar: CSA = Orta ve Güney Amerika; GHR 2021 = Küresel Hidrojen İncelemesi 2021.

Grafiğe dahil edilen tüm projeler, elektroliz yoluyla üretilen hidrojeni içerir. Yalnızca kamuoyu ile paylaşılmış ve faaliyet başlangıç yılı olan projeler dahil edilmiştir. *Küresel Hidrojen İncelemesi 2021*, Ağustos 2021 itibarıyla *IEA Hidrojen Projeleri Veritabanı'nda* bulunan projelerden elde edilen tahmini düşük emisyonlu hidrojen üretimini göstermektedir.

182 DRI verileri, demir üretim fırınına sentez gazı girişinin bir bileşeni olarak hidrojenin üretildiği tüm geleneksel üretimi içerir.

2030 yılına gelindiğinde ülkelerin taahhüt ettikleri iklim hedeflerine ulaşılması için yıllık yaklaşık 35 Mt kadar düşük emisyonlu hidrojen üretimine ihtiyaç duyulacaktır.[183] 2050 yılı net sıfır hedefleri için bu rakam yılda 100 Mt olarak tahmin edilmiştir.

2021 yılı itibariyle sanayi sektöründe kullanılmakta olan hidrojenin tamamına yakını, fosil yakıtlardan (doğal gaz veya kömür) üretilmekte olup ve bu süreç kaynaklı doğrudan 630 Mt CO_2 emisyonu oluşmaktadır. Bu rakam 2021 yılında endüstriyel CO_2 emisyonlarının %7'sine karşılık gelmektedir. Buna, üre ve metanol kullanımı sırasında salınan tahmini 290 Mt CO_2 de dahildir. [182]

EK 6. ÇELİK ENDÜSTRİSİNDE GELENEKSEL KARBON KAYNAKLARI YERİNE BİOCHAR VE BİYOKÜTLE KULLANIMI

Değişik boyutlarda ***metalurjik kok*** ve ***toz antrasit***, indirgeyici ve enjeksiyon malzemesi olarak yüksek fırın ve ark ocaklarında metalurjik nedenlerle çok önemli miktarlarda kullanılmaktadır.

Çeliğin tanımı gereği karbon içermesi ve birçok metalurjik proseste karbonun olmazsa olmaz element olması nedeniyle sera gazı emisyonu düşük veya sıfır olan alternatif karbon kaynakları, çelik endüstrisinin karbonsuzlaşma çalışmalarında temel odak noktası olmuştur.

Biochar malzemesi de bu alternatiflerden biridir. Örneğin Brezilya'da çelik endüstrisini karbondan arındırma çabaları, yüksek fırınlarda kömür yerine birincil olarak biyokömür kullanımına odaklanmıştır. 2021 itibarıyla, Brezilya çelik üretiminin yaklaşık %11'i biyokütleden elde edilen kömüre dayanmakta ve bu da Brezilya'yı küresel olarak biyokömür bazlı çeliğin en büyük üreticisi haline getirmektedir. Minas Gerais, Maranhão ve Pará eyaletlerindeki yedi demir ve çelik tesisi, proseslerini kömüre ek olarak okaliptüs ormanlarından elde edilen biochar ile çalışacak şekilde modifiye etmiştir.

Brezilya örneğindeki kısmi kullanımlar dışında büyük boyutlu tesislerde biyokütle ve biochar kullanılarak yapılan çelik üretimi çok sınırlıdır. Yürütülen çalışmalarda verimlilik ve metalurjik fonksiyon açısından henüz yaygınlaşabilecek bir düzey elde edilememiştir. Bazı uygulama teknolojileri henüz geliştirme veya pilot tesis aşamasındadır.

Çeşitli biyolojik ve endüstriyel atıkların çelik üretiminde kısmen kullanılması döngüsellik adına olumlu olsa da biochar üretimi için kullanılacak alanlarda doğal ekosistemleri bozacak veya üretim alanlarının çevresinde yaşayanları olumsuz etkileyecek projelere dikkatle yaklaşılması gerekir.

