

AĞIR SANAYİİ KARBONSUZLAŞTIRMA ve YEŞİL ÇELİKLER

Mustafa Safa Yılmaz*^{ID}
Fevzi Yılmaz**^{ID}

Alınma:29.07.2024; düzeltme:27.01.2025; kabul: 28.01.2025

Öz: Çimento, çelik ve kimyasalların üretimi; kara, deniz ve hava yolu ulaşımı; evlerde ve iş yerlerindeki ısıtma ve soğutma işlevleri enerji obur ve çevre oburdur. Yeni atılım olarak, enerji bağlamında sürdürülebilir-yenilenebilir enerji kaynakları öne çıkarken, çevre bağlamında karbonsuzlaştırma (dekarbonizasyon) başı çekmektedir. Bugün endüstri dünyasında, “Karbonsuzlaştırma 1 trilyon dolarlık bir iş kolu olur mu?” sorusu sorulmaya başlanmıştır. Ağır sanayi, özellikle çelik sektörü özelinde karbonsuz ekosistemin oluşturulmasındaki zorlukları tartışmak ve incelemek bu çalışmanın ana temasıdır.

Anahtar Kelimeler: Karbonsuzlaştırma, Yeşil çelik, Sünger demir, Sıvı oksit elektrolizi

Decarbonization of Heavy Industry and Green Steels

Abstract: The production of cement, steel, and chemicals; land, sea and air transportation; heating and cooling functions in homes and workplaces are energy-hungry and environmentally detrimental. As a new breakthrough, sustainable-renewable energy sources come to the fore in the energy context, while decarbonization takes the lead in the environmental context. Today, the question "Can carbon removal become a 1 trillion-dollar business?" is being asked in the industrial world. Obviously, a carbonless economy is difficult in heavy industry, especially in the steel sector. The main theme of this study is to discuss and examine the challenges of a decarbonized economy in heavy industry, especially in the steel sector.

Keywords: Decarburization, Green steel, Sponge iron, Liquid oxide electrolysis

1. GİRİŞ

Çevresel etkileri ve küresel üretimlerine göre çimento, çelik ve kimyasalların üretimi üç ağır sanayi dalıdır. Bu üç endüstri gurubunda da yüksek sıcaklıkta gerçekleşen kimyasal işlemlerin ve çevresel etkilerin fazla olmasından ötürü karbon emisyonları yüksektir ve dekarbonizasyonları (karbonsuzlaştırılmaları) da oldukça güçtür.

Çelik üretimi için 1500-1600 °C sıcaklıklarda çalışılmaktadır. Bu sıcaklıklar çoğunlukla karbon yüklü fosil yakıtlar ile elde edilmektedir. Üretimi karbonsuzlaştırma için yeni alternatif enerji kaynakları mevcuttur. Bunlardan bir tanesi; yeşil hidrojen enerjisidir, yenilenebilir enerji kullanarak suyun elementlerine ayrılması ile elde edilir. Elektroliz ile açığa çıkan gaz sıfır karbonlu yakıt olarak kullanılabilir. Hidrojen kaynaklı yakıt sistemlerinde yüksek soğutma sistemi ve yüksek hacim gerekliliği önemli bir zorluk olarak görülmektedir. Ayrıca hidrojen kullanımının karbon kullanımına göre diğer dezavantajları ise; yüksek üretim maliyeti, depolama ve taşıma zorlukları, altyapı eksiklikleri ve güvenlik endişesi gibi durumlar detaylandırılmaktadır (Romasheva vd. 2023). Görüldüğü gibi hidrojen enerjisinin kullanımı hem teknik hem ekonomik

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa

** Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

İletişim Yazarı: Mustafa Safa Yılmaz (msafayilmaz@uludag.edu.tr)

zorluklar ile kısıtlanmaktadır, fakat gelişen teknolojinin bu handikapları aşacağı ve hidrojen enerjisinin geleceğin önemli bir enerji kaynağı olacağı birçok üretici tarafından kabul görmektedir.

Bir başka karbonsuzlaştırma sistemi, fosil yakıt kullanan teknolojilerin bacalarından karbon yakalama ve depolama teknolojilerini kullanmaktadır (White vd., 2003). Üçüncü alternatif olan ve bazı üstünlüklerde sunan bir diğer yeni sistem ise; indirgeme reaksiyonları ile saf oksijen açığa çıkarmaktadır. Herhangi bir malzemenin üretiminde elektrik enerjisinden faydalanmak karbon emisyonunu ortadan kaldırmamaktadır. Çünkü üretim sırasında yanma dışı proses kimyasının da emisyon salması söz konusudur (Mattison, 2013). Örneğin çelik üretiminde, oksijenin karbonla birleşip ve karbon dioksit oluşturduğu bilinmektedir.

Küresel ısınma ve küresel iklim değişikliği kaygısı özellikle çelik üretim teknolojileri üzerinde ciddi bir baskı oluşturmuştur fakat ağır sanayilerden birisi olan çelik üretimini karbonsuzlaştırmak çok zordur. Teknoloji ve içsel çözümler, karbon emisyonunun ancak %30'unu eleme edebilecektir (Abdeen, 2008). Bu oranların kabul edilir seviyede olmasında yasal yaptırımların da getirilmesi önemli bir rol oynamıştır. Bu çalışmada özellikle çelik üretiminin karbonsuzlaşması için uygulanabilir teknolojilerin derlemesi yapılacaktır

2. YEŞİL ENERJİ

Temiz enerji kaynağı arayışları endüstri çevrelerini, “e-yakıt” olarak anılan yeni bir yakıt tanımı ile buluşturmuştur. E-yakıtlar (elektroyakıtlar), sentetik (yedek-ikincil) ve karbonsuzlaştırma süreci ile ilişkili yakıtlardır. Eğer fosil kaynaklardan elde edilen elektriğin üretimi sırasında karbondioksit veya karbonmonoksit yakalanıyorsa, bu elektrik enerjisi de e-yakıt olarak anılır. Ayrıca sürdürülebilir enerjiden (rüzgâr, güneş, vb.) ve nükleer güç kaynaklarından üretilen elektriği kullanarak elde edilen hidrojen de e-yakıt olarak anılır. Hidrojen elektrolizle sudan elde edilir ve bazı kaynaklar bu hidrojene “yeşil hidrojen” demektedir (Dell’Aversano, 2024).

