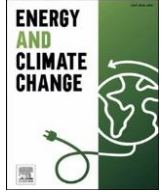


ScienceDirect

Enerji ve İklim Değişikliği

dergi ana sayfası: www.sciencedirect.com/journal/energy-and-climate-change

Büyük Çelik Şirketlerinin İklim Hedefleri: Toplam Hedef ve Planlanan Emisyon Azaltım Önlemlerinin Değerlendirilmesi

Maria Jose de Villafranca Casas^{a,*}, Sybrig Smit^a, Anna Nilsson^a, Takeshi Kuramochi^{a,b,*}^a NewClimate Enstitüsü, Köln, Almanya^b Copernicus Sürdürülebilir Kalkınma Enstitüsü, Utrecht Üniversitesi, Utrecht, Hollanda

ARTICLE INFO

Anahtar kelimeler:

Kurumsal iklim eylemi
Dekarbonizasyon
Paris Anlaşması
Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG)
Demir ve çelik endüstrisi

ÖZET

Bu makale, 2022 ortası itibarıyla en büyük çelik üreticisi şirketler tarafından belirlenen sera gazı emisyon azaltım hedeflerinin durumunu, sağlamlığını ve potansiyel etkisini sistematik olarak değerlendirmektedir. Değerlendirme, küresel çelik üretiminin %60'ından fazlasını gerçekleştiren, hacim bakımından en büyük 60 çelik şirketini kapsamaktadır. Şirket düzeyinde sera gazı emisyon azaltım hedefleri ve emisyon azaltım önlemlerine ilişkin veriler kamuya açık belgelerden toplanmıştır.

Sadece 30 şirketin 2025 ve 2060 yılları arasında değişen zaman dilimlerinde kendi sera gazı emisyon azaltım hedefleri olduğunu tespit ettik. Ulusal 2060 net sıfır hedefi kapsamında olan 15 Çin devlet şirketi hariç tutulduğunda bile, 15 şirketin emisyon azaltım hedefi yoktu. Yirmi bir şirketin uzun vadeli hedefleri (2040 veya sonrası) vardı ve bunların 18'i net sıfır emisyon hedefiydi; biri hariç hepsinin ara hedefleri de vardı. Eğer 60 şirket arasında belirlenen tüm iklim hedeflerine ulaşırsa, 60 şirket için yıllık CO₂ emisyonları, referans senaryoya kıyasla 2030 yılına kadar %12'ye kadar ve 2050 yılına kadar %39'a kadar azaltılabilir. Küresel ham çelik talebinin 2019'da 1,9 Gt'dan 2050'de 2,5 Gt'a kademeli olarak artacağı ve küresel demir-çelik sektörünün geri kalanı için 60 şirkette gözlemlenen benzer eğilimler varsayıldığında, küresel demir-çelik sektörünün emisyon azaltımı konusundaki mevcut kararlılığının 2050 yılına kadar 2019 seviyelerinden (3,4 GtCO₂ 'dan 1,6-2,1 GtCO₂ 'a) %38 ila %53 arasında bir azalmaya yol açacağını veya 2050'de referans senaryoda %32 ila %43 arasında bir azalmaya yol açacağını tahmin ediyoruz.

Çelik şirketleri de hedeflerine ulaşmak için net emisyon azaltım planları belirlemekte gecikmektedir. Hedefleri olan 30 çelik üreticisinden 14'ünün bir emisyon azaltım planı sunmadığını tespit ettik. Emisyon azaltım planlarında hedeflerine ulaşmak için en az bir önlem belirleyen 16 şirket arasında en popüler önlemler hidrojen bazlı DRI ($n = 14$), yenilenebilir elektrik kullanımının artırılması ($n = 13$) ve yüksek fırınlar için Karbon Yakalama Kullanma ve Depolama (CCU/S) ($n = 9$) olmuştur. Çelik şirketlerinin uzun vadeli derin dekarbonizasyon için harekete geçmeye başlaması cesaret verici olsa da, bulgularımız önümüzde uzun bir yol olduğunu ve eylemin önemli ölçüde hızlandırılması gerektiğini göstermektedir.

Giriş

Demir ve çelik sektörü, uzun vadeli karbonsuzlaştırmaya geçişte çok önemli bir role sahiptir. Paris Anlaşması'nın 1,5° C sıcaklık hedefine ulaşmak için, küresel karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık 2050 yılına kadar net sıfıra indirilmesi gerekmektedir [1,2]. Yüzyılın ortalarında net sıfır emisyonu ulaşmak için tüm sektörlerde acil ve ciddi sera gazı (GHG) emisyon azaltımlarının gerçekleştirilmesi gerekirken, bazı sektörlerde emisyonların azaltılması diğerlerine göre daha zordur. Geçiş zor olan bu sektörler arasında, değer zinciri emisyonlarının hesaplanmasına bağlı olarak yılda yaklaşık 3,7-4,1 GtCO₂ e saldıran tahmin edilen demir-çelik sektörü önemli bir emisyon kaynağıdır [3]. Sınırlı karbonsuzlaştırma seçenekleri, üretim tesislerinin uzun ekonomik ömrü ve önümüzdeki yıllarda daha fazla talep artışı ile demir-çelik sektörü karbonsuzlaştırma yolunda zorlu bir yol izlemektedir [4,5].

Bu nedenlerden dolayı demir-çelik sektörü uzun süre 'azaltılması zor' bir sektör olarak görülmüştür [6]. Ancak, gelişmiş düşük emisyonlu çelik teknolojileri ticarileşmeye yaklaştıkça ve siyasi ve tüketici baskısı arttıkça bu görüş hızla değişmektedir. Bu endüstri sektörleri için bile, yüksek emisyonlu

ısınmayı 1,5° C'nin altında tutmak için geleneksel tesislerden kaçınılması gerekmektedir [7,8]. Paris Anlaşması'nın kabul edilmesinden bu yana, çelik üretiminin karbonsuzlaştırılmasına ilişkin giderek artan sayıda çalışma yayınlanmıştır.

Küresel düzeyde emisyon senaryo çalışmaları, 2050 yılında sıfıra yakın CO₂ emisyonuna ulaşmanın, hem talep (yani gelişmiş ürün tasarımı, artan malzeme verimliliği ve döngüsel ekonomi yoluyla nihai talebi azaltmak) hem de arz (yani enerji verimliliğini artırmak, düşük ila sıfır emisyonlu enerji taşıyıcıları ve hammadde kullanan yeni süreçlere geçmek) için mevcut ve gelişmekte olan çok sayıda seçeneğin bir kombinasyonu yoluyla zor olsa da mümkün olduğunu göstermektedir [3,4,6,8-10]. Gelişmekte olan ülke düzeyindeki çalışmalar da benzer sonuçlara ulaşmıştır [11-13]. Akademisyenler arasında, demir çelik sektörünün yüzyılın ortalarında tam karbonsuzlaştırmaya ulaşmak için artımlı değişikliklerden dönüşümsel değişikliklere geçmesi gerektiği konusunda fikir birliği vardır. Bu seçenekler dizisini uygulamak için yoğun inovasyon, ticarileştirme ve politika gerekmektedir [3,6]. Bu nedenle, sektörün geçiş yapıp yapmadığını ve nasıl geçiş yaptığını anlamak önemlidir. Uzun vadeli karbonsuzlaştırma için ivme arttıkça, küresel demir çelik filosu, çelik üretiminden kaynaklanan emisyon yoğunluğu, yeni

ve duyurulan düşük karbonlu çelik projeleri gibi çeşitli göstergelere bakarak demir çelik sektöründeki geçiş sürecini izleyen projelerin sayısının da arttığını görüyoruz [9, 14,15].

Kısmen ulusal hükümetler tarafından açıklanan net sıfır emisyon hedefleri dalgasıyla senkronize olarak, şirketler de son birkaç yılda karbonsuzlaştırma yönünde harekete geçmeye başlamıştır [16,17]. Birçok çelik şirketi de sera gazı emisyonlarını azaltmaya istekli olduklarının sinyalini vermiş ve iklimle ilgili hedefler belirlemiştir [14]. Bazı çalışmalar, sektörün yalnızca yakıt değiştirme gibi muhafazakar önlemlere odaklanarak geride kaldığını öne sürerken [6], sera gazı emisyonlarını azaltma hedefleri ve bireysel çelik şirketlerinin planları hakkındaki literatürün nispeten az olduğunu görüyoruz. Bugüne kadar yayınlanan mevcut kurumsal sera gazı azaltım hedeflerinin benimsenmesi, ölçütleri ve sıklığına ilişkin kapsamlı değerlendirmeler, imalat sanayilerini toplu olarak ele almıştır [18-21]. Day ve diğerleri [22] ve Mooldijk ve diğerleri [23], kurumsal net sıfır hedeflerinin bütünlüğünü değerlendirmek ve birkaç çelik şirketi de dahil olmak üzere uzun vadeli net sıfır emisyon hedefleri olan şirketler için uzun vadeli sera gazı emisyon hedefi yörüngelerini tahmin etmek için bir yöntem önermektedir. Green Steel Tracker projesi [14], çelik şirketleri tarafından düşük karbonlu çelik üretim projelerinin ve sera gazı emisyon azaltım hedeflerinin geliştirilmesini düzenli olarak takip etmektedir, ancak küresel iklim hedefine karşı toplam kurumsal çabayı değerlendirmemektedir. Vogl ve diğerleri [6] küresel birincil çelik üretim altyapısının ekonomik ömrü boyunca işletilmesinden kaynaklanan küresel sera gazı emisyonlarını tahmin etmiş ve yüksek fırınların aşamalı olarak kaldırılmasının küresel iklim hedeflerine ulaşılmasını riske attığını tespit etmiştir.

Ancak, bugüne kadar hiçbir çalışma, büyük çelik şirketlerinin sera gazı emisyon azaltım hedeflerini ve planlarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmemiş ve bunların gelecekteki sera gazı emisyonları üzerindeki potansiyel etkilerini ve Paris Anlaşması kapsamındaki küresel 1.5° C hedefiyle tutarlılıklarını tahmin etmemiştir. Bu çerçevede, bu makale dünyanın en büyük 60 çelik üreticisi şirket tarafından 2022 ortası itibarıyla belirlenen sera gazı emisyon azaltım hedeflerinin durumunu, sağlamlığını ve potansiyel etkisini sistematik olarak analiz etmektedir. Araştırmamız, büyük çelik şirketlerinin hem bireysel hem de kolektif olarak karbonsuzlaştırmaya yönelik hedef belirleme ve geçiş planlarına odaklanmaktadır. Küresel demir-çelik sektörünün ısınmayı 1.5° C'de tutma doğrultusunda gerekli geçişi sağlamak için gerekli eylemler ışığında büyük çelik şirketlerinin emisyon azaltım hedefi belirleme ve planlamalarının bütünlüğü hakkında bilgi edinmeyi amaçlıyoruz.

Veriler ve yöntemler

Değerlendirme göstergelerine genel bakış

Kurumsal iklim eylemi bütünlüğüne ilişkin literatürden [22, 24] ve Birleşmiş Milletler Devlet Dışı Kuruluşların Net Sıfır Emisyon Taahhütlerine İlişkin Üst Düzey Uzman Grubu'nun (BM HLEG) [25] tavsiyelerinden yola çıkarak, kurumsal iklim eylemi bütünlüğünün hedef belirleme ve planlama ile ilgili aşağıdaki bileşenlerini değerlendiriyoruz:

- Hedef belirleme: Kısa vadeli (2029 veya öncesi), orta vadeli (2030-2039) ve uzun vadeli (2040 veya sonrası) sera gazı emisyon azaltım hedeflerinin peyzaj değerlendirmesi;
- Hedef tutkusu (kolektif): Mevcut şirket düzeyindeki hedefler altında küresel demir çelik sektöründe 2050'ye kadar olan emisyon yörüngelerinin 1,5° C-tutarlı yollarla karşılaştırmalı olarak sayısallaştırılması;
- Uygulama planı: Şirketlerin somut bir dizi emisyon azaltım önlemi de dahil olmak üzere kısa, orta ve uzun vadeli karbonsuzlaştırma hedeflerine nasıl ulaşmayı planladıkları veya amaçladıkları hakkında kamuya açık kurumsal belgelerin niteliksel değerlendirmesi.

