

# Türkiye Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası

Ekim 2023



T.C. SANAYİ VE  
TEKNOLOJİ BAKANLIĞI



tarafından desteklenmiştir.

**Yasal Uyarı:** Bu yayın, Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası'nın (EBRD) desteğiyle hazırlanmış ve İklim Yatırım Fonları tarafından sağlanan fonla desteklenmiştir. Bu yayının içeriği, danışman/yazar olarak PwC Türkiye ve ana faydalanıcısı olarak Türkiye Cumhuriyeti Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından oluşturulmuştur ve EBRD'nin görüşlerini yansıtmayabilir.

Raporun doğruluğu veya tamlığı konusunda PwC tarafından herhangi bir kişiye herhangi bir beyan veya garanti (açık veya zımni) verilmemektedir. Yasaların izin verdiği ölçüde, PwC, üyeleri, çalışanları ve temsilcileri, bu belgede yer alan bilgilere dayanarak hareket eden veya hareket etmekten kaçınan herhangi bir kişinin buna dayalı herhangi bir kararı veya sonuçları için herhangi bir sorumluluk, yükümlülüğü kabul etmez veya üstlenmez.

# İçindekiler

Kısaltmalar	4
Şekiller Listesi	6
Tablolar Listesi	8
Teşekkür	9
Giriş	10
<b>Yönetici Özeti</b>	<b>13</b>
<b>1. Türkiye Çelik Sektörünün Mevcut Durum Analizi</b>	<b>25</b>
1.1. Türkiye Çelik Sektörüne Genel Bakış	26
1.1.1. Kapasite ve Üretim	26
1.1.2. Türkiye'nin Çelik Ticareti ve İhracatında AB'nin Payı	29
1.2. Türkiye Çelik Sektörü Faaliyetlerinin Diğer Büyük Oyuncularla Karşılaştırılması	30
1.2.1. Çelik Üretim Kapasitelerinin Karşılaştırılması	30
1.2.2. CO <sub>2</sub> Emisyonlarının Karşılaştırılması	31
1.3. Türkiye Çelik Sektörünün Güçlü ve Zayıf Yönleri	34
1.3.1. Güçlü Yönler	34
1.3.2. Zayıf Yönler	35
<b>2. Türkiye Çelik Sektörünün Karbonsuzlaşması için Modelleme ve Senaryo Analizi</b>	<b>37</b>
2.1. Modelden Elde Edilen Emisyon Değerlerinin Özeti	40
2.2. Sektör Büyüme Metodolojisi ve Tahminleri	41
2.3. Düşük Karbonlu Çelik Üretim Teknolojileri	44
2.4. 2053'e Kadar Düşük Karbon Senaryoları	48
2.5. Sera Gazı ve Politika Etkileşim Modeli	50
2.5.1. Modelleme Yaklaşımı	50
2.5.2. Model Sonuçları	51
2.6. Karbonsuzlaşmayı Sağlamak için Gereken Yatırım İhtiyacı	62
<b>3. Türkiye Çelik Sektörü için Karbonsuzlaşma Yol Haritası</b>	<b>67</b>
3.1. A) Girdi ve Teknoloji	68
3.2. B) Politika ve Pazar	72
<b>4. Sonuç</b>	<b>77</b>



## Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
BAT	Mevcut En İyi Teknoloji
BDT	Bağımsız Devletler Topluluğu
BECCUS	Biyoenerji ile Karbon Yakalama, Depolama ve Kullanma
Bio-CH <sub>4</sub>	Biyometan
BOF/YF	Bazık Oksijen Fırını / Yüksek Fırın
CAPEX	Yatırım Maliyeti
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
CCS	Karbon Yakalama ve Depolama
CCU	Karbon Yakalama ve Kullanma
CCUS	Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama
CH <sub>4</sub>	Metan
ÇİB	Çelik İhracatçıları Birliği
CO <sub>2</sub>	Karbondiyoksit
DRI	Doğrudan İndirgenmiş Demir
EAF	Elektrik Ark Fırını
EBRD	Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
FTS	En İyi Teknolojiler Senaryosu (Frontier Technologies Scenario)
GAMS	Genel Cebirsel Modelleme Sistemi
H <sub>2</sub>	Hidrojen
HBI	Sıcak Briketlenmiş Demir
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı

---

İÇG	İhtisas Çalışma Grubu
İF	İndüksiyon Fırını
Kg	Kilogram
LCP	Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (Low Carbon Pathway Scenario)
MPP	Mission Possible Partnership
Mt	Milyon Ton
MWh	Megawatt-saat
NDC	Ulusal Katkı Beyanı
NBD	Net Bugünkü Değer
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
OPEX	İşletme Giderleri
PCI	Pulverize Kömür Enjeksiyonu
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
SOGAD	Soğuk Haddeme, Galvanizli ve Boyalı Sac Üreticileri Derneği
SPS	Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosu (Stated Policy Scenario)
TÇÜD	Türkiye Çelik Üreticileri Derneği
TİM	Türkiye İhracatçıları Meclisi
TOBB	Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği
TR	Türkiye
TTP	Teknoloji Takip Platformu
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
WoM	Azaltıcı Önlemlerin Öngörülmediği Senaryo (Without Measures Scenario)
YİSAD	Yassı Çelik İhracat ve Sanayicileri Derneği

## Şekiller Listesi

Şekil 1. Türkiye Çelik Üretim Kapasiteleri ve Hacimleri, (2022, Milyon Ton)	14
Şekil 2. Türk Çelik İhracatının Bölgelere Göre Dağılımı, (2022, Ton Bazında)	14
Şekil 3. IEA (solda) ve MPP (sağda) Emisyon Azaltım Senaryoları	17
Şekil 4. Projenin Emisyon Tahminleri (Milyon Ton CO <sub>2</sub> )	18
Şekil 5. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): LCP Senaryosu	20
Şekil 6. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): FTS Senaryosu	21
Şekil 7. Senaryolar Bazında Yıllık Ortalama Yatırım Gereksinimi (Milyon Dolar)	22
Şekil 8. 2022'de Ham Çelik Üretiminde Önde Gelen Ülkeler ve Üretim Hacimleri (Milyon Ton)	26
Şekil 9. Türkiye'deki Çelik Tesislerinin Coğrafik Dağılımı	27
Şekil 10. Ürün ve Üretim Yöntemi Bazında Türkiye Ham Çelik Üretimi (Milyon Ton)	27
Şekil 11. Türkiye'nin Ham Çelik Üretim Kapasitesi, 2000 – 2022 (Milyon Ton)	28
Şekil 12. Türkiye'deki Çelik Tesislerinin Kapasite Kullanım Oranı (%)	29
Şekil 13. Türkiye Çelik İthalat ve İhracatı, 2000 - 2022 (Milyon Ton)	29
Şekil 14. Türkiye'nin Çelik İhracat Hacminin Bölgelere Göre Dağılımı (2022, Milyon Ton)	30
Şekil 15. AB'den Seçili Üreticilerin Çelik Üretim Kapasiteleri ve Üretim Hacimleri, 2022 (Milyon Ton)	31
Şekil 16. Türkiye ve Seçili Büyük Üreticiler için Demir Çelik Endüstrisinden Kaynaklanan Toplam CO <sub>2</sub> Emisyonları, 2018	32
Şekil 17. Entegre Rota CO <sub>2</sub> Emisyonları ve Karbon Yoğunluğu	33
Şekil 18. EAF Rotası CO <sub>2</sub> Emisyonları ve Karbon Yoğunluğu	34
Şekil 19. 2020-2053 Yılları Arasında Kümülatif CO <sub>2</sub> Emisyonları (Mt CO <sub>2</sub> )	40
Şekil 20. Sektörel Büyüme Tahmini Metodolojisi	41
Şekil 21. Çelik Ürün Tiplerine Göre Talep Tahmini (Milyon Ton)	42
Şekil 22. Kişi Başına Çelik Tüketimi (Kg/Kişi)	42
Şekil 23. Ülkelere Göre Kişi Başına Çelik Tüketimi (Kg/Kişi)	43
Şekil 24. LCP Senaryosunda Üretim Yöntemine Göre Üretim Tahmini (Milyon Ton)	43
Şekil 25. BOF/YF Rotası için Ton Çelik Üretimi Başına Ortalama Emisyon Değerleri (Kapsam 1&2), (Ton CO <sub>2</sub> )	45

---

Şekil 26. EAF Rotası için Ton Çelik Üretimi Başına Ortalama Emisyon Değerleri (Kapsam 1 &2), (Ton CO <sub>2</sub> )	47
Şekil 27. Çelik Sektörü Senaryoları	48
Şekil 28. Hurda ve Demir Cevheri Fiyat Tahmini (Dolar/Ton)	49
Şekil 29. Türkiye Karbon Fiyat Projeksiyonları	49
Şekil 30. Hidrojen Fiyat Projeksiyonu	50
Şekil 31. Optimizasyon Modelinin Genel Çerçevesi	51
Şekil 32. Senaryolara Göre Emisyon Tahminleri (Mt CO <sub>2</sub> )	52
Şekil 33. SPS Senaryosuna Kıyasla Çelik Sektöründe Emisyon Azaltım Oranları (%)	53
Şekil 34. Senaryolara Göre Kapsam 1 ve Kapsam 2 Emisyonları (Mt CO <sub>2</sub> )	54
Şekil 35. LCP ve FTS için Teknolojiler Arası Geçiş Matrisi	55
Şekil 36. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): Düşük ETS	56
Şekil 37. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): LCP	57
Şekil 38. Üretim Kapasitesindeki Teknoloji Payları (%): Yüksek ETS	57
Şekil 39. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): FTS	58
Şekil 40. 2020-2053 Yılları Arasında Toplam CO <sub>2</sub> Maliyeti (Milyar Dolar)	59
Şekil 41. Senaryolara Göre Hammadde Projeksiyonları (Milyon Ton)	60
Şekil 42. Senaryolara Göre Enerji Kaynağı Projeksiyonları (Milyon GJ)	61
Şekil 43. Senaryolara Göre Yıllık Yatırım Maliyeti (Milyon Dolar)	62
Şekil 44. Yıllara Göre Yatırım Maliyeti (Milyon Dolar)	63
Şekil 45. Öngörülen Yıllık Ortalama Yatırım Miktarı (Milyon Dolar)	64
Şekil 46. Toplam Yatırımların NBD'si, 2023-2053 (Milyar Dolar)	65

## Tablolar Listesi

Tablo 1. Türkiye Çelik Sektörünün Güçlü ve Zayıf Yönleri	15
Tablo 2. Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosunda Modelin Karar Verdiği Öncelikli Çelik Üretim Teknolojileri	19
Tablo 3. Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu Senaryosunda Modelin Karar Verdiği Teknoloji Önceliklendirmesi	39
Tablo 4. BOF/YF Teknolojilerinin Kısa Tanımları	45
Tablo 5. BOF/YF Rotası için Teknoloji Giriş Yılı ve Teknolojinin Üretimde Maksimum Pay Öngörülleri	46
Tablo 6. EAF Teknolojilerinin Kısa Tanımları	46
Tablo 7. EAF Rotası için Teknoloji Giriş Yılı ve Teknolojinin Üretimde Maksimum Pay Öngörülleri	47



## Teşekkür

Bu rapor, PwC Türkiye ve **PwC Türkiye'nin** konsorsiyum ortakları bünyesinde görev alan uzman, yazar ve danışman ekibi tarafından hazırlanmıştır: Dr. Akif Koca, Levent Pekuyusal, Dr. Barış Çiftçi, Dr. Kubilay Kavak, Dr. Zeynep Yöntem. Bu Proje, Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası'nın (EBRD) finansman desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Proje ekibi, bu yol haritasının geliştirilmesi sürecinde değerli bilgi ve geri bildirimlerini sağlayan aşağıda isimleri yer alan kişilere teşekkürlerini sunar:

- **T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı:** Dr. Ali Murat Sürekli, Ümit Yasin Güven, Mehmet Demir, Sinan Durmaz, Alper Şahin, Bulut Polat, Mehmet Ali Yılmaz.
- **EBRD:** Ela Yılmaz, Gianpiero Nacci, Dimitri Koufos, Hande Islak, Muharrem Aşkın, Mine Işık, Elif Baknalı.

Proje ekibi, **Türkiye Çelik Üreticileri Derneği** Genel Sekreteri Dr. Veysel Yayan ve ekibine, proje boyunca verdikleri devamlı destek için özel olarak teşekkürlerini sunar.

Proje ekibi ayrıca aşağıdaki kurum ve kişilere de destekleri için teşekkür eder:

**Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK):** Hande Alparslan, Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Daire Başkanı. Melis (Yurttagül) Kocatürk, Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Müdür Yardımcısı.

**T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı:** Dr. Bilal Düzgün, Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanı. Ümit Çalıkoğlu, İklim Grubu Koordinatörü, Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı. Halil Oruç, Ölçme ve Değerlendirme Grubu Koordinatörü, Planlama ve Denetim Daire Başkanlığı. Yasemin Kaya, Çevre Yönetimi Grubu Koordinatörü, Çevre ve İklim Daire Başkanlığı. Yaprak Serenay Taşkın, Uzman, Çevre ve İklim Daire Başkanlığı. Çınla Demircigil Akkaşoğlu, Enerji Denge ve Modelleme Grubu Koordinatörü, Enerji Arz Güvenliği ve İstatistik Daire Başkanlığı, Tuğba Baysal Çiftçi, ETK Uzmanı, Enerji Arz Güvenliği ve İstatistik Daire Başkanlığı, Latife Demirtaş, ETK Uzmanı, Enerji Arz Güvenliği ve İstatistik Daire Başkanlığı, Gülden Sadegüzel, Mühendis, Yenilenebilir Enerji ve Yeni Teknolojiler Daire Başkanlığı, Aslı Güven, ETK Uzmanı, Yenilenebilir Enerji ve Yeni Teknolojiler Daire Başkanlığı.

**T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı:** Doç. Dr. Abdulkadir Bektaş, İklim Değişikliği Başkanlığı Başkan Yardımcısı. Eyüp Kaan Moralı, Daire Başkanı, Karbon Fiyatlandırma Dairesi Başkanlığı. Aydın Sargın, İklim Değişikliği Uzmanı, Karbon Fiyatlandırma Dairesi Başkanlığı.

**T.C. Ticaret Bakanlığı:** Gülizar Yavaş, Daire Başkanı, Uluslararası Anlaşmalar ve AB Genel Müdürlüğü, AB Tek Pazar ve Yeşil Mutabakat Dairesi. Demet Işıl Karakurt, Ticaret Uzmanı, Uluslararası Anlaşmalar ve AB Genel Müdürlüğü, AB Tek Pazar ve Yeşil Mutabakat Dairesi.

Proje ekibi son olarak, proje için bilgi ve veri paylaşımı yapan, taslak belgeleri inceleyip yorumlayan, toplantılara katılım sağlayan ve geri bildirim sunan tüm sektör firmalarına, kamu kurumlarına ve uzmanlara teşekkür eder.

## Giriş

Küresel iklim politikaları, Birleşmiş Milletler'in bilime dayalı emisyon azaltım hedefleri doğrultusunda hızla gelişmektedir. Küresel seviyede belirlenen iklim değişikliğiyle mücadele hedefleri, Paris Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi geniş kapsamlı girişimler aracılığıyla devletler için bağlayıcı politikalara dönüşmektedir.

Paris Anlaşması, iklim değişikliğiyle mücadele konusunda uluslararası iş birliğinin dönüm noktası sayılabilecek bir girişim olup, taraflarını sera gazı emisyonlarını sınırlandırma konusunda bağlamaktadır. Anlaşma, ülkeleri iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamak için birlikte çalışmaya ve taahhütlerini zaman içinde güçlendirmeye çağırılmaktadır. Bu proje, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi doğrultusunda düşük karbon seçeneklerinin yaygınlaştırılmasını desteklemeyi amaçlamaktadır.

Avrupa Yeşil Mutabakatı ise, Avrupa Birliği'nin (AB) iklim nötr ilk kıta olma ve Avrupa ekonomisini temelden dönüştürme yönündeki güçlü ve geniş kapsamlı planının bir sonucudur.<sup>1</sup> Mutabakatın temel politika aracı olan "Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM)" ise AB'ye giren karbon yoğun malların üretimi sırasında salınan karbonu ücretlendirerek karbon kaçağını önlemeyi, böylece AB üyesi olmayan ülkelerde daha temiz sanayi üretimini teşvik etmeyi ve küresel emisyonları azaltmayı amaçlamaktadır. Bu bağlayıcı girişimlerin bir sonucu olarak, küresel ısınmanın sanayi devrimi öncesi seviyelerin<sup>2</sup> 1,5°C üzerinde sınırlandırılması için çabalar yoğunlaşmakta ve çelik sektörü gibi karbonsuzlaşması zor sektörlerin<sup>3</sup> yeşil dönüşümü konusu, devletlerin gündeminde üst sıralara taşınmaktadır.

Altyapı, imalat ve savunma sanayii faaliyetlerinin temel girdisi olan çelik, tüm ülkeler için stratejik önem taşımaktadır. Stratejik önemiyle birlikte, enerjiyle ilişkili küresel CO<sub>2</sub>

emisyonlarının yaklaşık %10'undan ve endüstriyel karbon emisyonlarının yaklaşık %30'undan sorumlu olan çelik sektörü, küresel karbonsuzlaşma ve yeşil dönüşüm hedefleri için kritik önem arz etmektedir.<sup>4</sup> Bu raporun hazırlandığı tarih itibarıyla\* Türkiye'de üçü bazık oksijen fırını, 27'si elektrik ark fırını ve 11'i indüksiyon fırını temelli olmak üzere sıvı çelik üreten toplam 41 tesis bulunmaktadır. Bu tesisler 2022 yılında, toplamda 35 milyon tondan fazla çelik üretmiştir.

Küresel iklim politikalarının ulusal yansımalarına bakıldığında, Türkiye'nin 2021 yılı Eylül ayında, 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefini açıkladığı, Kasım 2021'de ise Paris Anlaşması'na taraf olduğu görülmektedir.<sup>5</sup> Nisan 2023'te Türkiye, 2012 yılını baz yıl (referans yıl) olarak kabul eden Türkiye'nin ilk NDC'sinde (INDC) verilen Referans (BAU) senaryosuna kıyasla 2030 yılına kadar %41 oranında (2030 yılında 695 milyon ton CO<sub>2eq</sub>) emisyon azaltımı ile Birinci Ulusal Katkı Beyanını güncellemiştir. Resmi olarak beyan edildiği üzere, "Türkiye'nin güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı tüm ekonomiyi kapsamaktadır ve kapsamlı azaltım ve uyum eylemlerinin yanı sıra uygulama araçlarına yönelik değerlendirmeleri de içermektedir. Türkiye en geç 2038 yılında emisyonlarını tepe noktasına ulaştırma niyetindedir."\*\*\*

Türkiye'nin 1996 yılından bu yana Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu'nun bir üyesi olarak, demir çelik ürünlerini AB'ye gümrük vergisi olmadan ihraç edebilmesi de iklim politikalarının sektörel yansımalarını değerlendirmek için önemli bir yer tutmaktadır. AB SKDM'nin 2023 yılında başlayacak raporlama zorunluluğu ile birlikte, Türkiye'den AB'ye ihracat yapacak çelik üreticilerinin, doğrudan ve dolaylı emisyonlarını raporlaması ve emisyon azaltım önlemleri alması beklenecektir.

<sup>1</sup>Avrupa Komisyonu, Delivering the European Green Deal

<sup>2</sup> Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği, Paris Anlaşması.

<sup>3</sup> Dekarbonizasyonu Zor" sektörler terimi genellikle sera gazı emisyonlarını azaltmanın veya sektörü tamamen karbondan arındırmanın özellikle zor olduğu sektörleri veya faaliyetleri ifade etmektedir. Bu sektörler büyük ölçüde fosil yakıtlara bağımlıdır ve genellikle sınırlı alternatifleri bulunmaktadır.

<sup>4</sup>IEA, OECD, 2021.

<sup>5</sup><https://www.iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34> adresinden alınmıştır

\*(Şubat 2023)

\*\*Türkiye Cumhuriyeti Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı, Nisan 2023.

---

Küreseldeki görünümüne paralel olarak, Türkiye çelik sektörü de ulusal sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Yakın gelecekte karşılaşılabileceği riskler sebebiyle sektörün karbonsuzlaşması için acil olarak teknolojik ve politik önlemlerin alınması gerekmektedir. "Türkiye Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası Projesi"nin temel çıktısı olan bu rapor, Türkiye çelik sektörünün Paris Anlaşması hedeflerine uygun şekilde yeşil dönüşümünü gerçekleştirmesi için bir zemin hazırlamayı amaçlamaktadır. Raporun ülke iklim stratejisinde anlamlı bir temele oturması için, ele alınan konu ve önerilerin ulusal politika belgeleriyle bağlantısı da incelenmiştir.

Türkiye Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası, Ticaret Bakanlığı tarafından hazırlanan "Yeşil Mutabakat Eylem Planı"nda yer alan ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nı sınırdan karbon düzenleme mekanizmasına konu olabilecek öncelikli imalat sektörlerinde sera gazı emisyonlarının azaltılmasını destekleyecek ulusal düzeyde bir yol haritası geliştirmekle görevlendiren Eylem 1.1.1'in uygulanması için bir temel oluşturmaktadır. Bu proje aynı zamanda Türkiye'nin 2053 net sıfır sera gazı emisyonu hedefiyle birlikte güncellenmiş ulusal katkı beyanı (NDC) kapsamında belirlenen ara hedeflerine ulaşmasına ve Yeşil Teknoloji Yol Haritaları'nın hazırlanmasına (2023-2024 dönemi için) destek olacaktır.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın yararlanıcısı, EBRD'nin fonlayıcısı olduğu ve PwC liderliğindeki Konsorsiyum'un yürüttüğü bu proje, ulusal ve Türk çelik sektörünün emisyon azaltım hedefleri doğrultusunda atılan iklim alakalı politika adımlarına girdi ve katkı sağlaması amacıyla

gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında tüm sektör paydaşlarının görüşlerini en doğru ve eksiksiz şekilde yansıtmak adına bir Yönlendirme Komitesi oluşturulmuştur. Söz konusu Yönlendirme Komitesi'nde Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ticaret Bakanlığı ve TÜBİTAK gibi birçok kamu kuruluşlarının yanı sıra, Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD) ve Çelik İhracatçıları Birliği (ÇİB) de yer almıştır.

Türkiye çelik sektörü için hazırlanan bu yol haritasının geliştirilmesi sürecinde proje çıktıları üç ayrı zamanda gerçekleştirilen Yönlendirme Komitesi Toplantıları vesilesiyle tüm paydaşlar ile paylaşılmış ve düzenli olarak görüşleri alınmıştır. Söz konusu Yönlendirme Komitesi toplantılarına ek olarak, birçok sektörel paydaşla hem model sonuçları hem de politika önerileri üzerine ayrıca istişare toplantıları gerçekleştirilmiştir.

Emisyonlarda kayda değer düşüşlerin sağlanması her bir çelik üreticisinin kendi durum ve şartlarına uygun tedbirleri uygulamasına bağlı olsa da, Proje'nin ortaya koyduğu yol haritası, politika yapımcıların ve sektör temsilcilerinin gelecek stratejilerini veri destekli geçiş senaryosuna uygun şekilde planlamalarına imkan verecektir. Bu yol haritası, ilgili aktörleri bir araya getirip sektör için ortak bir vizyon ortaya koyarak önerilen eylemlerin uygulanmasını hızlandırmaya yardımcı olacak bir yatırım planı ve platform geliştirilmesine temel teşkil edebilir.



# Yönetici Özeti

## Türkiye Çelik Sektörüne Genel Bakış: Üretim, Ticaret ve Emisyonlar

### Sektörün Mevcut Durumu ve Emisyon Seviyeleri

Küresel çelik üretimi ve yarı mamul ticaretindeki yüksek payı ile dünyada önemli bir yere sahip olan Türkiye çelik sektörü, 2022 yılı itibarıyla 35,1 milyon ton ham çelik üretimiyle bu alanda dünyada 8. sırada yer almaktadır.<sup>6</sup> Türkiye çelik sektörü, Avrupa ülkeleri ile kapasite ve üretim açısından karşılaştırıldığında ise lider ülke Almanya'nın hemen arkasında ikinci sırada gelmektedir. 2022 yılında gerçekleştirdiği 14,5 milyon ton çelik ürünü ihracatıyla Türkiye aynı zamanda dünyanın önde gelen çelik ihracatçılarından biridir.

Türkiye'nin toplam ham çelik üretiminin %71,6'sı elektrik ark fırınlı (EAF) ve indüksiyon fırınlı (İF) tesislerde, %28,4'ü ise entegre tesislerde (BOF/YF) gerçekleşmektedir.<sup>7</sup> Üretimin ürün grubu bazında dağılımı ise, Türkiye çelik sektörünün yüksek oranda uzun çelik odaklı bir üretim yapısına sahip olduğunu göstermektedir. 2022 yılı verilerine göre, toplam üretimin %65'i uzun çelikten, geri kalanı (%35'i) ise yassı çelikten oluşmaktadır.<sup>8</sup> Benzer bir dağılım ihracat yapısında da görülmekte olup ihracatın %67'si uzun çelikten oluşmaktadır.<sup>9</sup>

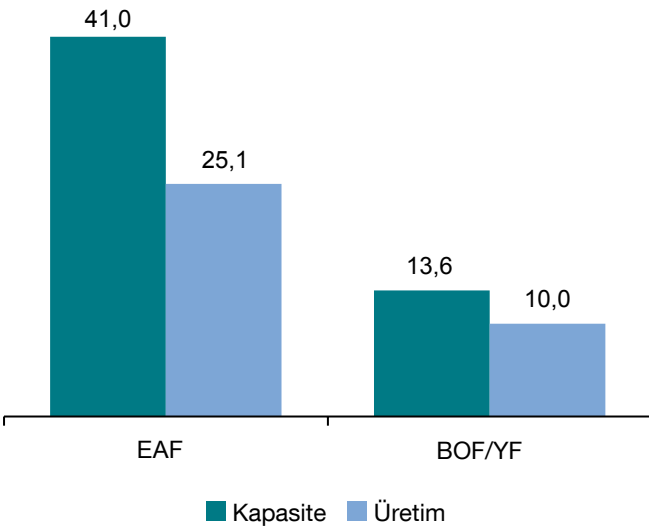
2000 yılından beri, Türkiye'de hem EAF hem de YF kapasiteleri önemli ölçüde büyümüş ve başlangıçtaki toplam

üretim kapasitesinin neredeyse üç katına ulaşmıştır. Kapasite artışı ise özellikle EAF tarafında yoğunlaşmış olup, 2022 itibarıyla EAF tesisleri toplam üretim kapasitesinin %75'ini oluşturmaktadır. Kapasitedeki kayda değer artışa rağmen, üretim oranları yaklaşık %65 ile neredeyse aynı seviyede kalmıştır.

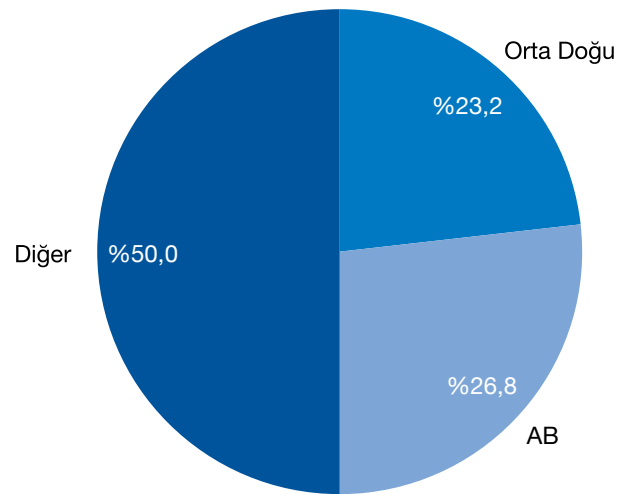
EAF tesislerinde enerji olarak elektrik ve üretimde girdi olarak hurda kullanıldığı dikkate alındığında, Türk çelik sektörü, hem güncel emisyon seviyeleri hem de gelecekteki emisyon azaltım çabaları açısından nispeten avantajlı bir konuma sahiptir. Çelik sektörü açısından önümüzdeki dönemde uluslararası piyasalarda hurda çeliğin bulunabilirliği ve ilave yenilenebilir enerji yatırımları yoluyla elektrik kaynaklı emisyonların azaltılması önemini artıracaktır.