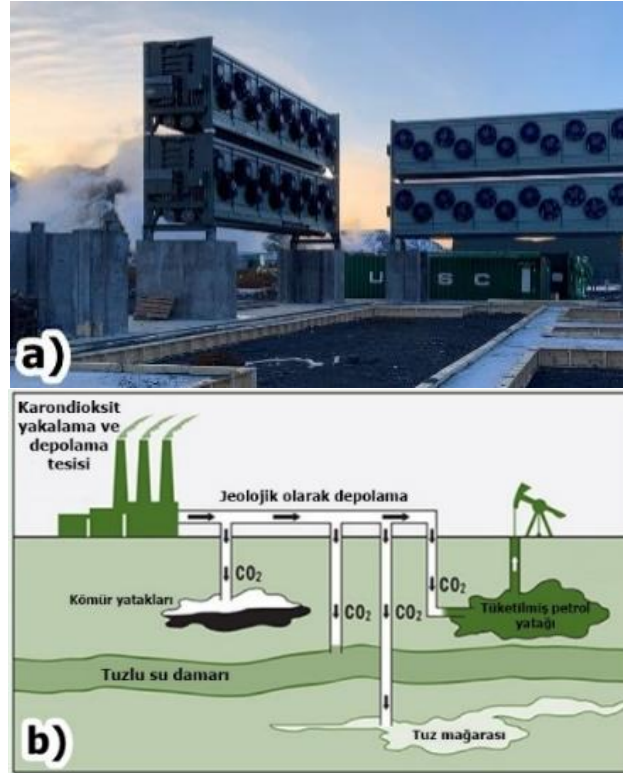
Eski pişirme yağları, hayvan yağları ve biyokütleden (bitki yaprak ve saplarından) de e-yakıt elde edilmektedir. Küresel tahıl pazarının %10’u biyoyakıt üretimine girer ve e-yakıt olarak kullanılmaktadır. Ana grupları etanol, bütanol, biyodizeller, alkoller, metan ve bütan gibi karbon içeren gazlar oluşturmaktadır. Biyoyakıtlı (mısırdan elde edilen etanol gibi) araç, tüm yakıtlar gibi partikül madde ve ozon salınımı da yapmaktadır. Fosil kaynak orijinli e-yakıtta, düşük toplam Karbon Ayak İzi (atmosfere yayılmasına sebep olan her türlü durumun, karbondioksit gazı dahil tüm sera gazlarının (CO₂) ton eşdeğeri cinsinden miktarı) için bir önceki ana işlemde karbondioksit yakalama yapılması beklenir ve bu yakıt kullanıldığında (yandığında) havaya bir önceki miktara eşit karbondioksit salınımı yapmaktadır. Özellikle karayolu ulaşımında, uzun mesafe deniz ve hava taşımacılığında e-yakıtlar, sera gazı emisyonunu azaltmanın bir yolu olarak önem kazanmaktadır (Reddy vd., 2023). Havacılık için e-yakıt üretiminde iki seçenek bulunmaktadır; i- biyokütle ve organik yağlardan (hayvan ve bitki yağları) e-yakıt elde etmek; ii- büyük e-yakıt fabrikası yanında prototip de olsa havadan/bacadan karbon emme düzeneğini bulundurmak (Rosson vd., 2021). Bu düzeneğe üretim öncesi yakalanan (emilen) karbondioksit miktarı e-yakıtın kullanımı sonrası havaya gönderilen miktarla eşleştirilmektedir. Her iki işlem de “sıfır” karbonlu elektrik ile yapılmaktadır. e-yakıt karbon nötrüdür; yakalanan karbondioksit ile yeni salınan karbondioksit eşit olursa -karbon nötr- olmaktadır. Sürdürülebilir yakıtlar (bitki kökenli) tam karbonsuz değildir ve yandıklarında %80’e kadar daha az sera gazı yaymaktadır (Carter vd., 2012). Hidrojen ve karbon birleştirilerek muhtelif sentetik hidrokarbon e-yakıtlar (dizel, petrol veya jet yakıt) elde edilmektedir. Karbondioksitin hammadde olduğu araştırmalar, sıvı e-yakıt eldesini de mümkün kılmıştır. Ulaşımında melez (sürdürülebilir yakıt ve bataryada depolanmış elektrik) yakıt sistemlerinin 2030’dan itibaren %100 sürdürülebilir yakıt olması hedeflenmektedir (Örnek kuruluş: BOEING). Yenilenebilir enerjilerden elde edilen elektroyakıtlar fosil yakıtların yerine geçebilmektedir. 2030’dan sonra da içten yanmalı motorlu araçlar yollarda olacaktır. AB, bu araçların kullandıkları yakıtın e-yakıt olmasını şart koşacaktır.

Ayrıca, yoldaki araçların %80'inin bataryalı olması öngörülmektedir. 2035'ten itibaren trafiğe çıkacak yeni araçların sıfır karbon emisyonlu olması hedeflenmektedir. Bazı, petrol ile çalışan spor arabaların e-yakıtı kullanmaları şartıyla üretimleri devam edecektir (Örnek ülke: Almanya) (Yılmaz, 2021; The Economist, 2023a; The Economist, 2023b).

3. KARBONSUZLAŞTIRMA (KARBON YAKALAMA)

DAC yöntemi (Doğrudan Havadan Yakalama/Direct Air Capture) ağaçların CO₂'yi emmesi gibi karbonun havadan alınmasını, yoğunlaştırılmasını ve bazı alanlarda kullanıma sokulmasını kapsamaktadır (Şekil 1.a). DAC'tan gelen temiz CO₂ içeceklerle köpürtücü olarak, seralara bitki büyümesini hızlandırıcı ve yeraltı petrol kaynağını akışkanlaştırıcı olarak kullanılabilir. DAC negatif emisyon olarak da anılmaktadır (Li ve Yao, 2024).