Biochar malzemesinin karbon nötrlüğüne ilişkin değerlendirmeler de karmaşık ve sıklıkla tartışmalı bir hüviyete sahiptir. Biochar, kağıt üzerinde demir ve çelik üretiminden kaynaklanan doğrudan emisyonları azaltabilirken, bazı biochar kaynakları ormansızlaşmadan ve işlemeden kaynaklanan emisyonlara neden olur ve çelik üretim sürecinde tasarruf edilen emisyon miktarını ortadan kaldırabilir, hatta aşabilir.

Özetle, pilot düzeydeki karbon nötr biochar/biyokütle kullanımında metalurjik olarak bazı örnekler gelişmeye açık ve umut vericidir, ancak sistemi besleyecek bu malzemelerin miktarsal olarak yetersizliği önemli bir engeldir. Bu nedenle metalurjik proseslerin karbon kaynaklarına en az ihtiyaç gösterecek şekilde yeniden dizayn edilmesi karbonsuzlaşma hiyerarşisinde daha uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

183 Dönemsel olarak elektrik fiyatlarının H_2 üretim maliyetini belirlemesi beklenmektedir. H_2 üretimi maliyetinin büyük bir kısmı kullanılan elektrik enerjisi maliyetinden kaynaklanır.

EK 7. ÇELİK ÜRETİMİNİN KARBONSUZLAŞMASINDA HAMMADDE KAYNAKLI SINIRLAMALAR

Hurda arzı ve kalitesi

Çelik üretiminde enerji ve emisyon açısından EAF'li tesislere avantaj sağlayan bir hammadde olan hurda, karbonsuzlaşma çabaları ve rekabetçilik unsurları nedeniyle kritik önemde bir hammadde haline gelmiştir.

Tablo 11'de gösterildiği gibi hurda döngüsü, çelik tüketimi ve tüketilen çeliğin hangi sektörlerce kullanıldığı ile yakından ilişkilidir. Tüketilen çelikler belirli bir süre sonra demir çelik hurdası kaynağı olarak pazara arz edilebilmektedir. Geri dönüşüm oranı ve malzemenin geri dönüşüme girme süresi, hurda arzı projeksiyonları için belirleyicidir.

2050 için 1-1,2 milyar ton hurda arzının mümkün olacağı öngörülmektedir. Günümüzle kıyaslandığında arzın iki katına çıkmasına karşın hurdanın oluştuğu kaynak ülkelerin kendi iç piyasalarındaki hurda tüketiminin de artması beklenmektedir. Bu nedenle arzdaki artış uluslararası ticarete konu olan hurda miktarını değiştirmeyebilir.

Hurdanın bulunabilirliğinin yanı sıra "temiz" hurdaya talebin artması da hurda bazlı EAF'li tesislerin karşılaşacağı sorunlar arasındadır.

Şekil 46, farklı hurda türleri ile hurdadaki iz element içeriğine bağlı olarak üretilebilecek çelik çeşitlerini göstermektedir. EAF'lerin temel girdisi olan hurda, yapısından kaynaklanan çeşitli nedenlerden dolayı teknik olarak sınırlı sayıda çelik türünü üretmeye izin vermektedir.