2000 ve 2022 yılları arasında sektör ithalatı iki kattan daha fazla yükselirken, ihracat ise aynı dönemde yaklaşık üç kat büyümüştür. Türk çelik ihracatçılarının en önemli iki pazarı olan AB (%26,8) ve Orta Doğu'nun (%23,2) payları, 2022 yılında toplam çelik ihracatının yarısını oluştururken, AB'ye yapılan ihracatta yassı ürünler, Orta Doğu'ya yapılan ihracatta ise uzun ürünler yüksek paya sahiptir.<sup>11</sup>

**Şekil 1. Türkiye Çelik Üretim Kapasiteleri ve Hacimleri, (2022, Milyon Ton)<sup>10</sup>**



**Şekil 2. Türk Çelik İhracatının Bölgelere Göre Dağılımı, (2022, Ton Bazında)<sup>12</sup>**



<sup>6</sup>Dünya Çelik Örgütü, World Steel in Figures 2022. <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2023/december-2022-crude-steel-production-and-2022-global-totals/> adresinden alınmıştır.

<sup>7</sup>TÇÜD ve çelik üreticileriyle yapılan görüşmeler sonucunda elde edilmiştir.

<sup>8</sup>Adı geçen eser (A.g.e)

<sup>9</sup>A.g.e.

<sup>10</sup>TÇÜD

Diğer önemli ihracat pazarları olan Kuzey Afrika ve Latin Amerika'ya ise sırasıyla yassı ve uzun ürünler ağırlıklı olarak ihraç edilmektedir.

Üretimin büyük bir kısmının EAF tesislerinde gerçekleşmesi dolayısıyla, Türkiye çelik sektörünün Kapsam 1 emisyonları açısından bir rekabet avantajına sahip olduğu söylenebilir. Çoğu ülke için EAF rotasındaki CO<sub>2</sub> emisyon yoğunluğu ton çelik başına 0,6 ton CO<sub>2</sub> seviyesindeyken, bu değer Türkiye'de ton çelik başına ortalama 0,04'ü Kapsam 1 ve 0,25'i Kapsam 2 olmak üzere toplam 0,29 ton CO<sub>2</sub> seviyesindedir.<sup>13</sup> Bununla birlikte, Türkiye'de elektrik üretiminden (şebeke emisyonlarından) kaynaklanan yüksek sera gazı emisyonları nedeniyle, EAF ve IF teknolojilerine sahip tesislerin görece yüksek Kapsam 2 emisyonlarına sahip olması, sektörün net sifıra geçişinde öncelikli odaklanılması gereken kritik alanların başında gelmektedir. Bu noktada, sektörün karbonsuzlaşması adına Türkiye'nin enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırma hedefi önemli rol oynayacaktır. BOF rotasında ise birçok ülkede karbon yoğunluğu ton çelik başına 1,8 ile 4,0 ton CO<sub>2</sub> arasında değişirken, Türkiye 2,17'si Kapsam 1 yukarı yönlü ve 0,03'ü Kapsam 2 olmak üzere ton çelik başına yaklaşık 2,20 ton CO<sub>2</sub> emisyonu ile

AB ortalamasından daha yüksek bir karbon yoğunluğuna sahiptir.<sup>14</sup>

Türkiye çelik sektörünün yüksek standartlarda üretim kapasitesine sahip olması küresel alanda güçlü ve rekabetçi bir oyuncu olmasını sağlamaktadır. Sektörün bu güçlü yapısını devam ettirmesi ve rekabetçiliğini geliştirmesi için önümüzdeki dönemde sektörün karşılaşılabileceği zorluklara yönelik olarak doğru ve odaklı politikaların tasarlanması gerekmektedir. Sektörün büyümesini sürdürülebilir kılmak ve emisyon azaltım hedeflerini gerçekleştirmek adına de güçlü ve zayıf yönlerin ele alınması kritik önem taşımaktadır. Türkiye çelik sektörü, önümüzdeki 30 yıl boyunca emisyon azaltım çabalarının ve değişen uluslararası ticaret paradigmasının merkezinde yer alacaktır. Sektörün bu zorlu geçiş sürecinde başarılı şekilde yol alabilmesi için güçlü yönlerinin desteklenmesi ve zayıflıklarının giderilmesi gereklidir.

**Tablo 1. Türkiye Çelik Sektörünün Güçlü ve Zayıf Yönleri<sup>15</sup>**

Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
<ul style="list-style-type: none"><li>• İmalat sanayi ve inşaat sektörlerinin güçlü varlığı</li><li>• Sektörün sahip olduğu geniş ve çeşitli dış pazar ağı</li><li>• Büyük pazarlara coğrafi yakınlıktan kaynaklanan lojistik avantajlar</li><li>• EAF'lerin üretimdeki yüksek payı</li><li>• Sektörün uluslararası rekabetçilik, markalaşma ve pazarlama gücü</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ara mal ve hammadde tedarikinde yüksek oranda dışa bağımlılık</li><li>• Enerji tedarikinde yüksek oranda dışa bağımlılık</li><li>• Dünya genelinde çelik endüstrisinde artan korumacılık eğilimleri</li><li>• Dahilde işleme rejiminin önümüzdeki dönemde yaratacağı potansiyel engeller</li><li>• Yüksek katma değerli ürünler için daha güçlü Ar-Ge ve inovasyon kapasitesi ihtiyacı</li></ul>

<sup>11</sup>A.g.e.

<sup>12</sup>A.g.e.

<sup>13</sup>Koolen, D. and Vidovic, D., Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners, EUR 31112 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-53417-4, doi:10.2760/170198, JRC129297.

<sup>14</sup>A.g.e.

<sup>15</sup>PwC Analizi

## Küresel Karbonsuzlaşma Hedeflerinin Rapor Bulgularıyla Karşılaştırılması

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Mission Possible Partnership (MPP) kuruluşları küresel çelik sektörü karbonsuzlaşma yol haritaları hazırlayarak farklı senaryolar altında emisyon azaltım hedefleri belirlemişlerdir.

IEA'nın, mevcut durumda açıklanmış olan politika ve planları dikkate alarak kurguladığı "Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosu", demir-çelik sektörü kaynaklı küresel sera gazı emisyonlarının 2020 yılına kıyasla 2030 ve 2050 yıllarında sırasıyla %8 ve %12 oranında artacağını öngörmektedir. Bu senaryo, varsayımları ve sonuçları ile bir "azaltım" senaryosu değil "referans" senaryosu maiyetindedir. Buna paralel olarak, Paris Anlaşması hedefleri ile uyumlu ve 2070 yılına kadar enerji sektöründe net sıfır sera gazı emisyonu öngören "Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu"nda ise emisyonların 2020 yılına kıyasla 2030 ve 2050 yıllarında sırasıyla %7 ve %52 azalması beklenmektedir. Bu senaryo ise hem varsayımları hem de sonuçları ile bir azaltım senaryosu olup, Düşük Karbonlu Çelik Projesi kapsamında elde edilen model sonuçları ve yol haritası için doğru bir karşılaştırma olacaktır.

Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu kapsamında, 2020 ve 2050 yılları arasında varsayılan doğrudan emisyon azaltımının büyük kısmı (kümülatif azaltımların %40'ı) malzeme verimliliğine dayanan stratejilerle sağlanmıştır. "Malzeme verimliliği"nin hemen ardından gelen "teknoloji verimliliğinin artırılması" ve "karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojilerinin yaygınlaştırılması" emisyon azaltımlarına sırasıyla %20 ve %16 oranında katkıda bulunmaktadır. Senaryoda dikkate alınan diğer emisyon düşürücü önlemler ise "hidrojen", "biyoenerji", "elektrifikasyon" ve "diğer yakıt değişimleri" olarak tanımlanmıştır.

Karbonsuzlaşması zor olan sektörler üzerine yol haritası çalışmaları yapan bir diğer küresel platform olan MPP ise çelik sektörü karbonsuzlaşma yol haritasında "Teknoloji Moratoryumu Senaryosu" ve "Karbon Maliyeti Senaryosu" olmak üzere iki azaltım senaryosu modellemiştir. "Karbon Maliyeti Senaryosu"nda çelik tesislerinin en düşük yatırım maliyetine sahip teknolojilere geçiş yapacağı varsayılırken, "Teknoloji Moratoryumu Senaryosu"nda da benzer bir varsayım dikkate alınmakta, ancak sıfır emisyonlu teknolojiler 2030'dan sonra devreye alınmaktadır. "Teknoloji Moratoryumu Senaryosu" ve "Karbon Maliyeti Senaryosu"nda 2020 yılına kıyasla 2030 yılında sırasıyla %10 ve %30 oranında emisyon azaltımı öngörülürken, her iki senaryoda da çelik sektörü kaynaklı emisyonların 2050 yılına kadar 2020'ye kıyasla %90,3 azalması ve net sıfır hedefine yaklaşması (0,3Gt CO<sub>2</sub>) yaklaşması beklenmektedir.

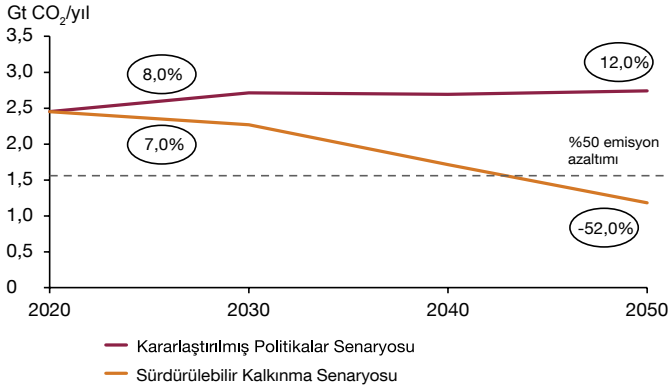
"Teknoloji Moratoryumu Senaryosu"nda, geleneksel yüksek fırın teknolojisinin yerini ergitme indirgeme veya Doğrudan İndirgenmiş Demir (DRI) gibi teknolojiler almaktadır. H<sub>2</sub> fiyatlarına bağlı olarak, DRI-EAF ve DRI-Melt-BOF teknoloji arketipleri, 2050 yılında birincil çelik üretiminin %45'ini oluşturacak olan doğal gazı kademeli olarak H<sub>2</sub> ile değiştirmek üzere modellenmiştir. Buna ek olarak, karbon yakalama ve depolama teknolojilerini kullanan arketipler, 2050 yılında birincil çelik üretiminin %55'ini oluşturacak şekilde modellenmiştir. Diğer azaltım senaryosu olan "Karbon Maliyeti Senaryosu"nda, DRI teknoloji arketipi öne çıkmakta ve 2050 yılına gelindiğinde DRI ile çelik üretimi birincil çelik üretiminin neredeyse %70'ini oluşturmaktadır. Buna ek olarak, diğer yenilikçi teknolojiler, biyoenerjili BAT YF-BOF ve karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojili BAT YF-BOF arketipleri de dikkate alınmıştır.

Şekil 3, bu çalışmanın baz aldığı iki çelik karbonsuzlaşma yol haritasının senaryolar bazındaki öngörülerini yansıtmaktadır.

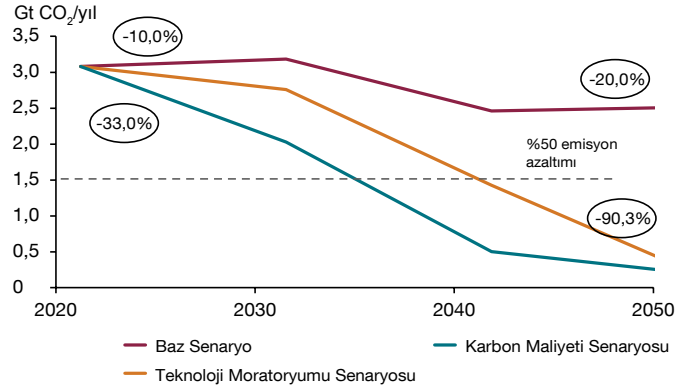


Şekil 3. IEA (solda) ve MPP (sağda) Emisyon Azaltım Senaryoları<sup>16</sup>

### Senaryolar bazında demir çelik sektöründe doğrudan CO<sub>2</sub> emisyonları\*



### Senaryolar bazında emisyon azaltımı (Kapsam 1 ve 2, Gt CO<sub>2</sub>/y)



Emisyon azaltım oranı, % 2030 - 2050

**Bu çalışma, söz konusu uluslararası çelik karbonsuzlaşma yol haritalarının hedef ve varsayımlarını da dikkate alarak, Türkiye Çelik Sektörü için 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi için bir yol haritası geliştirmiştir.** Sektörün girdi, teknoloji ve politika parametreleri bazında izleyebileceği muhtemel yolları ve bunlara karşılık gelen yatırım gereksinimlerini belirlemek için çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Referans senaryolar bir karşılaştırma noktası olarak kullanılırken, azaltım senaryoları düşük karbonlu üretime geçiş için referans senaryolarda varsayılan politika ve teknolojilerin üzerine çıkan, hedeflenmesi gereken alternatif yolları değerlendirmektedir. Bu çalışmanın kullandığı referans senaryolar azaltıcı önlemlerin öngörülmediği senaryo (WoM) ve kararlaştırılmış politikalar senaryosu (SPS); azaltım senaryoları ise düşük ETS senaryosu, düşük karbonlu yol haritası senaryosu (LCP), yüksek ETS senaryosu ve en iyi teknolojiler senaryosudur (FTS).

Buna göre, "Düşük Karbonlu Yol Haritası" (LCP) senaryosunda, 2030, 2040 ve 2053 yıllarında SPS senaryosuna göre sırasıyla %17, %47 ve %99 emisyon azaltımı elde edilirken<sup>17</sup>, Türkiye çelik sektörü, net sıfır emisyon seviyesine ancak karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) gibi radikal teknolojilerin uygulanmasıyla ulaşılabilmektedir. LCP senaryosu, 2050'lere gelindiğinde CCUS teknolojilerinin yaygınlaştırılmasına, EAF'lerin üretimdeki yüksek payına ve yüksek fırınların DRI-Melt BOF teknolojileriyle değiştirilmesine dayanan bir emisyon azaltım rotası ile sonuçlanmıştır. Bu rota, her iki MPP Senaryosu ile benzerlik göstermektedir. **Bu çalışmanın LCP senaryosunun, hem IEA hem de MPP hedeflerinden daha agresif emisyon azaltımları ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir.**

<sup>16</sup>EIA & MPP

<sup>17</sup>Projenin hem modelleme hem de politika önerisi ayaklarında kapsam yalnızca sıvı çelik üretimi olarak tanımlanmıştır

\* Doğrudan emisyonlar, endüstriyel enerji kullanımı sınırı dahilinde fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonları ve bu alt sektörlerdeki endüstriyel süreçlerden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarını ifade etmektedir.

## Sektörün Emisyon Azaltım Potansiyeli

Sanayide karbon emisyonlarını azaltma çabaları önümüzdeki yıllarda Türkiye ekonomisi için stratejik öneme sahip olacaktır. Bu çalışma, Türk çelik sektörünün karbon emisyonlarını azaltması için uzun vadeli bir yol haritası geliştirmeyi ve bu yol haritasının uygulanması için gereken yatırım gereksinimlerini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

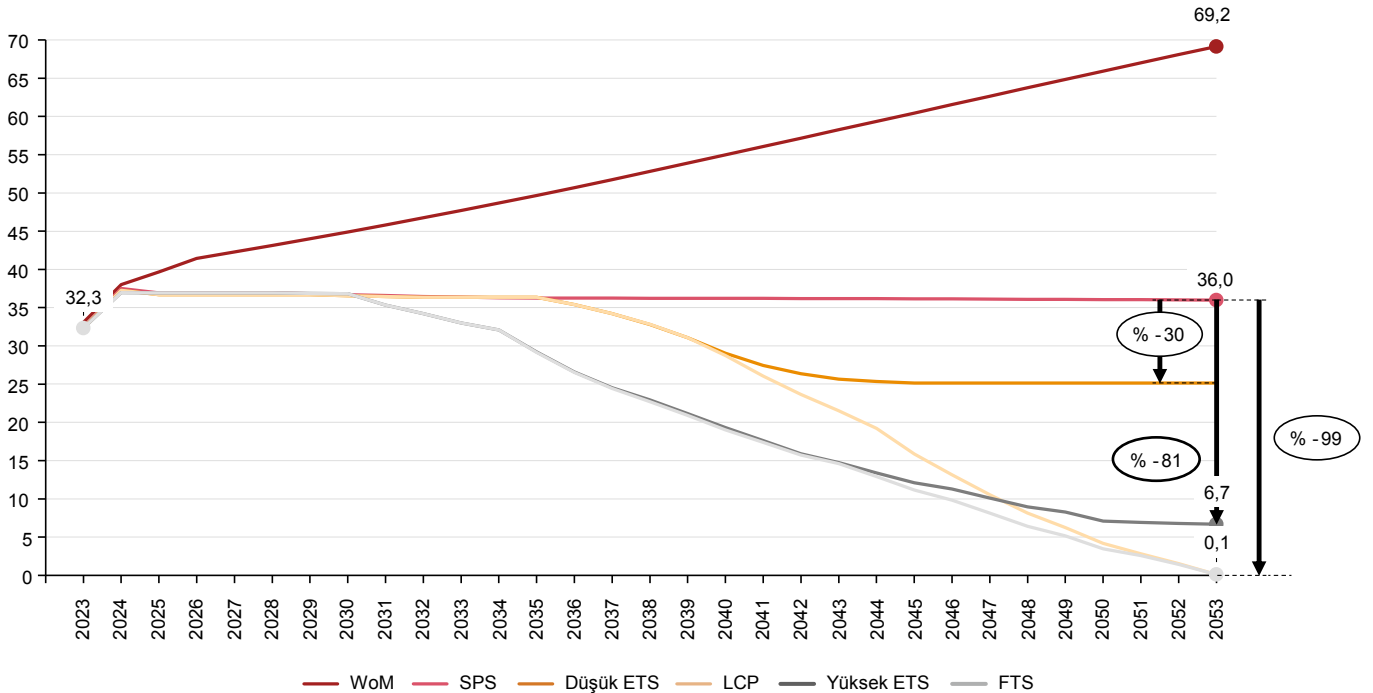
Veriye dayalı bu yol haritasını geliştirebilmek için 2023-2053 dönemini kapsayacak şekilde karbon azaltımı sağlayan teknolojiler, alternatif hammaddeler, yatırım gereksinimleri gibi parametreler ile AB SKDM ve devreye girmesi planlanan ulusal emisyon ticaret sistemi (ETS) gibi iklim politikalarını da ele alan çeşitli senaryolar oluşturulmuştur.

**Çalışma bulguları, Türk çelik sektörünün 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için kapsamlı ve bütüncül politikalar geliştirmesi ve radikal teknolojik dönüşümler için yatırım yapması gerektiğini göstermektedir.** Bu bağlamda Türkiye'nin yakın zamanda attığı kritik adımlardan biri de ulusal **Türkiye Hidrojen**

**Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası** açıklanmasıdır.

Ocak 2023'te Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye'de yeşil H<sub>2</sub> üretim maliyetini 2035 yılına kadar 2,4 dolar/kgH<sub>2</sub>'ye ve 2053 yılına kadar 1,2 dolar/kgH<sub>2</sub>'nin altına düşürmek doğrultusunda iddialı bir hedef açıklamıştır. Belirlenen azaltım senaryolarında açıklanan ulusal hedeflerin baz alınması ve 2053 yılına kadar H<sub>2</sub> fiyatlarındaki önemli düşüşün etkisiyle, proje kapsamında geliştirilen model sonuçları, hidrojen bazlı teknoloji arketiplerinin yüksek kullanımını öngörmektedir. H<sub>2</sub> böylelikle uluslararası senaryolara kıyasla (IEA, MPP), bu yol haritasında karbonsuzlaşma planlarına daha erken dahil olmaktadır. Bu nedenle, ulusal H<sub>2</sub> hedeflerine ulaşılması, yol haritasının baz aldığı azaltım senaryolarındaki emisyon hedeflerine ulaşılmasında kritik bir rol oynayacaktır. Bununla birlikte, Türk çelik sektörünün net sıfır üretime ulaşması, CCUS teknolojilerinin yaygınlaştırılmasını da gerektirmektedir. Bu nedenle, çelik sektörünün iklim hedeflerine ulaşmasını sağlamak ve uluslararası pazarlardaki rekabet gücünü korumak için bu girdi ve teknolojilerin ticari düzeyde kullanılmasını destekleyecek politikalara ve güçlü bir düzenleyici çerçeveye ihtiyaç vardır.

**Şekil 4. Projenin Emisyon Tahminleri (Milyon Ton CO<sub>2</sub>)**



Model sonuçlarına göre, uygulanabilir tüm karbon azaltıcı teknolojilerin yanı sıra düzenleyici politikaların da devreye sokulduğu, **en düşük maliyetli ve optimal azaltım senaryosu olan LCP senaryosunda, AB ETS fiyatlarınının 1/3'üne yakın fiyatlarda olacağı varsayılan bir ulusal ETS sisteminin kurulması ile 2053 yılına kadar %99,7 emisyon azaltımı (SPS senaryosuna göre) sağlanabilmektedir.**

sokulması gerekmektedir. **Türkiye çelik sektörünün net sıfır hedefine ulaşması ancak CCUS teknolojilerine ek olarak yeşil H<sub>2</sub> ve biyokütleinin girdi olarak ilave kullanımının birleştirilmesiyle gerçekleşebilir.** Optimizasyon modelinde maliyet ve emisyon yoğunlukları dikkate alınan ve model sonucuna göre önceliklendirilen teknolojiler aşağıdaki tabloda verilmektedir:

Net sıfır hedefine ulaşmak için 2040'lı yıllardan itibaren yüksek yatırım maliyeti (CAPEX) olan, radikal teknolojilerin devreye

**Tablo 2. Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosunda Modelin Karar Verdiği Öncelikli Çelik Üretim Teknolojileri**

Teknoloji Arketipi	Teknoloji Giriş Yılı (Modelin Karar Verdiği)	Emisyon Azaltımı Etkisi (tCO <sub>2</sub> /ton çelik)	Yatırım Gereksinimi (EUR/ton çelik)	Ton Başına Emisyon Azaltım Maliyeti (EUR/ ton CO <sub>2</sub> )
<b>YF-BOF</b> Geleneksel entegre tesis	-	-	-	-
<b>BAT_YF_BOF</b> Mevcut en iyi teknolojileri kullanan entegre tesis	2024	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
<b>BAT_YF_BOF_H<sub>2</sub>_PCI</b> Pulverize kömür enjeksiyonunun yerine hidrojen kullanımı	2035	Orta	Yüksek	Yüksek
<b>DRI_Melt_BOF</b> Entegre tesisinin yerini alan doğal gaz bazlı DRI	2036	Yüksek	Orta	Düşük
<b>DRI_Melt_BOF_%100_yeşil H<sub>2</sub></b> Entegre tesisinin yerini alan %100 yeşil hidrojen bazlı DRI	2036	Çok Yüksek	Orta	Düşük
<b>BAT_YF_BOF_CCU</b> Karbon yakalama ve kullanımlı entegre tesis	2044	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Düşük
<b>EAF</b> Geleneksel elektrik ark fırını	-	-	-	-
<b>DRI_EAF</b> Doğal gaz bazlı DRI kullanan elektrik ark fırını	2029	Düşük	Orta	Yüksek
<b>DRI_EAF_%100_yeşil H<sub>2</sub></b> %100 yeşil hidrojen bazlı DRI kullanan elektrik ark fırını	2043	Düşük	Orta	Çok Yüksek

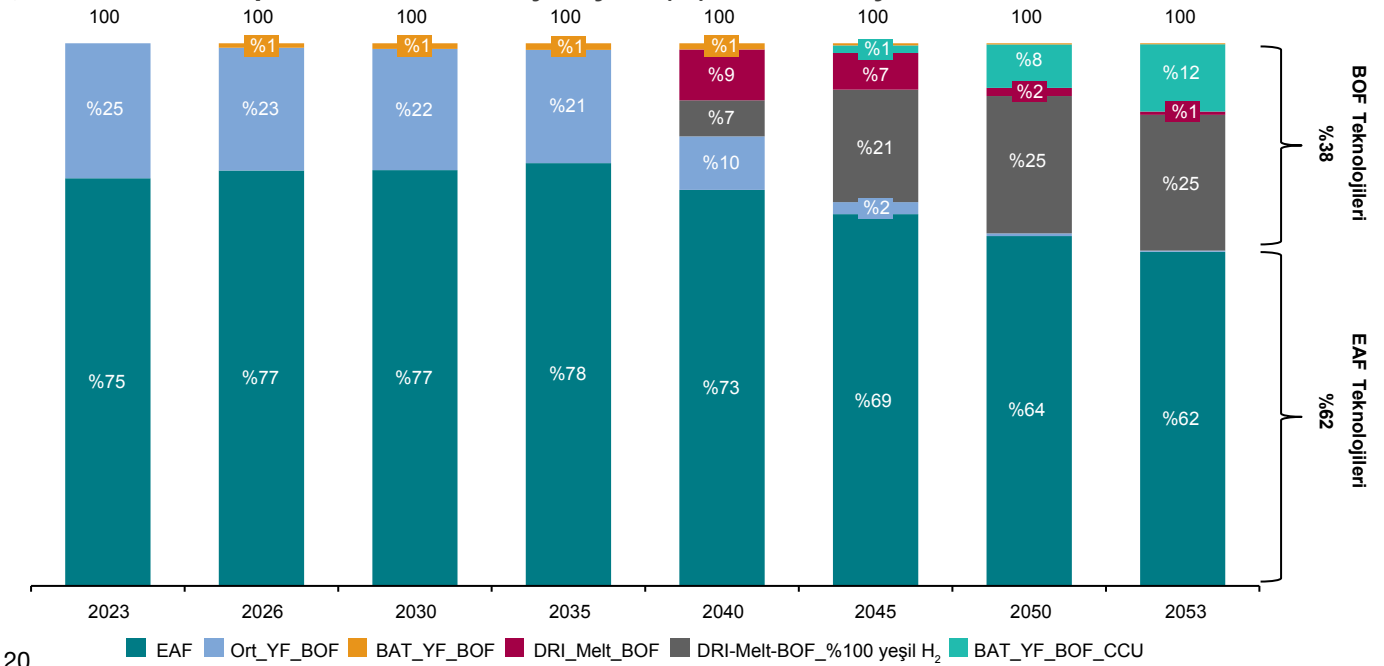
**Model çalışmasının sonuçlarına göre** LCP senaryosu kapsamında önümüzdeki 30 yıl içinde öngörülen teknolojik geçişler aşağıda özetlenmektedir:

- LCP senaryosunda toplam emisyonlar, kıyaslama amacıyla oluşturulan referans senaryolardan biri olan SPS'ye göre **2040 yılında %20,6** oranında ve **2053 yılında %99,7** oranında azaltılabilmektedir.
- Model genelinde yüksek fırınların kapatılmayacağı ve 2050'lerin ötesine uzanan fırın ömrü boyunca kullanılacağı varsayılmıştır. Bu nedenle, planlama döneminde **yüksek fırınlardan elektrik ark fırınına dönüşüm dikkate alınmamıştır**.
- Optimal senaryoda, EAF rotası çelik üretiminde en yüksek paya sahip olmaya devam etmektedir. Ancak, hurda fiyatlarında yaşanması beklenen artış ve yeni BOF teknolojilerinin devreye girmesiyle, **EAF kullanımının 2053 yılına kadar toplam üretim kapasitesi içindeki payının %62'ye düşmesi öngörülmektedir**.
- EAF üretim kapasitesinin bir kısmı öncelikle EAF-DRI teknolojisine dönerken, daha sonrasında bunların yerini **hidrojen bazlı DRI kullanan BOF teknolojileri** alacaktır. 2053 yılında EAF üretim kapasitesinin %13'ü DRI ve

hidrojen bazlı teknolojilere dönüşecektir.