CCS yöntemi (Karbon yakalama ve depolama/Carbon Capture and Storage) doğrudan sanayiden çıkan karbonu yakalama ve depolamayı kapsamaktadır. CCUS yöntemi (Karbon yakalama, kullanma ve depolama/Carbon Capture, Utilisation and Storage) karbon yakalamayı takiben kullanmaktadır (Şekil 1.b). CCS ve CCUS proseslerinde yakalanan karbondioksit yoğun ve kirli bir gaz olup kullanılabilmesi sorunludur (Benson ve Orr, 2008). CO₂ özel kaplarda ve mekanlarda sonsuza dek depolanabilir (Şekil 1). Karbon yakalama teknolojilerinin özünde pahalı bir yöntem olduğunu Koch Blank "Karbon yakalama sistemleri mevcut altyapıya ekstra maliyet eklemek anlamına geliyor ve bu rotanın ilerleyen yıllarda rekabetçi olması neredeyse imkânsız olacak" sözleri ile açıklamaktadır.



Şekil 1:

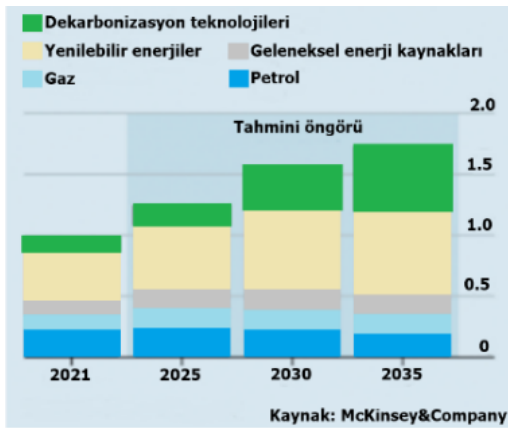
CO₂ yakalama ve depolama;

- DAC-Doğrudan havadan yakalama (<https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2022/04/new-eth-unicorn-climeworks-raises-chf-600-million.html>, 2024).
- CCUS-Karbon yakalama, kullanma ve depolama (<https://watchwire.ai/carbon-capture-utilization-storage-pipe-dream-potential-solution/>, 2024).

Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPCC/The Intergovernmental Panel on Climate Change) göre endüstri öncesinden bu yana atmosferin aşırı ısınmasının 2°C altında kalması için DAC ve CCS önemli rol oynayacaktır. Elektrikli araçlara (EV/Electric vehicle) dönüş ve endüstrilerde emisyonu azaltma yetersiz kalacaktır. Enerji danışmanı Wood Mackenzie'ye göre “-2°C’de kalmak” için küresel ölçekte yılda 8 milyar ton CO₂ emilmelidir. Bugün Amerika’da yılda 20 milyon ton CO₂, DAC ve CCS ile alınmaktadır. Bu, ABD’nin 2050 iklim hedefinin çok gerisindedir (400-1.800 milyon ton CO₂ /yıl hedefi). Danışmanlık şirketine göre küresel emisyon azaltımının 1/5’i mertebesi, küresel emisyon emilimleri ile geri alınmalıdır. Eğer Mackenzie’nin tahmini doğru ise bu yılda 8 milyar ton CO₂ emilmesine denktir ve büyük DAC ve CCS yatırımı gerekmektedir.

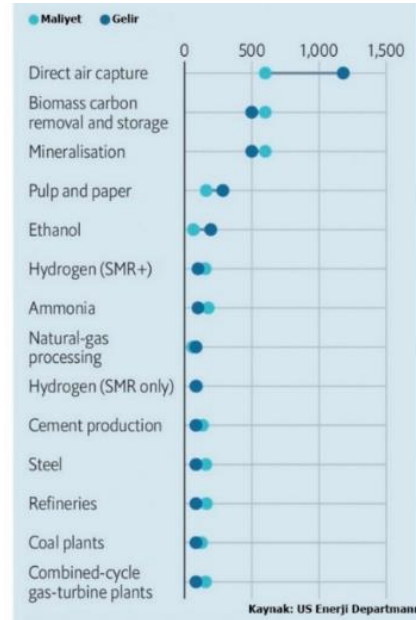
Çelik ekseninde yapılan araştırma, 2050 yılında küresel çelik talebinin 2,5 milyar tona çıkacağını öngörmektedir. Bu talep karbon emisyonunun artışını da beraberinde getirmektedir. Küresel ısınmayı sanayi öncesi seviyelerine göre maksimum 2 derecede sınırlamak için 2050 yılına kadar sektörde yaklaşık 500 milyon ton CO₂ azaltımı gerekmektedir. Bu hedef, 2015 Paris İklim Anlaşmasında konmuştur (Holappa, 2020). Bu hedefin yakalanması için metrik ton çelik başına 1,85 ton olan CO₂ değerinden 0,2 tona düşülmesi gerekmektedir. 20-40 yıl kullanımı olan ve devasa yatırımlar gerektiren yüksek fırınların varlığı bu hedefe ulaşmanın zorlaşmasına sebep olmaktadır. Yenilikçi teknolojiler ve büyük ölçekli firmaların konuyu önemsemeleri ile bu hedeflere ulaşma hayal olmaktan çıkmaktadır (Pei vd., 2020). Karbon yakalama yatırımları gelecek yıllarda en hızlı artışı gösterecektir, ikinci sıraya yenilenebilir enerji yatırımların yerleşeceği düşünülmektedir (Şekil 2).

Notres Fabrikası/Teksas yılda 500.000 ton CO₂ toplamaktadır ve CCS prosesi formatı ile depolamaktadır. Bitkiler karbon depolama aracı gibi mütalaa edilmektedir ve emisyon salan fabrikalar ağaç ekerek bir kısım CO₂ salınımlarını depolamış olmaktadır. Bitki ekmek, CO₂ depolama anlamı taşıdığından parasal karşılığı vardır. Bitkide depolamanın belirli bir ömrü varken, Notres depolama sonsuza dek sürebilir.



Şekil 2:

Trilyon Dolar olarak enerji karbonsuzlaştırma yatırımları (The Economist, 2023c).