Adil geçiş ve lobacilik gibi kurumsal iklim eylemi bütünlüğünün diğer bileşenleri bu çalışmada dikkate alınmamıştır [25]; şirketlerin iklim eylemi ve ilerlemesine ilişkin şeffaflık ve hesap verebilirlik burada sunulan araştırmanın ayrılmaz bir parçasıdır, ancak bunlar yalnızca yukarıda belirtilen bütünlük bileşenleri aracılığıyla dolaylı olarak değerlendirilmiştir. Analizimiz, çelik şirketlerinin açık ara en baskın sera gazı olan çelik üretim süreçlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarına odaklanmaktadır. Değerlendirmeler için kullanılan detaylı metodoloji ve veri kaynakları aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır. *Şirketlerin seçimi ve temel özellikleri*

Analiz için 2020 yılındaki ham çelik üretimine göre en büyük 60 çelik üreticisi şirket seçilmiştir [26]: Ansteel Group, Anyang Steel, ArcelorMittal, Baotou Steel, Benxi Steel, CELSA Steel Group, China Baowu Group, China Steel Corporation, CITIC Pacific, Delong Steel Group, Donghai Special Steel, Erdemir Group, EVRAZ, Fangda Steel, Gerdau, HBIS Group, Hyundai Steel, Iranian Mines & Madencilik Endüstrileri Geliştirme ve Yenileme (IMIDRO), JFE Steel, Jianlong Group, Jindal Steel and Power Ltd (JSPL), Jingye Steel, Jinxi Steel, Jiujiang Wire Rod, Jiuquan Steel, JSW Steel, Liberty Steel Group, Liuzhou Steel, Magnitogorsk Iron & Steel Works (MMK), Metinvest Holding, Nanjing Steel, Nippon Steel Corporation, Novolipetsk Steel (NLMK), Nucor Corporation, POSCO, Puyang Steel, Rizhao Steel, Ruifeng Steel, Salzgitter Group, Sanming Steel, Severstal, Shaanxi Steel, Shagang Group, Shandong Steel Group, Shenglong Metallurgical, Shougang Group, Sinogiant Group, SSAB, Steel Authority of India Ltd. (SAIL), Steel Dynamics, Inc, Tata Steel Group, Techint Group, thyssenkrupp, Tsingshan Holding, United States Steel Corporation, Valin Group, voestalpine Group, Xinyu Steel, Yingkou Plate, Zenith Steel. Genel merkez konumu ve 2020 yılı üretim verileri Ek Verilerdeki Tablo S-1'de bulunabilir. Bu 60 şirket 2019 yılında küresel birincil çelik üretiminin %64'ünü ve ikincil çelik üretiminin %52'sini gerçekleştirmiştir.

En büyük 60 şirket arasındaki ana üretim rotası, 2019 yılında toplam ham çelik üretiminde %78'lik pay ile yüksek fırın-temel oksijen fırını (BF-BOF) rotası olmuştur ve bu oran dünya ortalamasının (%72) biraz üzerindedir [27]. Bunu %19 ile hurda-elektrik ark ocağı (hurda-EAF) yolu ve %3 ile doğrudan indirgenmiş demir-(DRI)-EAF yolu takip etmiştir. Şirketlerin neredeyse yarısının merkezi Asya'da (2019 yılında küresel ham çeliğin %47'sini üreten 44 şirket) bulunurken, bu bölgeyi Avrupa Birliği (yedi şirket), Kuzey Amerika (üç şirket), Güney Amerika (iki şirket) ve Orta Doğu ve Afrika (biri şirket) takip etmektedir. En çok şirketin merkezi Çin'de (31 şirket) bulunurken, onu Hindistan ve Rusya (dörder şirket), ABD (üç şirket), Japonya, Almanya ve Güney Kore (ikişer şirket) takip etmektedir. Geri kalan ülkelerin her birinde sadece birer şirket bulunmaktadır.

Emisyon azaltım hedefleri verilerinin toplanması

Dünya Çelik Birliği'nden [26] ve şirketlerin belgelerinden, geçmiş küresel ve şirkete özgü ham çelik üretimi hakkında bilgi topladık. Kurumsal sera gazı emisyonlarını azaltma hedefleri için mevcut kaynaklar arasında, Green Steel Tracker veritabanı çelik üreticileri için en kapsamlı kaynaktır [14]. Bu nedenle, Green Steel Tracker'ı bir başlangıç noktası olarak kullandık ve bunu şirketlerin kamuya açık belgelerinden elde edilen bilgilerle tamamladık. Örneğin, yıllık raporlar, sürdürülebilirlik raporları ve sürdürülebilirlik web sayfaları. CDP (eski adıyla Karbon Saydamlık Projesi) ve Bilim Temelli Hedefler girişimi (SBTi) gibi gönüllü girişimler gibi diğer veri kaynakları, ilgili yerlerde çapraz kontrol için kullanılmıştır [28,29]. Temmuz 2022 itibarıyla iklimle ilgili hedefleri ve emisyon azaltım planlarını topladık.

Seçilen 60 şirket için, şirketlerin iklim hedefleri, hedef yıl(lar), emisyon kapsam(lar)ı ve temel hedef varsayımları hakkında sistematik olarak bilgi topladık. Yalnızca İngilizce olarak sağlanan kamuya açık bilgileri dikkate aldık. (a) iklim hedef(ler)i olanlar için, şirketlerin sera gazı emisyon azaltım hedef(ler)ini gerçekleştirmek için hangi teknolojileri veya önlemleri dikkate aldıkları hakkında da bilgi topladık: emisyon azaltım planları.

Hedefler kapsamında uzun vadeli sera gazı emisyon yörüngeleri

Bu analizde geliştirilen 2030 yılına kadar olan küresel sera gazı emisyon senaryoları, küresel demir çelik sektöründen kaynaklanan hem doğrudan hem de dolaylı CO₂ emisyonlarını dikkate almıştır. Bu çalışmada uygulanan sistem sınırı Hasanbeigi'ye [30] dayanmaktadır ve şunları içermektedir: kok üretimi, peletleme, sinterleme, demir yapımı, çelik yapımı ve dökümü, sıcak ve soğuk haddeleme ve işleme (örneğin galvanizleme ve kaplama). İthal demir ve kok kömürü ile ilişkili enerji kullanımı ve CO₂ emisyonları da dahildir. Tanımlanan sistem sınırı, IEA ve Dünya Çelik Birliği tarafından 'doğrudan ve dolaylı' emisyonların hesaplanmasıyla da büyük ölçüde tutarlıdır [4, 31].

Küresel sera gazı emisyon senaryoları, çeşitli kaynaklardan ve kendi değerlendirmelerimizden alınan hem tarihsel hem de senaryoya özgü gelecek tahminleri olan üretim faaliyeti ve emisyon verileri toplanarak aşağıdan yukarıya doğru geliştirilmiştir. İki sera gazı emisyon senaryosunu değerlendirdik. Bunlardan ilki, kısmen IEA Belirtilen Politikalar Senaryosuna (STEPS) [4] dayanan *temel senaryo*dur. IEA STEPS, Paris Anlaşması kapsamındaki ulusal olarak belirlenmiş katkılar da dahil olmak üzere ülkelerin enerji ve iklim politikası taahhütlerini

dikkate alır ve 2019 yılını baz yıl olarak alır [4]. İkincisi, bireysel şirketler tarafından belirlenen mevcut tüm sera gazı azaltım hedeflerine ulaşılacağına varsayıldığı kurumsal hedefler senaryosudur. İki senaryo kapsamında emisyon projeksiyonlarının geliştirilmesine ilişkin detaylar aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Temel senaryo

Çelik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları, ham çelik üretimine veya beklenen talebe ve üretim rotasının emisyon faktörüne dayalı olarak tahmin edilmektedir. Temel senaryomuzda 2019 baz yıl olarak alınmıştır. Daha sonra 2020 ve 2050 yılları arasında CO₂ emisyon projeksiyonları geliştiriyoruz. Küresel demir çelik sektörü 2020 t yılındaki emisyonlar ($E(t)$: MtCO₂ /yıl) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$E(t) = \sum_i [CSP_i(t) * PRS_{ij}(t) * EI_{ij}(t)] \quad (\text{Eşitlik 1}) \quad ij$$

Burada $CSP_i(t)$ i şirketinin t yılındaki yıllık ham çelik üretimidir [Mt ham çelik/yıl]; $PRS_{ij}(t)$ j çelik üretim rotasının i şirketinin t yılındaki toplam ham çelik üretimindeki payıdır [boyutsuz] ve $EI_{ij}(t)$ i şirketinin t yılındaki j çelik üretim rotasının emisyon faktörüdür [t CO₂ /t ham çelik]. İlk 60'ın dışındaki çelik şirketlerinin emisyonları Dünyanın Geri Kalanı (RoW) olarak adlandırılır.

Temel senaryo projeksiyonları için genel bir varsayımında bulunduğ

Bir şirketin gelecekteki üretim seviyelerinin ve çelik üretim rotalarındaki payının, şirketlerin merkezlerinin bulunduğu ülkenin eğilimlerini takip ettiğini göstermektedir. Bu, birkaç şirket istisnası dışında, 400'den fazla çelik tesisinin büyük çoğunluğunun şirketlerin merkezlerinin bulunduğu ülkelerde yer aldığı bulgumuza dayanmaktadır [32]. Global Steel Plant Tracker veri tabanındaki en büyük 60 çelik şirketten 24'ünü tespit ettik. Bu genel modelleme varsayımının istisnaları sonraki bölümlerde açıklanmaktadır.

Temel senaryoda aşağıdaki çelik üretim rotaları (j) dikkate alınmıştır: BF-BOF rotası (birincil çelik), DRI-EAF rotası (birincil çelik), açık ocak fırın rotası (OHF¹ ; birincil çelik) ve hurda- EAF rotası (ikincil çelik). Emisyon yoğunluğu değerleri şirketler, üretim rotaları ve coğrafyalar arasında farklılık göstermektedir. Ayrıca, emisyonları azaltmaya yönelik sıkı politikalar olmaksızın zaman içinde değişimleri beklenmektedir.

Ham çelik üretimi (CSP). Küresel yıllık çelik talebinin 2019'da 1,9 Gt'dan 2050'de 2,5 Gt'a yükseleceği varsayılmaktadır ki bu da son literatürde varsayılan veya öngörülen değerlerle (aralık: 2,3-2,7 Gt) iyi bir uyum göstermektedir [4,33-36]. Toplam ülke düzeyinde, çelik talebi tahminlerimiz literatürdeki diğer tahminlerle uyumlu olsa da, özellikle talebin zirveye ulaştığı veya zirveye yaklaştığı ülkelerde bireysel çelik şirketlerinin geleceği oldukça belirsizdir. Bazı şirketler birleşme, satın alma ve faaliyetlerini coğrafi olarak genişletme yoluyla pazar paylarını koruyabilir ve hatta artırabilirken, diğerleri üretim seviyelerini düşürürken yüksek katma değerli ürünlere odaklanabilir veya işlerini başka sektörlerde çeşitlendirebilirler. Bu nedenle, şirket düzeyinde gelecekteki çelik üretimi için iki durum araştırdık. İlk durumda, yıllık ham çelik üretimi açısından en büyük 60 şirketin pazar paylarının 2050 yılına kadar 2019 seviyelerinde sabit kalacağını, yani tüm şirketlerin zaman içinde üretim seviyelerini artıracaklarını varsaydık. İkinci durumda, Mission Possible Partnership [37] tarafından yapılan tahminlere uygun olarak, ham çelik üretim seviyelerinin merkezi Doğu Asya'da (Çin, Japonya, Güney Kore ve Tayvan) bulunan şirketler için 2019 seviyelerinden %25 oranında azalacağını, merkezi başka yerlerde bulunan şirketler için ise üretim seviyelerinin 2050 yılına kadar 2019 seviyelerinde sabit kalacağını varsaydık.

Merkezi diğer tüm ülke ve bölgelerde (yani Hindistan, İran, Afrika, Orta ve Güney Amerika, Asya'nın geri kalanı ve Rusya) bulunan şirketler için, küresel toplam çelik üretimindeki paylarının 2050 yılına kadar 2019 seviyelerinde kalacağı varsayılmıştır. RoW için ham çelik üretim seviyelerinin, IEA STEPS'te öngörülen küresel toplam ile en büyük 60 şirketin toplamı arasındaki boşluğu dolduracağı varsayılmıştır.

Şirket düzeyinde üretim rotası payları (PRS). Farklı üretim rotaları için 2019 yılına ait geçmiş üretim payları iki kademeli bir yaklaşımla toplanmıştır. İlk olarak, şirketler

tarafından bildirilen üretim rotası başına payları topladık (5 şirket için mevcut) ve Global Steel Plant Tracker [32] bilgileriyle üretim rotası payını hesapladık (6 şirket için mevcut). Şirkete özgü veriler mevcut olmadığında, bir şirketin merkezinin bulunduğu ülkenin ortalama paylarını varsaydık; veriler [27,32]'den toplanmıştır (bkz. Ek Verilerdeki Tablo S-2).