- Çelik sektörünü dönüştürmek için farklı yıllarda devreye girecek **beş BOF teknoloji arketipi kullanılmıştır**. Dönüşüm, doğal gaz bazlı DRI, hidrojen bazlı DRI (EAF rotası için 2029'da ve BOF/YF rotası için 2036'da) ve daha sonrasında CCUS teknolojilerinin entegrasyonu (BOF/YF rotası için 2044'te) ile sağlanmaktadır.
- Entegre tesislerde yüksek fırın ihtiyacını ortadan kaldıran **doğal gaz bazlı DRI'nın** 2040 yılında %9'luk bir paya sahip olması öngörülmekte ve bu oranın hidrojen gibi diğer teknolojilerin kullanılmasıyla azalması beklenmektedir. Bununla birlikte, 2053 yılına kadar doğal gaz bazlı DRI, üretimde az da olsa pay sahibi olacaktır.
- İlerleyen yıllarda **hidrojen ve CCUS teknolojilerinin kombinasyonu** ile dönüşüm hızlanmaktadır. 2053 yılında, yeşil hidrojen teknolojilerinin toplam üretim kapasitesinde **%25 (21,8 milyon ton)**, CCUS teknolojilerinin ise **%12 (10,8 milyon ton)** pay sahibi olması öngörülmektedir. Böylece 2053'te **CCUS teknolojileri ile 16,2 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı** gerçekleşmesi beklenmektedir. Ayrıca, 2053 yılında **381,8 milyon GJ hidrojene** ihtiyaç duyulacağı modellenmiştir.

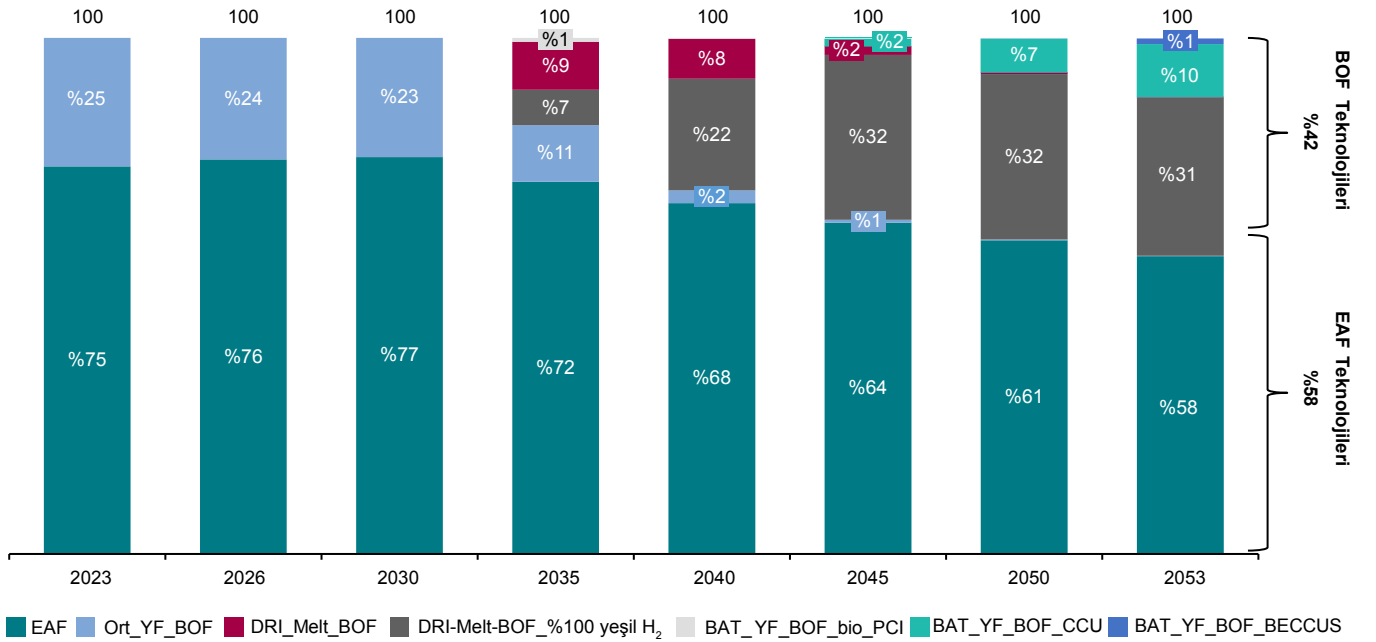
**Şekil 5. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): LCP Senaryosu**



Paris Anlaşması doğrultusunda en iddialı senaryo olan FTS senaryosunda, öncü teknolojiler çelik üretimine LCP senaryosuna göre daha erken tarihlere dahil edilmektedir. LCP senaryosunda olduğu gibi, FTS senaryosunda da 2053 yılına kadar SPS senaryosuna kıyasla emisyonlarda %99'luk bir azaltım sağlanabilir. Ancak, 2023-2053 dönemindeki toplam CO<sub>2</sub> emisyonları dikkate alındığında, SPS senaryosuna kıyasla, LCP senaryosu toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarında 336 milyon tonluk azaltım sağlarken, FTS senaryosunda 446 milyon tonluk CO<sub>2</sub> azaltımına ulaşabilmektedir. (SPS senaryosunda toplam CO<sub>2</sub>

emisyonlarının aynı dönemde 1,2 milyar tonu aşacağı öngörülmektedir). FTS senaryosunda, EAF tesislerinin toplam üretim kapasitesi içindeki payı, LCP senaryosundaki paydan (%62) daha düşük olan %58'e gerilerken, BOF bazlı DRI kapasitelerinin 2053 yılında çelik üretiminin %31'ini, CCUS teknolojilerini kullananların ise %11'ini oluşturacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda, FTS senaryosunda 2053 yılında **CCUS teknolojileri ile 13,3 milyon ton CO<sub>2</sub> azaltımı** projekte edilmiştir. Ayrıca, 2053 yılında **hidrojen** talebinin **396,7 milyon GJ'e** ulaşması öngörülmektedir.

**Şekil 6. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): FTS Senaryosu**

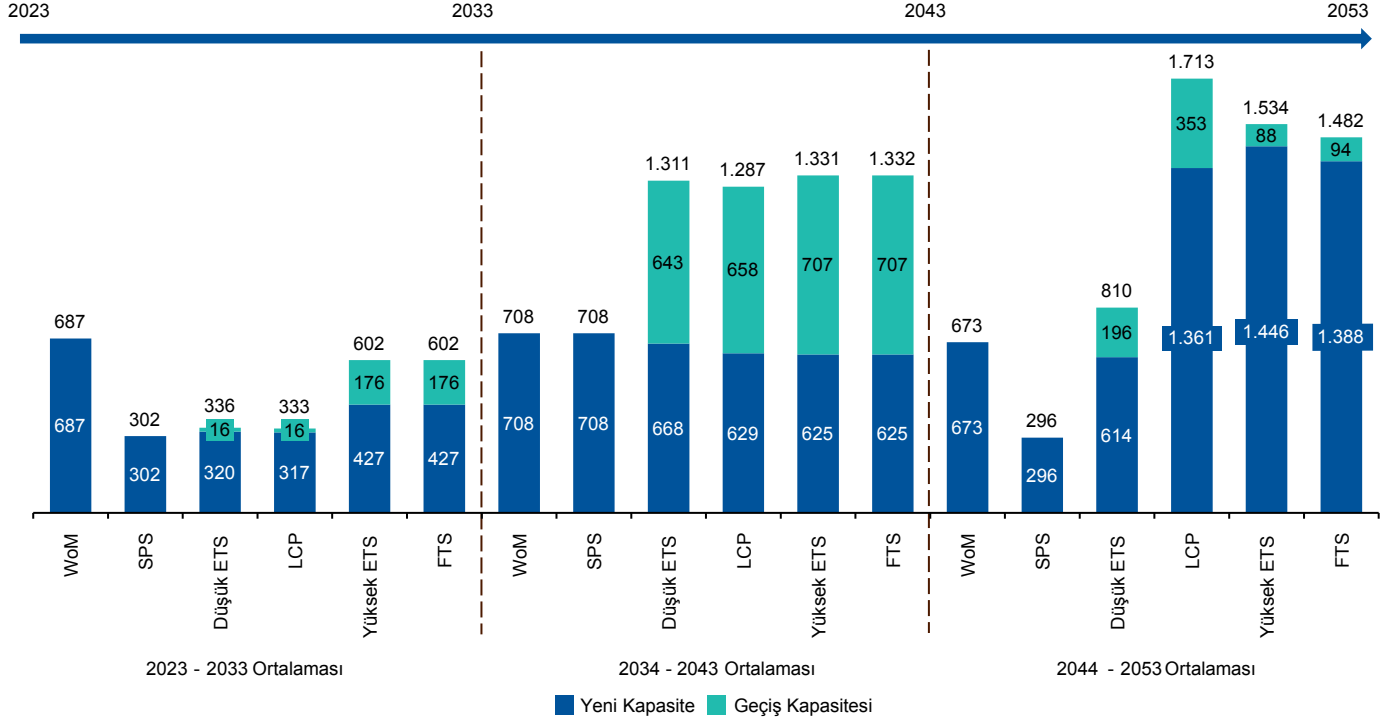


## Yatırım İhtiyaçları

Modelleme sonucu, Türkiye çelik sektörünün iddialı azaltım hedeflerine ulaşabilmesi için 2030'ların başından itibaren hızlı bir teknolojik dönüşüme girmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, azaltım senaryolarındaki hedeflere ulaşılması için 2023 ve 2053 yılları arasında yıllık ortalama olarak yaklaşık 0,8 – 1,1 milyar dolar tutarında teknoloji yatırımı yapılmasını gerektirecektir. Optimizasyon modeli sonuçlarına göre, 2023'ten 2033'e kadar

LCP senaryosu için her yıl ortalama 333 milyon dolar, FTS senaryosu içinse her yıl ortalama 602 milyon dolar yatırım yapılmalıdır. Optimal senaryoda (LCP) net sıfır emisyona ulaşmak için 2034-2043 yılları arasında yıllık ortalama 1,3 milyar dolar finansmana ihtiyaç duyulmaktadır. Buna ek olarak, modellenen dönemin son on yılında gerekli yıllık yatırımın ortalama 1,7 milyar dolara yükseleceği öngörülmektedir.

Şekil 7. Senaryolar Bazında Yıllık Ortalama Yatırım Gereksinimi (Milyon Dolar)\*



Türkiye çelik sektörü üzerine yapılmış karbonsuzlaşma projeksiyonları, öncelikli olarak finansman mekanizmalarının geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır. **Toplam yatırım ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda, sektör paydaşları ve politika yapımcılar ilk yıllardan itibaren büyük ölçekli yatırım planlarını geliştirmeye başlamalıdır.** Bunun için de vakit kaybetmeden ilave fonların geliştirilmesine öncelik verilmesi gerekecektir. Sektörün karbonsuzlaşma yatırımlarını teşvik edecek, büyük ölçekli sermayeye erişebilmesi içinse politika yapımcıların ve finans kuruluşlarının iş birliği yapması kritik önem taşıyacaktır.

### Düşük Karbonlu Çelik Sektörü için Önümüzdeki 30 Yıl Çerçevesinde Önerilen Politika Adımları

Türkiye çelik sektörünün karbonsuzlaşması, birbiriyle ilişkili olan pek çok politika alanında bütüncül ve eş zamanlı bir çalışma gerektirmektedir. Yol haritası kapsamındaki atılması gereken politika adımlarını tespit etmek için birçok kaynaklar kullanılmıştır:

- Proje uzmanlarının görüşü,
- Ulusal/uluslararası akademik yayınlar,
- Sektör ve kamu paydaşları tarafından paylaşılan sektörel bilgi ve varsayımlar,
- Proje kapsamında oluşturulan optimizasyon modeli ve senaryo analizi sonuçları.

Gerçekleştirilen tüm masa başı analiz ve alınan görüşler sonucunda, Yol Haritasını oluşturan politika önerileri **Girdi & Teknoloji ile Politika & Pazar** olmak üzere iki temel eksen altına haritalandırılmıştır. Her bir politika eksenini altında, önerileri ilgili temalar altında birleştiren toplam 12 politika alanı mevcuttur. Bu çalışmanın ele aldığı, ilgili politika eksen ve alanları altında gruplanan öneriler sağda özetlenmektedir.<sup>18</sup>

## A) Girdi ve Teknoloji

- 1. Ana Girdi Optimizasyonu:** Ulusal ve uluslararası hurda arzının güvence altına alınması, düşük tenörlü cevherlerin verimliliğinin artırılması, yenilenebilir enerji girdisi kullanan teknolojilerin (DRI/HBI teknolojileri) ve alternatif hammaddelerin kullanımının teşvik edilmesi.
- 2. Doğrudan Karbon Oluşumunu Azaltan Teknolojiler:** Doğrudan karbon oluşumunu azaltan teknolojilerin kullanımı: (i) Mevcut En İyi Teknolojiler (MET) altında ele alınan teknolojilerin uygulanması, (ii) Çalışmada Doğrudan Karbon Oluşumunu Azaltan Teknolojiler altında ele alınan teknolojilerin senaryolarda öngörülen zaman ve şekilde uygulanması ve (iii) Modelde ele alınmayan sürekli döküm ve yarı mamul işlenmesine dair, ulusal ve uluslararası iyi uygulama örneklerinin ve teknolojilerin araştırılması, geliştirilmesi ve prototip çalışmalarının gerçekleştirilmesi.
- 3. Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS) Teknolojileri:** Yüksek fırınlarda kullanım veya depolama için H<sub>2</sub> zenginleştirilmesi ve/veya CO<sub>2</sub> azaltımı, karbon yakalama ile çıkış gazlarının yakıt ve kimyasallara dönüştürülmesi, DRI için doğal gaz bazlı CO<sub>2</sub>'nin yakalanması ve Türkiye'nin karbon yakalama ve kullanma kapasitesinin artırılmasına yönelik finansal, hukuki ve teknik altyapının güçlendirilmesi.
- 4. Süreç İyileştirmesi:** Enerji yönetim sistemleriyle entegre dijital izleme sistemlerinin kurulması, çelik üretim tesislerinde bakım gereksinimlerinin ve denetimlerin artırılması, düşük emisyonlu teknolojiler kullanılarak tesis güçlendirme/yenileme/devre dışı bırakma faaliyetlerinin planlanması ve uygulanması, sinterleme ve peletleme tesislerinde enerji verimliliğinin ve hammadde girdisinin iyileştirilmesi.
- 5. Yeşil Enerji:** Yenilenebilir enerji kullanımını artırmak amacıyla kaynak planı hazırlanması ve üretim altyapılarının kurulması, çelik sektörü ve diğer yüksek emisyonlu sektörler için yeşil H<sub>2</sub>'yi ticari olarak kullanılabilir ve uygun maliyetli hale getirmek için mevcut ve uygun teknolojilerin tespit edilmesi ve ulusal düzeyde orta-uzun vadeli tedarik planlamasının yapılması.

- 6. Kapsayıcı İstihdam ve Beceriler:** Çelik sektöründe yeşil dönüşüm sürecinin işgücü talebinde ortaya çıkaracağı yeni nitelik ve beceri gerekliliklerinin belirlenmesi, çelik sektörü istihdamında herkes için fırsat eşitliğinin sağlanması ve işgücü ihtiyacını karşılamaya yönelik eğitim programlarının hazırlanması ve uygulanması.

## B) Politika ve Pazar

- 7. Emisyon Ticaret Sistemi:** Türkiye'de AB mevzuatı ile uyumlu ulusal bir ETS kurulması, ETS kapsamındaki sektörler başta olmak üzere yeşil dönüşüme yönelik stratejik öncelikli sektörlerde faaliyet gösterenlerin teşvik edilmesi için uygun mekanizmalar oluşturulması ve karbon kaçacağı riski yüksek olan emisyon yoğun tesisler için sektör ortalamasının altında emisyonla sebep olan tesislere yönelik ücretsiz tahsisat uygulamasının teşvik edilmesi.
- 8. Ticaret Modeli:** Karbonsuzlaşma adımı atmayan ülkeler arasındaki ticaretin artmasından doğacak ticaret kaymaları ve olası pazar değişimlerinin analiz edilmesi ve sektörün uluslararası rekabet gücünün korunmasına yönelik tedbirlerin alınması, ulusal bir karbon fiyatlandırma mekanizmasının oluşturulması, AB SKDM'nin olası uygulamasına ilişkin ticaret politikası adımlarının belirlenmesi, Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu ile Türkiye arasındaki Serbest Ticaret Anlaşması kapsamında yeşil dönüşüme yönelik yatırımlara ilişkin sınırlamaların gözden geçirilmesi ve Anlaşma kapsamında uygun olması hâlinde yeşil üretim desteği sağlanması.
- 9. Ulusal Politika Belgeleri:** Ulusal seviyede ve bütünsel bakış açısıyla değerlendirilmesi gereken Ar-Ge ve yenilik konularına yönelik fizibilite çalışmalarının gerçekleştirilmesi, çelik sektörünün sürdürülebilir enerji dönüşümü için net ve uzun vadeli bir vizyon geliştirilmesi, ulusal iklim taahhütleriyle uyumlu, kapsamlı bir sanayi politikası çerçevesi ve ilgili emisyon hedeflerinin benimsenmesi, Uzun Dönemli İklim Değişikliği Stratejisi ve İklim Değişikliği Eylem Planında sektöre yönelik azaltım hedeflerinin belirlenmesi.

- 10. Yeşil Dönüşüm Finansmanı:** Düşük emisyonlu teknolojilerin yaygınlaşması için kamu teşviki sağlanması ve özel sermayenin harekete geçirilmesi, yenilenebilir lisanssız enerji yatırımlarına kolaylık sağlanarak teşvik edici unsurlar geliştirilmesi.
- 11. İş Birlikleri:** Çelik üreticilerinin uluslararası platformlara katılımının teşvik edilmesi.
- 12. Döngüsel Ekonomi:** Çelik girdisi kullanan son kullanıcı sektörlerin karbonsuzlaşmasına katkıda bulunmak için yüksek kaliteli, katma değerli, hafifletilmiş çelik ürünlerin geliştirilmesi, kullanıcı sektörlerin düşük karbonlu çelik kullanımına yönelik proje ve uygulamalarının desteklenmesi, çelik sektörü özelinde ulusal, kapsayıcı, bütüncül bir döngüsel ekonomi eylem planının geliştirilmesi ve üretim tesislerinde yan ürün ve atık yönetimi için döngüsel ekonomi ilke ve uygulamalarının benimsenmesi.

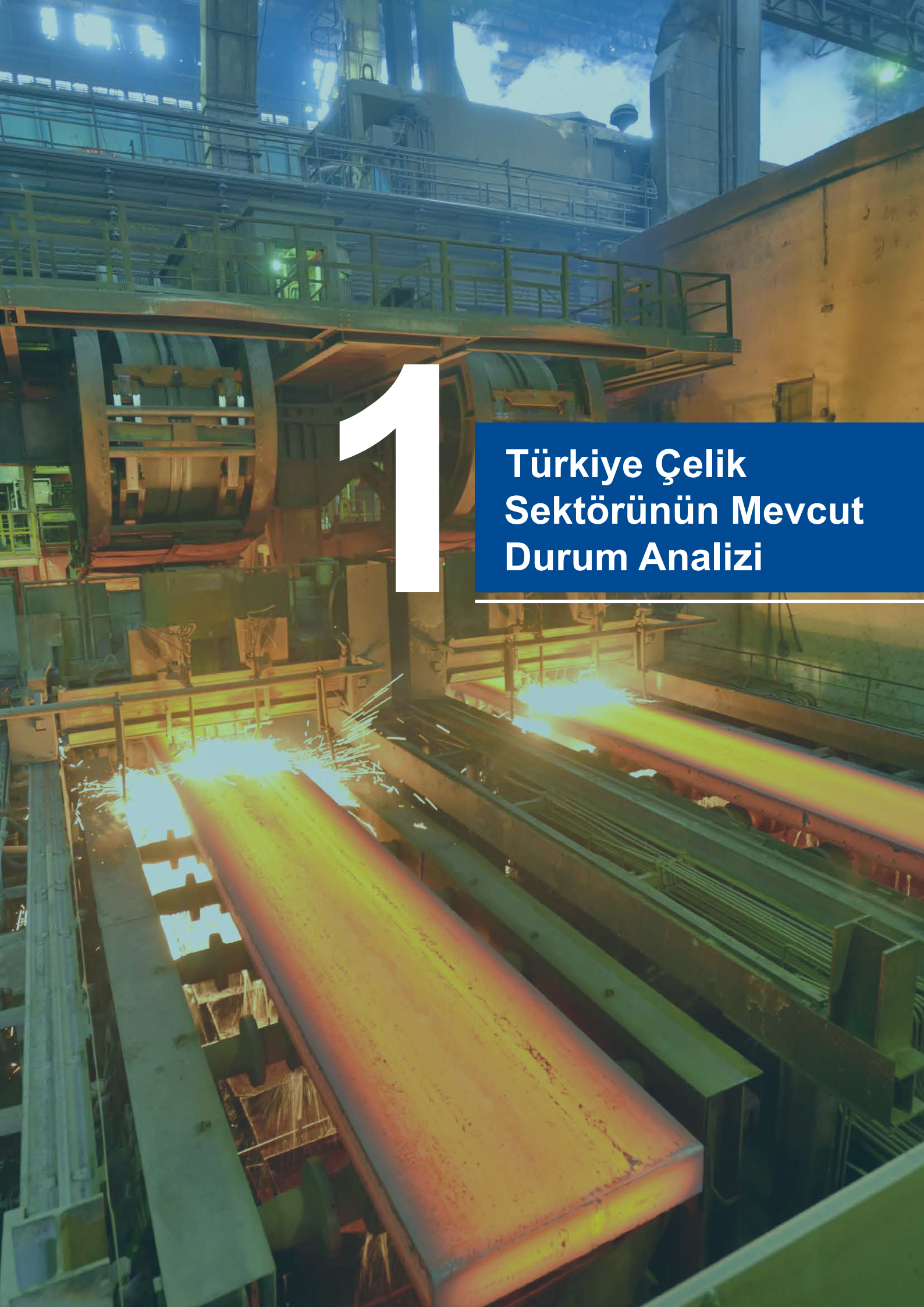
Politika adımlarının daha ayrıntılı bir değerlendirmesi, bu raporun "3. Türkiye Çelik Sektörü için Karbonsuzlaşma Yol Haritası" bölümünde ve bu projenin bir parçası olarak hazırlanan detaylı "Politika Önerileri Dökümanı"nda yer almaktadır.

Bu rapor kapsamında önerilen politika adımları aynı zamanda Türkiye'nin uzun vadeli ekonomik stratejisinin geliştirilmesinde ve çalışmalarını devam eden ikinci Ulusal Katkı Beyannamesi'nin hazırlanmasında temel bir girdi olarak hizmet edecektir. Çeşitli kamu strateji belgeleri arasında uyum ve bütünlüğün tahsis edilmesi, Türkiye'nin net sıfır emisyon hedefine ulaşma hedefi bağlamında, çelik sektörü gibi diğer kritik sanayi sektörleri için de karbon azaltım yönünde proje geliştiricilere, finansman kuruluşlarına ve yatırımcılara güçlü piyasa mesajları sağlaması bakımından son derece yüksek öneme sahip olacaktır.



1

# Türkiye Çelik Sektörünün Mevcut Durum Analizi



# 1. Türkiye Çelik Sektörünün Mevcut Durum Analizi

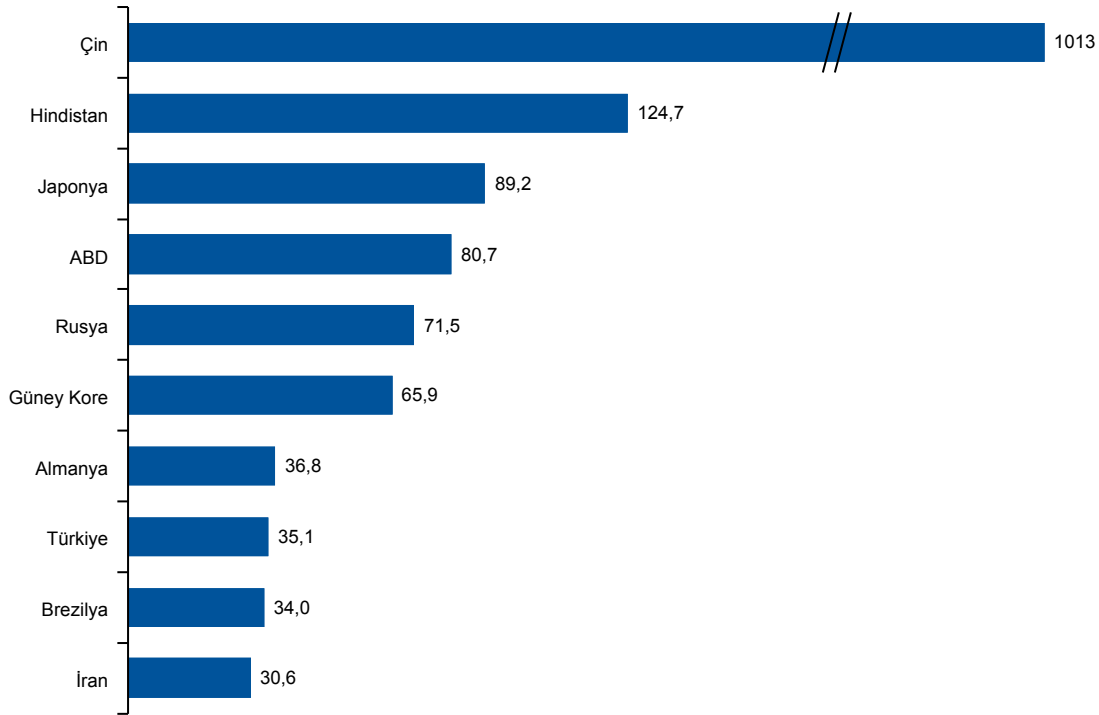
## 1.1. Türkiye Çelik Sektörüne Genel Bakış

### 1.1.1. Kapasite ve Üretim

Küresel ham çelik üretimi ve ara malı ticaretinde önemli bir ülke konumunda bulunan Türkiye, 2022 yılında 35,1 milyon ton ham çelik üreterek ham çelik üretiminde dünyada 8. sırada yer almıştır.<sup>19</sup> Aynı yıl Türkiye, dünyanın en büyük 8. çelik

ihracatçısı ve en büyük 6. çelik ithalatçısı olmuştur.<sup>20</sup> Sektör, yüksek üretim kapasitesini Avrupa, Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Amerika Birleşik Devletleri başta olmak üzere dünyanın dört bir yanına ihraç edebilmektedir.