Şekil 3:

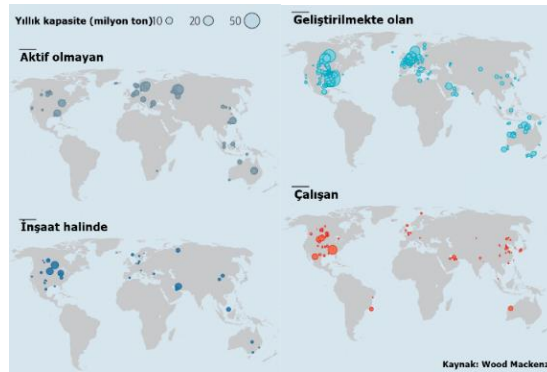
Maliyetleri ve cirolarıyla ABD CO₂ azaltma faaliyetleri “dolar/ton CO₂ 2023 yılı için” (The Economist, 2023c).

2035'te 100 DAC yatırımının olması beklenmektedir (Küresel DAC kuruluşları: Carbon Engineering ve Occidental. Küresel CCS kuruluşları: Climeworks ve Global Thermostat.). CCS, DAC'tan daha ucuzdur. Amerikan Fizik Cemiyeti 2011 yılı için yakalanan her ton CO₂ için maliyeti 600 dolar olarak hesaplamıştır Şekil 3'te verildiği gibi 2023 için tahminler DAC'ta ton CO₂ fiyatı 530-1200 dolar aralığında olup, CCS'de 480-550 dolardır (iletim ve depolama hariç). DAC'ta CO₂ temiz iken ve ticari değere sahip iken, CCS'de fabrika bacalarından kirleticilerle birlikte CO₂ gazı alınmaktadır. Mackenzie'ye göre gelecek 10 yılda 150 milyar dolarlık CCUS yatırımı yapılacaktır. DAC 2030 itibarıyla yatırım olarak 7 kat artacaktır. AB genel çevre vergisi anlayışı ile kirleticiler tarafından karbon vergisi ödeme sisteme sokulmuştur. Karbondioksit eşlik eden kirleticilerin seviyesi doğal olarak DAC veya CCS yatırımını öne çıkartacaktır. (The Economist, 2023c; The Economist, 2023d) (Şekil 3).

Karbonsuzlaştırma özelinde yapılan birçok işbirlikleri bulunmaktadır;

- KarbonFree Kuruluşu ile USSteel, BP, British Oil-Gas ortak çalışma yürütmektedir. CO₂'i özel kimyasala dönüştürme projesi ana faaliyetleridir;
- LanzeTevh ile ArcelorMittal ve Çin firmaları biyoreaktörde CO₂ türevli faydalı malzeme üretimi çalışması yürütmektedir.
- AB ile Norveç, karbon yakalama teknolojileriyle ilgili "Yeşil mutabakat" imzalamışlardır
- Microsoft biyokitle yakarak enerji üreten bir Danimarka güç santrali paydaş yaparak 10 yıl boyunca (2,7 milyon ton CO₂/yıl) CO₂ satın alacaktır. Satın alınan CO₂ Shell iş birliği ile Kuzey Buz Denizinin dibine pompalanacaktır
- Alphabet Meta 53 milyon dolarlık 112.000 ton CO₂'i 2024-2030 yılları arasında zirai atık dönüştürme projesi kapsamında satın alacaktır (Bu proje sayesinde CO₂ yoğun ziraatten uzaklaşılacaktır);
- İsveç ve Amerika bankaları karbon emme kredisi vermektedirler;
- ExxonMobil 2022-2027 yılları arasında CCS projeleri için 17 milyar dolar harcayacaktır;
- Saudi Aramco ve Emirates şirketleri 2030'da CCS kapasitelerini 6 kat arttıracaktır (5 milyon ton/yıl);
- Climeworks/İsveç Firması İzlanda'da dünyanın en büyük DAC yatırımı ile yılda 4.000 ton karbondioksiti atmosferden emmektedir (Maliyet 600-800 dolar/ton CO₂);
- Octavia Carbon/ Kenya Start Up'ı dünyanın ikinci büyük DAC fabrikasını kurmaktadır. Rift Vadisindeki jeotermal enerji kullanımı ile maliyet 300-400 dolar/ton CO₂ olacaktır (Şirket yöneticisi 5 yıl içinde maliyetin 100 dolara inebileceğini belirtmiştir).

Kaynaktan karbon yakalama (CCS, CCUS) ve negatif emisyon (DAC) çabaları büyük petrol şirketlerinin itibarını kurtaracaktır.CO₂ canlı biyokütlenin karbon-hidrat gövdesi için çok önemlidir. Diğer yandan, küresel emisyonda ağır sanayinin payı 1/3 olup bunu oluşturan CO₂'in yakalanıp depolanması gerekmektedir (Şekil 4).



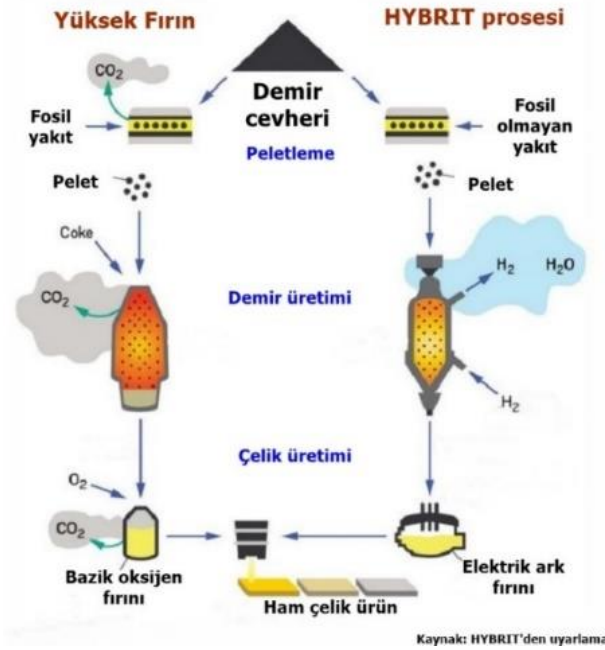
Şekil 4:

Karbon yakalama, değerlendirme ve depolama projeleri (The Economist, 2023c).