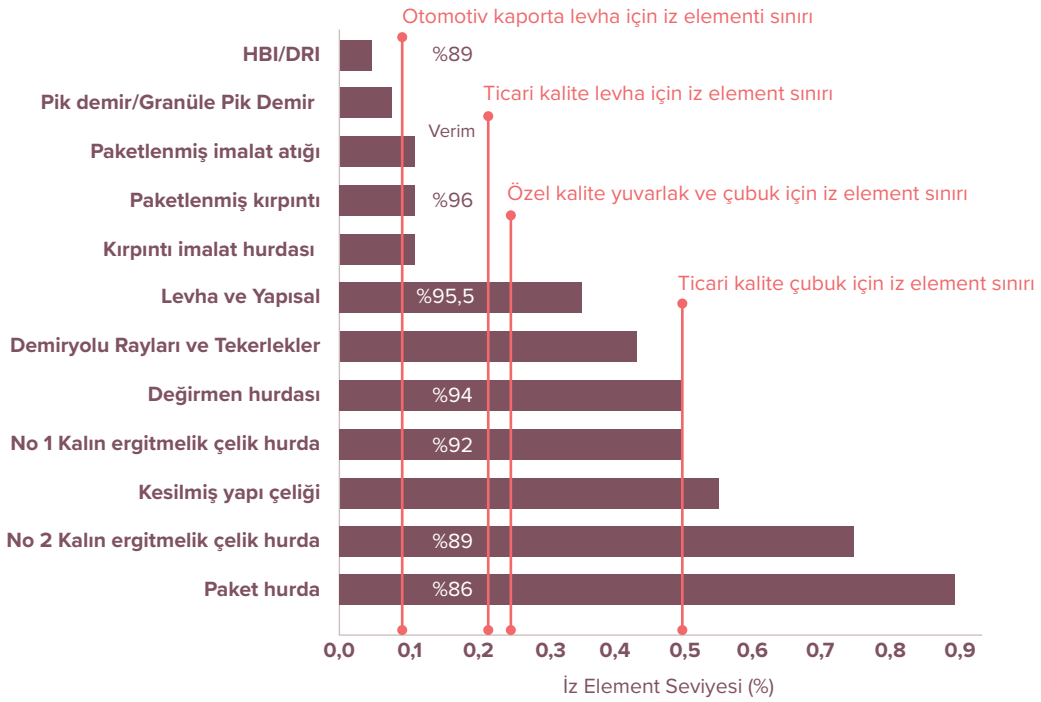
EAF'li tesislerde hammadde kullanımda hibrit çözümler (hurda ve cevher bazlı metalik malzemelerin beraber kullanılması), proses esnekliği, kalite, maliyet ve sera gazı optimizasyonu açısından yaygın bir seçenek olabilir.

Tablo 11 - Çeliğin kullanım alanları, geri dönüşüm oranları ve çelik ürünlerin kullanım ömürleri[185]

Çelik tüketilen sektör	Çelik tüketimindeki payı (%)	Geri dönüşüm oranı (%)	Geri dönüştürülen çelikteki oranı (%)	Kullanım ömrü (yıl)
İnşaat	51	85	43	100
Karayolu taşımacılığı	12	90	15	15-20
Diğer taşımacılık	5	90	15	30-35
Makina	15	90	14	50
Diğer	17	50	9	0-5

184 "*Trends in the global steel industry: Evolutionary projections and defossilisation pathways through power-to-steel*", 2022. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622037544

Şekil 46 - Hurda türlerinin iz element içerikleri ve üretilebilecek çelik türüne etkisi



Kaynak: International Iron Metallics Association Ltd.