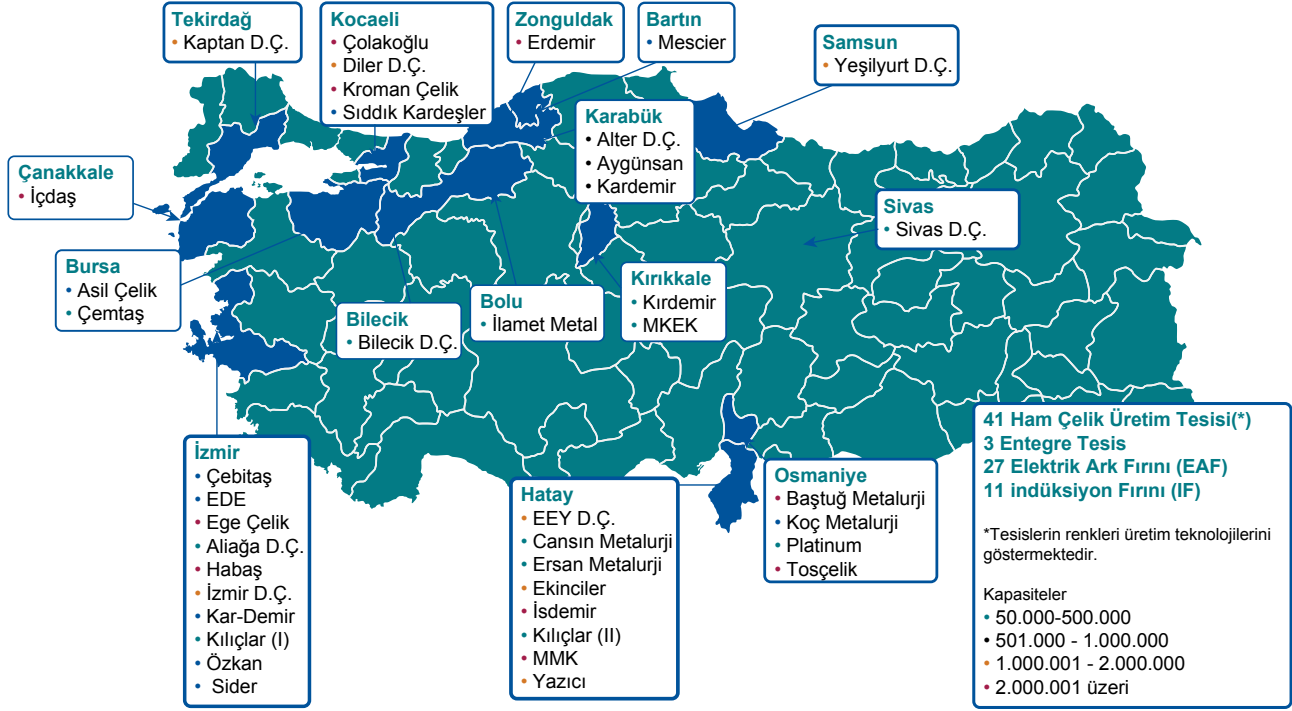
Şekil 8. 2022'de Ham Çelik Üretiminde Önde Gelen Ülkeler ve Üretim Hacimleri (Milyon Ton)<sup>21</sup>



Türkiye Çelik Üreticileri Derneği'nden (TÇÜD) alınan verilere göre, bu analizin gerçekleştirildiği tarih itibarıyla (Şubat 2023), Türkiye'de 15 şehre yayılmış faal durumda 41 adet çelik tesisi (3 BOF/YF, 27 EAF ve 11 İF) bulunmaktadır. Sektörün yıllık ham çelik üretiminin %71,5'i elektrik ark fırınlı (EAF) ve indüksiyon fırınlı (İF) tesislerde, %28,5'i ise entegre tesislerde

(BOF/YF)<sup>22</sup>gerçekleşmektedir. Sektörün emisyon azaltım hedefleri bakımından çelik üretimindeki yüksek EAF tesis sayısının, fazla sayıda BOF/YF tesis barındıran ülkelere göre Türkiye'yi daha avantajlı bir konuma yerleştirdiği söylenebilir.

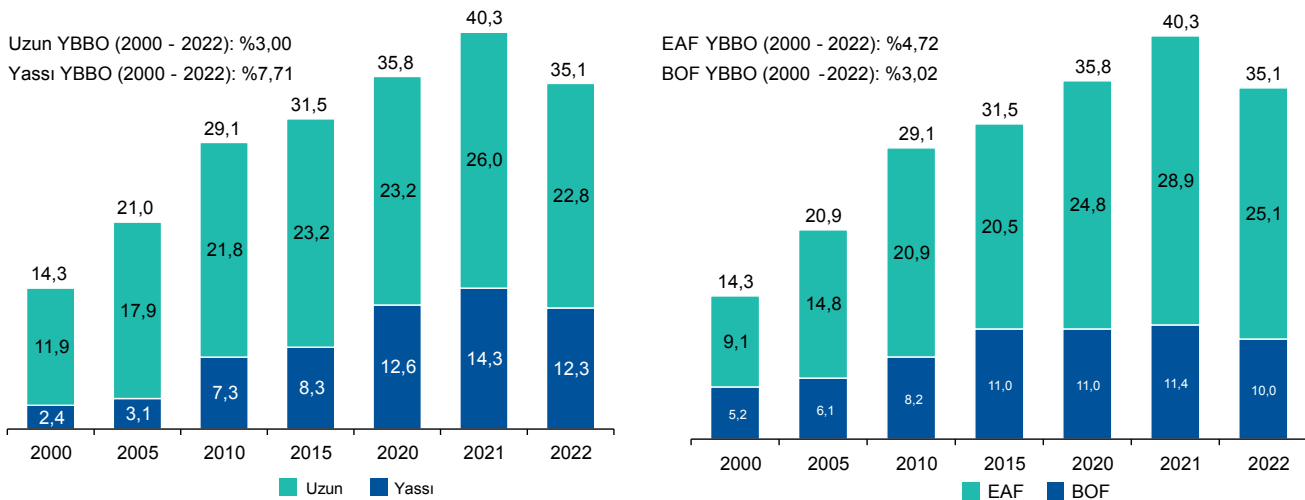
## Şekil 9. Türkiye'deki Çelik Tesislerinin Coğrafik Dağılımı<sup>23</sup>



Yine TÇÜD verilerine göre, Türkiye'deki ham çelik üretiminin 2000 yılından bu yana yıllık ortalama %4,2 gibi ciddi bir oranla büyüdüğü görülmektedir.<sup>24</sup> Türkiye çelik üretimi 2021 yılında COVID-19 salgınının ardından toparlanmaya bağlı olarak artmış, ancak 2022 yılında enerji fiyatlarındaki artış ve Rusya, İran, Hindistan ve Çin gibi ülkelerden yapılan dumpingli çelik ithalatının etkisiyle önemli ölçüde azalmıştır.

Son yirmi yılda yassı çelik üretimi uzun çelik üretiminden daha hızlı büyümüş olsa da sektörde ağırlıklı üretim hala uzun çelik tarafındadır. 2022 yılında gerçekleşen toplam ham çelik üretiminin %65'ini uzun çelik ürünleri oluşturmaktadır. Üretim yöntemine bakıldığında ise, aynı dönemde EAF tesislerinin BOF tesislerinden daha hızlı büyüyerek üretimdeki ağırlığını artırdığı ve 2022 yılında %71,5'lik bir paya ulaştığı görülmektedir.

## Şekil 10. Ürün ve Üretim Yöntemi Bazında Türkiye Ham Çelik Üretimi (Milyon Ton)<sup>25</sup>



<sup>23</sup>www.celik.org.tr/harita/ adresinden alınmıştır.

<sup>24</sup>TÇÜD, PwC Analizi

<sup>25</sup>TÇÜD ve çelik üreticileriyle yapılan görüşmeler sonucu elde edilmiştir.

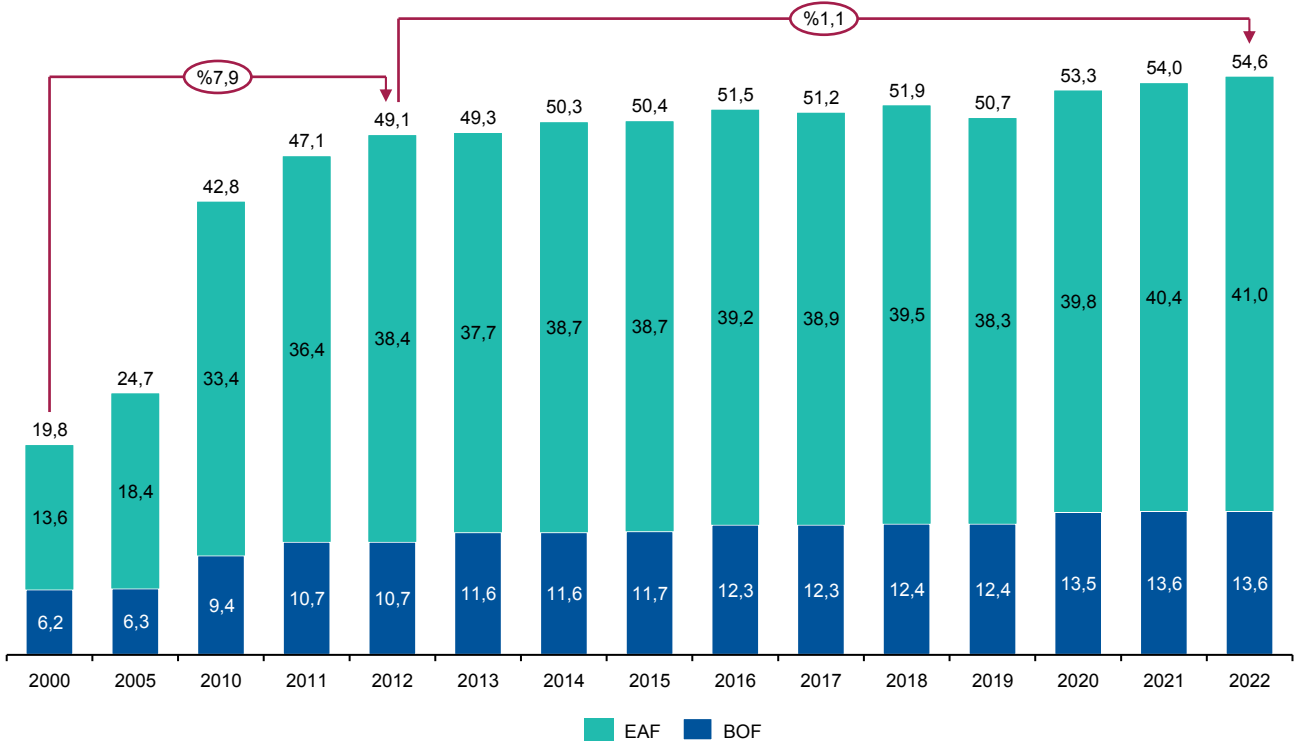
2022 yılı sonu itibariyle Türkiye çelik sektörü, 41 milyon tonu EAF tesislerinde, 13,6 milyon tonu ise BOF tesislerinde olmak üzere toplam 54,6 milyon ton üretim kapasitesine sahiptir. Çelik sektörü üretim kapasitesi 2000 ile 2012 yılları arasında %7,9 yıllık ortalama büyüme oranıyla artarken, bu oran 2012 ile 2022 yılları arasında %1,1'e gerilemiştir.

Toplam üretim kapasitesi içindeki EAF üretim kapasitesi, 2000-2012 arasında yılda ortalama %9 oranında artmış,

2012 ile 2022 yılları arasında ise bu büyüme performansını koruyamamış ve yıllık bileşik büyüme oranı %0,7'ye düşmüştür. BOF tesislerindeki üretim kapasitesi de benzer bir seyir izlemiş, 2000-2012 arasında yılda ortalama %4,7 oranında artarken, 2012 ile 2022 yılları arasına gelindiğinde %2,4 seviyelerine inerek yükselmeye devam etmiştir.<sup>26</sup>

**Bu rakamlar, Türkiye'nin hem EAF hem de BOF tesislerindeki kapasite artışının son 10 yılda yavaşladığını göstermektedir.**

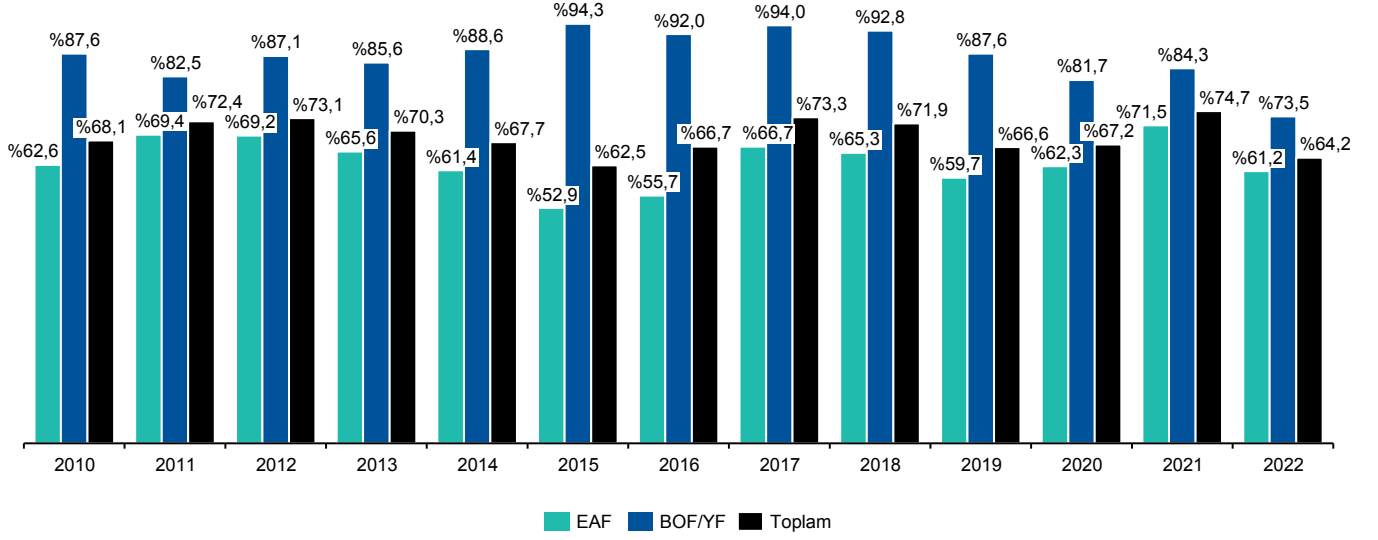
**Şekil 11. Türkiye'nin Ham Çelik Üretim Kapasitesi, 2000 – 2022 (Milyon Ton)<sup>27</sup>**



2022 yılında, Türkiye'deki BOF tesislerinin kapasite kullanım oranı %73,5 olarak gerçekleşirken, EAF tesislerinde bu oran %61,2 olmuştur.<sup>28</sup> Şekil 12, bu çıkarımın tarihi olarak tekrarlayan bir eğilim olduğunu göstermektedir. Yıllar içerisinde EAF kapasitesindeki yaklaşık üç kat artışa rağmen

kapasite kullanım oranlarının neredeyse aynı seviyelerde kaldığı göz önünde bulundurulursa, EAF çelik üreticilerinin yıllar içerisinde eklenen ciddi miktardaki ilave kapasiteleri büyük oranda kullanabildiği sonucuna varılabilir.

Şekil 12. Türkiye'deki Çelik Tesislerinin Kapasite Kullanım Oranı (%)<sup>29</sup>



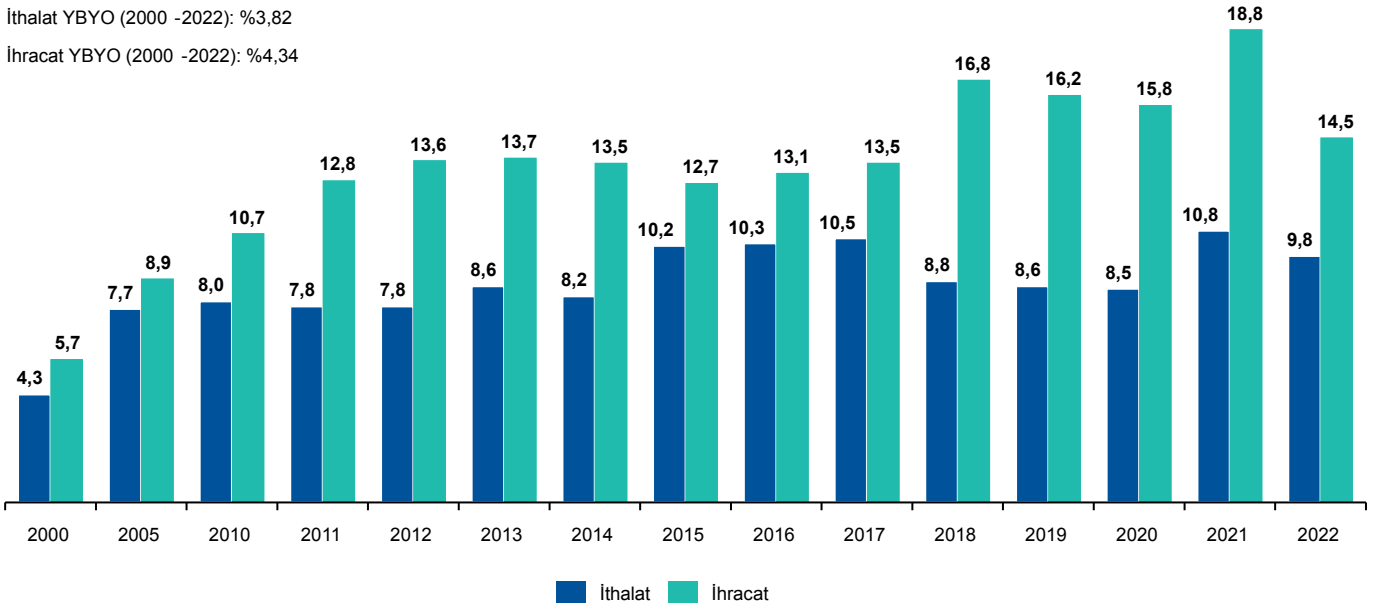
### 1.1.2. Türkiye'nin Çelik Ticareti ve İhracatında AB'nin Payı

Türkiye küresel ticarete önemli bir çelik ihracatçısı konumundadır. 2000 yılından bu yana çelik ithalatı yıllık ortalama %3,82'lik büyüme oranı ile artarak yaklaşık iki

katına çıkarken, aynı dönemde ihracat yıllık %4,34'lük oranda büyüyerek yaklaşık üç kat artmıştır. Bununla birlikte 2022 yılında artan enerji maliyetleri ihracat performansını da etkilemiş ve aynı sene yıllık ihracatta %22,8'lik bir düşüşe neden olmuştur.

Şekil 13. Türkiye Çelik İthalat ve İhracatı, 2000 - 2022 (Milyon Ton)<sup>30</sup>

İthalat YBYO (2000 -2022): %3,82  
İhracat YBYO (2000 -2022): %4,34



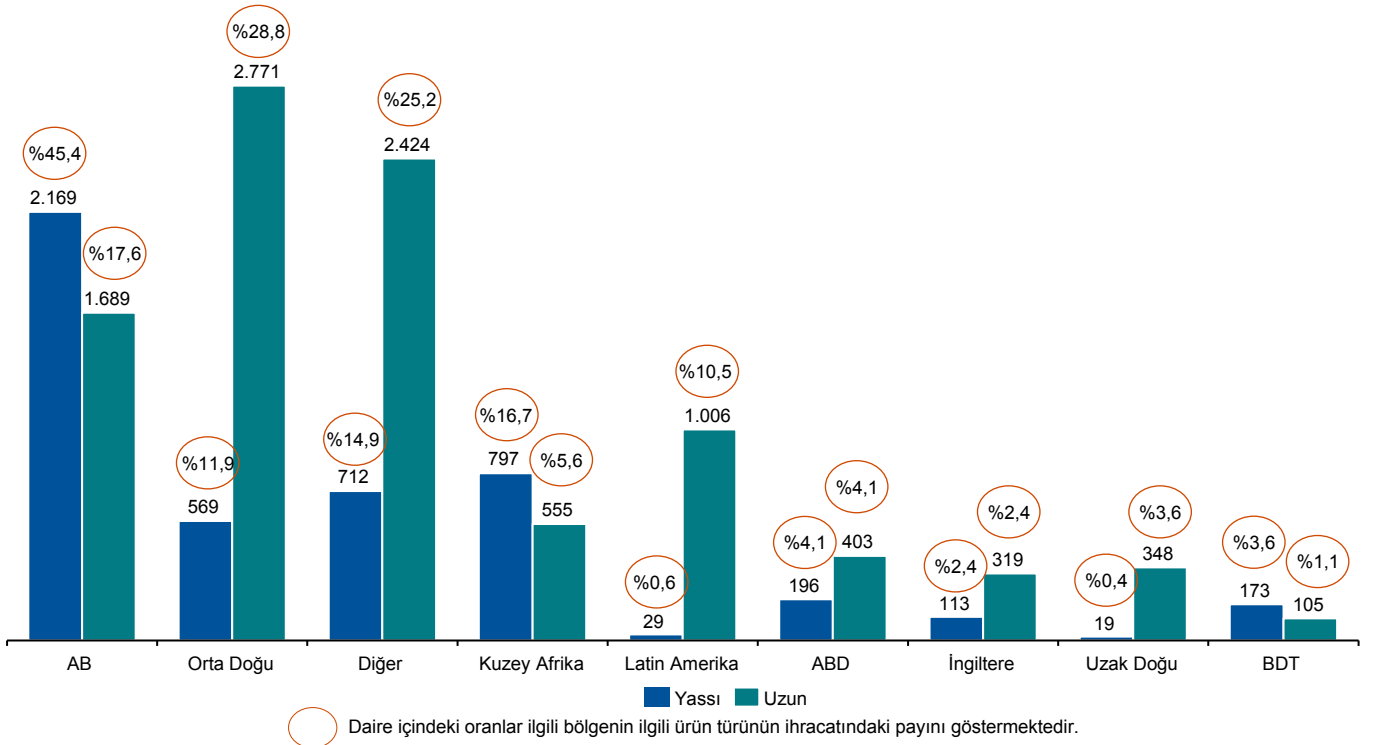
<sup>29</sup>TÇÜD ve çelik üreticileriyle yapılan görüşmeler sonucu elde edilmiştir.

<sup>30</sup>TÇÜD ve çelik üreticileriyle yapılan görüşmeler sonucu elde edilmiştir.

Yine TÇÜD verileri, 2022 yılında Türkiye çelik sektörünün en büyük ihracat adresinin AB ülkeleri olduğunu ve buraya yapılan ihracatın, toplam çelik ihracatının dörtte birinden fazlasını (%26,8) oluşturduğunu göstermektedir. Ürün bazında AB'ye yapılan ihracatın büyük bölümünü yassı ürünler oluşturmaktadır, AB ülkeleri bu ürün tipindeki toplam Türk ihracatının yarısına yakınının varış noktasını oluşturmaktadır. Tarihsel olarak Türkiye'nin önemli çelik ihracat

destinasyonlarından biri olan Orta Doğu'nun AB'nin hemen ardından ihracatta ikinci sırada yer aldığı (%23,2 pay ile) ve bu bölgeye yapılan ihracatın çoğunlukla uzun çelik ürünlerinden oluştuğu görülmektedir. Bölgeleri takip eden Kuzey Afrika (%9,4 pay ile) ve Latin Amerika (%7,2 pay ile) diğer önemli ihracat pazarları olup, ilkinde çoğunlukla yassı ürünler, ikincisine ise çoğunlukla uzun ürünler ihraç edilmektedir.

#### Şekil 14. Türkiye'nin Çelik İhracat Hacminin Bölgelere Göre Dağılımı (2022, Milyon Ton)<sup>31</sup>



## 1.2. Türkiye Çelik Sektörü Faaliyetlerinin Diğer Büyük Oyuncularla Karşılaştırılması

### 1.2.1. Çelik Üretim Kapasitelerinin Karşılaştırılması

AB ülkelerinin 2022 yılındaki toplam ham çelik üretim kapasitesi 213,6 milyon ton iken, bölgenin en büyük çelik üreticisi Almanya'nın üretim kapasitesi 58,1 milyon ton seviyesinde gerçekleşmiştir (bölge kapasitesinin %27'si). Buna karşılık, Türkiye aynı yıl 54,6 milyon tonluk üretim kapasitesiyle Almanya'nın hemen ardından gelmekte ve kapasite bakımından diğer Avrupalı üreticileri geride bırakmaktadır.<sup>32</sup>

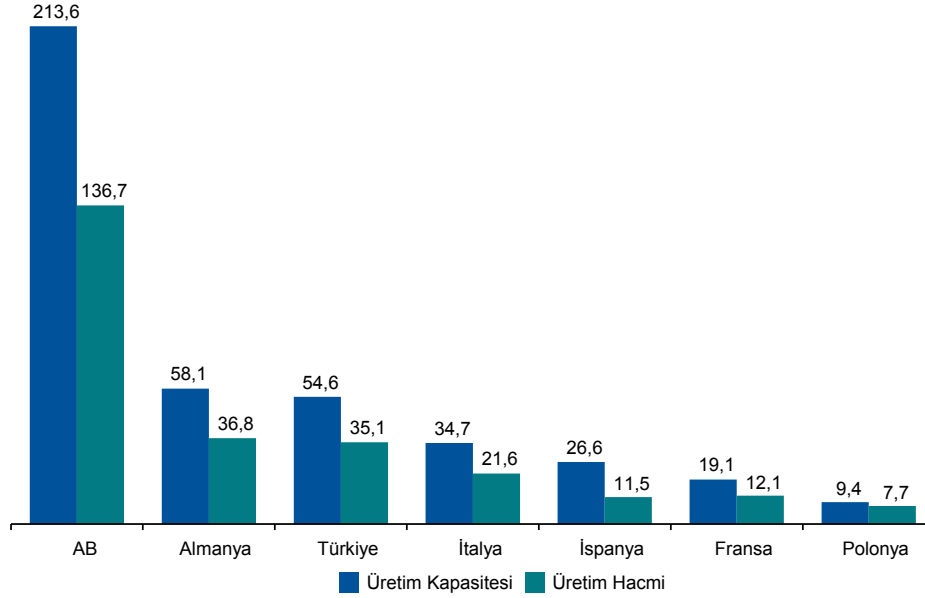
Dünya Çelik Örgütü verilerine göre,<sup>33</sup> 2022 yılında AB'deki toplam çelik üretimi, Rusya'nın Ukrayna'yı işgali, süregelen yüksek enflasyonun etkileri ve dünya genelinde artan faiz oranlarının etkisiyle 2022 yılında bir önceki yıla göre %10,5 azalarak 136,7 milyon tona gerilemiştir. Söz konusu yılda, AB'nin toplam üretiminin dörtte birinden fazlasını oluşturan 36,8 milyon ton çelik üretimi ile listenin başında yer almasına rağmen Almanya'daki çelik üretimi bir önceki yıla göre %8,4 oranında azalmıştır. Almanya'yı takip eden diğer büyük çelik üreticileri İtalya (%15,8 üretim payı) ve Fransa'da ise (%8,9 üretim payı) çelik üretiminin bir önceki yıla göre sırasıyla %11,6 ve %13,1 oranında azaldığı izlenmiştir. 2022 yılında Türkiye'nin çelik üretimi AB ortalamasının biraz üzerinde daralarak %12,9 oranında düşse de, ülke 35,1 milyon tonluk üretimiyle Avrupa ülkeleri arasında en büyük ikinci ham çelik üreticisi pozisyonunu korumuştur.

<sup>31</sup>TÇÜD ve çelik üreticileriyle yapılan görüşmeler sonucu elde edilmiştir.

<sup>32</sup>OECD (2022). Latest Developments in Steelmaking Capacity. www.oecd.org/industry/ind/latest-developments-in-steelmaking-capacity-2022.pdf adresinden alınmıştır.

<sup>33</sup>Dünya Çelik Örgütü. Short Range Outlook, Ekim 2022.

Şekil 15. AB'den Seçili Üreticilerin Çelik Üretim Kapasiteleri ve Üretim Hacimleri, 2022 (Milyon Ton)<sup>34</sup>



2021 yılında BOF/YF tesislerinin küresel çelik üretimindeki payı %70,8 olarak gerçekleşmiştir.<sup>35</sup> AB içindeki üretim yöntemi dağılımı ise daha dengelidir. Aynı yıl BOF/YF tesisleri AB'deki toplam çelik üretiminin yaklaşık %56'sını oluştururken, EAF tesisleri ise yaklaşık %44'ünü oluşturmuştur.<sup>36</sup> 2022 yılında BOF/YF Türkiye'deki toplam üretimin %28,4'ünden sorumluyken, EAF ve IF tesisleri toplam üretimin %71,6'sını sağlamıştır.

### 1.2.2. CO<sub>2</sub> Emisyonlarının Karşılaştırılması

EAF teknolojisiyle çelik üretimi, teoride hem enerji girdisi hem de CO<sub>2</sub> emisyonları açısından BOF rotasına göre daha avantajlıdır. Bu sebeple EAF tesislerinin üretimdeki payı nispeten daha yüksek olan Türkiye, çelik sektörü ortalama emisyon yoğunluğu açısından rakiplerinin birçoğundan daha iyi bir konumdadır. Buna ek olarak, çoğu EAF tesisinin son yirmi yılda, yeni teknolojilerle inşa edilmiş olması Türk çelik üreticilerine üretim verimliliği ve emisyon sonuçları açısından da avantaj sağlamaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yakın zamanda yayınladığı Türkiye Ulusal Enerji Planı doğrultusunda elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılması hedefi, EAF rotasının karbonsuzlaşmasını destekleyecek ve bu rotayı orta-uzun vadede daha da verimli hale getirecektir<sup>37</sup>.