4. YEŞİL ÇELİK

Günümüzde bilinen çelik üretim prosesleri, insanlığın oluşturduğu sera gazı emisyonlarının %7-9'luk kısmını üretmektedir. Çelik üretiminde yüksek fırınlar, çelik fırınları ve ark ocakları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Nispeten klasik çelik üretim yöntemleri olarak görülen bu sistemlerin sera gazı etkisi yüksek düzeydedir (Kim vd., 2022). Yüksek fırın sürecini ikame eden yöntem (DRI-direk redüksiyon) ham demir yerine sünger demir (süngerimsi bir görüntüye sahip olduğu için bu ad verilmiştir) üretimine imkân sağlar. İçerisinde yüksek oranda metalik demir içeren sünger demir bir yarı üründür ve indirgenmemiş demir oksitler, karbon ve gang bileşenleri (cevherden gelen) içermektedir. Hindistan'da çok miktarda kömür esaslı sünger demir üretim tesisleri bulunmaktadır. 2021 raporlarında katı redükleyici /gaz redükleyici oranı 46/5 olarak verilmiş olup bu oran kısa zamanda ters yüz edilmesi beklenmektedir. Atmosfere en çok CO₂ salan üç ülke Çin, ABD ve Hindistan'dır (<https://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/direct-reduced-iron.html>, 2024).

Şekil 5'te yüksek fırın prosesi ve DRI prosesi (HYBRID process) çelik üretimini mukayeseli olarak vermektedir. Günümüzde Direk Redüksiyonu yeşil hidrojen ile yapma ana akımı oluşturulmaktadır. Burada ana ürün dışındaki proses çıktısı su veya su buharıdır. Hidrojenli Çelik İmalat Teknoloji (HYBRIT- The Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology) sistemleri sayesinde yüksek fırın bazlı çelik üretiminde kullanılan kok ve fosil yakıtların yerine yenilenebilir enerjiden üretilmiş hidrojen kullanılmaktadır. Bu teknoloji ile CO₂ emisyonları azaltılmaktadır (Shahabuddin vd., 2023). Enerji kaynağı olarak daha çok rüzgârdan elde edilen elektrik kullanılmaktadır. HYBRIT sistemlerinde, su elektrolizle parçalanmakta ve açığa çıkan hidrojen değerlendirilmektedir. 2017 yılı verilerine göre bu proses %20-30 daha pahalı iken, bugün AB Emisyon Ticaret Sistemi'nde yapılan güncellemeler ile CO₂ salınım izin maliyetlerindeki yaklaşık 5 kat artış HYBRIT sistemini rekabet edebilir seviyelere getirmiştir. Ayrıca ilerleyen yıllarda AB'nin emisyon azaltma taahhütlerini daha da sıkılaştırması beklenmektedir (<https://www.ispatguru.com/green-steelmaking/>, 2024; Şahin vd. 2012).



Şekil 5:

Yüksek fırınlı (ve bazık oksijen fırını) çelik üretim sistemi ile, Hidrojenli DRI (sünger demir) ve EAF çelik üretim süreçleri (Shahabuddin vd., 2023).

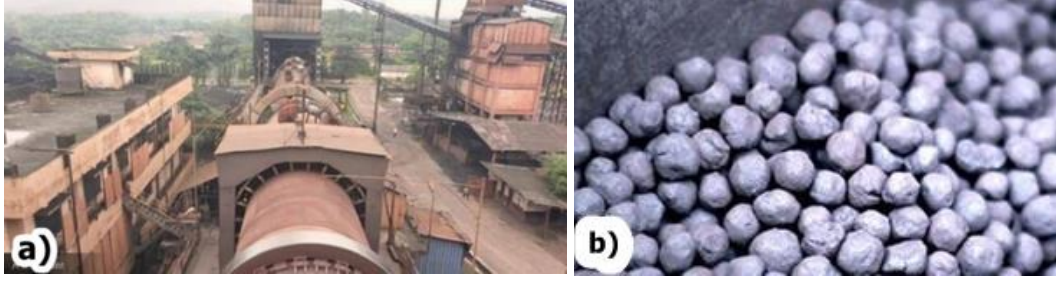
Yeşil çelik çalışmaları son yıllarda hızlanmıştır. Bu konuda Almanya Ekonomi Bakanı Peter Altmaier yaptığı bir açıklamada; “Çelik üretimi Almanya için kritiktir ama aynı zamanda sera gazlarının salınımında büyük rol oynamaktadır. Bu sebeple karbonsuzlaşma çalışmaları da özel bir yere sahiptir. Almanya, çelik fabrikaları için hidrojen üretim projelerini ciddi oranda destekleyecektir ve yeşil dönüşümü kolaylaştırmak için gerekli altyapının oluşturulmasını destekleyecektir. Yapılan araştırmalara göre Almanya’da 2050 yılına kadar çelik sektöründen kaynaklanan sera gazı salımlarını azaltabilmesi için 35 milyar eurodan fazla yatırım yapması gerekmektedir. Bu hedefler doğrultusunda ülke yönetimi, yeşil dönüşüm için AB’nin devlet yardımları konusundaki kurallarının izin verdiği en yüksek tutara kadar destek sunmaya hazırdır” demiştir (Tecdecioğlu, 2024).

Türkiye’de de hidrojen stratejileri konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Hidrojen kullanımı ile ilgili olarak ilk somut proje; GAZBİR-GAZMER Temiz Enerji Teknoloji Merkezi açılarak evsel cihazlarda hidrojen ile doğalgaz karışımı kullanımı planlanmaktadır. Diğer birçok endüstride de (rafineriler, demir çelik endüstrisi, doğalgaz dağıtım firmaları, çimento ve gübre üreticileri vd.) hidrojenin kullanımına ilişkin çalışmalar yapılmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (Tecdecioğlu, 2024); i. Daha fazla yenilenebilir enerjiyi sisteme dâhil etmek, ii. Isı sektörünü karbon emisjonsuz bir hale getirmek, iii. Yerli kömürden hidrojen üretimi gerçekleştirmek, iv. Hidrojen depolama ve tutucusu olarak borun kullanımını artırmak. Hedefleri doğrultusunda hidrojenden faydalanılmasına teşvik etmektedir.