2050'ye kadar gelecek yıllar için, şirket başına üretim rotası paylarının, IEA [4] STEPS kapsamında merkezlerinin bulunduğu bölge için 2050'de öngörülen paylara doğrusal olarak yakınsayacağı varsayılmıştır. Toplam üretim seviyelerinde olduğu gibi, 2050 için küresel ortalama öngörülen payların varsayıldığı ArcelorMittal için istisnalar uygulanmıştır. IEA STEPS projeksiyonları, en yaygın yol olan BF-BOF yolunu kullanan birincil çelik üretiminin payının 2050 yılında çoğu ülke ve bölgede (örneğin Çin, Avrupa Birliği, Orta Doğu, Amerika Birleşik Devletleri) azalacağını, ancak diğerlerinde (örneğin Hindistan, Afrika, Orta ve Güney Amerika) 2019 değerlerine kıyasla artacağını göstermektedir (küresel olarak %27 azalma). DRI-EAF'nin payı dünya genelinde yaklaşık %70 oranında artacaktır. Hurda-EAF yolu ile ikincil çeliğin payı da çoğu ülke ve bölgede %60'tan fazla artacaktır (2050 yılına kadar teknoloji paylarının gelişimine ilişkin küresel tahminler için Ek Verilerdeki Tablo S-3'e bakınız). OHF çelik üretimi yapan şirketler için, OHF paylarının 2030 yılında aşamalı olarak ortadan kalkacağı varsayılmıştır; IEA STEPS'in OHF rotasını dikkate almadığına dikkat edilmelidir (çünkü küresel paylar küçüktür ve muhtemelen önümüzdeki yıllarda azalacaktır). RoW için üretim yolu başına ham çelik üretim seviyelerinin, IEA STEPS'te öngörülen küresel toplam ile en büyük 60 şirketin toplamı arasındaki boşluğu dolduracağı varsayılmıştır.

Emisyon yoğunluğu (EI). Referans senaryo kapsamındaki CO₂ emisyon yoğunluğu değerleri, üretim rotası ve şirket merkezi konumu başına tahmin edilmiştir. Ülke başına BF-BOF ve hurda-EAF rotaları için 2019 tahminleri Hasanbeigi'den alınmıştır [30]. Şirketlerin kendileri tarafından raporlanan CO₂ emisyon verilerini kullanmadık çünkü bu veriler genellikle araştırma kapsamımızın dışında kalan çelik üretimi dışındaki ticari faaliyetlerden kaynaklanan emisyonları da içermektedir. Gelecek yıllar için, BF-BOF rotası için ortalama CO₂ yoğunluğunun tüm küresel üretim için 2050 yılına kadar küresel olarak yakınsayacağı varsayılmıştır. Yüksek ve düşük yakınsama seviyeleri olan 1,8 tCO₂ /t-cs ve 1,6 tCO₂ /t-cs değerlerini araştırdık; bu değerler mevcut en iyi teknolojiler (BAT) ve diğer temel senaryolar hakkındaki literatüre dayanmaktadır [4,38-40]. Bu, sadece Çin için ortalama CO₂ yoğunluğunda kabaca %10-20 azalma (2019'da 2 tCO₂ /t-cs'nin üzerinde) ve Almanya için %0-10 azalma (2019'da 1,8 tCO₂ /t-cs) anlamına gelmektedir [30] (ayrıntılı tahminler için Ek Verilerdeki Tablo S-3'e bakınız).

Hurda-EAF rotası için, IEA STEPS senaryosunda [41] öngörüldüğü gibi elektrik CO₂ faktörü azaldıkça ve 2050 yılına kadar Oda [42] tarafından değerlendirilen en iyi performans gösteren ülke olan Japonya seviyesine doğru enerji yoğunluğunda kademeli bir azalma ile CO₂ yoğunluğunun kademeli olarak azalacağı varsayılmıştır (ayrıntılı tahminler için Ek Verilerdeki Tablo S-4'e bakınız). EAO hammaddesi olarak önemli miktarda pik demirin kullanıldığı Çin'de yerleşik şirketler için, pik demirle beslenen EAO çelik üretiminin 2050 yılına kadar tamamen hurda ile beslenmeye geçeceğini varsaydık. DRI-EAF rotası için, küresel üretimin büyük çoğunluğunun doğal gazla beslendiğini ve emisyon yoğunluğunun Hindistan hariç tüm ülkeler için 2050 yılına kadar 1,6 tCO₂ /t-cs'den 1,3 tCO₂ /t-cs'ye düşeceğini varsaydık [40,43]; DRI-EAF rotasının ağırlıklı olarak kömürle beslendiği Hindistan için, modelleme dönemi boyunca IEA'ya [4] dayalı olarak 3,4 tCO₂ /t-cs'lik bir emisyon yoğunluğu varsaydık. OHF çeliğinin CO₂ emisyon yoğunluğunun 2019 yılında Çin'in BF-BOF çeliğinin CO₂ yoğunluğunun dört katı olduğu ve modelleme dönemi boyunca sabit kaldığı varsayılmıştır [44].

¹ Ansteel Group karbon nötr emisyonlar için bir yıl belirtmemekte, ancak ulusal 30-60 stratejisinden bahsetmektedir, bu nedenle ulusal iklim taahhüdü doğrultusunda 2060 olarak yorumladık.

Kurumsal hedefler senaryosu

Dört tür emisyon azaltım hedefi belirledik:

- 1 Karbon nötrlüğü hedefi, iklim nötrlüğü ve net sıfır emisyon hedefleri: bir şirket (net) sıfır CO₂ veya sera gazı emisyonu elde etmek ister.
- 2 Mutlak emisyon azaltma hedefi: bir şirket, bir baz yılı kıyasla CO₂ veya sera gazı emisyonlarında yüzdelik bir düşüş hedefler.
- 3 Emisyon yoğunluğu hedefi: Bir şirket, çelik üretiminin emisyon yoğunluğunu belirli bir yüzde oranında azaltmayı veya belirli bir emisyon yoğunluğu seviyesine ulaşmayı hedefler.
- 4 Tepe emisyon hedefi: bir şirket hedef yıldan sonra emisyonları azaltmaya başlamayı amaçlar (yani, hedef yılda tepe emisyonlar). Bu hedef türü Çinli şirketler ve özellikle de devlete ait şirketler için benzersizdir.

Sera gazı emisyon azaltım hedeflerini, hedef yılı temel alarak zaman çerçevesine göre kategorize ettik. Bir şirketin yalnızca bir veya daha fazla hedef(ler) benimsemesi durumunda "tek veya nihai hedef" ve "ara hedefler" terminolojisini uyguladık. Bir şirket birden fazla hedef benimsemişse, gelecekte en uzakta olan hedef (yani, en yüksek hedef yılı) "tek veya nihai hedef" olarak listelenmiştir. Diğer hedef(ler) ise "ara hedef" olarak nitelendirilmiştir.

Emisyon azaltma hedef değerleri özellikle kapsam 1 ve 2 emisyon azaltma hedefleri için toplanmıştır. Ara hedefler için, mevcut olduğunda, kendi emisyonları için azaltım hedefi değerlerini topladık. Emisyon kapsamı netleştirilmediğinde, bir hedefin kapsam 1 ve 2 emisyonlarını kapsadığını varsaydık.

Hedefler kapsamındaki mutlak emisyon seviyelerinin ölçümü şu şekilde yapılmıştır: iklim nötrlüğü, karbon nötrlüğü ve net sıfır emisyon hedefleri için, karbonsuzlaştırma senaryo çalışmaları, gelişmiş teknolojilerle 2050 yılında bile tüm üretim yolları için bir miktar artık emisyon olacağını göstermektedir [37]. Bu kurumsal hedefler için, emisyon yoğunluklarının karbondioksit azaltmalarını ve denkleştirmeleri olmaksızın referans senaryo emisyon seviyelerinden %90 oranında azalacağını varsaydık; bu varsayım demir-çelik sektörü karbonsuzlaştırma yolları hakkındaki literatürle tutarlıdır [34,37,43]. Diğer hedefler için, emisyon seviyelerinin nihai hedef yılından sonra 2050 yılına kadar sabit kalacağı varsayılmıştır. Yoğunluk hedefleri için, bölüm 0'da açıklandığı gibi yoğunluk değerlerini ham çelik üretim seviyeleri ile çarparak mutlak emisyon seviyelerini ölçtük. Birden fazla hedefi olan şirketler için, iki hedef yıl arasında doğrusal emisyon azaltımı olduğunu varsaydık. Hedefleri 2030'da olan ancak 2020 ile 2029 arasında ara hedefleri olmayan şirketler için, emisyonların 2025'ten sonra 2030'a kadar doğrusal olarak azalmaya başlayacağını varsaydık.

Ayrıca, iklim hedefi olmayan ilk 60'taki Çin kamu iktisadi teşebbüslerinin (KİT'ler) CO₂ azaltma potansiyelini araştırdık. En büyük 60 çelik üreticisinden 31'inin merkezi Çin'dedir ve bunlardan 21'i KİT'tir; 19'u tamamen devlete aittir ve ikisi %50'den fazla devlet mülkiyetine sahiptir [45]. Çinli KİT'ler Çin'in ulusal, bölgesel ve sektörel emisyon azaltma hedeflerine tabidir ve bu nedenle Çin'in 2060 yılına kadar net sıfır karbon emisyonuna ulaşma ve 2030 yılına kadar emisyonları zirveye çıkarma ulusal çelik hedefi kapsamına girmektedir [46]. Referans senaryo için, 2030 ve 2050 yılları arasındaki emisyon eğilimini 2060 yılına kadar tahmin ettik. Hedef tipinde (1) olduğu gibi, hedef yıl olan 2060'taki artık emisyonları ham çelik ve baz yıldaki emisyon yoğunluğunun %10'unun çarpımı olarak tahmin ettik.

En büyük 60 şirket için tahmin edilen emisyon azaltımları, en büyük 60 şirket dışındaki çelik üretimine referans senaryoya göre emisyon azaltım oranı uygulanarak küresel demir çelik sektörüne ekstrapole edilmiştir. Emisyon azaltım oranını, en büyük 60 şirket için referans senaryoya kıyasla hedefler senaryosu kapsamında hedefler tarafından kapsanan emisyonların payı olarak tahmin ettik.

İklim eylem planlarında dikkate alınan emisyon azaltım tedbirleri

Şirketlerin emisyon azaltım planlarının somutluğunu değerlendirmek için, emisyon azaltım eylem planı belgelerinde açıklanan emisyon azaltım tedbirleri hakkında da bilgi topladık. Ayrıca sera gazı emisyon azaltım hedefleriyle açıkça bağlantılı olmayan emisyon azaltım tedbirlerini de topladık. Literatürde [4,34,37,47] temel seçenekler olarak tanımlanan ve geleneksel bir BF-BOF'a kıyasla emisyon

azaltma potansiyellerine göre kategorize edilen aşağıdaki dokuz emisyon azaltma önleminin bir veya daha fazlasını içerip içermediklerini analiz ettik (ayrıntılar için SI S4'e bakınız):

- Sınırlı azaltım potansiyeli (%10-30)
 - 1 Mevcut en iyi teknolojilerin (CCU/S olmadan üst gaz geri dönüşümü de dahil olmak üzere MET'ler) ve enerji verimliliğinin artırılması
 - 2 BF-BOF'larda hidrojen kullanımı
 - 3 Yenilenebilir elektrik kullanımının artması
 - 4 Eritme indirgemesi (CCU/S olmadan)
 - 5 Geliştirilmiş biyokütle kullanımı
 - Orta ila derin azaltım potansiyeli (%50-100)
 - 6 Yüksek fırınlarda Karbon Yakalama Kullanma ve Depolama (CCU/S)
 - 7 Hidrojen bazlı DRI
 - Üretim rota anahtarı
 - 8 Hurda-EAF'nin toplam ham çelik üretimindeki payının artması
 - Diğerleri
 - 9 Planlanan denkleştirme kullanımı

Emisyon azaltım planları birden fazla tedbir içerebilir. Şirketler tarafından belirtilmeyen 'doğrudan elektrifikasyon' dışında dikkate alınan tüm teknolojiler veya tedbirler toplanmış ve sunulmuştur. 'Biyokütlenin gelişmiş kullanımı' durumunda, şirketler tarafından sağlanan ayrıntı eksikliği nedeniyle veri toplama sürdürülebilir veya sürdürülemez biyokütle arasında ayırım yapmamıştır. Yukarıdaki sekiz kategoriye girmeyen birkaç emisyon azaltma önlemi, örneğin süreç içinde geri dönüşüm, listelenmiştir, ancak derin emisyon azaltımları yaratmaları beklenmediğinden ve bu nedenle ihmal edilebilir olarak görüldüklerinden sonuçlarda vurgulanmamıştır.

En büyük 60 çelik üreticisinin çoğu BF-BOF rotasını kullandığından, BF-BOF rotasını hedefleyen emisyon azaltma önlemleri özel ilgi görmüş ve sonuçlarda vurgulanmıştır. Ancak analiz sürecinde, spesifik çelik üretim rotalarını da hesaba kattık.

Şirketlerin emisyon azaltım planları konusunda net olmaması durumunda, bu şirketleri "belirtilmemiş veya belirsiz" kategorisine aldık. Bazı durumlarda bu, kamuya açık bilgi eksikliğiyle ilgiliydi. Diğer durumlarda, kamuya açık belgelerin anlamını çıkaramadık: şirketler gerçek bir plan sunmuyor, bunun yerine azaltım seçeneklerini ve olasılıklarını listeliyor veya çeşitli seçeneklerin araştırıldığını belirtiyorlardı.