BOF/YF teknolojisi ile üretimde ise, Türkiye'nin ortalama emisyonları AB ortalamalarının üzerinde seyretmektedir. Bu rotanın karbonsuzlaşması radikal bir dönüşümü (H<sub>2</sub> ve karbon yakalama gibi yenilikçi teknolojilerin kullanılmasını) gerektirmektedir. Bu nedenle, Türkiye'de bu rotayı kullanarak üretim yapan 3 entegre tesis, önümüzdeki dönemde rekabet güçlerini koruyabilmek adına karbonsuzlaşma stratejilerini geliştirmeye başlamıştır.

EU JRC'nin (AB Ortak Araştırma Merkezi) 2022 yılında yayımlayıp, 2018 yılı için hesaplamalarını gerçekleştirdiği Çelik Sektörü Emisyon Yoğunlukları Analizi, Türkiye'nin toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarını (Kapsam 1 & kaynak yönlü<sup>38</sup> + Kapsam 2) seçili diğer büyük üreticilerin emisyonlarıyla karşılaştırma imkânı vermektedir. JRC'nin çalışmasına göre, küresel çelik sektörünün yol açtığı CO<sub>2</sub> emisyonlarının çoğunluğu Asya ülkeleri kaynaklıdır. **Demir çelik sektör emisyonları 1.576 Mt CO<sub>2</sub> seviyesinde olan Çin, bu değerle Hindistan (325 Mt), AB ülkeleri (183 Mt), Japonya (176 Mt) ve Rusya (166 Mt) gibi diğer büyük üreticileri önemli ölçüde geride bırakmaktadır.** Türkiye demir çelik sektör emisyonu 34 milyon ton ile diğer oyunculara kıyasla nispeten daha düşüktür. Bunda, EAF + IF üretiminin, BOF/YF üretiminin çok üzerinde olduğu üretim yapısının etkisi vardır. Emisyonların büyük ölçüde farklı üretim teknolojilerinin (örneğin entegre veya EAF) payına bağlı olduğu unutulmamalıdır.

<sup>34</sup>Bu görsel TÇÜD, OECD ve GMK Center'dan derlenen verilerle oluşturulmuştur.

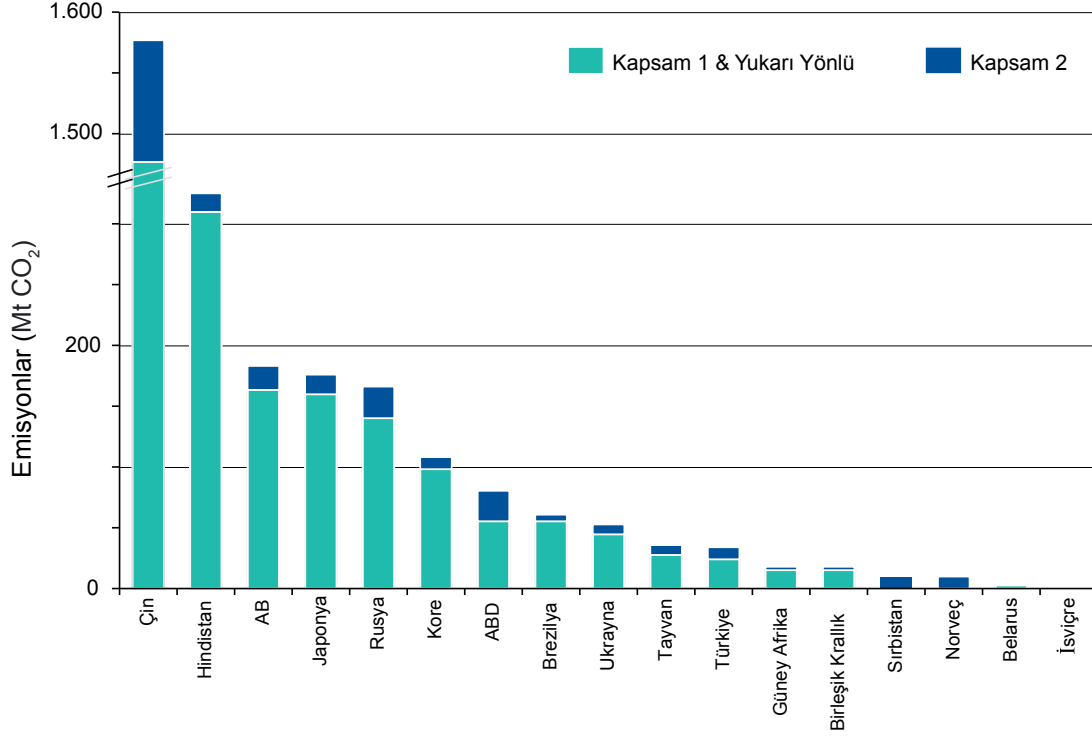
<sup>35</sup>Dünya Çelik Örgütü, World Steel in Figures 2022

<sup>36</sup>Avrupa Çelik Birliği

<sup>37</sup>T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Ulusal Enerji Planı, 2022

<sup>38</sup>Kaynak yönlü emisyonlar ithal edilen ürünün kaynak ülkesindeki kapsam 1 emisyonlarını ve ihraç edilen ürünün (negatif) kapsam 1 emisyonlarını içermekte, ancak örneğin nakliye ve madencilikten kaynaklanan diğer ilişkili emisyonları hariç tutmaktadır.

**Şekil 16. Türkiye ve Seçili Büyük Üreticiler için Demir Çelik Endüstrisinden Kaynaklanan Toplam CO<sub>2</sub> Emisyonları, 2018<sup>39</sup>**



EAF+İF üretim teknolojilerinin Türkiye çelik üretimindeki yüksek payı, Türkiye'nin AB SKDM sebebiyle dolaylı olarak karşı karşıya kalacağı muhtemel karbon maliyetleri açısından AB pazarına ihracat yapan diğer rakiplerine kıyasla avantajlı bir konumda olacağını göstermektedir. AB'ye en yüksek çelik ihracatını yapan beş ülke arasında Türkiye; diğer dört ülke olan Rusya, Ukrayna, Çin ve Güney Kore'ye arasındaki en düşük karbon yoğunluğuna sahiptir.

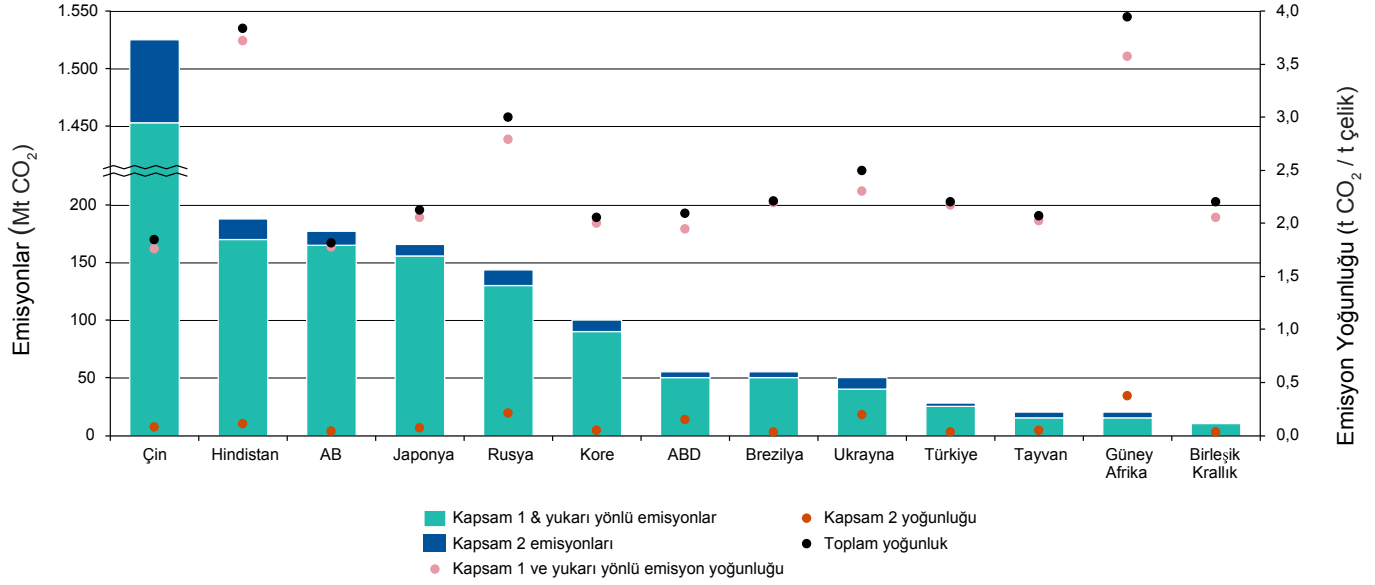
Şekil 17, entegre rotadaki toplam CO<sub>2</sub> emisyonları (Kapsam 1 ve kaynak yönlü emisyonları + Kapsam 2 emisyonları) göstermektedir. Çin, 1,525 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonu bildirirken, ardından entegre çelik tesislerinden Hindistan (188

milyon ton), AB (177 milyon ton), Japonya (166 milyon ton) ve Rusya (144 milyon ton) gelmektedir.

Şekil 17'deki noktalar, entegre rota emisyonlarının entegre rotadaki toplam ham çelik üretimine bölünmesiyle hesaplanan CO<sub>2</sub> emisyon yoğunluklarını göstermektedir. Çoğu ülkenin karbon yoğunluğunun ton çelik başına 1,8 ila 4,0 ton CO<sub>2</sub> arasında değiştiği görülmektedir. AB ve Çin, sırasıyla 1,81 ve 1,84 ton CO<sub>2</sub>/ton çelik ile en düşük karbon yoğunluklarını bildirirken, üst uçta Güney Afrika ve Hindistan, 3,8 ton CO<sub>2</sub>/ton çelik üzerinde karbon yoğunluklarına sahiptir. Türkiye'deki entegre rota karbon yoğunluğu ise, ton çelik başına 2,20 ton CO<sub>2</sub> ile AB ortalamasının üzerinde seyretmektedir.



Şekil 17. Entegre Rota CO<sub>2</sub> Emisyonları ve Karbon Yoğunluğu<sup>40</sup>



Bir sonraki şekil ise EAF üretim rotası için aynı parametrelerin bir kıyaslamasını sunmaktadır. EAF rotasında emisyonların tipik olarak Kapsam 2 emisyonlarını da içerecek şekilde raporlandığı unutulmamalıdır, çünkü EAF'ler için gerekli elektrik bu süreçteki en yüksek enerji talebini oluşturmaktadır. Entegre rota durumunda olduğu gibi, Çin toplam 52 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonu ile EAF rotasındaki toplam emisyonlara hakimken, onu AB (16 milyon ton), ABD (15 milyon ton), Hindistan (12 milyon ton), Kore (10 milyon ton) ve Japonya (10 milyon ton) izlemektedir. Türkiye, bu rotadan kaynaklanan toplam 7 milyon ton Kapsam 1&2 emisyonu ile küresel ölçekte 7. sırada yer almaktadır.

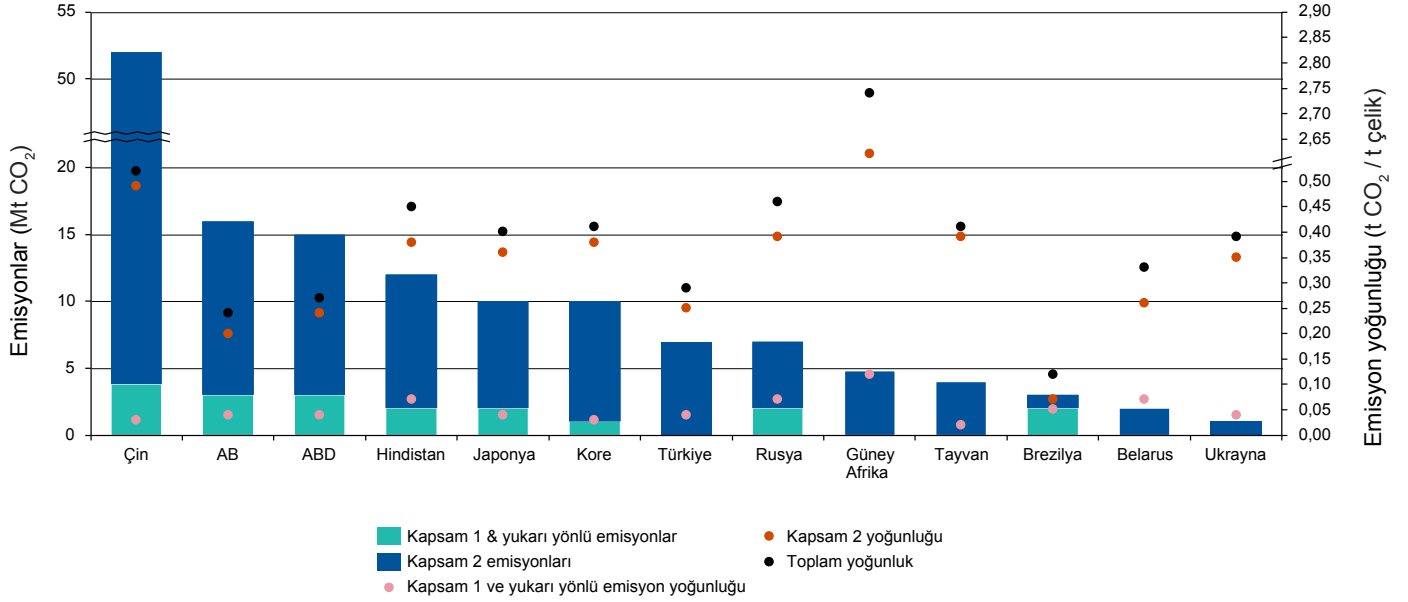
Bu şekil aynı zamanda çoğu ülke için EAF rotasının CO<sub>2</sub> emisyon yoğunluğunun ton çelik başına 0,6 ton CO<sub>2</sub>'nin altında olduğunu göstermektedir. Spektrumun en alt ucunda, düşük karbon yoğunluğuna sahip hidroelektrik enerji kaynakları sebebiyle Brezilya (0,12 ton CO<sub>2</sub>/ton çelik) bulunurken en üst ucunda ise karbon yoğun elektrik şebekesi

sebebiyle Güney Afrika (2,74 ton CO<sub>2</sub>/ton çelik) bulunmaktadır. 2020 yılında AB-27 ortalaması ise ton çelik başına 0,265 ton CO<sub>2</sub> iken Türkiye ise ton çelik başına 0,29 ton CO<sub>2</sub> (0,04 Kapsam 1 + 0,25 Kapsam 2) ortalamasına sahiptir. Türkiye'nin şebeke emisyon faktörü ise, 2020 yılında hesaplanan ve 2022 yılında yayınlanan Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre 0,447 ton CO<sub>2</sub>/MWh'dir.<sup>41</sup>

Nispeten yüksek miktarda EAF ve IF teknolojileri göz önüne alındığında, Türk çelik sektörünün Kapsam 1 emisyonlarından kaynaklanan potansiyel dolaylı karşılaşılabilecek karbon maliyetleri açısından AB pazarındaki rakiplerine göre avantajlı olduğu düşünülebilir. Ancak, Türkiye'de elektrik üretiminden (şebeke emisyonları) kaynaklanan sera gazı emisyonları nedeniyle, EAF ve IF teknolojilerine sahip tesislerin Kapsam 2 emisyonları, Türk çelik sektörü için önemli bir zorluk teşkil etmekte ve sektörün net sıfıra geçiş sürecinde bir darboğaz olarak değerlendirilmektedir.

<sup>40</sup>Koolen, D. and Vidovic, D., Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners, EUR 31112 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-53417-4, doi:10.2760/170198, JRC129297.

<sup>41</sup>Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü Bilgi Formu

Şekil 18. EAF Rotası CO<sub>2</sub> Emisyonları ve Karbon Yoğunluğu<sup>42</sup>

Son olarak, Türkiye çelik sektörünün üretim için büyük ölçüde ithal hammadde kullandığı unutulmamalıdır. Sektör ihtiyaç duyduğu demir cevherinin %60'ını, hurda çeliğin %70'ini ve kömürün %90'ını ithal etmektedir.<sup>43</sup> AB SKDM kapsamının nakliyeden kaynaklı emisyonları ve değer zincirinin daha aşağısındaki ürünleri de içerecek şekilde genişletilmesi ihtimali göz önünde bulundurulduğunda, sektörün bu ithal hammaddelerin üretimini ve nakliyesi sırasında ortaya çıkan emisyonları içeren Kapsam 3 emisyonları için de önümüzdeki dönemde adımlar atması gerekecektir.

### 1.3. Türkiye Çelik Sektörünün Güçlü ve Zayıf Yönleri

#### 1.3.1. Güçlü Yönler

##### İmalat sanayi ve inşaat sektörlerinin güçlü varlığı

Ülke gayri safi yurt içi hasılasının yaklaşık dörtte birini oluşturan imalat sanayi ve inşaat sektörleri, büyük miktarda çelik tüketmekte ve iç çelik talebini şekillendirmektedir.\* Son yıllarda inşaat sektöründe bir yavaşlama gözlenirse de hem deprem bölgesinde başlayan yeniden yapılanma çalışmaları hem de ülkenin geri kalanında hız kazanan kentsel dönüşüm projeleri sayesinde sektörün önümüzdeki dönemde güçlü bir toparlanma sürecine girmesi beklenmektedir.

##### Sektörün geniş ve çeşitli dış pazar ağı

2021 yılında toplam 178 ülkeye ihracat yapan ve başlıca destinasyonları arasında ABD, Kanada, Singapur ve Peru gibi uzak ülkeler bulunan Türkiye çelik sektörü, geniş bir dış pazar ağına sahiptir.<sup>44</sup> Bu durum, Türk çelik üreticilerinin müşteri pazarlarını çeşitlendirmelerine ve gelişmekte olan ekonomilerde artmakta olan talebin avantajlarından yararlanmalarına olanak sağlamıştır. Türk çelik sektörü geniş pazar ağı sayesinde, çeşitli bölgelerde meydana gelebilecek ticaret kaymalarından da faydalanarak ihracat hacmini arttırma potansiyeline sahiptir.

## Büyük pazarlara coğrafi yakınlıktan kaynaklanan lojistik avantajlar

Avrupa, Orta Doğu ve Kuzey Afrika'ya coğrafi yakınlığı sayesinde Türkiye, çelik ürünlerini bu bölgelerdeki önemli alıcılara düşük lojistik maliyetlerle ulaştırabilmektedir. Bu avantajı kullanan Türkiye'nin bu 3 bölgeye yaptığı çelik ihracatı (AB için %26,8, Orta Doğu için %23,2 ve Kuzey Afrika için %9,4) 2022 yılındaki toplam çelik ihracatının büyük kısmını (%59,4) oluşturmaktadır.<sup>45</sup>

## EAF'lerin üretimdeki yüksek payı

EAF tesisleri, hem daha düşük birincil emisyon yoğunluğuna hem de nispeten daha ulaşılabilir karbonsuzlaşma seçeneklerine sahip olmaları sebebiyle çelik üretiminde emisyon azaltımı için BOF/YF teknolojisine göre daha avantajlı konumdadır. Çoğu EAF tesisinin son 20 yılda ve güncel teknolojilerle inşa edilmiş olduğu Türkiye'de, EAF tesisleri toplam üretim kapasitesinin %75,1'ini ve 2022 yılındaki toplam çelik üretiminin %71,1'ini<sup>46</sup> oluşturmaktadır. Emisyon bazlı düzenlemelerin önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde artmasının beklendiği de göz önünde bulundurulursa, EAF ağırlıklı bir çelik üretim ekosistemine sahip olmanın Türkiye için önemli bir avantaj sağladığı söylenebilir.

## Sektörün uluslararası rekabetçilik, pazarlama ve markalaşma gücü

İleri teknoloji ve ekipmana büyük yatırımlar yapan Türk çelik üreticileri, uluslararası standartlara uygun çelik ürünlerini verimli şekilde üretebilmekte, düşük lojistik maliyetlerle büyük pazarlara ulaşabilmektedir. Ayrıca çelik üretiminde köklü bir geçmişe sahip olan Türkiye, yıllar içinde önemli bir bilgi birikimi ve nitelikli bir işgücü havuzu da oluşturmuştur. Yüksek kalite ve güvenilirliğin rekabetçi fiyatlarla birlikteliği, Türk çelik üreticilerinin güçlü pazarlama ve markalaşma çabalarıyla da desteklenerek önemli bir küresel pay elde edilmiştir.

## 1.3.2. Zayıf Yönler

### Ara mal ve hammadde tedarikinde yüksek oranda dışa bağımlılık

Türk çelik üreticileri, demir cevheri ve hurda çelik gibi üretimin sürdürülmesi için kritik öneme sahip girdileri büyük ölçüde ithal etmektedir. Bu durum hem üretim maliyetlerini arttırmakta hem de Türk üreticileri uluslararası piyasalarda bu emtialarda yaşanabilecek fiyat dalgalanmalarına karşı hassas hale getirmektedir. Gereklili adımlar atılmadığı takdirde, muhtemel fiyat artışları kârlılığını engelleyebileceği gibi, bu malların uluslararası piyasalarda bulunabilirliğinin azalması Türk üreticileri olumsuz yönde etkileyebilir.

### Enerji tedarikinde yüksek oranda dışa bağımlılık

Büyük enerji rezervlerinden yoksun olduğu için dışarıdan önemli miktarda enerjiyi ithal etmek durumunda olan ülkenin çelik üreticileri de ihtiyaç duydukları enerjiyi karşılayabilmek için yüksek oranda ithalata bağımlıdır. 2021 yılında doğal gazın %99,3'ünü ve kömürün ise %56,9'unu ithal eden Türkiye'nin enerji tedarik zincirine başta Rusya olmak üzere belirli ülkeler hakimdir.<sup>47</sup> Bu bağımlılık Türkiye'yi küresel enerji fiyatlarındaki gelişmelere karşı hassas duruma getirmektedir. Örneğin, küresel enerji krizi nedeniyle 2022 yılında Türkiye'nin enerji ithalatı yıllık %90,5 oranında artarak 96,54 milyar dolara yükselmiştir.<sup>48</sup> Üretimi ağırlıklı EAF tesislerine dayanan Türkiye çelik sektörü, 2022 yılında yaşanan enerji fiyatlarındaki artışlar sebebiyle hem üretim hem de ihracat bakımından zorluklar yaşamıştır. Enerji fiyatlarının yüksek seyretmeye devam edeceği beklentisi göz önüne alındığında, fiyatlardaki kısa ve orta vadeli hareketler Türk çelik üreticileri için kritik önem taşımaya devam edecektir.

### Dünya genelinde çelik endüstrisinde artan korumacılık eğilimleri

ABD'nin 2018'de başlattığı korumacı ticaret politikaları ve Rusya-Ukrayna savaşının ardından ülkelerin stratejik sektörlerini korumak üzere attığı adımlar Türkiye çelik sektörünün ihracatı için önem teşkil etmektedir. Ayrıca, AB'nin uygulamaya koyduğu ve sera gazı emisyonlarını baz alan SKDM'nin diğer ülkeler tarafından da hayata geçirilmesi küresel ticaret modellerini derinden etkileyecektir. Türkiye çelik sektörünün önümüzdeki dönemde küresel pazarlardaki rekabetçiliğini koruyabilmesi için, değişen ticaret dinamiklerine hızlı adaptasyonu önem kazanacaktır.

<sup>45</sup>TÜİK Dış Ticaret İstatistikleri, PwC Analizi

<sup>46</sup>TÇÜD ve çelik üreticileriyle yapılan görüşmeler sonucu elde edilmiştir.

<sup>47</sup>EPDK 2021 Doğalgaz Sektör Raporu, Türkiye Kömür İşletmeleri 2021 Kömür Üretim Tüketim İstatistikleri

<sup>48</sup>TÜİK Dış Ticaret İstatistikleri

### Dahilde işleme rejiminin önümüzdeki dönemde yaratacağı potansiyel engeller

Türkiye'nin yerli üretimi teşvik etmek için kullandığı Dahilde işleme rejimi, olumlu etkilerinin yanı sıra hem ithalata bağımlılığı artırmış hem de yerel hammadde ve bileşen endüstrilerinin gelişimini zayıflatmıştır. Dahilde işleme rejimi, şu ana kadar ülkenin ticaret politikalarına hizmet etmiş olsa da değişen pazar ve düzenlemeler neticesinde bu etkisini kaybetmesi olası görülmektedir. AB SKDM gibi ticaret politikalarının dahilde işleme rejimini de etkileyeceği ve az gelişmiş pazarlara yapılan ihracatı sınırlandırabileceği öngörülmektedir.

### Yüksek katma değerli ürünler için daha fazla Ar-Ge ve inovasyon ihtiyacı

Yüksek katma değerli çelik ürünlerinin geliştirilmesi hem artan korumacı politikalar hem de tırmanan iklim riskleri ile daha da önem kazanmıştır. Önümüzdeki dönemde Ar-Ge ekosistemi ile; kamu kurumları, özel sektör ve akademi arasında geliştirilecek ticari, bilimsel ve teknolojik iş birliklerine yapılacak yatırımlar sektörün ihtiyaç duyduğu yüksek katma değerli, yenilikçi çelik ürünlerinin gelişimini destekleyecektir.

# 2

**Türkiye Çelik  
Sektörünün  
Karbonsuzlaşması  
için Modelleme ve  
Senaryo Analizi**

## 2. Türkiye Çelik Sektörünün Karbonsuzlaşması için Modelleme ve Senaryo Analizi

Proje'nin temel çıktılarından biri **farklı politika ve teknoloji kombinasyonlarının sektörün gelecekteki emisyonları üzerindeki etkisini tahminleyen modelleme ve senaryo analizidir**. Modelleme çalışması kapsamında, 2053 yılına kadar farklı varsayımlar altında Türk çelik sektörünün arz ve talep projeksiyonları geliştirilmiş ve sektörde karbon azaltımını sağlayacak temel kaldıraç ve teknolojiler belirlenmiştir. Model, Türkiye çelik sektörünün 2023-2053 arasındaki emisyonlarını tahminlemek için 2 temel senaryo (Mevcut Durumun Devamı/ Referans ve Azaltım Senaryoları) üzerine geliştirilen alternatif yolları kapsamaktadır. Bu modelleme çalışması 2 referans senaryo ve 4 azaltım senaryosu kullanarak, Türkiye çelik sektörünün gelecekte uygulayabileceği politikaları tespit etmek amacıyla geliştirilmiştir.

**Referans senaryolar**, azaltım senaryolarından elde edilen azaltım miktarı, yatırım ve üretim maliyeti gibi sonuçların karşılaştırıldığı ve değerlendirildiği senaryolardır. Referans senaryo olarak i) Azaltıcı Önlemlerin Öngörülmediği Senaryo (Without Measures - WoM) ve ii) Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosu (Stated Policy Scenario - SPS) olmak üzere iki senaryo oluşturulmuştur. WoM hiçbir azaltıcı eylem ya da politikanın uygulanmadığı ve teknolojik dönüşümün öngörülmediği referans senaryosudur. Diğer referans senaryo olan SPS senaryosunda ise yenilenebilir enerji yatırımları, süreç verimliliği iyileştirmeleri, AB SKDM ve ulusal ETS'nin uygulamaya konulması dahil olmak üzere şu ana kadar açıklanan politikaların olası etkileri incelenmiş ancak hiçbir ek azaltım politikasına ya da yatırımına gidilmeyeceği varsayılmıştır. Başka bir deyişle, SPS açıklanan politika adımlarına ek olarak teknolojik dönüşümün sağlanmadığı durumda emisyon seviyelerini ölçmek için oluşturulmuştur.