Ayrıca, Marmara Organize Sanayi Bölgesi (OSB) ve Yeşil Hidrojen Üreticileri Derneği (H2DER) iş birliğiyle, Bandırma ilçesine Yeşil Hidrojen Ar-Ge ve Üretim Merkezi kurulması planlanmakta ve enerjide yeşil dönüşümün önemli bir ayağı olması umut edilmektedir. İlk olarak Yeşil Hidrojen Ar-Ge ve Üretim Merkezi faaliyete geçecek arkasından yeşil çelik üretimi takip edecektir (Tecdecioğlu, 2024).

2024 yılının son aylarında gerçekleşen bir gelişme Türkiye’de çelik üretiminde hidrojen kullanımının ilk denemesi olarak görülmektedir. Erdemir’in birinci yüksek fırınında yakıt olarak hidrojen enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Bu gelişme ile Türk firması Avrupada bu denemeyi yapan üçüncü çelik üreticisi olarak görülmektedir. Erdemir dünyada sayısı firmalarda yapılan Ar-Ge çalışmaları neticesinde bir ton sıvı ham demir başına 28 kilogram kadar hidrojen enjeksiyonu yapılabileceği ve bu sayede atmosfere salınan emisyonlarda %15-16 oranında doğrudan emisyon tasarrufu elde edileceği tespit edilmiştir. Öte yandan hidrojenle yeşil çelik üretiminin geleneksel üretimden %20-30 daha pahalı olduğu hesaplanmaktadır (15 kat fazla elektrik tüketir). Aradaki bu maliyette esas rol redüksiyon prosesinde kullanılan elektrik maliyetidir. Morgan Stanley’in yaptığı hesaplamalarda göre yeşil çelikte, ton başına 115 dolar ilave maliyet olduğu görülmüştür.

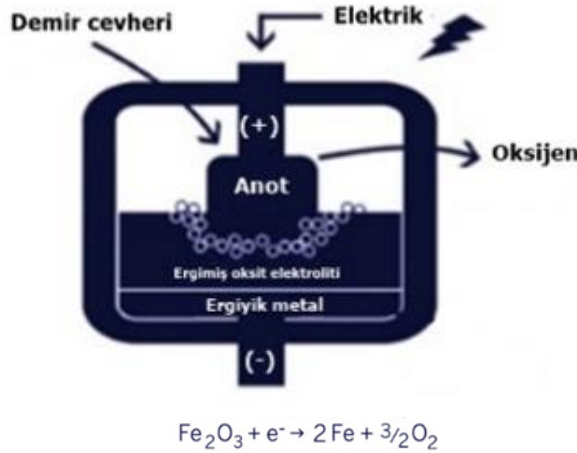
DRI proseslerinde %35-40 daha az CO₂ emisyonu oluşturmak en önemli avantaj olarak gösterilmektedir (Draxler vd., 2020). Çelik üreticilerinin DRI sistemlerine ilgi göstermesinin arkasındaki bir diğer neden de; yeşil hidrojen kullanarak emisyonları daha da düşürme potansiyelidir ve çelik üreticilerinin önümüzdeki yıllarda yatırımlarına “tamamen hidrojen ile çalışacak tesis” yatırımlarını hızlandıracaktır (Şekil 6). Hidrojen yakıtlı prosese dönüşüm için Avrupa’daki bütün tesislerin 130 milyar dolar mertebesinde yatırım yapması gerekmektedir.



Şekil 6:

- a) Bir DRI Sünger demir fabrikası ana bölümü
(<https://www.teriin.org/sites/default/files/2021-08/Direct%20Reduction%20of%20Iron%20Process.pdf>, 2024)
- b) Sünger demir ürünler (<https://www.steelradar.com/en/afrika-ormani-altinda-gomulu-demir-cevheri-zenginlikleri-icin-yaris-basladi-77890/>, 2024)

Oksit metalleri saflaştırmada elektroliz yöntemi uzun yıllardır kullanılmaktadır. Özellikle alüminyum üretiminde karbon elektrotların (anot) yardımı ile karbondioksit açığa çıkartılarak saf metal elde edilmektedir. Sıvı oksit elektrolizi ile çelik üretiminde karbondioksit açığa çıkmamaktadır (Allanore vd., 2013). Çelik üretiminde katot olarak sıvı metalin kendisi değerlendirilmektedir. Anot ve katot arasındaki elektrolit demiroksit içeriğine sahip sıvı metaldir. Sıvı metalin içinden geçen akım sıcaklığı artırır ve böylece elektroliz tamamlanmış olur. Elektroliz hücresi ile saf oksijen sıvıdan ayrılır ve ergimiş haldeki sıvı demir dibe çöker (Şekil 7).



Şekil 7:

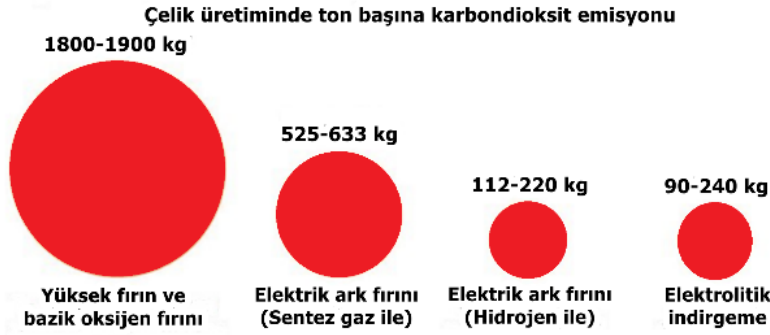
Sıvı Oksit Elektrolizi ile çelik üretimi (Daha kaliteli, kolay proseslenebilir, tehlikeli atıksız, saf metal çıktı) (<https://driftinginandoutofsteel.wordpress.com/tag/processes>, 2024).

Direkt redüksiyon sonrası su baharı ortaya çıkar ve “sünger demir” elde edilmektedir. Bir sonraki adım çelik üretimidir fakat sünger demir içerisinde cevherden gelen safsızlıkları da bulundurduğundan cevherin kalitesinin yüksek olması gerekmektedir. Elektroliz esaslı üretimde (Boston Metal Uygulaması) sıvı demir doğrudan elde edilmektedir ve safsızlıklar sıvı banyosunda kalmasından ötürü cevherin yüksek kalitede olması beklenmez, sıvı demir ayrıştırma ihtiyacı olmaz, kolay alaşımlandırma yapılabilir ve çelik elde edilmiş olur. Çelik kalitesinin yüksek olması yanında zararlı atık çıkmaması bu sistemin en önemli iki unsurudur. Boston Metal uygulamasının elektriğe bağlı olması bir diğer avantajıdır. Sünger demir uygulamasında kullanılan hidrojenin erişim sıkıntılıdır (Sanayide hidrojen üretimi altyapısı mevcut değil ve organizasyonu zordur).