Demir cevheri kalitesi

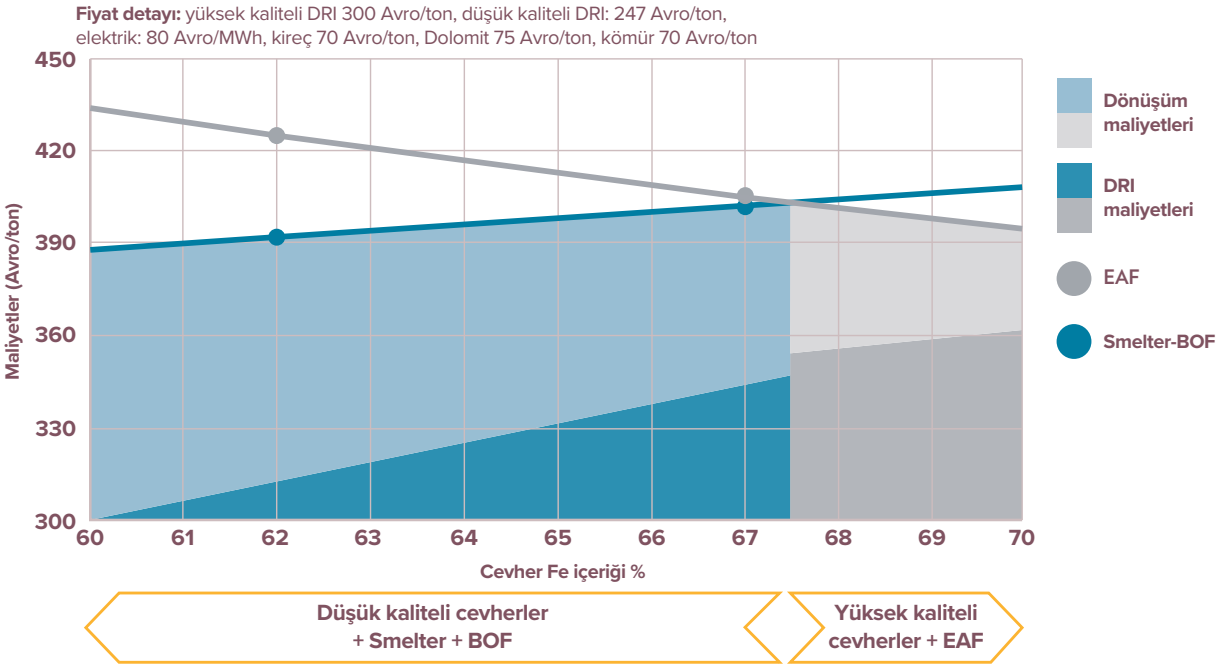
Karbonsuzlaşma süreç analizlerinin dikkate alması gereken bir diğer konu da cevher kalitesidir. Yüksek kaliteli DRI eldesine müsait cevherler, ticari demir cevherlerinin %5-7'sini oluşturmaktadır. Buna karşın talebin arzdan çok daha fazla olacağı beklenmektedir.

Tamamen hurda esaslı EAF çelik üretimi rotasına kıyasla, hurda ile beraber ocağın yüksek miktarlarda DRI ile beslenmesi yoluyla yapılan üretimde daha fazla enerji tüketilmektedir. Bu durum temel olarak, DRI'daki gang miktarından ve DRI'daki demir oksitin nihai indirgemesinden kaynaklanmaktadır. Üretim sırasında DRI ile beslenen EAF'nin karlı bir şekilde işletilmesi için, düşük gang içeriği ve yüksek metalizasyona sahip yüksek kaliteli DRI/HBI gereklidir.

Düşük gang içeriği ve yüksek metalizasyon, EAF sürecindeki cüruf miktarını makul seviyelerde tutar ve daha az demir kaybı, daha düşük elektrik gücü ve akı tüketimi sağlar. Sonuç olarak da daha düşük kaliteli DRI/HBI kullanımına kıyasla daha iyi bir verim sağlar.

Düşük kaliteli cevherin tipik gang içeriği %12'dir ve bu yüksek kaliteli cevherlerdeki miktarın iki katından fazladır. Daha yüksek gang içeriği, hedeflenen cüruf bazikliğini ve uygun cüruf köpürmesini elde etmek için EAF'lerde daha yüksek akı tüketimine neden olmaktadır.

Şekil 47 - EAF ve Smelter + BOF üretim rotası için cevher kalitesine (Fe içeriği) göre toplam maliyet değişimi[186]



Bu nedenle, düşük kaliteli cevherlerden üretilen DRI'nin işlenmesi için yeni çözümler geliştirilmektedir. Yeni yatırımlarla artması beklenen kaliteli DRI arzına rağmen, çelik üreticilerinin bir kısmı H_2-DRI sonrası ergitme ocağı seçiminde EAF yerine ESF/OBF seçeneğine yöneltmektedir.

Şekil 47'de farklı üretim rotaları için cevher türüne göre yapılacak dönüşüm harcamaları ile ton başına üretim maliyeti arasındaki maliyet dengesi gösterilmektedir. Bu şekilde düşük dereceli cevherlerin (yani Fe<67 wt-%) işlenmesi için DRI-ESF-BOF rotasının ekonomik olarak uygulanabilir bir yol olabileceği ve ayrıca karbon emisyonunu azaltabileceği, DRI-EAF rotasının ise yüksek dereceli cevherler (yani Fe>67 wt-%) için daha uygun olduğu iddia edilmektedir.