**Azaltım senaryoları** ise emisyon azaltıcı politika eylemlerinin ve ileri teknoloji yatırımlarının sektörün emisyon seviyeleri üzerindeki etkisini modellemek amacıyla kurulmuştur. Modelleme çalışmasında dört farklı azaltım senaryosu geliştirilmiştir: i) Düşük ETS, ii) Yüksek ETS, iii) Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (Low Carbon Pathway - LCP) ve iv) En İyi Teknolojiler Senaryosu (Frontier Technologies

Scenario - FTS). Düşük ETS senaryosunda ulusal ETS fiyatlarının AB'deki karbon fiyatlarından daha düşük olacağı ve Türkiye çelik sektörünün altyapısı göz önünde bulundurularak uygulanabilir tüm düşük karbon teknolojilerin yanı sıra uygulanmakta olan ve uygulanması planlanan politikaların etkisi modellenmiştir. Yüksek ETS senaryosunda ise ulusal ETS fiyatlarının AB'deki karbon fiyatlarına eşit olacağı, yani daha agresif bir karbon fiyatlama politikasına gidileceği varsayılmaktadır. Ayrıca, Yüksek ETS senaryosu, Düşük ETS senaryosuna göre daha agresif bir teknolojik geçiş öngörmekte ve yeni çevreci çelik üretim teknolojileri için daha erken devreye giriş tarihlerine işaret etmektedir. LCP ve FTS, 2053 yılında net sıfır hedefine ulaşmak adına farklı düzeylerde politika eylemlerini ve karbon azaltıcı teknolojileri modellemektedir. LCP, Türkiye çelik sektöründe karbon azaltımı için (maliyet etkin) en uygun senaryo olarak tasarlanırken, daha agresif adımların varsayıldığı FTS, öncül teknolojilerin daha erken ve daha yüksek seviyede uygulamaya konulmasıyla ve daha yüksek ulusal ETS fiyatları ile LCP Senaryosundan farklılaşmaktadır.

Proje kapsamında hazırlanan model, uzun bir tahmin ufkunda farklı senaryolar dahilinde Türkiye çelik sektörü için çeşitli dekarbonizasyon yollarını ortaya çıkarmak üzere geliştirilmiş bir optimizasyon modelidir. Söz konusu optimizasyon modeli GAMS (Genel Cebirsel Modelleme Sistemi, General Algebraic Modeling System) yazılımı kullanılarak çalıştırılmıştır. Bu yazılım, belirlenen emisyon hedefine ulaşırken teknolojik ve ekonomik kısıtlar altında toplam maliyetin net bugünkü değerini asgari seviyeye indirmeyi amaçlayan büyük ölçekli bir doğrusal programlama modelidir.

Türkiye çelik sektöründe karbon emisyonlarının azaltılması, tasarlanan karbonsuzlaşma planlarını destekleyecek şekilde yeni ve öncül teknolojilerin kullanılmasını elzem kılmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon modeli sonuçlarına göre Türkiye çelik sektörü için önceliklendirilen teknolojiler<sup>49</sup> sağ tarafta sunulmuştur.

**Tablo 3. Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu Senaryosunda Modelin Karar Verdiği Teknoloji Önceliklendirmesi**

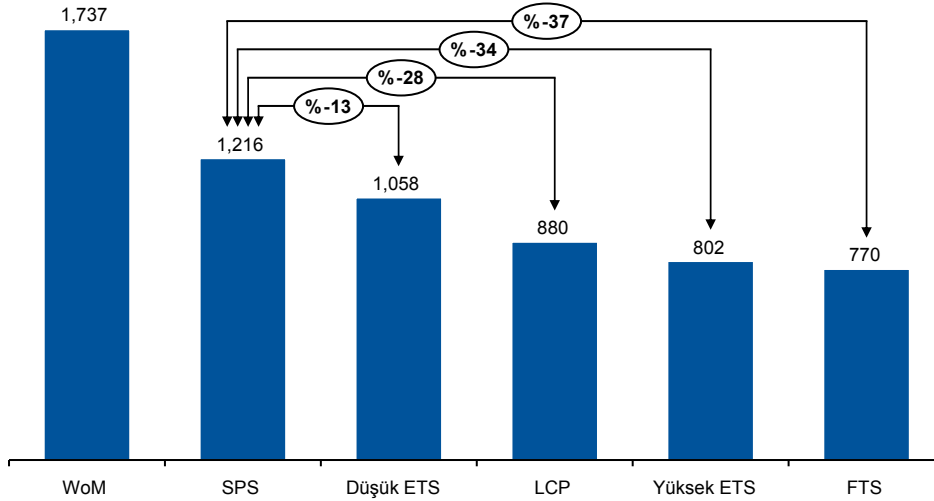
Teknoloji Arketipi	Öngörülen Teknoloji Giriş Yılı	Emisyon Azaltım Etkisi (tCO <sub>2</sub> /ton çelik)	Gereken Yatırım Değeri (EUR/ton çelik)	Ton başına emisyon azaltım maliyeti (EUR/ton CO <sub>2</sub> )
<b>YF-BOF Teknolojileri</b>				
<b>YF-BOF</b> Geleneksel entegre tesis	-	-	-	-
<b>BAT_YF_BOF</b> Mevcut en iyi teknolojileri kullanan entegre tesis	2024	0,41	1066,85	2602,1
<b>BAT_YF_BOF_H<sub>2</sub>_PCI</b> Pulverize kömür enjeksiyonunun yerine hidrojen kullanımı	2035	0,73	1066,85	1461,4
<b>DRI_Melt_BOF</b> Entegre tesisinin yerini alan doğal gaz bazlı DRI	2036	1,33	603,34	453,6
<b>DRI_Melt_BOF_%100_yeşil H<sub>2</sub></b> Entegre tesisinin yerini alan %100 yeşil hidrojen bazlı DRI	2036	2,15	603,34	280,6
<b>BAT_YF_BOF_CCU</b> Karbon yakalama ve kullanımlı entegre tesis	2044	2,86	1298,55	454
<b>EAF Teknolojileri</b>				
<b>EAF</b> Geleneksel elektrik ark fırını	-	-	-	-
<b>DRI_EAF</b> Doğal gaz bazlı DRI kullanan elektrik ark fırını	2029	-0,56	698,34	1247
<b>DRI_EAF_%100_yeşil H<sub>2</sub></b> %100 yeşil hidrojen bazlı DRI kullanan elektrik ark fırını	2043	0,21	698,34	3325,4

## 2.1. Modelden Elde Edilen Emisyon Değerlerinin Özeti

Hiçbir teknolojik dönüşümün ve azaltım politikasının hesaba katılmadığı WoM senaryosuna göre, 2020-2053 arası 34 yıllık dönemde çelik sektörünün toplam 1,7 milyar tonluk CO<sub>2</sub> emisyonu değerine ulaşılacağı tahmin edilmektedir. Bu değer, beklendiği gibi senaryolar arasında en yüksek CO<sub>2</sub> emisyonuna ulaşılan değerdir. SPS senaryosunda ise toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının aynı dönemde 1,2 milyar tonu aşacağı öngörülmektedir. Azaltım senaryolarında, yeni teknolojilerin devreye girmesi ve potansiyel ETS fiyatı ile önümüzdeki 30 yıl içinde toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının önemli ölçüde azalacağı değerlendirilmektedir. Düşük ETS senaryosu, SPS

senaryosuna kıyasla %28 seviyesinde daha düşük bir toplam CO<sub>2</sub> emisyonuna neden olurken, Yüksek ETS senaryosunda ilgili dönemde toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarında SPS'ye göre %34 azalma sağlanabileceği görülmüştür. Optimal senaryo olarak tanımlanan LCP senaryosunda, 2020-2053 döneminde SPS senaryosuna kıyasla toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarında 336 milyon ton ve daha agresif senaryo olan FTS senaryosunda ise 446 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyon azaltımına ulaşılabileceği öngörülmektedir.

Şekil 19. 2020-2053 Yılları Arasında Kümülatif CO<sub>2</sub> Emisyonları (Mt CO<sub>2</sub>)



**LCP senaryosunda**, net sıfır emisyonla yol açan üretime geçiş hidrojen ve CCUS teknolojilerinin kombinasyonu ile sağlanmaktadır.

- EAF rotası, 2053 yılında %62'lik payı ile çelik üretiminde en büyük paya sahip olmaya devam edecektir. EAF teknolojisinin bir kısmı doğal gaz bazlı DRI teknolojisine dönüşürken çoğu YF-BOF teknolojileri ile değiştirilecektir.
- LCP senaryosunda net sifıra ulaşmak için gereken toplam yatırım miktarının net bugünkü değeri (NBD), %7'lik iskonto oranı ile 2023-2053 dönemi için yaklaşık 11 milyar dolar seviyesinde hesaplanmaktadır.

- Türkiye'de daha düşük karbon fiyatları ve sıfır emisyon hedefine ulaşılacağını varsayan LCP senaryosundaki dönüşümün, 2023-2053 yılları arasında net bugünkü değer bazında 10,44 milyar dolar tutarında bir karbon maliyetine neden olması beklenmektedir.



**FTS senaryosu**, düşük karbonlu bir üretime geçiş için LCP senaryosuna kıyasla daha erken tarihlerde radikal teknolojik değişiklikler ve politika uygulamaları gerektiren alternatiflere yatırım yapılmasını gerektirmektedir.

- 2053 yılına gelindiğinde, üretimin yalnızca %58'i EAF ve %42'si BOF teknolojilerinin kombinasyonu tarafından gerçekleştirilecektir.
- Net sıfır hedefine ancak yeşil hidrojen ve CCUS teknolojileri ile biyokütlenin yakıt girdisi olarak kullanımıyla birleştirilmesiyle ulaşılabilmektedir.
- FTS senaryosunda, toplam yıllık yatırım maliyetinin 2053 yılında yaklaşık 2,5 milyar dolara ulaşacağı öngörülmektedir.
- Agresif FTS senaryosunda net sıfır değerine ulaşmak için gereken toplam yatırımların NBD'si, önümüzdeki 30 yıl içinde toplam yatırımlarda yaklaşık 12,5 milyar dolardır.
- Daha yüksek ETS fiyatı varsayımı nedeniyle, FTS senaryosunun 2023-2053 yılları arasında net bugünkü değer bazında 37,02 milyar dolar tutarında bir karbon maliyetine sebep olması beklenmektedir.

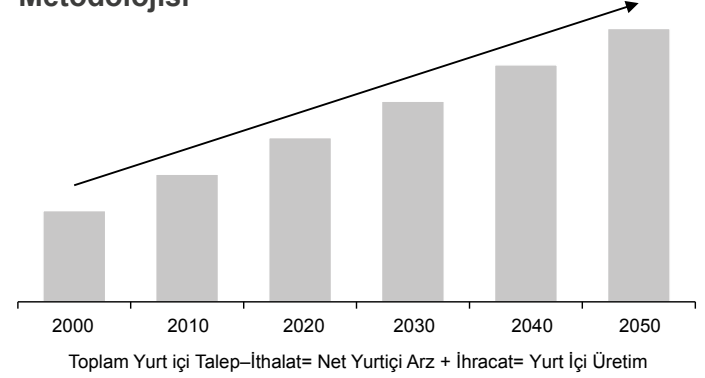
## 2.2. Sektör Büyüme Metodolojisi ve Tahminleri

Proje ekibi tarafından bu proje için geliştirilen arz-talep modeli kullanılarak 30 yıllık çelik üretim tahminlemesi yapılmıştır. Projeksiyonlar ürün tipi bazında uzun çelik ve yassı çelik için ve BOF ve EAF üretim yöntemleri için gerçekleştirilmiştir. Yurt içi talep öngörüsü için pazar büyüme tahminleri kullanılmıştır. Net yurt içi arz değerleri, yurt içi talepten ithalatın çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Yurt içi üretim ise net yurt içi arz ve ihracatın toplam değerine eşit olacak şekilde hesaplanmıştır.

Türkiye çelik sektörüne ilişkin projeksiyonların yapılabilmesi için sektör verileri, sektörün çatı kuruluşları olan TÇÜD ve Türkiye Çelik İhracatçıları Birliği'nin (ÇİB) yardımlarıyla elde edilmiştir. Ayrıca, projeksiyonların ve varsayımların tartışıldığı toplantılar sık aralıklarla gerçekleştirilmiş ve projeksiyonlar sektör temsilcilerinin bakış açısından da doğrulanmıştır.

Çelik sektörüne yönelik projeksiyonlar, daha önce yürütülen çalışmalar ve Yönlendirme Komitesi temsilcilerinin görüş ve düşünceleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, nihai projeksiyonun değerlendirilmesi ve doğruluğunun teyit edilmesi için T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile istişare edilmiştir.

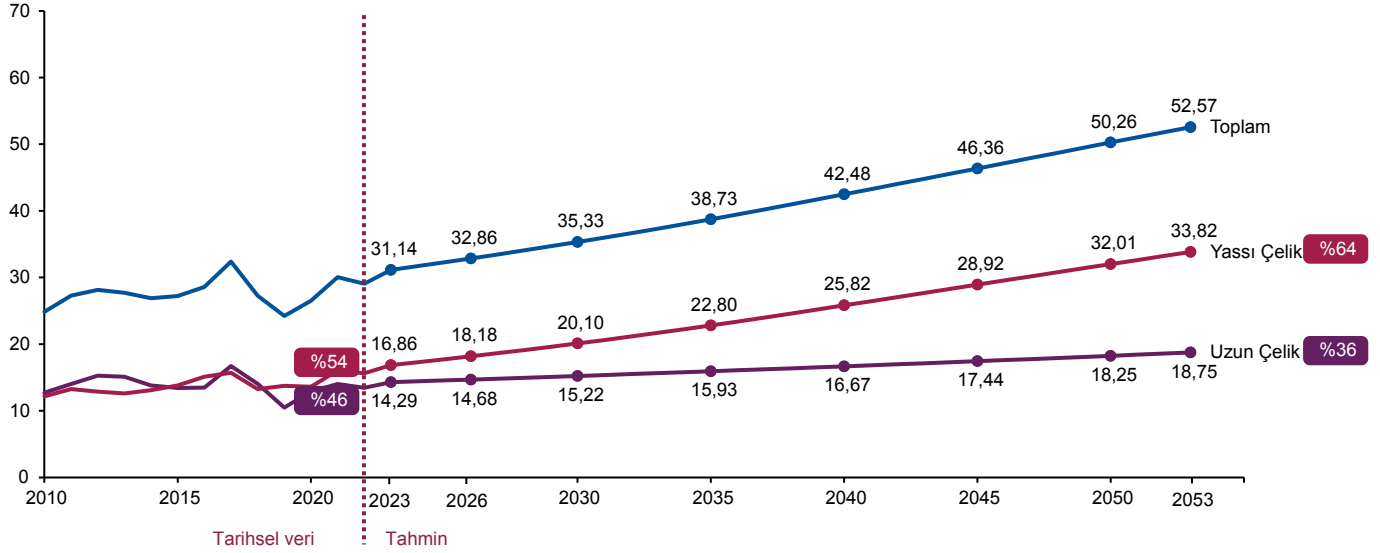
### Şekil 20. Sektörel Büyüme Tahmini Metodolojisi



### Yurt İçi Talep Tahminleri

Başta inşaat ve imalat sektörlerindeki eğilimler ve nüfus artışı olmak üzere çeşitli faktörler değerlendirildiğinde, Türkiye'deki çelik talebinin güçlü büyüme rakamlarını yakalayacağı ve toplam çelik talebinin 2053 yılında 52 milyon tonu aşacağı öngörülmektedir. Uzun çeliğin geçmiş dönemde olduğu gibi benzer bir büyüme performansı göstereceği tahmin edilmektedir. Yassı çeliğin ise emisyonlarda zirve yapması beklenen yıla kadar yüksek performansını koruyacağı, sonrasında ise nispi bir düşüşle de olsa yüksek oranda büyümesini sürdüreceği öngörülmektedir. Böylece, yassı ürünlerde daha hızlı büyüme beklentisiyle, 2023 yılında %54 olan yassı çelik ürünlerinin toplam talep içindeki payının 2053 yılında %64'e ulaşacağı öngörülmektedir.

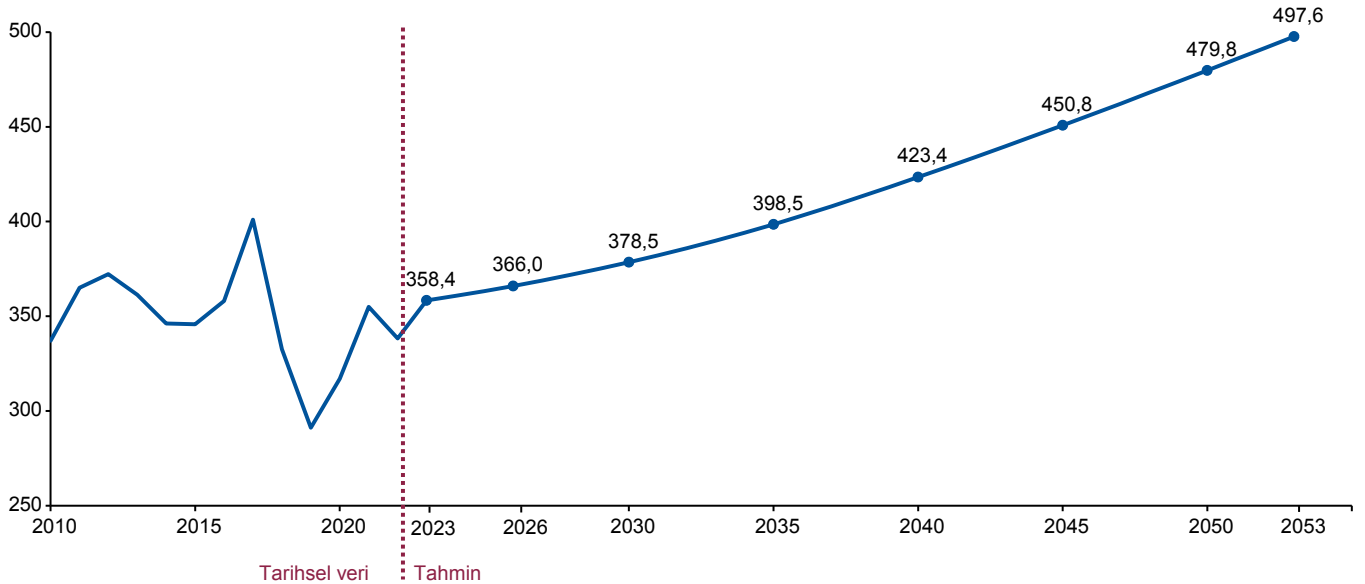
## Şekil 21. Çelik Ürün Tiplerine Göre Talep Tahmini (Milyon Ton)



Türkiye'nin kişi başı çelik tüketimi 2017 yılında 400 kg seviyesinin üstüne çıkmış ve 2022 yılında 338,3 kg düzeyinde gerçekleşmiştir. Önümüzdeki döneme dair yapılan çelik talep artış projeksiyonları ve nüfus tahminleri doğrultusunda

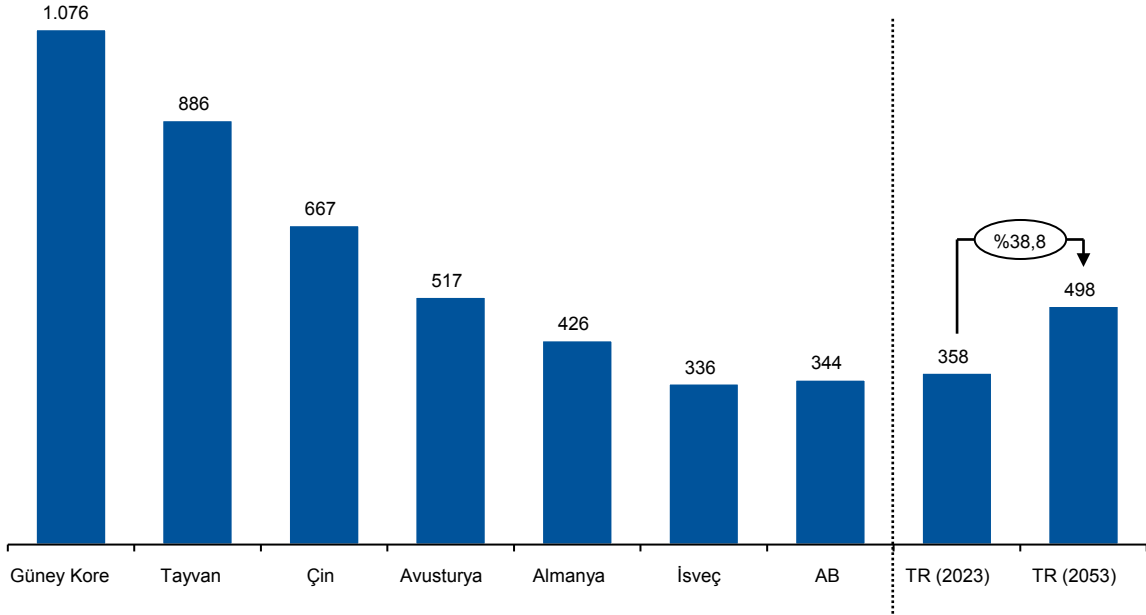
2053 yılında kişi başı çelik tüketiminin 497,6 kg'ye ulaşacağı öngörülmektedir.

## Şekil 22. Kişi Başına Çelik Tüketimi (Kg/Kişi)



Bu büyüme varsayımlarıyla, Türkiye'nin şu anda İsveç seviyesine yakın olan kişi başına çelik tüketimi, Avusturya'nın mevcut seviyesine yükselecektir.

Şekil 23. Ülkelere Göre Kişi Başına Çelik Tüketimi (Kg/Kişi)<sup>50</sup>

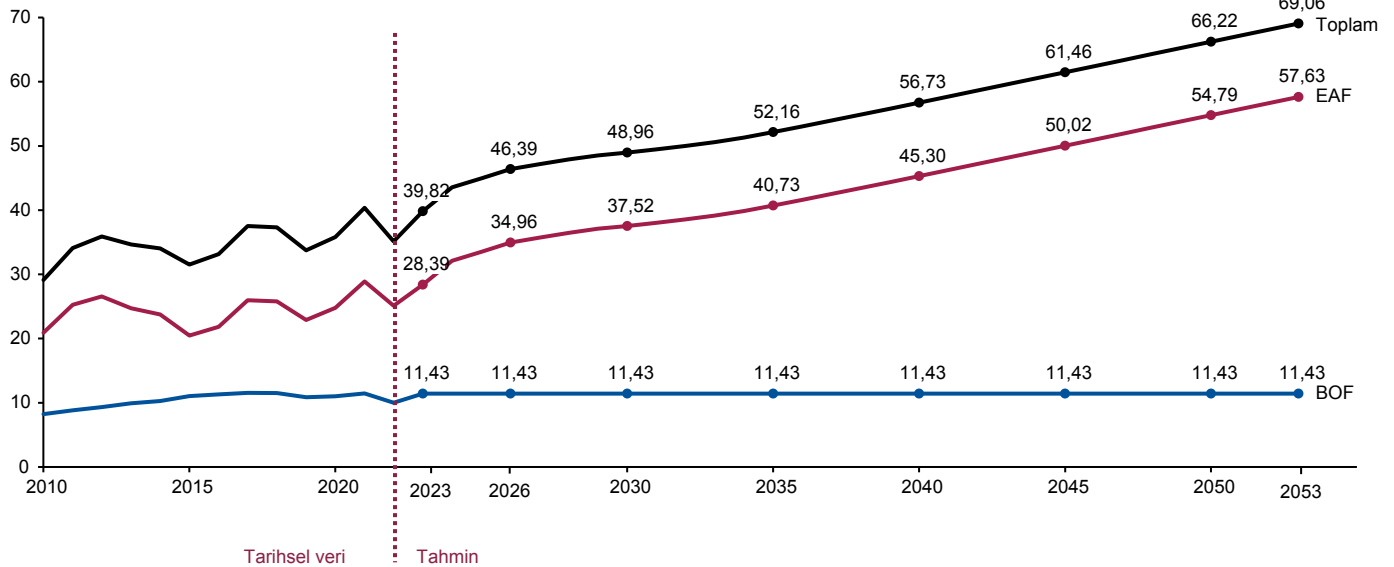


### Üretim Yöntemine Göre Üretim Tahminleri (Ham Çelik)

Türkiye'nin ham çelik üretim tahminleri, ithalat ve ihracat varsayımları kullanılarak geliştirilmiştir. LCP senaryosunda, üretim dönemi boyunca ulusal ETS'nin AB ETS fiyatlarından daha düşük olacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla, AB SKDM'nin ihracat üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri, referans senaryoya kıyasla toplam üretim rakamlarını bir miktar düşürecektir. Bu senaryoda, artan çelik talebinin büyük

ölçüde sadece EAF kullanılarak üretilen çelik miktarındaki artışla karşılanacağı varsayılmaktadır. Bu nedenle, projeksiyon dönemi boyunca BOF çelik üretim oranı azalırken, EAF yöntemiyle üretilen çeliğin payı artacaktır. EAF kullanılarak üretilen çelik miktarının 2023 yılında %71,3'ten 2053 yılında %83,4'e yükseleceği tahmin edilmektedir. 2053'teki toplam 69,06 milyon ton ham çelik üretiminin 57,63 milyon tonunun EAF yöntemiyle, 11,43 milyon tonunun ise BOF yöntemiyle üretileceği öngörülmektedir.

Şekil 24. LCP Senaryosunda Üretim Yöntemine Göre Üretim Tahmini (Milyon Ton)



<sup>50</sup>World Steel Association (2022). <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/> adresinden alınmıştır.

Dünya Ekonomik Forumu, 2050 yılına kadar küresel çelik talebinde %30'luk bir büyüme öngörmekte<sup>51</sup> ve bu artışın özellikle Hindistan ve Afrika ve Güneydoğu Asya ülkelerinde görülmesini beklemektedir. Öte yandan, IEA Hindistan'ın çelik üretiminde 2050 yılına kadar üç-dört katlık bir artış olmasını ve bu artışla birlikte ülkenin küresel çelik üretimindeki büyümede öncü olmasını beklemektedir.<sup>52</sup> Ajans ayrıca Latin Amerika, Afrika ve Asya'daki gelişmekte olan ülkelere ilişkin varsayımlarda bulunarak, farklı senaryolarda 2050 yılına kadar ilgili ülkelerin çelik üretiminde iki kat ila dört katın üzerinde büyüme beklemektedir. 2022 yılı itibarıyla, Türkiye 35 milyon tonun üzerinde çelik üretimiyle dünya ham çelik üretiminin %1,92'sini gerçekleştirmiştir. Proje kapsamında yapılan sektörel büyüme projeksiyonlarına göre, diğer gelişmekte olan ve yükselen ülkelere benzer şekilde, Türkiye çelik sektörünün de üretimde iki kat büyüme kaydetmesi ve 2053 yılına kadar ~70 milyon ton ham çelik üretimine ulaşması beklenmektedir.

### 2.3. Düşük Karbonlu Çelik Üretim Teknolojileri

Çelik üretimini daha düşük karbonlu hale getirmek için birden çok yoldan bahsedilebilir. Ancak bu dönüşüm, ülkenin ve şirketin kendine has özelliklerine de bağlı olarak, teknolojik seçeneklerinin tek tek veya bir arada kullanılmasını gerektirmektedir.

Çelik üreticileri, yeni teknolojilerin ve daha düşük emisyonlu girdilerin kullanılmasıyla proses ve enerji verimliliğini artırarak CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltabilir. Emisyonları büyük ölçüde azaltmanın bir yöntemi, yeni teknolojileri üretim sürecine hızla entegre etmektir. Bazı düşük karbonlu çelik üretim teknolojileri bugün ticari olarak kullanıma hazırken, bazıları da henüz pilot/demo veya Ar-Ge aşamasındadır. Hidrojen ve karbon yakalama, emisyonları sıfıra yaklaştırabilecek kilit teknolojiler olmakla beraber, bunların dünyada ancak 2020'lerin sonunda veya 2030'ların başında ticarileşmesi beklenmektedir.

Çelik üretim teknolojileri, üretim yöntemleri (EAF, BOF/YF) ve süreçleri bazında literatür taramasıyla ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda teknolojiler; enerji tasarrufu potansiyeli, CO<sub>2</sub> emisyonu azaltma potansiyeli, (literatüre dayalı) CAPEX & OPEX ve gelişme durumu/teknoloji olgunluğu gibi konular bazında haritalandırılmıştır.

Düşük karbonlu çelik üretim teknolojilerinin ticarileşme yılları en güncel uluslararası kaynakların taranması yoluyla elde edilmiş, bu bilgiler sektör paydaşlarının ve proje uzmanlarının görüşleri doğrultusunda (gerekli durumlarda) güncellenmiş ve buna bağlı olarak teknolojilerin olası giriş zamanlarına yönelik kabuller yapılmıştır. Türkiye çelik sektörünün düşük emisyonlu üretime geçiş senaryolarına girdi sağlamak ve ilgili etkileri modellemek için teknolojiye giriş yılları ve azami penetrasyon oranları tanımlanmıştır. Teknoloji giriş yılları ve bunların gelecekteki üretimdeki paylarının öngörülmesi için TÇÜD öncülüğünde iki çalıştay gerçekleştirilmiştir. Bu çalıştaylar sırasında hem BOF/YF hem de EAF üreticilerinden temsilciler teknoloji detayları, teknolojilerin Türk Çelik Sektörü'nde devreye giriş yılları ve üretimdeki maksimum payları (penetrasyon tavanı hakkında görüşlerini bildirmişlerdir).