Sonuçlar**Çelik şirketleri tarafından iklim hedeflerinin belirlenmesinde manzara**

En büyük 60 ham çelik üreticisinden 30'unun sera gazı emisyonlarını azaltma hedefi olduğunu tespit ettik² (Şekil 1). Bunlardan yirmi üçü merkezi Çin dışında bulunan şirketlere ait olup, üçer tanesi Hindistan, Rusya ve ABD'den gelmektedir. Bu 30 şirket, 2019 yılında en büyük 60 şirketin toplam ham çelik üretiminin 746 Mt'undan fazlasını veya %65'ini gerçekleştirmiştir [48]. En büyük 10 üretici arasında sekiz şirketin net sıfır emisyon hedefi vardı ve bunlardan altısının hedef yılı 2050 (China Baowu Group, Arcelor Mittal, HBIS Group, Nippon Steel, POSCO ve Shandong Steel Group); ikisi 2060 (Jianlong Group, Ansteel Group³); diğer ikisi ise Çinliydi (biri özel, biri devlete ait). Shandong Steel Group ve Benxi Steel'in hedeflerini, yakın zamanda satın alındıkları için sırasıyla ana şirketleri China Baowu Group ve Ansteel Group ile aynı olarak kabul ettik [49,50]. Çin devletine ait çelik şirketleri için bir iklim hedefinin olmaması, 2030'da karbon emisyonlarını zirveye çıkarma ve 2060'a kadar karbon nötrlüğüne ulaşma şeklindeki ulusal iklim hedefleriyle uyumlu oldukları için karbonsuzlaştırmaya yönelik çalışmaların eksikliği anlamına gelmemektedir. Toplu olarak ulusal sektörel net sıfır hedefi kapsamında olan Çin devlet şirketleri de eklendiğinde, en büyük 60 çelik üreticisinden 45'inin bir tür sera gazı emisyonu azaltma hedefi bulunmaktadır (Şekil 1). Bu şirketler 2019 yılında 933 Mt'un üzerinde veya en büyük 60 üreticinin ham çelik üretiminin %81'ini ve küresel toplam üretimin %50'sini gerçekleştirmiştir.

² Bu şirketlerden ikisi, Shandong Steel Group ve Benxi Steel, kendi hedeflerine sahip değildi ancak geçen yıl içinde hedefleri olan şirketler tarafından satın alındı (sırasıyla China Baowu Group ve Ansteel Group). Bu şirketler için yeni satın almaların hedefe dahil edilceğini varsaydık ve bunları kurumsal hedefler senaryosunda sayıllaştırdık, ancak ana şirkette belirtilen önlemleri dahil etmedik.

³ Ansteel Group karbon nötr emisyonlar için bir yıl belirtmemekte, ancak ulusal 30-60 stratejisinden bahsetmektedir, bu nedenle ulusal iklim taahhüdü doğrultusunda 2060 olarak yorumladık.

Uzun vadeli net sıfır emisyon hedefine sahip şirketler şunlardır

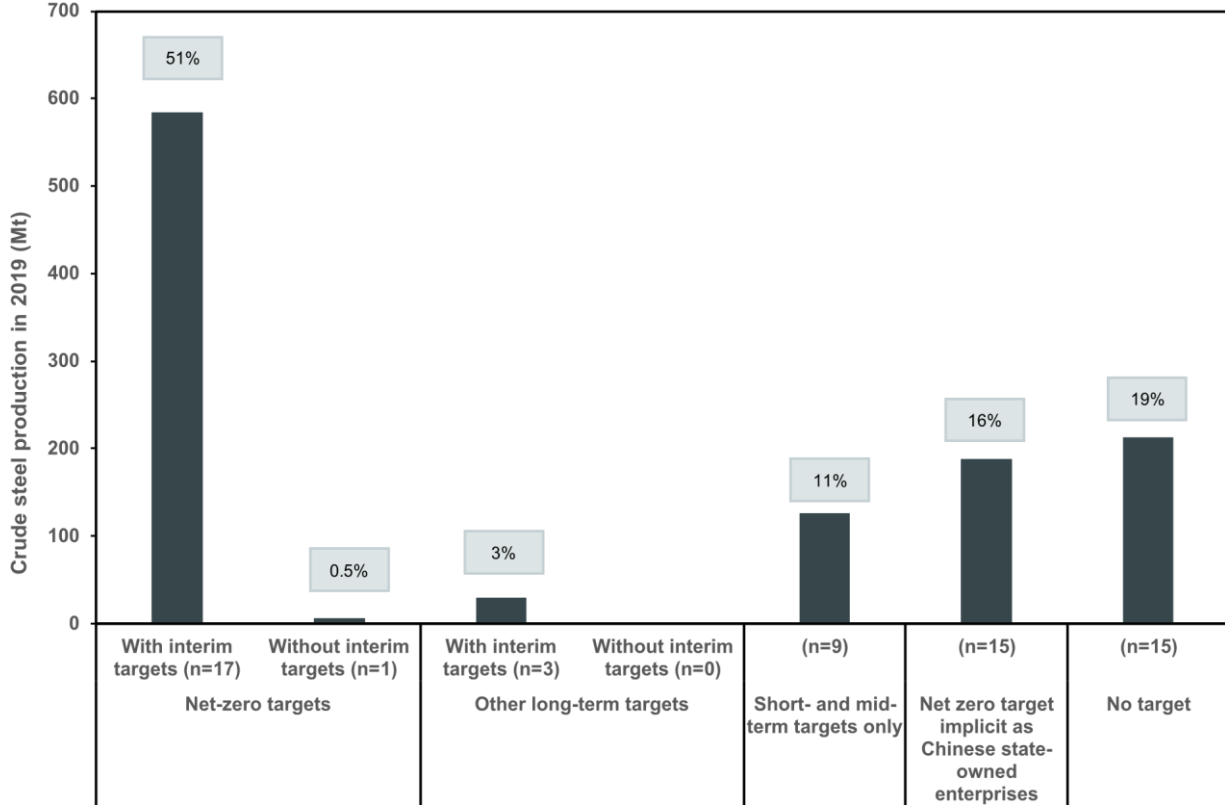
Gelişmiş ekonomilerde, yani Avrupa Birliği üye ülkeleri, Japonya, Güney Kore, Birleşik Krallık ve ABD'de orantısız bir şekilde daha yaygındır ($n = 10$). Kalan sekiz tanesi Çin ve Hindistan'da bulunmuştur. Buna karşılık, örneğin Arjantin, Brezilya ve Rusya'da merkezi bulunan şirketler için net sıfır emisyon hedefi bulunmamıştır.

2030 ve 2050, sırasıyla orta vadeli (2030-2039) ve uzun vadeli (2040 sonrası) hedefler için en yaygın hedef yıllarıdır (Şekil 2). Bugüne kadar belirlenen uzun vadeli hedeflerin çoğu net-sıfır emisyon hedefleridir. (Şekil 2). 2019'da en büyük 60 çelik üreticisinin ham çelik üretiminin yaklaşık 600 Mt'unu gerçekleştiren on sekiz şirketin net sıfır emisyon hedefi bulunmaktadır (Şekil 1); 2060 için üç, 2050 için 12, 2040 için bir, 2045 için bir ve 2030 için bir şirket. 2030'a kadar karbon nötr olma taahhüdünde bulunan Liberty Steel, kalan emisyonları telafi etmek için denkleştirme kullanmayı planladığını açıklamıştır [51]. Uzun vadeli sera gazı emisyon azaltma hedefi olan ($n = 20$) ve 2019 yılında üretilen 600 Mt'un üzerindeki ham çeliği kapsayan tüm şirketler (Şekil 2), en az bir ara hedef ve orta vadede bir ara hedef belirlemiştir (Şekil 1).

Ara hedef türlerine ilişkin olarak, mutlak emisyon azaltım hedeflerinin ($n = 23$) emisyon yoğunluğu hedeflerinden ($n = 7$) daha popüler olduğu ve 2019 bazında ham çelik üretiminin daha büyük bir payını kapsadığı görülmüştür (Şekil 2). Gözlemlenen eğilimler kısmen, bu şirketlerin çoğunun çelik talebinin önemli ölçüde artmasının beklenmediği ülkelerde faaliyet göstermesi ile açıklanabilir.

İklim hedeflerinden kaynaklanan potansiyel azaltım Temel senaryo

Referans senaryo kapsamında küresel demir çelik sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarının 2030 yılına kadar hafif bir düşüşle 3,3-3,4 GtCO₂ seviyesine



Hedefler senaryosu kapsamında en büyük 60 çelik üreticisinin toplam yıllık CO₂ emisyonlarının, yalnızca kendi hedefleri olan 30 şirket dikkate alındığında, 2030 yılında 1,7-1,9 GtCO₂ ve 2050 yılında 0,71-1,2 GtCO₂ arasında değişeceğini tahmin ediyoruz (Şekil 3); bunlar referans senaryo projeksiyonlarına kıyasla 2030 yılında %7-12 ve 2050 yılında %32-43 oranında bir azalmaya eşittir. Üst sınır projeksiyonları 2050 yılında yüksek BF-BOF emisyon yoğunluğu yakınsama seviyesini ve 60 şirketin yüksek toplam çelik üretimini yansıtırken, alt sınır projeksiyonları 2050 yılında düşük BF-BOF emisyon yoğunluğu yakınsama seviyesini ve 60 şirket için düşük çelik üretimini yansıtmaktadır. Ayrıca 15 şirket de dahil edildiğinde

Şekil 1. En büyük 60 çelik şirketi tarafından belirlenen sera gazı emisyon azaltım hedeflerine genel bakış. Yüzde rakamları toplam ham çelik içindeki payları temsil etmektedir. 2019'da en büyük 60 şirketin üretimi.

gerileyeceğini ve ardından 2050 yılında 2,8-3,1 GtCO₂ seviyesine düşeceğini tahmin ediyoruz. Emisyonların 2025 civarında zirve yapacağını öngörüyoruz. 2050'ye kadar devam eden talep artışına rağmen öngördüğümüz emisyon düşüşleri iki faktörle açıklanabilir: (1) artan hurda geri kazanımı nedeniyle ikincil çeliğin toplam ham çelik üretimindeki payının artması ve (2) artan enerji verimliliği iyileştirmesi ve yakıtların emisyon yoğunluğunun azaltılması nedeniyle ana çelik üretim yollarının emisyon yoğunluğu (örn.

azaltılmış şebeke elektriği CO₂ faktörü, BF-BOF'de düşük karbonlu hidrojen).

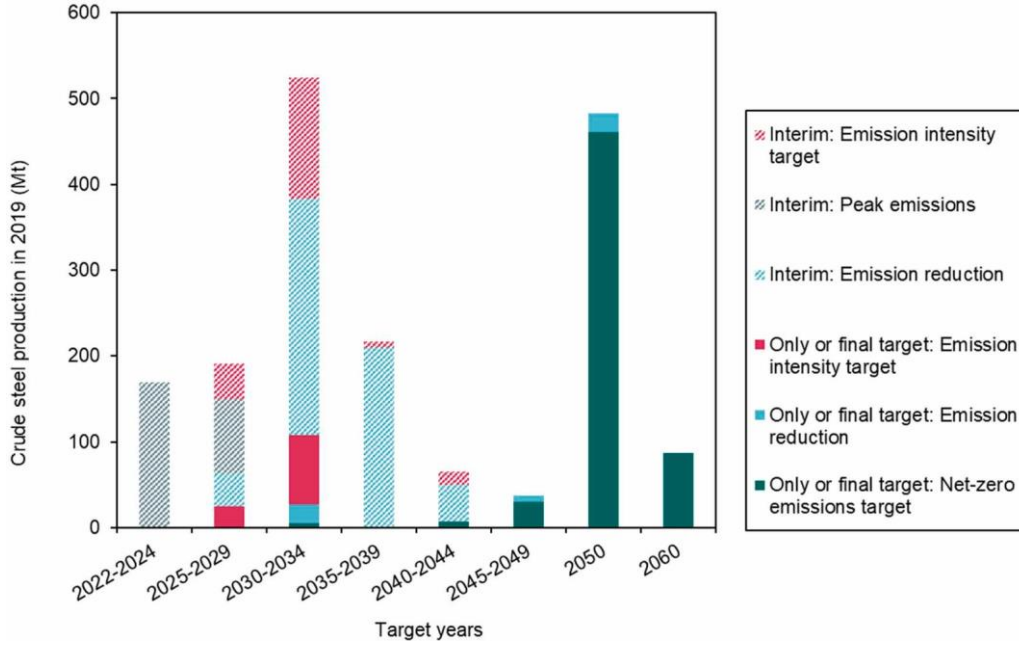
Küresel demir-çelik sektörü için temel emisyon projeksiyonlarımız, son literatürdekilerin arasında yer almaktadır [4,33,37]. Özellikle IEA projeksiyonu ile karşılaştırıldığında, bizim temelimiz BF-BOF'lar ve hurda-EAF'lar için mevcut en iyi teknolojilerin (BAT'lar) benimsenmesini dikkate alırken, IEA bunu derin bir dekarbonizasyon senaryosu (SDS) altında değerlendirmektedir.