Son olarak Boston Metalin elektroliz hücreleri geleneksel yöntemde kullanılan ergitme fırınlarından küçüktür, modülerdir ve isteğe göre çoğaltılıp azaltılabilir (Zhiyuan ve Friedmann, 2021).

Almanya enerji-yoğun çalışan şirketlerin maliyetlerinin %80'ini karşılama kararı almıştır ve bu karardan 2045'te net-0- olmaları şartıyla çelik üreticilerin de faydalanacaktır. Bu fırsatı değerlendirmek isteyen kuruluşlar ve STK'lar "Karbon Kontratları" yaparak yeşil çelik ve yeşil ürünler için avantaj sağlamaya çalışmaktadır. Ayrıca Avrupa Birliği "AB Emisyon Ticareti" kapsamında karbonsuzlaştırma hedefi için %80'lere varan maliyet destekleri sunmaktadır. Tüm bu altyapı verimli bir şekilde işlerde 2030 yılında AB çelik endüstrisi 190 milyon ton karbondioksit salınımını net-0- seviyesine çekebilecektir (The Economist, 2023e; Yılmaz, 2023; The Economist, 2023f).

Ton çelik başına salınan karbondioksit azaltım miktarının proseslere bağlı sıralaması Şekil 8'de verilmiştir. Yüksek fırınlı çelik üretimindeki oldukça yüksek CO₂ değeri (ort.:1850 kg), gazla DRI üretimi ve EAF çelik imalatında (ort.:580 kg) çok azalmaktadır. Hidrojen ile DRI üretimini takiben EAF çelik imalatı ve elektroliz hücreli fırınlarından çelik imalatının CO₂ emisyonları birbirine yakındır ve ortalama 165kg/ton çelik'e kadar düşmektedir (Rechberger, 2020).



Şekil 8:

Yüksek fırınlı çelik üretim, gazla DRI üretimini takiben EAF çelik imalatı, Hidrojen ile DRI üretimini takiben EAF çelik imalatı ve elektroliz hücreli fırınlardan çelik imalatının CO₂ emisyonu (Rechberger vd., 2020).

Karbonsuz ekonomi yaptırımları sünger demir üretiminde hidrojenin direk redüksiyonu proseslerine ilgili arttırmaktadır. Buna rağmen bu teknoloji için yapılan destek çalışmaları yetersizdir. Geleneksel yöntemleri kullanan firmaların bacalarından karbon yakalama ve/veya depolama teknolojileri popülerliğini korumaktadır. Son teknoloji gelişmeleri ile çelik üretiminde elektroliz hücrelerinden faydalanan tekniklerin olgunlaşması için biraz zamana gerek duyulmaktadır ama yine de iki büyük çelik üreticisi olarak ArcelorMittal ve ClevelandCliff, elektroliz yöntemi ile üretim kararı almışlardır.

5. SONUÇ

Günümüzde bireyler, şirketler, küresel kuruluşlar ve uluslar tarafından yenilenebilir yakıtlar ve karbonsuzlaştırma süreçlerinden geçmiş e-yakıtlar önemsenmeye başlanmıştır. Bu bağlamda, dünyanın dört bir tarafında havadan/bacadan karbon yakalama, değerlendirme ve depolama projeleri ve yatırımları ile atmosferin CO₂ yükü düşürülmeye çalışılmaktadır. Çelik üretimi özelinde karbon ayakizini düşürücü eylemler ve gelişmeler, geleceğe yönelik olarak yapılan projeksiyonlar umut vericidir.

Ayrıca, günümüzde geri dönüşümlü çelik üretimi %30'luk paya sahiptir ve 2050 yılına kadar payın %50 ye ulaşması beklenmektedir. Bu gelişmeler yenilenebilir enerjili üretimlerin önüne fırsatlar sunmaktadır.

Yeşil hidrojen kullanılarak; yarı ürün sünger demir ile çelik üretimi ve cevherden elektroliz esaslı doğrudan sıvı çelik üretimi mümkündür. Bu temiz teknolojinin sanayide mevcut olan yüksek fırınlar ve EAF ile uygulanması mümkün çevreci iki alternatiftir. Çelik üretiminde geleneksel metotlar yerine elektroliz yöntemi tercih edilirse demir-çelik coğrafyasında da değişimler kaçınılmaz olacaktır. Fosil yakıtlara yakın olan tesisler, maden yataklarına ve veya elektrik kaynaklarına yakın konumlara transfer olacaklardır. Yeşil hidrojen ile yeşil çelik üretimi bilinen bir teknolojidir fakat geliştirilmesi ve erişilebilir hale geliştirilmesi kritiktir. Ton çelik üretimi başına düşen CO₂'i azaltma adına yürütülen çalışmalarla yeni kapılar açılacaktır. Yeşil çelik üretimi için yüksek sıcaklık elektrolizi yeni teknoloji olarak, uygun seçenek olma potansiyeline sahiptir. Yeşil çelik üretim süreçleri ölçek ekonomisi açısından beklentileri karşılayabilmesi için özellikle Avrupalı ülke devletlerinin önemli destekleri artarak devam edecektir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Bu çalışmada Mustafa Safa YILMAZ ve Fevzi YILMAZ ortak bir şekilde literatür taraması, metin yazımı, kurgu çalışmalarını ve görsellerin düzenlemesi çalışmalarını gerçekleştirmiştir.