### Teknoloji Arketipleri (MPP'nin Tanımladığı Teknoloji Arketipleri)

Çeşitli süreçler için girdi kombinasyonlarını tanımlayan teknoloji arketipleri, Mission Possible Partnership<sup>53</sup> (MPP) teknoloji çerçevesi referans alınarak değerlendirilmiştir. Örnek alınan bu teknoloji çerçevesi Türkiye çelik sektörünün, hem BOF/YF hem de EAF üretim rotasında, düşük karbonlu üretimi için bir referans olarak kullanılmıştır.

### BOF/YF Teknolojileri

Standart BOF/YF teknolojilerine ek olarak, bu üretim rotasının modellenmesinde 11 teknoloji arketipi kullanılmıştır. Bu teknolojilerin kısa açıklamaları sağda sunulmaktadır.

<sup>51</sup><https://www.weforum.org/reports/the-net-zero-industry-tracker/in-full/steel-industry/> adresinden alınmıştır.

<sup>52</sup>[https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron\\_and\\_Steel\\_Technology\\_Roadmap.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf) adresinden alınmıştır.

<sup>53</sup><https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf> adresinden alınmıştır.

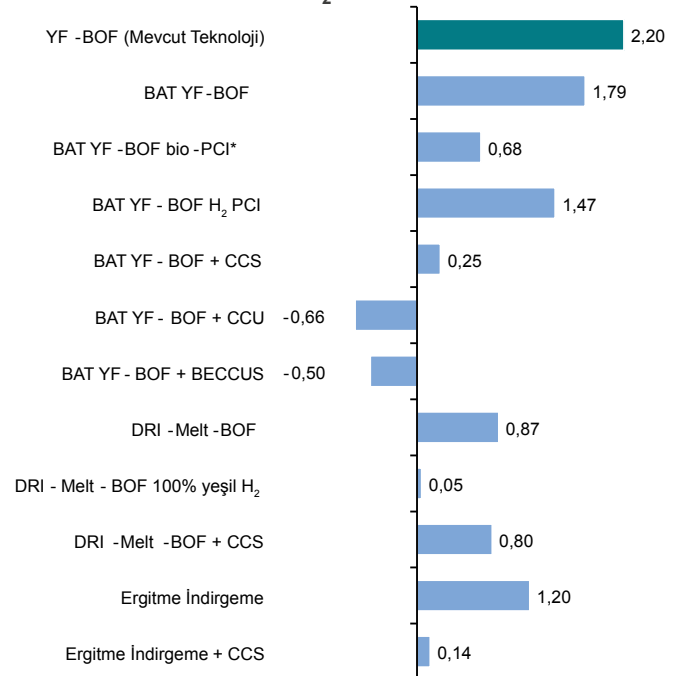
**Tablo 4. BOF/YF Teknolojilerinin Kısa Tanımları**

Teknoloji Adı	Tanım
<b>BAT YF-BOF</b>	Entegre tesislerde mevcut en iyi proses teknolojilerinin kullanılması
<b>BAT YF-BOF bio-PCI</b>	Pulverize kömür enjeksiyonunun yerine ön işlemde geçirilmiş biyokütle kullanılması (ör. odun kömürü)
<b>BAT YF-BOF H<sub>2</sub> PCI</b>	Pulverize kömür enjeksiyonunun yerine hidrojen kullanılması
<b>BAT YF-BOF + CCS</b>	Entegre tesislerde karbon yakalama ve depolama kullanılması
<b>BAT YF-BOF + CCU</b>	Entegre tesislerde karbon yakalama ve kullanma teknolojisinin kullanılması
<b>BAT YF-BOF + BECCUS</b>	Entegre tesislerde karbon yakalama, depolama ve kullanma ile birlikte biyoenerji kullanılması
<b>DRI-Melt-BOF</b>	Entegre tesisin yerini doğal gaz bazlı DRI'nın alması
<b>DRI-Melt-BOF 100% yeşil H<sub>2</sub></b>	Entegre tesisinin yerini %100 yeşil hidrojen bazlı DRI'nın alması
<b>DRI-Melt-BOF + CCS</b>	Doğal gaz bazlı BOF-DRI ile karbon yakalama ve depolama kombinasyonunun kullanılması
<b>Ergitme indirgeme</b>	Kok kömürü olmadan sıvı metal üretimi
<b>Ergitme indirgeme + CCS</b>	Ergitme indirgeme teknolojisinin karbon yakalama ve depolama ile birlikte kullanılması

Bahsedilen YF/BOF teknolojileriyle ilişkilendirilen emisyon oranları, sağ taraftaki grafikte gösterilmektedir. İlgili teknolojilerin Türkiye çelik sektörü için devreye giriş yılları, penetrasyon oranları, girdi kullanım gereklilikleri ve yatırım maliyetleri (CAPEX ve OPEX), önümüzdeki 30 yılı kapsayan planlama döneminde farklı senaryolar altında yol haritasını belirleyecek optimizasyon modeline girdi sağlamıştır.

Farklı senaryolar bazında, bu teknolojiler için öngörülen teknoloji giriş yılları ve penetrasyon üst sınırları aşağıdaki tabloda detaylandırılmıştır. Agresif FTS senaryosunda teknolojiye giriş yılları daha erken ve küresel kaynakların tahminlerine daha yakinken, daha gerçekçi LCP senaryosunda teknolojiye giriş yılları Türkiye'nin ilgili teknolojiye hazır olması beklenen yıllar olarak belirlenmiştir. Genel olarak, teknolojilerin Türkiye'de 5-10 yıl gecikmeyle uygulanacağı varsayılmaktadır. Bu varsayımlar, TÇÜD tarafından düzenlenen teknoloji çalışmaları sırasında sektör temsilcileriyle yapılan istişarelere dayanmaktadır. Entegre tesislerden temsilciler, sadece daha küçük yüksek fırınlarda uygulanabilen BAT YF-BOF bio-PCI teknolojisinin kendi yüksek fırınlarında uygulanamayacağını belirtmişlerdir. Bu nedenle, BOF rotası için teknoloji öngörü senaryolarında bu teknolojiye öncelik verilmemiştir.

**Şekil 25. BOF/YF Rotası için Ton Çelik Üretimi Başına Ortalama Emisyon Değerleri (Kapsam 1&2), (Ton CO<sub>2</sub>)<sup>54</sup>**



<sup>54</sup>MPP, Making Net Zero Steel Possible Raporu & Koolen, D. and Vidovic, D., Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners, EUR 31112 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-53417-4, doi:10.2760/170198, JRC129297.

**Tablo 5. BOF/YF Rotası için Teknoloji Giriş Yılı ve Teknolojinin Üretimde Maksimum Pay Öngörülleri**

MPP		Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu			En İyi Teknolojiler Senaryosu		
Teknoloji	Ticari Olarak Kullanılabilir Yıl	Ticari Ortak Kullanılabilir Yıl	Üretimde Maksimum Pay (% , 2030)	Üretimde Maksimum Pay (% , 2053)	Ticari Ortak Kullanılabilir Yıl	Üretimde Maksimum Pay (% , 2030)	Üretimde Maksimum Pay (% , 2053)
YF-BOF (Mevcut Teknoloji)	2020	2020	100	100	2020	100	100
BAT YF-BOF	2020	2025	50	100	2020	100	100
BAT YF-BOF bio-PCI*	2020	2055			2035		30
BAT YF-BOF H <sub>2</sub> PCI	2020	2035		50	2030		100
BAT YF-BOF + CCS	2025	2043		50	2038		100
BAT YF-BOF + CCU	2028	2043		50	2038		100
BAT YF-BOF + BECCUS	2028	2055			2043		30
DRI-Melt-BOF	2028	2036		50	2031		100
DRI-Melt-BOF 100% yeşil H <sub>2</sub>	2026	2036		50	2031		100
DRI-Melt-BOF + CCS	2026	2043		50	2038		100
Ergitme azaltma	2028	2045		50	2040		100
Ergitme azaltma + CCS	2030	2045		50	2040		100

## EAF Teknolojileri

Standart EAF teknolojilerine ek olarak, bu üretim rotasının modellenmesinde 7 farklı teknoloji arketipi kullanılmıştır. Bu teknolojilerin kısa açıklamaları aşağıda sunulmaktadır.

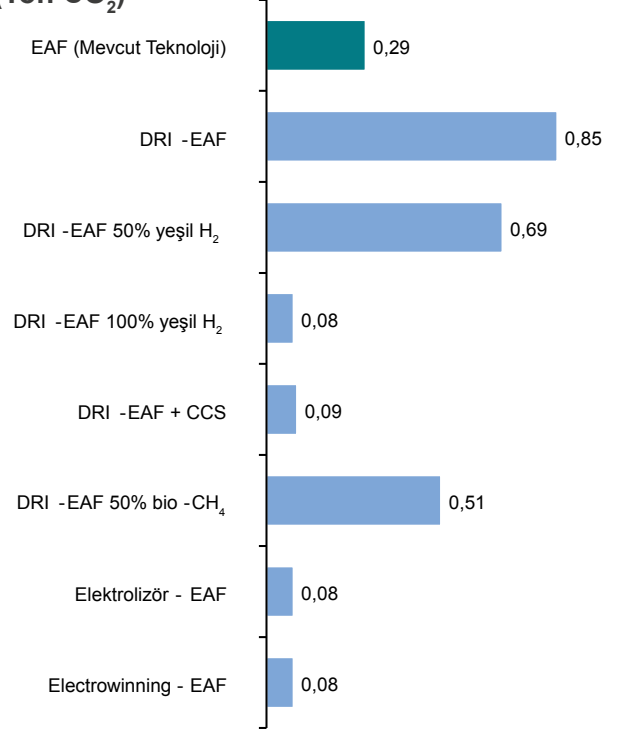
**Tablo 6. EAF Teknolojilerinin Kısa Tanımları**

Teknoloji Adı	Tanım
<b>DRI-EAF</b>	EAF tesislerinde doğal gaz bazlı DRI kullanılması
<b>DRI-EAF 50% yeşil H<sub>2</sub></b>	EAF tesislerinde %50 doğal gaz ve %50 yeşil hidrojen bazlı DRI kullanılması
<b>DRI-EAF 100% yeşil H<sub>2</sub></b>	EAF tesislerinde %100 yeşil hidrojen bazlı DRI kullanılması
<b>DRI-EAF + CCS</b>	Doğal gaz bazlı EAF-DRI ile karbon yakalama ve depolama kombinasyonu kullanılması
<b>DRI-EAF 50% bio-CH<sub>4</sub></b>	EAF tesislerinde %50 doğal gaz ve %50 biyometan kullanılması
<b>Elektrolizör-EAF</b>	Alüminyum eritme işlemine benzer yüksek sıcaklıkta demir cevheri elektrolizi
<b>Electrowinning-EAF</b>	Alkali çözelti ile düşük sıcaklıkta demir cevheri elektrolizi

Bahsedilen EAF teknolojileriyle ilişkilendirilen emisyon oranları, sağ taraftaki grafikte gösterilmektedir. BOF teknolojilerinde olduğu gibi, EAF rotası için alternatif teknolojiler de uzun vadeli optimizasyon modeli senaryolarında dikkate alınmıştır.

Bu teknolojiler için senaryo bazlı teknoloji giriş yılları ve penetrasyon üst sınırları aşağıdaki tabloda detaylandırılmıştır. Teknoloji giriş yılları, senaryo gerekliliklerine bağlı olarak Türkiye çelik sektörünün teknolojiye hazır olacağı yıllar olarak belirlenmiştir. Bazı teknolojiler her iki senaryoda da erken devreye alınabilirken, yerel endüstri uzmanlarına danışıldıktan sonra DRI-EAF %50 bio-CH<sub>4</sub> ve elektrowinning gibi bazı teknolojilerin 2053 yılına kadar devreye alınması beklenmemektedir.

**Şekil 26. EAF Rotası için Ton Çelik Üretimi Başına Ortalama Emisyon Değerleri (Kapsam 1 & 2), (Ton CO<sub>2</sub>)<sup>55</sup>**



**Tablo 7. EAF Rotası için Teknoloji Giriş Yılı ve Teknolojinin Üretimde Maksimum Pay Öngörülleri**

MPP		Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (LCP)			En İyi Teknolojiler Senaryosu (FTS)		
Teknoloji	Ticari Olarak Kullanılabilir Yıl	Ticari Olarak Kullanılabilir Yıl	Üretimde Maksimum Pay (% , 2030)	Üretimde Maksimum Pay (% , 2053)	Ticari Olarak Kullanılabilir Yıl	Üretimde Maksimum Pay (% , 2030)	Üretimde Maksimum Pay (% , 2053)
EAF (Mevcut Teknoloji)	2020	2020	100	100	2020	100	100
DRI-EAF	2020	2030		70	2025	50	100
DRI-EAF 50% yeşil H <sub>2</sub>	2026	2036		70	2031		100
DRI-EAF 100% yeşil H <sub>2</sub>	2026	2036		70	2031		100
DRI-EAF + CCS	2028	2043		50	2038		100
DRI-EAF 50% bio-CH <sub>4</sub>	2028	2070			2070		
Elektroliz-EAF	2035	2050		50	2045		30
Electrowinning-EAF	2035	2055			2050		

<sup>55</sup>MPP, Making Net Zero Steel Possible Raporu & Koolen, D. and Vidovic, D., Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners, EUR 31112 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-53417-4, doi:10.2760/170198, JRC129297.

## 2.4. 2053'e Kadar Düşük Karbon Senaryoları

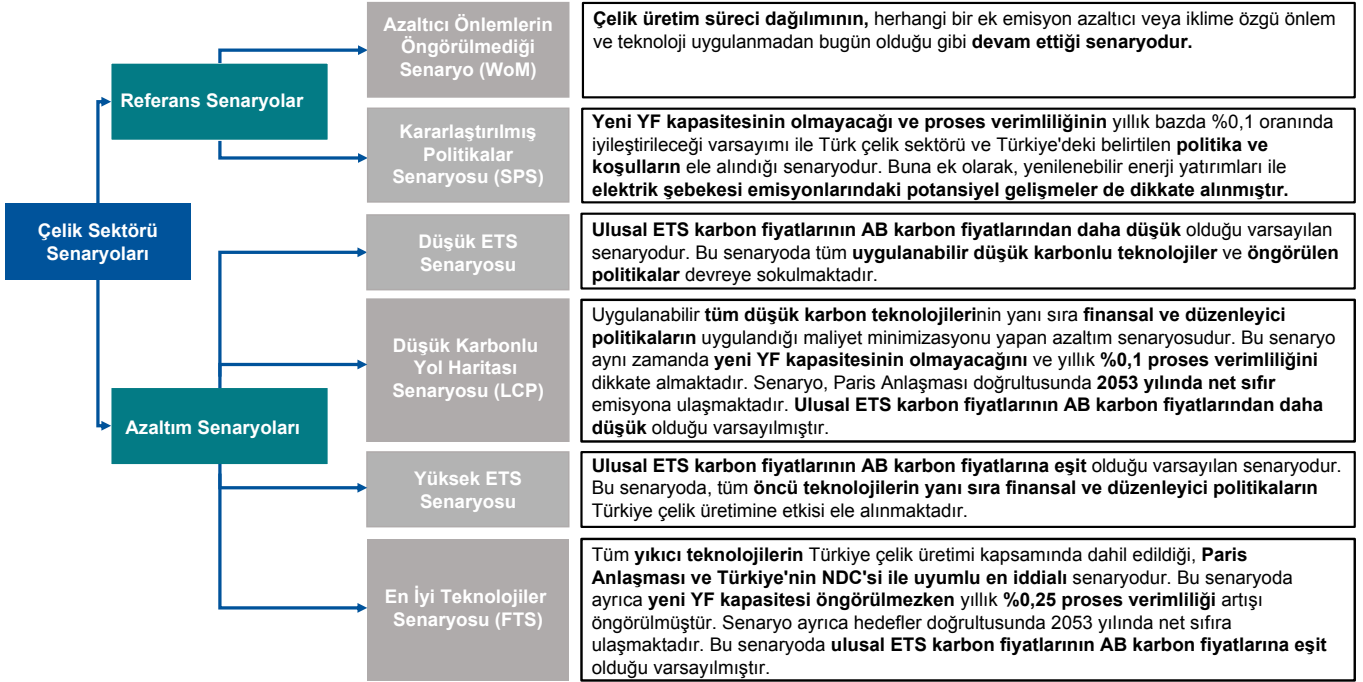
Proje kapsamında çelik sektörü emisyonlarının azaltılması için gereken teknoloji yatırımlarının ve politika eylemlerinin farklı boyutlarını ele alan iki senaryo seti kullanılmaktadır:

**Referans senaryolar** alternatif senaryolar için bir kıyas noktası olarak işlev görmektedir. Bunlardan, Azaltıcı Önlemlerin Öngörülmediği Senaryo (WoM), üretimin herhangi bir emisyon azaltıcı uygulama ya da teknoloji entegrasyonu öngörülmeden devam ettiği senaryodur. Diğer bir referans senaryo olan Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosunda (SPS) ise açıklanmış olan politikalara ek olarak süreç verimliliğinde beklenen artış, AB SKDM kısıtlamaları ve ETS'nin yakın gelecekte uygulamaya konulmasının potansiyel etkileri gibi parametreler göz önünde bulundurulmuştur.

**Azaltım senaryoları**, düşük karbonlu üretime geçiş için radikal politika ve teknolojik değişiklikler öngörmektedir. Kurulması planlanan ulusal ETS'nin etkilerini gözlemlemek için farklı ETS fiyatlarını baz alan iki senaryo oluşturulmuştur. Bunlar; AB ETS'den daha düşük bir ETS fiyatını ve teknolojik dönüşümü dikkate alan Düşük ETS senaryosu ve AB ETS karbon fiyatına eşit bir ETS fiyatı ve daha agresif bir teknolojik dönüşüm öngören Yüksek ETS senaryosudur.

Bunlara ek olarak, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda, Türkiye çelik sektörü için iki farklı net sıfır senaryosu daha geliştirilmiştir. Tüm uygulanabilir düşük karbon teknolojilerinin yanı sıra öngörülen politikaların tanımlandığı en düşük maliyetli azaltım senaryosu olan LCP Türkiye çelik sektörünün düşük karbonlu dönüşümü için en optimal senaryo olarak kabul edilmektedir. Daha agresif bir senaryo olan FTS ise, yıkıcı teknolojilerin daha erken devreye girmesi ve daha yüksek penetrasyon oranı varsayımları ile LCP Senaryosundan ayrılmaktadır.

**Şekil 27. Çelik Sektörü Senaryoları**



## Senaryo Bazlı Varsayımlar

### Hurda & Demir Cevheri Fiyat Projeksiyonu

Modelleme çalışması kapsamında hurda ve demir cevheri fiyatları tahmin edilmiştir. Demir cevheri fiyatları, mevcut Türkiye fiyatlarına yakınsayan Çin'in demir cevheri

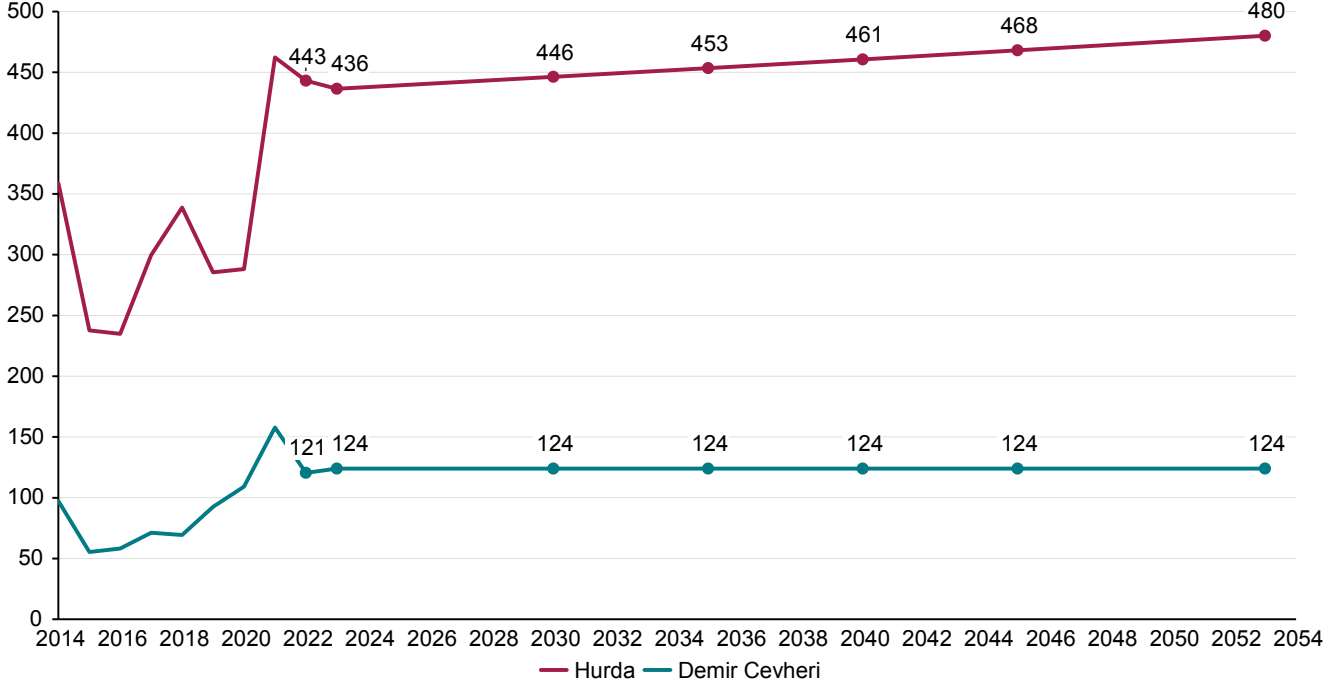
fiyatlarına dayanmaktadır. Hurda çelik, sektörün en önemli hammaddelerinden biridir. Ülkelerin emisyon azaltma ve karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda, hurda çeliğe olan talebin önümüzdeki yıllarda artması beklenmektedir. Bu nedenle modelleme çalışmasında hurda çelik fiyatının demir cevherine kıyasla nispeten artacağı varsayılmıştır.



Demir cevheri fiyatının geçmiş yıllarda daha az dalgalandığı göz önünde bulundurularak modelleme çalışması süresinde demir cevheri fiyatı en güncel veri olan 2022 yılının fiyatında sabit

tutulmuştur. Öte yandan, fiyattaki yüksek dalgalanma ve artan talep nedeniyle hurda çelik fiyatının 2023 yılında 435 dolara 2053 yılında 480 dolara yükseleceği öngörülmektedir.

## Şekil 28. Hurda ve Demir Cevheri Fiyat Tahmini (Dolar/Ton)

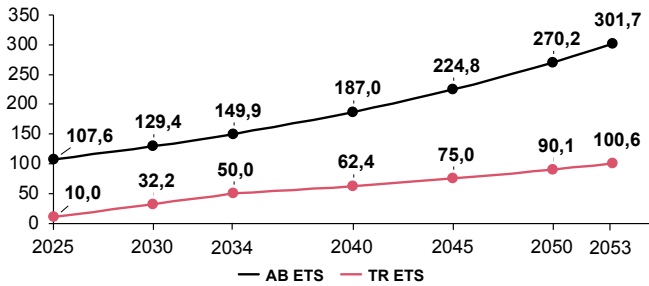


## Türkiye için Karbon Fiyatı Projeksiyonları

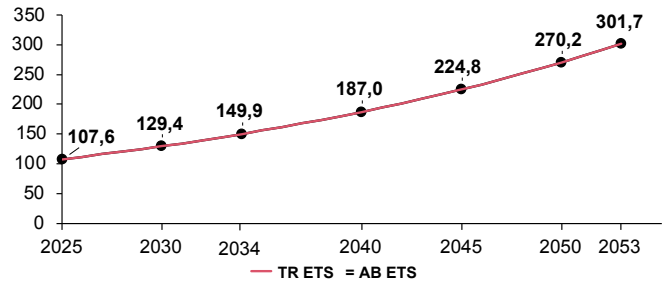
CBAM ve planlanan ulusal ETS için farklı tahminler göz önünde bulundurularak iki farklı karbon fiyatı projeksiyonu geliştirilmiştir. İlk projeksiyonda (varsayımlar: SPS, Düşük ETS ve LCP senaryosu için Düşük ETS fiyatları, TR ETS<AB ETS), Türkiye'deki karbon fiyatlarının 2025 yılında 10 Avro'dan başlayıp 2034 yılında 50 Avro'ya ulaşacağı ve sonrasında AB karbon fiyatları ile aynı hızda artacağı öngörülmektedir. İkinci projeksiyonda ise (varsayımlar: daha agresif olan Yüksek ETS ve FTS senaryosu için yüksek ETS fiyatları, TR ETS=AB ETS), Türkiye karbon fiyatının 2025 yılından itibaren AB karbon fiyatları ile aynı olacağı öngörülmektedir.

## Şekil 29. Türkiye Karbon Fiyat Projeksiyonları

### Projeksiyon 1: Düşük ETS Fiyatları, € (SPS, Düşük ETS ve LCP için)



### Projeksiyon 2: Yüksek ETS Fiyatları, € (Yüksek ETS ve FTS için)

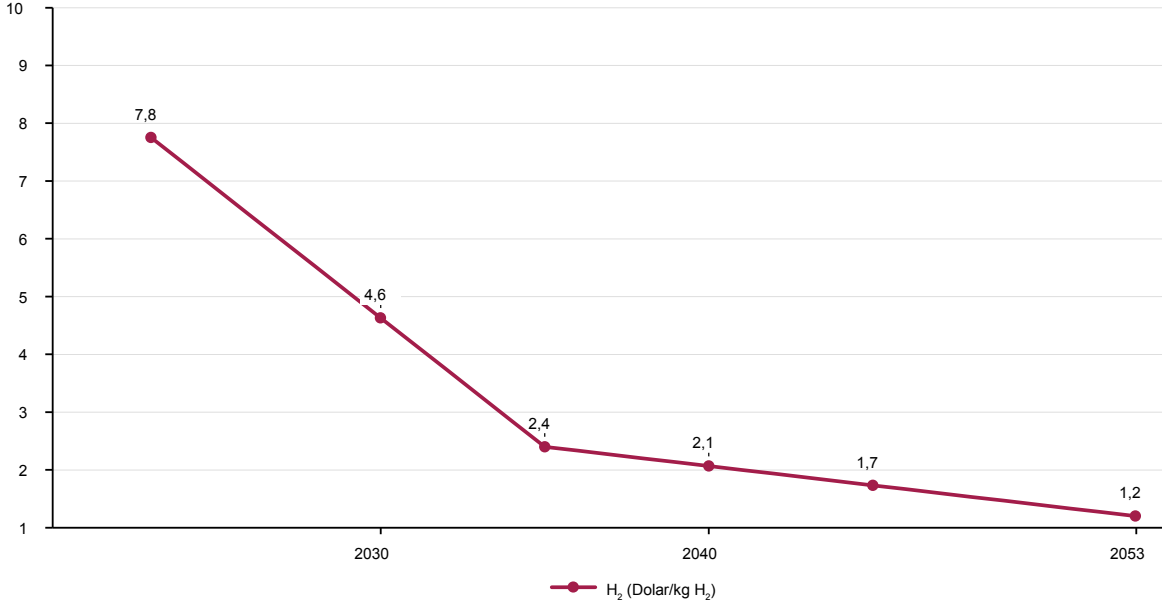


Karbon fiyatı projeksiyon çalışması, EBRD'nin "Sınırdaki Karbon Düzenlemesi Mekanizması'nın Türkiye Ekonomisi'ne Olası Etkileri" Raporu'ndan faydalanmış, sonuçlar ise proje paydaşları olan Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve EBRD ile birlikte değerlendirilmiştir.