En büyük 60 şirketin emisyon kapsamının 2019'da 2,2 GtCO₂ 'den 2030'da 1,8 ila 2,2 GtCO₂ 'ye (%1-21 azalma) ve 2050'de 1,1-1,9 GtCO₂ 'ye (%14-52 azalma) sürekli olarak düşeceğini tahmin ediyoruz. 2050'deki geniş projeksiyon aralığı, esas olarak, üretim seviyelerinin küresel talep artışıyla orantılı olarak artıp artmayacağı veya sabit kalıp kalmayacağı, hatta bazı bölgelerde azalıp azalmayacağı gibi, küresel çelik pazarındaki gelecekteki paylarına ilişkin büyük belirsizlikten kaynaklanmaktadır. En büyük 60 şirketin BF-BOF üretiminin payının 2019'da %77'den 2050'de %56'ya düşeceği öngörülmektedir. Buna karşılık, dünyanın geri kalanındaki BF-BOF çelik üretiminin payının 2019'da %62'den 2050'de %49 ila %52'ye düşeceği tahmin edilmektedir.

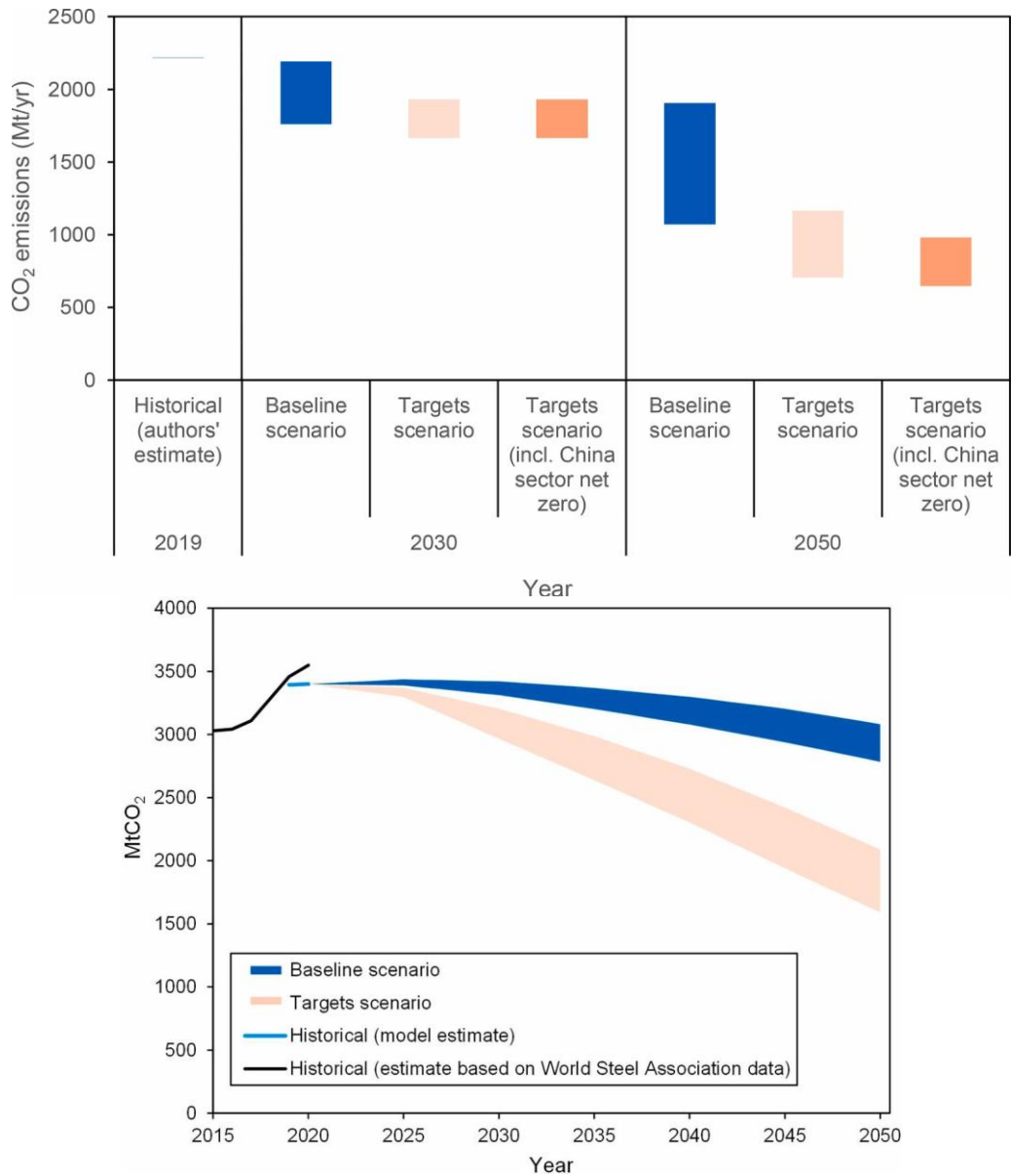
İklimle ilgili hedeflerin azaltım potansiyeli

2060 net sıfır hedefi kapsamındaki Çin devlet şirketleri için 2050 yılı emisyon projeksiyonları 0,65 ile 0,98 GtCO₂ arasında değişmektedir ve tam olarak uygulanması halinde 0,1 ile 0,3 GtCO₂ daha emisyon azaltımı sağlayacaktır (referans senaryo projeksiyonlarına kıyasla 2050 yılında toplam %40-48'lik bir azaltıma eşittir). En büyük 60 şirket için emisyon azaltma potansiyelinin çoğu, net sıfır emisyon ve emisyon nötrlüğü hedefleri belirleyen 18 şirketten kaynaklanmaktadır (Şekil 3).

En büyük 60 şirket için elde edilen bulguları tüm küresel demir çelik sektörüne uyarlayacak olursak, küresel demir çelik sektörünün CO₂ emisyonlarını 2019 seviyelerine göre %6-13 oranında azaltarak 2030 yılında 3,0 ila 3,2 GtCO₂ seviyesine, 2050 yılında ise %38-53 oranında azaltarak 1,6-2,1 GtCO₂ seviyesine düşürebileceğini tahmin ediyoruz (Şekil 4). Referans senaryo projeksiyonları ile karşılaştırıldığında,



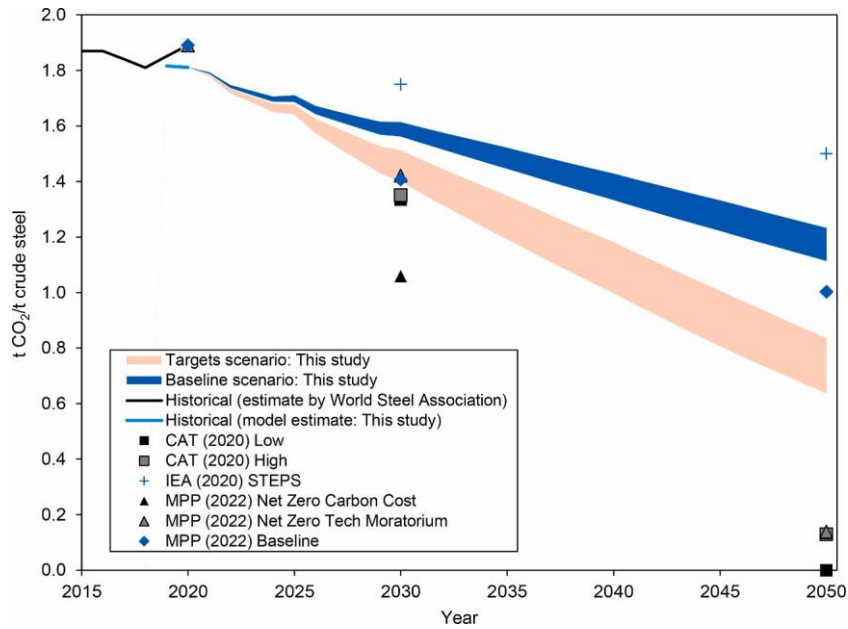
Şekil 2. Sera gazı emisyon azaltım hedefleri olan 26 çelik şirketinin geçici ve tek veya uzun vadeli hedefleri ve hedef türleri (ayrı hedefleri olmayan Çin devlet şirketleri hariç).



Şekil 3. Ulusal 2060 net sıfır emisyon hedefi kapsamında Çin devletine ait şirketler dikkate alınarak ve alınmadan, referans senaryo ve şirket düzeyindeki tüm emisyon azaltma hedeflerinin tam olarak

uygulanması (Hedefler senaryosu) altında 2030 ve 2050 yıllarında en büyük 60 çelik şirketi için CO₂ emisyon projeksiyon aralıkları. Üst sınır projeksiyonları 2050 yılında yüksek BF-BOF emisyon yoğunluğu yakınsama seviyesini ve 60 şirketin yüksek toplam çelik üretimini yansıtırken, alt sınır projeksiyonları 2050 yılında düşük BF-BOF emisyon yoğunluğu yakınsama seviyesini ve 60 şirketin düşük çelik üretimini yansıtmaktadır.

Şekil 4. Küresel çelik üretiminden kaynaklanan CO₂ Küresel çelik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyon yörüngeleri ve en büyük 60 ülkede tüm sera gazı azaltım hedeflerine ulaşılmasından kaynaklanan potansiyel CO₂ emisyon azaltımı



Şekil 5. Ham çelik tonu başına Ham çeliğin tonu başına öngörülen küresel ortalama karbon yoğunluğunun literatürdeki 1,5° C-tutarlı kriterlerle karşılaştırılması [4,37,52]. Çelik üreticileri ve dünyanın geri kalanı.

Emisyon azaltım planlarında dikkate alınan önlemler

ekstrapole edilmiş Hedefler senaryosu, 2030 yılında %6-10 ve 2050 yılında %32-43 oranında bir azaltım öngörmektedir. Burada, üst sınır projeksiyonları 2050 yılında yüksek BF-BOF emisyon yoğunluğu yakınsama seviyesini ve 60 şirketten düşük toplam çelik üretimini yansıtırken, alt sınır projeksiyonları 2050 yılında düşük BF-BOF emisyon yoğunluğu yakınsama seviyesini ve 60 şirket için yüksek çelik üretimini yansıtmaktadır.

2030'a kadar sera gazı emisyonlarını azaltma hedefleri, çelik üretiminin karbon yoğunluğunu 2050 net sıfır CO₂ emisyonları veya ısınmanın 1,5° C ile sınırlandırılması ile tutarlı kriterlerin üst ucuyla neredeyse aynı seviyeye getirmektedir (Şekil 5). Ancak, bundan sonraki azaltma oranı yeterince hızlı değildir ve 2050 yılında tam karbonsuzlaştırmaya ulaşmak için gerekenin yaklaşık yarısı kadar karbon yoğunluğu seviyelerine yol açmaktadır.

Çeliğin karbonsuzlaştırılmasına ilişkin mevcut çalışmalar, çelik üretiminin emisyon yoğunluğunun 2020 yılına kıyasla 2030 yılında %25 ila %44 arasında azalması ve 2050 yılında %93 ila %100 arasında daha da azalması gerektiğini öne sürmektedir [37,52]. Bu aralıklar, sıfıra yakın teknolojilerin teknolojik gelişimi ve ticarileştirilmesi ile ilgili belirsizlikleri ve karbon fiyatlandırmasına ilişkin farklı varsayımları gösterse de, bu çalışmalar 2050 yılına kadar tüm çeliğin derin emisyon azaltma potansiyeline sahip teknolojilerle üretilmesi gerektiği konusunda hemfikirlerdir; örneğin yeşil hidrojen bazlı DRI, hurda bazlı EAF çelik, CCU/S ile birleştirilmiş fosil yakıt bazlı DRI.

16 şirketin kamuya açık emisyon azaltım planlarında düşündükleri en az bir emisyon azaltım tedbirini bildirdiğini tespit ettik (Tablo 1). Emisyon azaltım hedefleri olan on dört şirket, herhangi bir emisyon azaltım tedbirini kamuya açıklamamıştır.

Bu kategori altında hedefleri olan şirketler tarafından 2021 yılında satın alınan iki şirketi de dahil ediyoruz (Ansteel Group tarafından satın alınan Benxi Steel ve China Baowu Group tarafından satın alınan Shandong Steel Group). Ayrıca, kamuya açık bir emisyon azaltma planı olmayan 14 çelik üreticisinden dördü yalnızca kısa vadeli bir hedef belirlemiş olup, bu da gelecekteki sera gazı emisyon azaltmalarına yönelik herhangi bir vizyona sahip olmadıklarını göstermektedir.