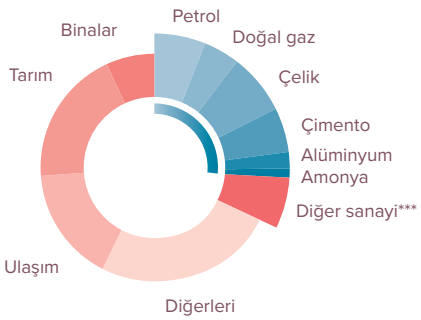
EK 8. ÇELİK SEKTÖRÜ KAYNAKLI SERA GAZI EMİYONLARI VE BUNLARIN KAYNAKLARI

Şekil 48 ve **Şekil 49**'da çelik sektörü kaynaklı sera gazı emiyonlarının toplam emisyonlar içerisindeki payı ve bu emisyonların hangi süreçlerde oluşutuğu bilgileri sunulmuştur.

185 "*Breakthrough Pathways to Decarbonize the Steel Sector*", 2022. https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e594/e594120.pdf Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 59 No. 4 (December 2022)

Şekil 48 - Küresel sera gazı emisyonlarının farklı sektörlere göre dağılımı[187]

Küresel sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı (Kapsam 1 ve 2)*



Kapsam 1 ve 2 emisyonlar vs. Kapsam 3 Emisyonları**



LEJANT

Kapsam 1 ve 2

Kapsam 3

2,0 $GtCO_2e$

0,5 $GtCO_2e$

Yuvarlağın boyutu:
Sera gazı emisyonu miktarını gösterir.

* Kapsam 2 emisyonları imalat kaynaklı emisyonları içerir, diğer sanayi dışı sektörler dahil edilmemiştir.

** Kapsam 3 emisyonları GHG protokolü standartlarını dikkate almıştır.

*** Petrokimyasallar, kömür madenciliği, kağıt üretimi, seramik üretimi vd. diğer sektörleri içerir.

Şekil 49 - Çelik sektörü Kapsam 1,2 ve 3 kategorisine giren süreçlerin detayı[188]

Girdiler	Demir & Çelik Yapımı		Ham çelik üretimi sonrası Nihai ürün üretim	Ham çelik üretimi sonrası Değer zinciri
Girdilerin tesise taşınması	Kokun hazırlanması	Oksijen tesisi	Sıcak haddeleme	Dışarı gönderilen baca gazı kaynaklı emisyonlar
Hurdanın toplanması ve ayrıştırılması	Sinterleme	Kireç üretimi	Soğuk haddeleme	Dışarı iletilen enerji kaynaklı emisyonlar
Demir cevheri madenciliği	Yüksek fırın	Peletleme	Kaplama	Yüksek fırın cürufunun dışarı gönderilmesi
Kömür madenciliği	Bazik oksijen fırını	Kazanlar ve Enerji tesisi (fazla gaz)		Ulaşım kaynaklı emisyonlar
Doğal gazın çıkarılması	Döküm	İzabe indirgemesi		Nihai ürün üretimi
Enerji üretimi (satın alınan)	Doğrudan indirgenmiş demir	Elektrik ark ocağı		
H2/Syngas üretimi		İkincil metalurji		
Diğer petrol ürünlerinin çıkarılması				
Biyokütle ve biyogaz üretimi				
Kireç madenciliği				
Demir dışı cevher madenciliği				
Ferroalyaj üretimi				

186 "*Net-Zero Industry Tracker 2022 Edition*", 2022. https://www3.weforum.org/docs/WEF_NetZero_Industry_Tracker_2022_Edition.pdf

187 "*Steel Science-Based Target-Setting Guidance*", 2023. https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-Steel-Guidance.pdf

İPM

İSTANBUL POLİTİKALAR MERKEZİ
SABANCI ÜNİVERSİTESİ
STIFTUNG MERCATOR GİRİŞİMİ

ISBN 978-625-6956-62-9

İstanbul Politikalar Merkezi
Bankalar Caddesi No: 2 Minerva Han 34420
Karaköy, İstanbul Türkiye
+90 212 292 49 39
+90 212 292 49 57
@ ipc@sabanciuniv.edu
w ipc.sabanciuniv.edu