KAYNAKLAR

1. Abdeen Mustafa Omer, (2008), Focus on low carbon technologies: The positive solution, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 9, Sayfa 2331-2357, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.04.015>.
2. Allanore A., Yin L. ve Sadoway D. R. (2013), A new anode material for oxygen evolution in molten oxide electrolysis, *Nature*, 497, 353–356, <https://doi.org/10.1038/nature12134>
3. Benson, S. M., & Orr, F. M. (2008). Carbon Dioxide Capture and Storage. *MRS Bulletin*, 33(4), 303–305. doi:10.1557/mrs2008.63
4. Carter, M.S., Hauggaard-Nielsen, H., Heiske, S., Jensen, M., Thomsen, S.T., Schmidt, J.E., Johansen, A. and Ambus, P. (2012), Consequences of field N₂O emissions for the environmental sustainability of plant-based biofuels produced within an organic farming system. *Glob. Change Biol. Bioenergy*, 4: 435-452. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01132.x>.
5. Dell'Aversano, S., Villante, C., Gallucci, K., Vanga, G., & Di Giuliano, A. (2024). E-Fuels: A Comprehensive Review of the Most Promising Technological Alternatives towards an Energy Transition. *Energies*, 17(16), 3995. <https://doi.org/10.3390/en17163995>
6. Draxler M., Schenk J., Bürgler T. ve Sormann A., Berg (2020), The steel industry in the european union on the crossroad to carbon lean production—status, initiatives and challenges, *BHM Berg- und Huettenmaenn Monatsh*, 165 (5) 221–226. <https://doi.org/10.1007/s00501-020-00975-2>
7. <https://driftinginandoutofsteel.wordpress.com/tag/processes>, Erişim Tarihi: 23.09.2024
8. <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2022/04/new-eth-unicorn-climeworks-raises-chf-600-million.html>, Erişim Tarihi: 23.09.2024
9. <https://www.iipinetwork.org/wp-content/Ietd/content/direct-reduced-iron.html>, Erişim Tarihi: 23.09.2024

10. <https://www.ispatguru.com/green-steelmaking/>, Erişim Tarihi: 23.09.2024
11. <https://www.steelradar.com/en/afrika-ormani-altinda-gomulu-demir-cevheri-zenginlikleri-icin-yaris-basladi-77890/>, Erişim Tarihi: 23.09.2024
12. <https://www.teriin.org/sites/default/files/2021-08/Direct%20Reduction%20of%20Iron%20Process.pdf>, Erişim Tarihi: 23.09.2024
13. <https://watchwire.ai/carbon-capture-utilization-storage-pipe-dream-potential-solution/>, Erişim Tarihi: 23.09.2024
14. Holappa L., (2020), A general vision for reduction of energy consumption and CO2 emissions from the steel industry, *Metals*, 10(9), 1117. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
15. Jinsoo Kim, Benjamin K. Sovacool, Morgan Bazilian, Steve Griffiths, Junghwan Lee, Minyoung Yang, Jordy Lee, (2022), Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options, *Energy Research & Social Science*, Sayı 89, 102565, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102565>.
16. Mattisson, Tobias, (2013), Materials for Chemical-Looping with Oxygen Uncoupling, *International Scholarly Research Notices*, 526375, 19 pages, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/526375>
17. Li, G., & Yao, J. (2024). Direct Air Capture (DAC) for Achieving Net-Zero CO2 Emissions: Advances, Applications, and Challenges. *Eng.* 5(3), 1298-1336. <https://doi.org/10.3390/eng5030069>
18. Pei M., Petäjäniemi M., Regnell A., ve Wijk O., (2020), Toward a fossil free future with hybrit: development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland, *Metals*, 10(7), 972. <https://doi.org/10.3390/met10070972>
19. Rechberger K., Spanlang A., Conde A. S., Wolfmeir H. ve Harris C., (2020), Green hydrogen-based direct reduction for low-carbon steelmaking, *Steel Research International*, 91. <https://doi.org/10.1002/srin.202000110>
20. Reddy, V. J., Hariram, N. P., Maity, R., Ghazali, M. F., & Kumarasamy, S. (2023). Sustainable E-Fuels: Green Hydrogen, Methanol and Ammonia for Carbon-Neutral Transportation. *World Electric Vehicle Journal*, 14(12), 349. <https://doi.org/10.3390/wevj14120349>
21. Romasheva, N., & Cherepovitsyna, A. (2023). Renewable Energy Sources in Decarbonization: The Case of Foreign and Russian Oil and Gas Companies. *Sustainability*, 15(9), 7416. <https://doi.org/10.3390/su15097416>
22. Rosson, E., Sgarbossa, P., Pedrielli, F. et al. , (2021), Bioliquids from raw waste animal fats: an alternative renewable energy source. *Biomass Conv. Bioref.* 11, 1475–1490. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00634-z>
23. Shahabuddin M., Brooks G., Rhamdhani M. A., (2023), Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis, *Journal of Cleaner Production*, 395, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136391>
24. Şahin S., (2012), Endüstri çelik üretimini karbondan arındırabilir mi?, *İnovatif Kimya Dergisi*
25. Tecdelioğlu Mustafa, (2024), Çelik üretiminde hidrojen kullanımı ne kadar mümkün?
26. The Economist, (2023a), Green energy: Making petrol from thin air, June 10th, 68
27. The Economist, (2023b), Net zero flying: Green sky thinking, May 20th, 58-60
28. The Economist, (2023)c, Climate technology: A giant sucking sound, May 27th, 55-57

29. The Economist, (2023d), Carbon removal: The great carbon valley, June 17th, 27-28
30. The Economist, (2023e), Decarbonising industry, June 16th, 69
31. The Economist, (2023f), Metallurgy and global warming, June 3rd, 69
32. White, C. M., Strazisar, B. R., Granite, E. J., Hoffman, J. S., & Pennline, H. W., (2003), Separation and Capture of CO₂ from Large Stationary Sources and Sequestration in Geological Formations—Coalbeds and Deep Saline Aquifers. Journal of the Air & Waste Management Association, 53(6), 645–715. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466206>
33. Yılmaz F., (2023) “Ağır sanayi ve karbonsuzlaştırılması”, *Ekonomim*/Köşe yazısı.
34. Yılmaz F., (2021), Hava kirliliği, bileşenleri ve sağlık, *FSM İlmî Araştırmalar İnsan ve Toplum Bilimleri Dergisi*, 18 Güz, s:242-244
35. Zhiyuan Fan, S. Julio Friedmann, (2021), Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy, *Joule*, Volume 5, Issue 4, Pages 829-862, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>.