Kamuya açık bir emisyon azaltma planı bulunan hemen her şirket birden fazla tedbiri dikkate almıştır. Mevcut karbonsuzlaştırma tedbirleri farklı gelişim seviyelerine ve azaltım potansiyeline sahip olduğundan, özellikle birincil çelik üretimi için birden fazla tedbirin dahil edilmesi olumlu bir işarettir (bkz. [Tablo 1](#)). Sınırlı ve orta düzeyde azaltım potansiyeline sahip bazı tedbirler hazırda bulunur ve kısa vadede uygulanabilirken, daha derin emisyon azaltım potansiyeline sahip diğerleri hala geliştirilme aşamasındadır ve ancak daha sonraki bir aşamada kullanılabilir olacaktır. Emisyon azaltma tedbirlerini değerlendirdiklerini bildiren şirketler arasında hidrojen bazlı DRI ($n = 14$), yenilenebilir elektrik kullanımının artırılması ($n = 13$) ve CCU/S ($n = 9$) en popüler üç tedbirdir.

Geleneksel BOF'larda kullanım da dahil edildiğinde, sera gazı emisyon azaltma hedefi olan 30 çelik üreticisinden 17'si hidrojen bazlı birincil çelik üretimini sürdürme niyetlerini belirtmiştir. On dört şirket, en büyük 60 üreticinin ham çelik üretiminin üçte birinden fazlasına veya 2019'daki küresel çelik üretiminin %24'üne denk gelen hidrojen bazlı DRI kullanma niyetlerini belirtmiştir. Küresel ham çelik üretiminin %9'u da BF-BOF tesislerinde hidrojen kullanmak isteyen şirketler tarafından karşılanmaktadır. Bu çelik üretim seçeneklerinin emisyon yoğunluğu büyük ölçüde hidrojenin nasıl üretildiğine bağlı olsa da, şirketler genellikle emisyon azaltma planlarında bu konuda ayrıntı vermemiştir.

BF-BOF'lardaki CCU/S için, emisyon yoğunluğunun derinlemesine azaltılmasının ancak karbon yakalama ve depolamanın kok kömürü ve kömürün biyokütle ile önemli ölçüde değiştirilmesi ve muhtemelen metanol ve etanol üretimi için yüksek fırından karbon monoksit ve hidrojen kullanılması gibi diğer geleneksel olmayan seçeneklerle birleştirilmesi halinde mümkün olduğunu belirtmek de önemlidir [\[43\]](#). Bu önlemler olmadan, emisyon önleme oranı sadece yaklaşık %50-60'a ulaşacaktır [\[47,53\]](#).

Emisyon azaltma planları olan 30 şirketin toplam üretiminin üçte birinden sorumlu olan altı şirket, denkleştirme kullanımından açıkça bahsetmiştir. Dengeleme, örneğin kalıcılık, eklenebilirlik ve yüksek çevresel maliyetler gibi çeşitli belirsizlikleri beraberinde getirdiğinden, bu tartışmalı bir strateji olarak değerlendirilebilir [\[17,22\]](#).

Emisyon azaltım tedbirlerinin maliyeti ve uygulanabilirliği büyük ölçüde coğrafyalara bağlıdır [\[47\]](#). Ancak, analizimizde incelenen emisyon azaltma planları, birkaç pilot ve tanıtım projesi örneği dışında, faaliyet gösterdikleri farklı ülkeler arasında farklılaştırılmış emisyon azaltma stratejileri hakkında ayrıntı vermemiştir.

Tartışma ve sonuç

Önem ve çıkarımlar

Araştırmamız, büyük çelik şirketleri tarafından belirlenen şirket düzeyindeki sera gazı emisyon azaltım hedefleri ve planlarının mevcut kolektif hirsının kapsamlı bir değerlendirmesini yapan akademik literatürdeki ilk çalışmalardan biridir. Ayrıca, çelik üreticilerinin uzun vadeli hedeflerine ulaşma olasılığı hakkında da erken bilgiler sunmaktadır. Bulgularına ek olarak bu araştırma, sera gazı emisyon azaltım hedeflerinin ve planlamasının bütünlüğünü ve göstergelerin nasıl geliştirilebileceğini değerlendirmek için bir dizi gösterge önermektedir. Bu metodoloji, gelecekteki araştırmalarda sadece demir çelik sektörü şirketlerinde hedef belirleme ve planlama bütünlüğünün ilerlemesini izlemek için değil, aynı zamanda diğer sektörlerdeki hedef ve planların bütünlüğünü değerlendirmek için de uygulanabilir.

2022'nin ortalarından itibaren, en büyük 60 çelik şirketinin 2050'ye kadar olan emisyon azaltma hedeflerinin, ısınmayı 1,5° C'nin altında tutmak için gereken küresel 2050 net sıfır CO₂ emisyonları ile tutarlı olmak için yeterli olmaktan uzak olduğunu gösterdik. Ayrıca, hedefleri olan şirketlerin neredeyse yarısının emisyon azaltma

planlarını yayınlamadığını ve mevcut planların genellikle hedeflerine nasıl ulaşılacağı konusunda yeterli ayrıntı sağlamadığını tespit ettik. Bu bulgular, ne yazık ki, 1.5° C ısınma ile tutarlı olarak kendi değer zinciri emisyonlarını azaltma konusundaki hırs eksikliğini ve uzun vadeli derin dekarbonizasyona yönelik iyi tasarlanmış planlama eksikliğini ortaya koyan kurumsal iklim eylemine ilişkin diğer çalışmalarla tutarlıdır [\[17,22\]](#).

Bu çalışma, emisyon azaltımının güncel bir resmini sunmaktadır

Tablo 1

İklim hedefleri olan 26 şirket tarafından dikkate alınan emisyon azaltma önlemleri, önlemlerden kaç kez bahsedildiğini ve 2019'daki ham çelik üretiminin toplamını göstermektedir. Gösterge niteliğindeki emisyon azaltım oranları geleneksel BF-BOF ile karşılaştırmalı olup literatür tahminlerine dayanmaktadır [\[4,34,54-57\]](#).

Gösterge Emisyon % emisyon Listelenen önlemlerdeki emisyon azaltımını dikkate alan şirketler				
azaltma oranı çelik üretimi	ölçüsü	geleneksel BF ile karşılaştırma- BOF	Şirket sayısı	Yılda toplam ham çelik
Sınırlı azaltım potansiyeli 10 ila %30	MET'lerin ve enerji verimliliğinin yaygınlaştırılmasının artırılması	15-25 %	7	310
	Hidrojen kullanımı BF-BOF	10-20 %	3	160
	Artan kullanım BF- BOF'ta hurda	N/A	5	230
	Yenilenebilir elektrikğin payının artması	N/A	11	360
	Eritme indirgemesi (örn. Hlsarna, vs. BF-BOF)	20 (olmadan CCU/S)	1	30
	Geliştirilmiş biyokütle kullanımı	25-30 %	7	280
Orta ila derin emisyon azaltma potansiyeli: 50 ila %100	Karbon Yakalayan, Kullanım ve Depolama (CCU/ S) BF-BOF Hidrojen bazlı DRI'da (vs. BF-BOF)	50-90%	9	360
		95-100 %	12	440
Üretim rota anahtarı	Toplam ham çelik üretiminde hurda- EAF payının artması	N/A	8	260
Diğer	Planlanan denkleştirme kullanımı	N/A	5	210
	Belirtilmemiş veya belirsiz ⁴	N/A	12	270
Kendi emisyon azaltım hedefleri olan 30 şirketin toplamı		N/A	N/A	750
Toplam 60 şirket değerlendirildi		N/A	N/A	1150

yeni yatırım döngüleri için zamanlama (Bkz. Ek Verilerdeki Şekil S-1; [\[32,57\]](#)).

şirketi arasında yeni gelişmeler görüyor olabiliriz. Bununla birlikte, çelik şirketleri arasında karbonsuzlaştırmaya yönelik hedef belirleme ve planlamanın mevcut kolektif durumu, karbondan arındırılmış çelik üretimi için yeni bir altyapının geliştirilmesi uzun teslim süreleri gerektirdiğinden, endüstrinin 1.5° C ısınma ile tutarlı hızlı bir geçişin fizibilitesi konusunda büyük endişelere yol açmaktadır [\[59\]](#). Ayrıca, mevcut küresel yüksek fırın kapasitesinin neredeyse yarısının 40 yıllık tipik kullanım ömrünün aştığı düşünüldüğünde, eylemde daha fazla gecikme de

⁴ Kendi emisyon azaltma hedefi olmayan ancak hedefleri olan bir ana şirket (sırasıyla Ansteel Group ve China Baowu Group) tarafından satın alınan şirketler (Benxi Steel ve Shandong Steel Group) bu kategoriye yerleştirilmiştir.

Demir-çelik sektöründe hedef belirleme ortamı. Hem münferit şirketlerin iklim eylemleri hem de kurumsal iklim eylem bütünlüğü etrafındaki tartışmalar hızla gelişmektedir [\[58\]](#) ve literatürün sonlandırıldığı tarihten bu yana 60 büyük çelik

Finans kuruluşları yatırımlarını Paris Anlaşması'nın hedefleriyle uyumlu hale getirmeyi düşünmeye başladıkları veya bu yönde baskı altında oldukları için [60, 61], uzun vadeli dekarbonizasyon taahhütleri veya sağlam geçiş planları olmayan çelik şirketleri de yatırımcıları uzak tutarak kendilerini riske atıyor olabilirler. Bu durum, emisyonlarını en aza indirirken küresel pazarda rekabetçi kalabilmek için gereken yatırımın büyüklüğü nedeniyle önümüzdeki on yıllarda çelik şirketlerinin hayatta kalması için kritik öneme sahip olabilir. *Metodolojik sınırlamalar*

Uygulanan araştırma yöntemleri ve analiz için kullanılan verilerle ilgili çeşitli kısıtlamalar tespit ettik. Araştırma kapsamında, günümüzde küresel çelik üretiminin yalnızca %60'ından sorumlu olan şirketleri analiz ettik. Bu şirketlerin coğrafi dağılımı ve birincil çelik üretiminin kapsamı, bulgularımızın tüm küresel demir çelik sektörünü temsil ettiğini düşündürse de, ilk 60'ın dışındaki şirketler üzerinde yapılacak daha fazla araştırma, daha küçük çelik üreticilerinin karbonsuzlaştırmaya geçişlerini nasıl öngördükleri (veya öngörmedikleri) konusunda daha fazla bilgi sağlayabilir. Küçük üreticilere ait üretim ve emisyon verileri şu anda büyük üreticilerde olduğu gibi merkezi bir şekilde kolayca elde edilememektedir.

Bununla ilgili bir başka sınırlama da temel yıl için şirkete özgü emisyon verileridir ve bu veriler mevcut olduğunda kullanılmasına öncelik verilmiştir. Birçok şirketin emisyon raporlamasının Worldsteel Association [31] tarafından önerilen sistem sınırı ile tutarlı olduğu ve dolayısıyla bu çalışmada uygulanan sınır ile tutarlı olduğu varsayılmaktadır. Ancak, tüm şirketler için tam tutarlılık sağlamak mümkün olmamıştır.

Araştırmamızda İngilizce dışındaki dillerde yayınlanmış belgeler incelenmemiştir. Bu durum, merkezi Avrupa, Hindistan ve Kuzey Amerika dışında bulunan en büyük 60 şirketin, özellikle de Çinli şirketlerin, özellikle emisyon azaltım hedefleri ve tedbirlerinin ayrıntıları konusunda eksik temsil edilmesine yol açmış olabilir.

Emisyon senaryo analizinde uygulanan yöntemlerle ilgili çeşitli kısıtlamalar tespit ettik. İlk olarak, bireysel çelik şirketlerinin gelecekteki gelişimini veya çoğu şirket için şirketlerin çelik üretim kapasitelerinin coğrafi dağılımını dikkate almadık (ArcelorMittal gibi merkezlerinin bulunduğu ülke yerine küresel faktörleri kullandığımız küresel olarak faaliyet gösteren şirketler istisnadır). Emisyon projeksiyonlarını geliştirmek için şirket başına uyguladığımız teknik varsayımların birçoğu şirketlerin merkezlerinin bulunduğu yere dayanmaktadır. Birçok büyük çelik şirketi, özellikle Çin, Japonya ve Güney Kore merkezli olanlar, bugün üretim kapasitelerinin büyük çoğunluğuna merkezlerinin bulunduğu ülkelerde sahipken [62], ArcelorMittal gibi şirketlerinin merkezlerinin bulunduğu ülkelerin içinde ve dışında farklı ülkelere üretim tesisleri bulunan şirketler de vardır. Gelecekte şirketler çelik üretim kapasitelerini başka yerlere taşıyabilir veya şu anda faaliyet göstermedikleri ülkelere yeni tesisler işletmeye başlayabilirler. Analizimizde uygulanan varsayımların küresel düzeydeki emisyon yörüngelerini analiz etmek için yeterince ayrıntılı olduğunu, ancak şirket veya ülke düzeyindeki emisyon yörüngeleri için belki de daha az ayrıntılı olduğunu düşünüyoruz.

İkinci olarak, Çin devletine ait çelik şirketleri haricinde, şirketlerin ulusal net sıfır uygulama planlarına karşı hedeflerini ve eylemlerini ayrıntılı olarak incelemedik. Haziran 2022 itibarıyla, küresel sera gazı emisyonlarının %80'inden fazlası, hem mevcut hem de gelecekteki büyük çelik üreticisi ülkeler de dahil olmak üzere ulusal net sıfır emisyon hedefleri kapsamındadır [17]. Gelecekteki araştırmalar, ulusal ve kurumsal düzeydeki karbonsuzlaştırma stratejileri arasındaki uyum ve tamamlanabilirliğe odaklanabilir. Bu tür bir araştırma, örneğin ulusal hükümetler tarafından yayınlanan sektör düzeyinde net sıfır stratejileri ve yol haritaları ile küresel pazardaki daha geniş kapsamlı uzun vadeli kurumsal stratejilerin ayrıntılı bir değerlendirilmesini gerektirecektir.

Üçüncü olarak, sayısallaştırılan emisyon azaltım potansiyelinin uygulanabilirliği daha fazla incelenebilir. Şirketlerin kendi hedeflerine ulaşmak için düşündükleri emisyon azaltım tedbirleri hakkında bilgi toplamış olsak da, şirketlerin emisyon azaltım planlarının kapsamı hakkında, muhtemelen kamuya açık bilgilerin ötesine geçerek, uzun vadeli emisyon azaltım hedeflerinin güvenilirliği ve fizibilitesi hakkında ek içgörüler sağlamak için daha fazla araştırma yapılması gerekecektir.

Dördüncü olarak, araştırmamız sadece çelik üretim süreçlerinden kaynaklanan kapsam 1 ve 2 CO₂ emisyonlarını dikkate almıştır. Daha ileri analizler, emisyon kapsamını kapsam 3 emisyonlarını (yukarı ve aşağı yönlü faaliyetlerden kaynaklanan) içerecek şekilde genişleterek ve geri kalan tüm sera gazlarını dahil ederek bu çalışmayı tamamlayabilir. Kömür madencilikinden kaynaklanan metan emisyonlarının önemli olduğu düşünülmektedir. Sorumlu Çelik girişimi [63] tarafından bildirilen bir değere dayanarak, çelik üretiminden kaynaklanan yukarı akış metan emisyonlarının yaklaşık 260 MtCO₂ e (100 yıllık küresel ısınma potansiyeli

(GWP) olarak ifade edilir) veya doğrudan ve dolaylı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'si kadar olduğunu tahmin ediyoruz.

Beşinci olarak, bu makale çelik üreticilerinin emisyon azaltım hedeflerini incelemiş, ancak çelik tüketimiyle ilgili sera gazı emisyon ayak izini azaltmaya yönelik talep tarafındaki kurumsal eylemleri araştırmamıştır. Son yıllarda düşük karbonlu çeliğe olan talebi artırmak için SteelZero ve UNIDO'nun Endüstriyel Derin Dekarbonizasyon Girişimleri gibi bir dizi uluslararası özel-kamu ortaklığı başlatılmıştır [64]. IEA, gelişmiş malzeme verimliliği yoluyla doğrudan emisyonların azaltılma potansiyelinin, temel STEPS senaryosuna kıyasla 2050 yılında 0,5 GtCO₂ kadar büyük olabileceğini tahmin etmektedir [4]. Son kullanım sektörlerinden net sıfır çeliğe yönelik artan talep, sera gazı emisyon azaltım hedefleri belirleyen çelik şirketlerinin sayısını artırmakla kalmayıp, mevcut hedefleri olan şirketleri de daha iddialı hedefler belirlemeye ve/veya bu hedeflere ulaşmak için daha net planlar ve stratejiler tanımlamaya teşvik edebilir. Küresel demir çelik sektöründen kaynaklanan emisyonları azaltmaya yönelik kurumsal eylemler üzerine gelecekte yapılacak araştırmalar, düşük karbonlu çelik ürünlerinin talep-arz (yanlış) eşleşmesine ışık tutabilir.

Politika önerileri

Küresel ısınmayı 1.5° C'de tutmak için yüzyılın ortalarında küresel net sıfır CO₂ emisyonlarına ulaşmak için tüm aktörlerin acil olarak harekete geçmesi gerekmesine rağmen, kamuya açık bilgilere dayanan analizimizin bulguları, çelik şirketlerinin genel olarak yeterince hızlı hareket etmediğini güçlü bir şekilde göstermektedir. Bu bulgulara dayanarak, politika ile ilgili dört tavsiyede bulunuyoruz. İlk olarak, ulusal hükümetlerin, faaliyet gösterdikleri ülkelerin uzun vadeli net sıfır emisyon hedefleriyle veya ısınmayı 1,5° C'nin altında tutmak için 2050 yılına kadar küresel net sıfır CO₂ emisyonlarıyla tutarlı kendi emisyon azaltım hedeflerini belirlemeleri için çelik şirketlerine baskı yapmaları gerekmektedir. Uluslararası düzeyde bir oyun alanı oluşturmak için uluslararası koordinasyon ve işbirliği ile desteklenen ulusal hükümetler tarafından net stratejilere sahip kapsamlı politikalar da şirketlerin yatırım kararları almasını kolaylaştırmak için gerekli olacaktır [59]. Şirketlerin hem uzun vadeli derin dekarbonizasyon hedefleri hem de birbiriyle tutarlı ara hedefler belirlemesi de çok önemlidir. İkinci olarak, şirketlerin emisyon azaltım hedeflerine ulaşmak için düşündükleri teknolojik seçenekler ve dağıtım yol haritaları hakkında yeterli ayrıntı sağlayan uzun vadeli bir geçiş planı geliştirmeleri gerekmektedir. Üçüncü olarak, demir çelik sektörü birçok ülkenin ekonomisinde önemli ve stratejik bir role sahip olduğundan, ulusal hükümetlerin de derin dekarbonizasyona gerekli geçişin gerçekleşmesini sağlamak için kamu alımları yoluyla düşük karbonlu çeliğe talep yaratılması da dahil olmak üzere demir çelik sektörüne çeşitli açılardan desteklerini güçlendirmeleri gerekmektedir [4,10]. Uluslararası işbirliği ve kamu-özel sektör ortaklıkları, adil küresel pazar rekabetini sağlarken düşük karbonlu çeliğin finansmanı da dahil olmak üzere Ar-Ge'sini geliştirmek için de çok önemlidir [64,65]. Dördüncü olarak, uzun vadede tüm uygulanabilir emisyon azaltım önlemleri tüketildikten sonra muhtemelen bir miktar artık emisyon olacağını kabul ederek, şirketlerin artık emisyonları nasıl nötrale etmeyi planladıklarını şeffaf bir şekilde bildirmeleri gerekmektedir.

YASAL ÖNERİLER

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyebilecek bilinen herhangi bir rakip finansal çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan etmektedir.

Teşekkür

Bu araştırma IKEA Vakfı tarafından desteklenmiştir (hibe no. G- 2010-01689). Yazarlar, Joel Beuerle'ye (Utrecht Üniversitesi) bu makalenin ilk kavramsallaştırma aşamalarındaki tartışmalarda sağladığı içgörü ve veri toplama konusundaki desteği için teşekkür eder. Yazarlar ayrıca Niklas Hohne (NewClimate Institute), Amadeep Gill-Lang (NewClimate Institute), Caitlin Swalec (Global Energy Monitor), Johan Rootz' en (IVL Svenska Miljöinstitutet) ve Ned Downie'ye (Princeton University) bu makalede sunulan analizin önceki bir versiyonuna ilişkin yapıcı geri bildirimleri için teşekkür eder.

Tamamlayıcı materyaller

Bu makale ile ilişkili ek materyaller çevrimiçi versiyonda [doi:10.1016/j.egycc.2023.100120](https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100120) adresinde bulunabilir.

online version, at [doi:10.1016/j.egycc.2023.100120](https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100120).

References

- [1] J. Rogelj, D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, L.M.P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Khesghi, S. Kobayashi, E. Kriegler, M.V.V.R. Se'ferian, SPECIAL REPORT Global' Warming of 1.5 °C Chapter2 Mitigation Pathways Compatible with 1.5 °C in the Context of Sustainable Development, in: IPCC Spec. Rep. Glob. Warm. 1.5 °C, 2018, p. 82.
- [2] IPCC, Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers (SPM), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf. accessed December 6, 2022.
- [3] I.A. Bashmakov, L.J. Nilsson, A. Acquaye, C. Bataille, J.M. Cullen, S. de la R. du Can, M. Fischedick, Y. Geng, K. Tanaka, F. Bauer, A. Hasanbeigi, P. Levi, A. Myshak, D. Perczyk, C. Philibert, S. Samadi, N. Campbell, R. Pichs-Madruga, S. Guo, Industry, in: Clim. Chang. 2022 Mitig. Clim. Chang. - Work. Gr. III Contrib. to Sixth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter_11.pdf.
- [4] IEA, Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking, International Energy Agency, Paris, France, 2020. <https://doi.org/10.1787/3dccc2a1b-en>.
- [5] S.J. Davis, N.S. Lewis, M. Shaner, S. Aggarwal, D. Arent, I.L. Azevedo, S.M. Benson, T. Bradley, J. Brouwer, Y.-M. Chiang, C.T.M. Clack, A. Cohen, S. Doig, J. Edmonds, P. Fennell, C.B. Field, B. Hannegan, B.-M. Hodge, M.I. Hoffert, E. Ingersoll, P. Jaramillo, K.S. Lackner, K.J. Mach, M. Mastrandrea, J. Ogden, F. Peterson, D. L. Sanchez, D. Sperling, J. Stagner, J.E. Trancik, C.-J. Yang, K. Caldeira, Net-zero emissions energy systems, *Science* (2018) 360, <https://doi.org/10.1126/science.aas9793> (80-).
- [6] V. Vogl, O. Olsson, B. Nykvist, Phasing out the blast furnace to meet global climate targets, *Joule* 5 (2021) 2646–2662, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.09.007>. [7] T. Kuramochi, N. Hohne, M. Schaeffer, J. Cantzler, B. Hare, Y. Deng, S. Sterl, M. Hagemann, M. Rocha, P.A. Yanguas-Parra, G.-U.-R. Mir, L. Wong, T. El-Laboudy, K. Wouters, D. Deryng, K. Blok, Ten key short-term sectoral benchmarks to limit warming to 1.5 °C, *Clim. Policy*. 18 (2018) 287–305, <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1397495>.
- [8] M.A.E. van Sluiseveld, H.S. de Boer, Y. Daiglou, A.F. Hof, D.P. van Vuuren, A race to zero - assessing the position of heavy industry in a global net-zero CO2 emissions context, *Energy Clim. Chang.* 2 (2021) 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100051>.
- [9] C. Swalec, Pedal to the Metal 2022. It's Not Too Late to Abate Emissions from the Global Iron and Steel Sector, Global Energy Monitor, San Francisco, CA, United States of America, 2022. https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2022/06/GEM_SteelPlants2022.pdf.
- [10] C. Bataille, L.J. Nilsson, F. Jotzo, Industry in a net-zero emissions world: new mitigation pathways, new supply chains, modelling needs and policy implications, *Energy Clim. Chang.* 2 (2021) 2–6, <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100059>.
- [11] S. Zhang, B. Yi, F. Guo, P. Zhu, Exploring selected pathways to low and zero CO2 emissions in China's iron and steel industry and their impacts on resources and energy, *J. Clean. Prod.* 340 (2022), 130813, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130813>.
- [12] C. Bataille, S. Stiebert, O. Hebeda, H. Trollip, B. McCall, S.S. Vishwanathan, Towards net-zero emissions concrete and steel in India, Brazil and South Africa, *Clim. Policy*. (2023) 1–16, <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2187750>. [13] O. Hebeda, B.S. Guimaraes, G. Cretton-Souza, E.L. La Rovere, A.O. Pereira, Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry, *J. Clean. Prod.* 401 (2023), 136675, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136675>.
- [14] V. Vogl, F. Sanchez, T. Gerres, F. Lettow, A. Bhaskar, C. Swalec, G. Mete, M. Åhman, J. Lehne, S. Schenk, W. Witecka, O. Olsson, J. Rootz'en, Green steel tracker, (2022). <https://www.industrytransition.org/green-steel-tracker/> (accessed August 25, 2022).
- [15] S. Boehm, L. Jeffery, K. Levin, J. Hecke, C. Schumer, C. Fyson, A. Majid, J. Jaeger, A. Nilsson, S. Naimoli, J. Thwaites, E. Cassidy, K. Lebling, M. Sims, R. Waite, R. Wilson, S. Castellanos, State of Climate Action 2022, Bezos Earth Fund, Climate Action Tracker, World Resources Institute, Berlin and Cologne, Germany, and San Francisco and Washington, D.C., 2022. United States of America, <https://www.wri.org/research/state-climate-action-2022> (accessed November 2, 2022).
- [16] T. Kuramochi, M. Roelfsema, A. Hsu, S. Lui, A. Weinfurter, S. Chan, T. Hale, A. Clapper, A. Chang, N. Hohne, Beyond national climate action: the impact of region, city, and business commitments on global greenhouse gas emissions, *Clim. Policy*. 20 (2020) 275–291, <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1740150>.
- [17] Net Zero Tracker, Net Zero Stocktake 2022, NewClimate Institute, Oxford Net Zero, Energy & Climate Intelligence Unit; Data-Driven EnviroLab, Cologne, Berlin, Oxford, London, North Carolina, Germany, UK, United States of America, 2022. <https://ca1-nzt.edcdn.com/Net-Zero-Tracker/Net-Zero-Stocktake-Report-2022.pdf?v=1655074300>. accessed July 14, 2022.
- [18] A. Björn, S. Lloyd, D. Matthews, Reply to Comment on 'From the Paris Agreement to corporate climate commitments: evaluation of seven methods for setting "science-based" emission targets', *Environ. Res. Lett.* 17 (2022), 038001 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac548e>.
- [19] J. Gieseckam, J. Norman, A. Garvey, S. Betts-davies, Science-based targets: on target? *Sustainability* 13 (2021) 1657, <https://doi.org/10.3390/su13041657>.
- [20] D.D. Wang, T. Sueyoshi, Climate change mitigation targets set by global firms: overview and implications for renewable energy, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94 (2018) 386–398, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.024>.
- [21] A.-F. Bolay, A. Björn, O. Weber, M. Margni, Prospective sectoral GHG benchmarks based on corporate climate mitigation targets, *J. Clean. Prod.* 376 (2022), 134220, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134220>.
- [22] T. Day, S. Mooldijk, S. Smit, E. Posada, F. Hans, H. Fearnough, A. Kachi, C. Warnecke, T. Kuramochi, N. Hohne, Corporate Climate Responsibility Monitor – 2022: Assessing the Transparency and Integrity of Companies' Emission Reduction and Net-Zero Targets, NewClimate Institute, Carbon Market Watch, Berlin and Cologne, Germany, 2022. <https://newclimate.org/2022/02/07/corporate-climate-responsibility-monitor-2022/>.
- [23] S. Mooldijk, F. Hans, M. Marquardt, S. Smit, E. Posada, A. Kachi, T. Day, Evaluating Corporate Target Setting in the Setting in the Netherlands, NewClimate Institute, Berlin and Cologne, Germany, 2022. https://newclimate.org/sites/default/files/2022-07/NewClimate_Evaluating_corporate_target_setting_in_the_Netherlands_Report_July22.pdf. accessed July 14, 2022.
- [24] T. Hale, S.M. Smith, R. Black, K. Cullen, B. Fay, J. Lang, S. Mahmood, Assessing the rapidly-emerging landscape of net zero targets, *Clim. Policy*. 22 (2022) 18–29, <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.2013155>.
- [25] UN HLEG, Integrity Matters: Net Zero Commitments by Businesses, Financial Institutions, Cities and Regions, United Nations' High-Level Expert Group on the Net Zero Emissions Commitments of Non-State Entities, 2022. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/high-level_expert_group_n7b.pdf. accessed November 29, 2022.
- [26] World Steel Association, Top Steelmakers in 2020, World Steel Association, Brussels, Belgium, 2021. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Top-steel-makers-2020.pdf>.
- [27] World Steel Association, Steel Statistical Yearbook 2020 Concise version, World Steel Association, Brussels, Belgium, 2020. <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:5001dac8-0083-46f3-aadd-35aa357acbcc/Steel%2520Statistical%2520Yearbook%25202020%2520%2520concise%2520version%2529.pdf>. accessed June 8, 2021.
- [28] CDP, Company responses to the Climate Change Questionnaire 2021, (2021). www.cdp.net.
- [29] SBTi, Companies Taking Action [status as of May 2022], (2022). <https://sciencebasedtargets.org/companies-taking-action> (accessed April 7, 2022).
- [30] A. Hasanbeigi, Steel Climate Impact - An International Benchmarking of Energy and CO2 Intensities, Global Efficiency Intelligence, Florida, United States, 2022. <https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities>.
- [31] World Steel Association, CO2 Data Collection User Guide, Version 10, Worldsteel Association, Brussel, Belgium, 2021. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/CO2-data-collection-user-guide-version-10.pdf>.
- [32] Global Energy Monitor, Global steel plant tracker (database v. March 2022), (2022). <https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/> (accessed November 1, 2022).
- [33] S. Yu, J. Lehne, N. Blahut, M. Charles, 1.5 °C Steel: Decarbonizing the Steel Sector in Paris-Compatible Pathways, Pacific Northwest National Laboratory, E3G, Alexandria, United States of America, 2021. https://e3g.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/1.5C-Steel-Report_E3G-PNNL-1.pdf.
- [34] C. Bataille, S. Stiebert, F.G.N. Li, Global Facility Level Net-Zero Steel pathways: Technical Report On the First Scenarios of the Net-zero Steel project, Institute for Sustainable and International Relations (IDDRI); Global Energy Monitor (GEM), Paris, France, 2021. http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zer_o_steel_report.pdf.
- [35] S. Teske, Achieving the Paris Climate Agreement Goals. Part 2: Science-based Target Setting for the Finance industry – Net-Zero Sectoral 1.5 °C Pathways for Real Economy Sectors, Springer, Cham, Switzerland, 2022. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-99177-7.pdf>. accessed August 24, 2022.
- [36] K. Kermeli, O.Y. Edelenbosch, W. Crijns-Graus, B.J. van Ruijven, D.P. van Vuuren, E. Worrell, Improving material projections in Integrated Assessment Models: the use of a stock-based versus a flow-based approach for the iron and steel industry, *Energy* 239 (2022), 122434, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122434>.
- [37] F. Delasalle, E. Speelman, A. Graham, R. Malinowski, H. Maral, A. Isabirye, M. F. Moutinho, L. Hutchinson, C. Gamage, L. Wright, Mission Possible Partnership, Making Net-Zero Steel Possible - An industry-backed, 1.5 °C-aligned Transition Strategy, Mission Possible Partnership, 2022. <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/SteelTSExecutiveSummary.pdf>. accessed October 5, 2022.
- [38] T. Kuramochi, Assessment of midterm CO2 emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan, *J. Clean. Prod.* 132 (2016) 81–97, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.055>.
- [39] Material Economics, Energy Transitions Commission, Breakthrough Energy, Mission Possible Partnership, Steeling demand: mobilising buyers to bring net-zero steel to market before 2030, 2021. <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/07/2021-ETC-Steel-demand-Report-Final.pdf> (accessed August 23, 2022).
- [40] R. Willis, M. Berners-Lee, R. Watson, M. Elm, The Case Against New Coal Mines in the UK, Green Alliance, London, 2020. https://green-alliance.org.uk/wp-content/uploads/2021/11/The_case_against_new_coal_mines_in_the_UK.pdf. accessed August 23, 2022.
- [41] IEA, World energy outlook 2021, (2021). <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- [42] J. Oda, Estimated Energy Intensity in 2019: Iron and Steel Sector (scrap-EAF Route), Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE), 2022. [http](http://)

- ps://www.rite.or.jp/system/en/global-warming-ouyou/download-data/2019_EAF_energy-intensity-by-RITE.pdf. accessed September 16, 2022.
- [43] Mission Possible Partnership, Net-zero Steel Initiative, Net-Zero Steel Sector Transition Strategy, Mission Possible Partnership, Energy Transitions Commission, Rocky Mountain Institute, 2021. <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2021/10/MPP-Steel-Transition-Strategy-Oct-2021.pdf>. accessed August 4, 2022.
- [44] L.N. Shevelev, A review of greenhouse gas emissions in the Russian iron and steel industry, *Steel Times Int.* 34 (2010) 33–34. <https://www.proquest.com/openview/406070e80660dca4904399a62d4aa422/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=1056347>.
- [45] State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council, Home, Directory. (2022). http://en.sasac.gov.cn/n_688_2.htm (accessed July 30, 2023).
- [46] M.T. Lin, China Suggests Slower Steel Decarbonization, But Retreat On National Climate Goals Seen Unlikely, *S&P Glob.* 2022. <https://cleanenergynews.ihsmarkit.com/research-analysis/china-suggests-slower-steel-decarbonization-but-retreat-on-nat.html>. accessed March 30, 2022.
- [47] Z. Fan, S.J. Friedmann, Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy, *Joule* 5 (2021) 829–862, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>.
- [48] World Steel Association, World Steel in Figures - 2020 Edition, World Steel Association, 2020. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2020-World-Steel-in-Figures.pdf>.
- [49] ARGUS media, Chinese steel producer Baowu to acquire Shandong Steel, (2021). <https://www.argusmedia.com/en/news/2234903-chinese-steel-producer-baowu-to-acquire-shandong-steel> (accessed March 23, 2023).
- [50] SteelOrbis, Angang Group takes over Benxi, forming second largest Chinese steelmaker, (2021). <https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/angang-group-takes-over-benxi-forming-second-largest-chinese-steelmaker-1212146.htm>.
- [51] LIBERTY Steel Group, Sustainability Report 2022: Push for Change, LIBERTY Steel Group, 2022. <https://libertysteelgroup.com/wp-content/uploads/2022/12/Liberty-Steel-Sustainability-Report-2022.pdf>.
- [52] CAT, Paris Agreement Compatible Sectoral Benchmarks: Elaborating the Decarbonisation Roadmap, Climate Action Tracker (Climate Analytics, NewClimate Institute), Berlin, Germany, 2020. https://climateactiontracker.org/documents/753/CAT_2020-07-10_ParisAgreementBenchmarks_FullReport.pdf. accessed December 1, 2022.
- [53] T. Kuramochi, A. Ramírez, A. Faaij, W. Turkenburg, Comparative assessment of CO2 capture technologies for carbon-intensive industrial processes, *Prog. Energy Combust. Sci.* 38 (2012) 87–112. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128511000293?via%3Dihub>.
- [54] P. Wang, M. Ryberg, W. Chen, S. Kara, M. Hauschild, Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts, *Nat. Commun.* (2021) 1–11, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6>.
- [55] Material Economics, Industrial transformation 2050 - pathways to net-zero emissions from EU heavy industry, 2019. <https://materialeconomics.com/latest-updates/industrial-transformation-2050> [accessed on 13 July 2020].
- [56] M. Draxler, A. Sormann, T. Kempken, T.H. BFI, J.-C. Pierret, A. Di Donato, M.D. S. CSM, C. Wang, Technology Assessment and Roadmapping (Deliverable 1.2), Green Steel for Europe Consortium, Brussels, Belgium, 2021. <https://www.estep.eu/assets/Uploads/D1.2-Technology-Assessment-and-Roadmapping.pdf>.
- [57] C. Swalec, C. Shearer, Pedal to the Metal 2021. No Time to Delay Decarbonizing the Global Steel Sector, Global Energy Monitor, San Francisco, CA, United States of America, 2021, <https://doi.org/10.7551/mitpress/11314.003.0023>.
- [58] Net Zero Tracker, Net Zero Stocktake 2023, NewClimate Institute, Oxford Net Zero, Energy & Climate Intelligence Unit; Data-Driven EnviroLab, Cologne, Berlin, Oxford, London, North Carolina, 2023. https://ca1-nzt.edcdn.com/Reports/Net_Zero_Stocktake_2023.pdf?v=1689326892. accessed September 5, 2023.
- [59] Agora Industry and Wuppertal Institute, 15 Insights On the Global Steel Transformation, Agora Industry, Germany, 2023.
- [60] U.N.-Convened Net-Zero Asset Owner Alliance, Inaugural 2025 Target Setting Protocol, UNEP Finance Initiative Principles for Responsible Investment, 2021. <https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/01/Alliance-Target-Setting-Protocol-2021.pdf>.
- [61] GFANZ, Glasgow financial alliance for net zero, (2021). <https://www.gfanzero.com/> (accessed June 15, 2023).
- [62] S&P Global, Analysis: china looks overseas for steel capacity expansion, Metals (Basel) (2019). Commodity Insights, <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/videos/market-movers-asia/022723-china-russia-crude-india-wheat-aluminum-coal-power-plants> (accessed February 10, 2023).
- [63] ResponsibleSteel, Methane and steel, (2021). <https://www.responsiblesteel.org/news/methane-and-steel/>.
- [64] IEA, IRENA, UNCC HLC, The breakthrough agenda report: accelerating sector transitions through stronger international collaboration, international energy agency, International Renewable Energy Agency, UN Climate Change High-Level Champions, 2022. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-124-3-199602010-00013>.
- [65] L.J. Nilsson, F. Bauer, M. Åhman, F.N.G. Andersson, C. Bataille, S. de la Rue du Can, K. Ericsson, T. Hansen, B. Johansson, S. Lechtenbohmer, M. van Sluisveld, "V. Vogl, An industrial policy framework for transforming energy and emissions intensive industries towards zero emissions, *Clim. Policy*. 21 (2021) 1053–1065, <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1957665>.