## Hidrojen Fiyat Projeksiyonu

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, iklim değişikliği ile mücadeleye, Türkiye'nin net sıfır hedefine ve sürdürülebilir enerji geleceğine katkısı nedeniyle hidrojeni öncelikli alanlardan biri olarak belirlemiş, "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" raporunu yayınlamıştır. 2053 yılına kadar hidrojen fiyatlarının bir projeksiyonunu yapan modelleme çalışması, ulusal hedef olan yeşil hidrojen üretim maliyetinin 2035 yılına kadar 2,4 dolar/kg H<sub>2</sub>'nin altına ve 2053 yılına kadar 1,2 dolar/kg H<sub>2</sub>'nin altına düşürülmesi ulusal hedefini dikkate almıştır.

### Şekil 30. Hidrojen Fiyat Projeksiyonu



## Girdi Fiyat Projeksiyonları

Farklı teknolojilerde kullanılan girdi (yakıt, hammadde vb.) fiyatları, MPP (Mission Possible Partnership),<sup>56</sup> Steelonthenet,<sup>57</sup> SteelOrbis<sup>58</sup> ve IEA (International Energy Agency)<sup>59</sup> kaynaklarından elde edilen verilerin, uzman ve paydaş görüşleri ile güncellenmesi sonrası modele entegre edilmiştir. Girdi fiyatları aylık ve hatta haftalık bazda büyük dalgalanmalar gösterebilmektedir. Bu projede, fiyatları önemli ölçüde etkileyecek bir eğilim olmadığı sürece fiyatların sabit kalacağı varsayılmış ve enflasyona göre düzeltilmiş reel fiyatlar kullanılmıştır. MPP veri setinde yer alan ve modellemede doğrudan girdi olarak kullanılan parametreler şu şekildedir: Yüksek fırın / bazik oksijen fırını gazı, kok fırını gazı (COG), biyokütle, elektrik, buhar, yüksek fırın cürufu, diğer cüruf. MPP'de doğrudan mevcut olmayan veriler diğer kaynaklardan elde edilmiş veya MPP verileri kalibre edilerek türetilmiştir. Bu şekilde elde edilen veriler: kok kömürü, termal kömür, metalürjik kömür ve doğal gazdır.

## Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü Projeksiyonu

Türkiye'nin İletim Hattı Bağlantılı Tüketim Şebeke Emisyon Faktörü, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafında

2020 yılı için 0,447 tCO<sub>2</sub>/MWh olarak açıklanmıştır.<sup>60</sup> Model çalışması kapsamında ise bu şebeke emisyon faktörü, Ocak 2023'te açıklanan Ulusal Enerji Planı'nda belirlenen azaltım hedefleri ve Türkiye'nin güncellenen NDC hedefleri doğrultusunda ileriye dönük olarak hesaplanmıştır. Buna göre, şebeke emisyon faktörünün 2035 yılına kadar %41 oranında azalacağı ve 2035-2053 yılları arasında benzer şekilde %41 oranında düşeceği öngörülmüştür. Yapılan projeksiyona göre, 2053 yılı için şebeke emisyon faktörünün 0,0157t/MWh olacağı öngörülmektedir.

## 2.5. Sera Gazı ve Politika Etkileşim Modeli

### 2.5.1. Modelleme Yaklaşımı

Proje kapsamında hazırlanan çelik sektörü modeli, Türkiye çelik sektörü için çeşitli senaryoları analiz etmek üzere geliştirilmiş, çoklu hedef ve uzun vadeli hesaplama izin veren bir optimizasyon modelidir. Bu geniş ölçekli doğrusal programlama modeli, belirli bir emisyon hedefine ulaşırken teknolojik ve ekonomik kısıtlamalar altında toplam maliyeti minimumda tutmayı hedeflemektedir. Son olarak modelin çözüm aralığı 2020-2053 yılları arası olarak belirlenmiştir.

<sup>56</sup>[https://github.com/missionpossiblepartnership/mpp-steel-model/tree/main/mppsteel/data/import\\_data](https://github.com/missionpossiblepartnership/mpp-steel-model/tree/main/mppsteel/data/import_data)

<sup>57</sup><https://www.steelonthenet.com/>

<sup>58</sup><https://www.steelorbis.com/price-forecasters/orbis-HRC-CIS-export-forecaster/>

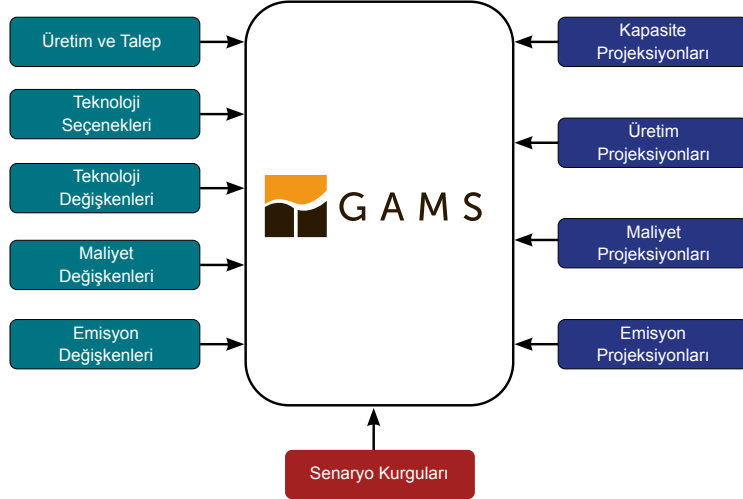
<sup>59</sup><https://www.iea.org/>

<sup>60</sup><https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri>

Optimizasyon modelinin genel çerçevesi Şekil 31'de gösterilmektedir. Görselde aktarıldığı şekilde, GAMS (Genel Cebirsel Modelleme Sistemi) kullanılarak geliştirilen optimizasyon modeli; talep projeksiyonları, mevcut ve gelecekteki teknolojik seçenekler, bunların maliyetleri ve teknik özellikleri ile emisyon parametreleri gibi çeşitli girdi setleri kullanmaktadır. Bu şekilde kurulmuş olan optimizasyon

modeli, geliştirilen senaryolara göre çalıştırılmaktadır. Model tarafından üretilen çözüm; öngörülen talebi, teknoloji tipi bazında üretimi, senaryolar bazında yıllık, nominal ve net bugünkü toplam maliyeti ile toplam emisyonları karşılayan optimum kapasite projeksiyonunu – çözüm zaman aralığı için - ortaya koymaktadır.

**Şekil 31. Optimizasyon Modelinin Genel Çerçevesi**



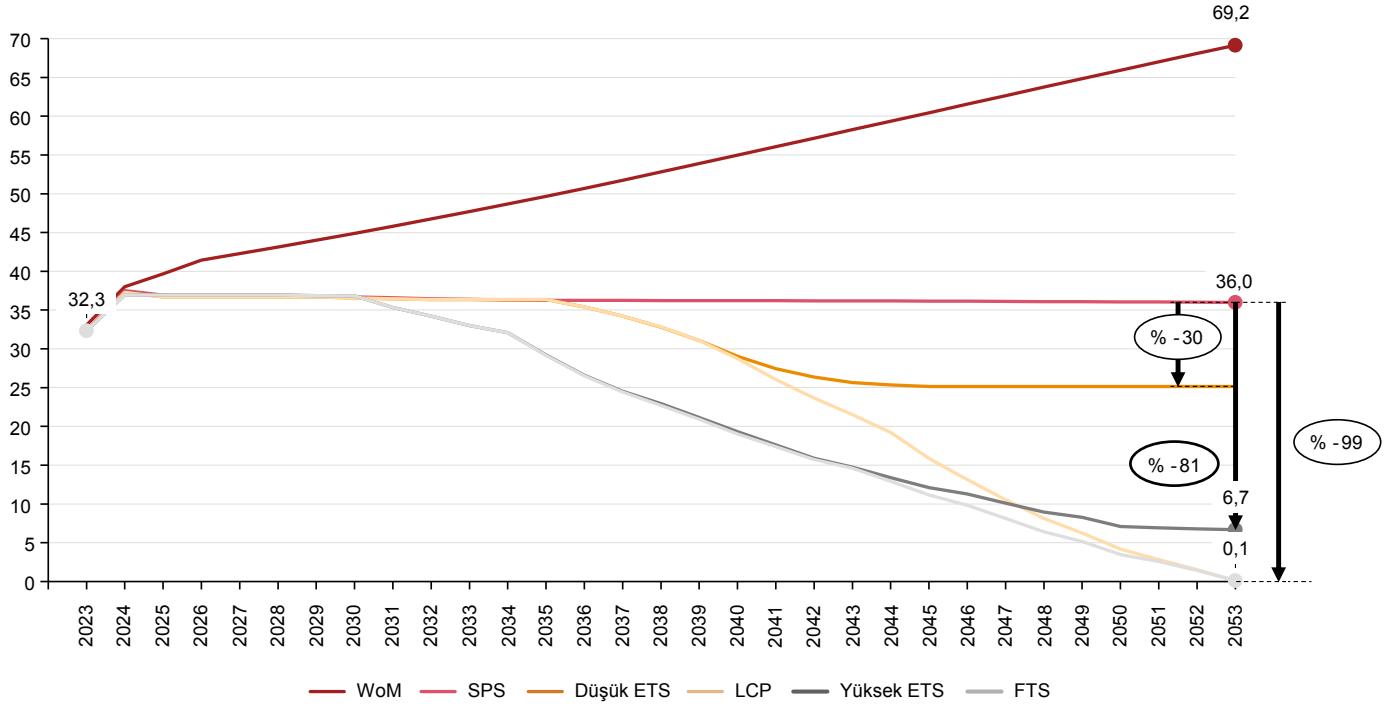
## 2.5.2. Model Sonuçları

Model çalışması yukarıda açıklanan kapsamda, farklı senaryolar için emisyon seviyeleri, maliyetler, teknoloji dönüşüm ve yatırım gereksinimleri ile iklim politikalarının bunlar üzerine etkisini tahminlemeyi amaçlamaktadır.

Bundan sonraki bölümde model sonuçları; emisyon, teknolojik dönüşüm, karbon maliyeti ve girdi gereksinim projeksiyonları lenslerinden detaylıca ele alınacaktır. 2.6. bölümde ise senaryolar çerçevesinde karbonsuzlaşmayı sağlamak için gereken yatırım ihtiyaçları detaylandırılmıştır. Emisyon bölümünde, Kapsam 1 ve 2 emisyonları ile senaryo bazlı emisyon azaltım varsayımları ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Yatırım bölümünde, gerekli yatırım, yakıt ve teknoloji fiyatı ilişkilendirilerek senaryolara dayalı olarak öngörülmektedir. Karbon fiyatları da dahil olmak üzere dönüşüm ihtiyacının Türkiye çelik sektörü için maliyeti de değerlendirilmektedir. Son olarak, dönüşüm bölümünde, EAF ve BOF rotaları için teknoloji dönüşümü, 2053 yılına kadar azaltım senaryolarına dayalı olarak incelenmiştir.

## Emisyonlar

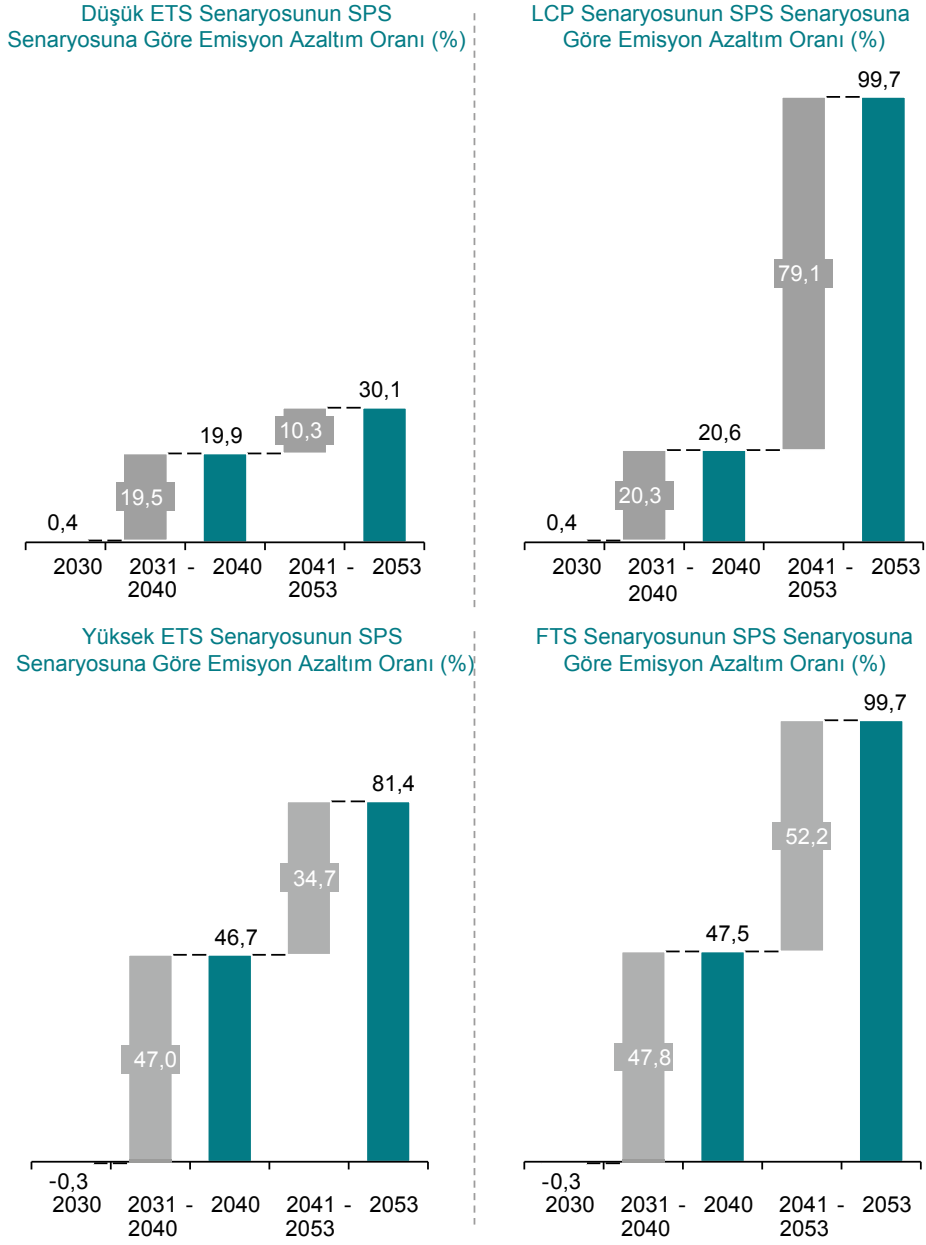
Senaryo bazlı emisyon tahminleri, farklı teknolojik dönüşüm patikaları altında Türkiye çelik sektörünün emisyon azaltım potansiyelinin anlaşılmasına yardımcı olacaktır. Hiçbir azaltım eyleminin ve teknolojik dönüşümün değerlendirilmediği WoM senaryosunda, emisyonların önemli ölçüde artması ve 2053 yılına kadar 69,1 milyon tona ulaşması beklenmektedir. WoM senaryosu en yüksek karbona neden olan senaryodur. SPS senaryosundaki toplam emisyonlar, şu anda belirtilenler dışında herhangi bir ek yatırım veya azaltım politikası uygulanmadığı varsayılarak, EAF kapasitesinin artması, şebeke emisyonlarının azalması ve verimlilik faktörleri sayesinde sabit kalmaktadır. SPS senaryosunda 2053 yılında 36 Mt CO<sub>2</sub> seviyesinde emisyon değerine ulaşılacağı tahmin edilmektedir. Düşük ETS senaryosuna göre, 2053 yılına kadar 25,1 Mt CO<sub>2</sub> azaltımı sağlanabilir ve bu da SPS senaryosuna kıyasla toplam emisyonlarda %30'luk bir azalmayı işaret etmektedir. Yüksek ETS senaryosunda ise daha yüksek karbon fiyatlarının daha agresif teknolojik dönüşümü zorlamasıyla daha da fazla emisyon azaltımının başarılabacağı tahmin edilmektedir ve emisyonların 2053 yılına kadar 6,7 Mt'a düşeceği öngörülmektedir, bu da SPS senaryosuna kıyasla %81'lik bir emisyon kesintisine tekabül etmektedir. Hem LCP hem de FTS senaryolarının önerdiği gibi, 2053 yılına kadar sıfır emisyonla ulaşmak için daha da radikal teknolojik yatırımlara ihtiyaç vardır.

Şekil 32. Senaryolara Göre Emisyon Tahminleri (Mt CO<sub>2</sub>)

Şekil 33'te Düşük ETS, Yüksek ETS, LCP ve FTS senaryoları için emisyon projeksiyonları SPS senaryosuyla karşılaştırılmaktadır. Azaltım senaryolarında, emisyon azaltımlarının yeni teknolojilerin devreye girmesiyle 2030'dan itibaren başladığı göze çarpmaktadır. Senaryolar kapsamında farklı teknoloji giriş yılları ve maksimum penetrasyon oranları tanımlanmış, bu da farklı emisyon azaltım projeksiyonlarına yol açmıştır. Modelleme sonuçlarına göre, LCP senaryosunda toplam emisyonlar 2040 yılına kadar %20,6 ve 2053 yılına kadar %99,7 oranında azaltılabilmektedir. LCP senaryosunda en önemli nokta, 2053 yılına kadar net sıfır hedefine ulaşmak için emisyon azaltımlarının çoğunun 2040 yılından sonra elde edileceğinin varsayılmasıdır. En agresif senaryo olan FTS senaryosunda ise teknolojilerin daha erken uygulanması beklendiğinden öngörülen emisyon azaltımı daha yüksektir. Bu nedenle, FTS senaryosu 2040 yılına kadar Türkiye'nin en son NDC hedefinden (2030'da %41 emisyon azaltımı) daha

yüksek olan %47,5'lik bir emisyon azaltımı sağlamaktadır. Öte yandan, Düşük ETS senaryosu ve Yüksek ETS senaryosunda emisyon azaltım oranları daha düşüktür ve senaryolar 2053 yılında net sıfır emisyona ulaşamamaktadır. Düşük ETS senaryosunda, toplam emisyonlar 2040 yılında %19,9 ve 2053 yılında %30,1 oranında azaltılabilmektedir. Yüksek ETS senaryosunda, 2040 yılındaki toplam emisyon azaltımı %46,7'ye ulaşarak Ulusal NDC hedeflerinden hâlâ daha yüksektir, ancak 2053 yılındaki toplam emisyon hâlâ net sıfıra ulaşamamaktadır. Teknoloji devreye giriş yıllarının daha erken olduğu FTS ve Yüksek ETS senaryolarının ikisinde de emisyon azaltımları 2040'lı yılların ortalarına kadar benzer ilerlemektedir. 2040'lı yılların ortalarında FTS senaryosunun CCUS teknolojisini devreye almasıyla beraber daha radikal bir azaltım sağlanmaya başlamıştır.

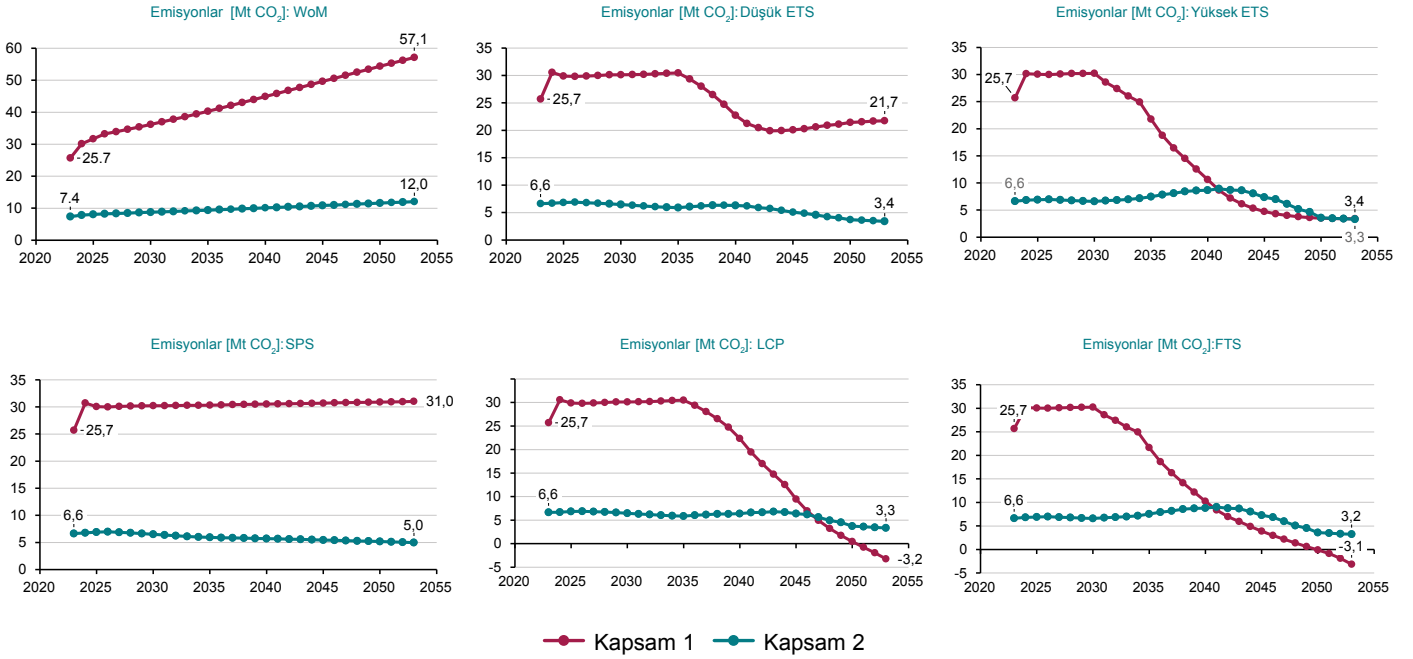
Şekil 33. SPS Senaryosuna Kıyasla Çelik Sektöründe Emisyon Azaltım Oranları (%)



Azaltım senaryoları için Kapsam 1 ve Kapsam 2 emisyonları ayrı ayrı modellenmiştir. WoM senaryosunda, 2053 yılında Kapsam 1 emisyonları 57,1 MtCO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır ve bu toplam emisyonların %83'üne tekabül etmektedir. Bu senaryoda, şebeke emisyon faktöründe herhangi bir değişiklik olmayacağı varsayılarak, tarihsel eğilimin devam etmesi sonucunda Kapsam 2 emisyonlarının 12,0 MtCO<sub>2</sub>'ye ulaşması beklenmektedir. SPS senaryosunda, Kapsam 1 emisyonlarının 31 Mt CO<sub>2</sub>'ye ulaştığı 2025 yılından sonra değişmesi beklenmemektedir. Elektrik şebekesi emisyonlarındaki kademeli düşüş nedeniyle, üretim rakamlarındaki büyümeye rağmen Kapsam 2 emisyonlarının 6,6 Mt CO<sub>2</sub>'den 5 Mt CO<sub>2</sub>'ye düşeceği öngörülmektedir.

Düşük ETS senaryosunda, elektrik şebekesi emisyonlarının azalması, yeni teknolojilerin devreye girmesi ve artan süreç verimliliği gibi faktörler nedeniyle Kapsam 1 ve 2 emisyonlarının azalması beklenmektedir. Buna ek olarak, Yüksek ETS, LCP ve FTS senaryolarında daha yüksek süreç verimliliği varsayımları, yıkıcı teknolojilerin erken tanıtımı ve daha yüksek penetrasyonu nedeniyle Kapsam 1 emisyonlarında daha radikal bir azalma gözlemlenmektedir. LCP ve FTS senaryolarında, 2053 yılında net sıfır hedefine ulaşabilmek için CCUS teknolojilerinin devreye alınması ve biyoyakıtların kullanılması ile birlikte Kapsam 1 emisyonları önce sıfıra, daha sonra negatif değerlere ulaşmaktadır.

### Şekil 34. Senaryolara Göre Kapsam 1 ve Kapsam 2 Emisyonları (Mt CO<sub>2</sub>)



## Teknolojik Dönüşüm

Optimizasyon modeli, farklı yatırım harcamaları, işletme giderleri, karbon fiyatı tahminleri ve belirli senaryolardaki emisyon limitleri ile birlikte, önümüzdeki 30 yıl için farklı teknolojik kombinasyonlar ortaya çıkarmaktadır. Yüksek

fırınların kapatılmayacağı ve 2050'lerin ötesine uzanan ömürlerinin sonuna kadar kullanılacağı varsayımı sebebiyle yüksek fırınlardan EAF rotasına herhangi bir kapasite geçişi beklenmemektedir. Modelleme çalışmasına göre birbiri arasında teknolojik geçiş yapabilen teknolojiler geçiş matrisinde listelenmiştir.

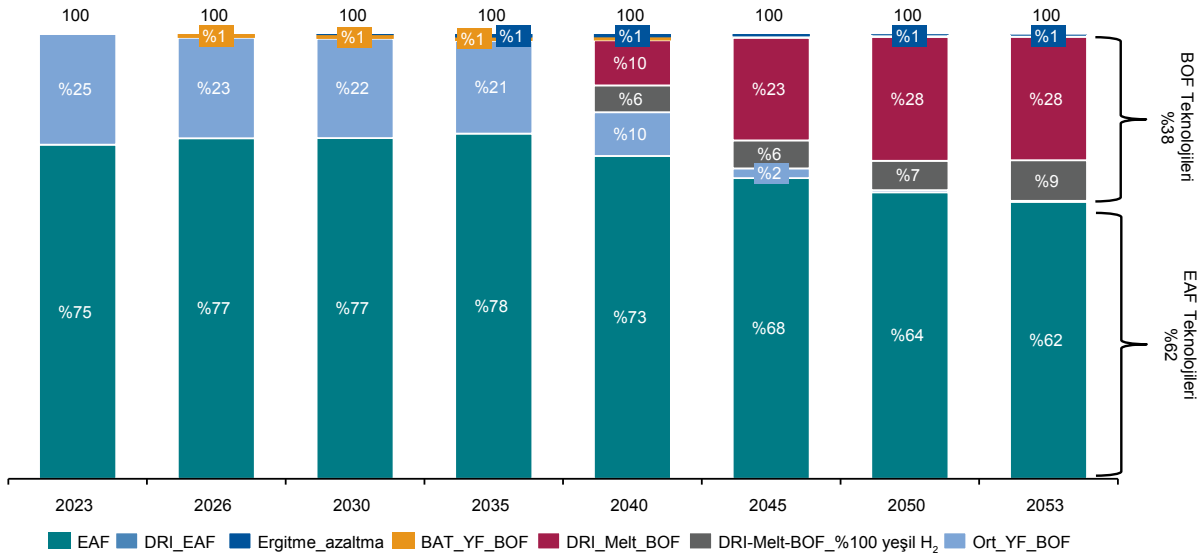
**Şekil 35. LCP ve FTS için Teknolojiler Arası Geçiş Matrisi**

	Ort. YF-BOF	BAT YF-BOF	BAT YF-BOF_bio PCI	BAT YF-BOF_H <sub>2</sub> PCI	BAT YF-BOF+BECCUS	BAT YF-BOF+CCU	BAT YF-BOF+CCUS	DRI-EAF	DRI-EAF_%100 yeşil H <sub>2</sub>	DRI-EAF_%50 bio -CH <sub>4</sub>	DRI-EAF_%50 yeşil H <sub>2</sub>	DRI-EAF+CCUS	DRI-Melt -BOF	DRI-Melt-BOF_%100 yeşil H <sub>2</sub>	DRI-Melt-BOF+CCUS	EAF	Elektroliz-EAF	Electrowinning-EAF	Ergitme azaltma	Ergitme azaltma+CCUS	
Ort. YF-BOF	1	1	1	1	1	1	1						1	1	1				1	1	
BAT YF-BOF		1	1	1	1	1	1						1	1	1				1	1	
BAT YF-BOF_bio PCI			1		1	1	1							1	1					1	
BAT YF-BOF_H <sub>2</sub> PCI				1	1	1	1							1	1					1	
BAT YF-BOF+BECCUS					1																
BAT YF-BOF+CCU						1															
BAT YF-BOF+CCUS							1														
DRI-EAF								1	1	1	1	1						1	1	1	1
DRI-EAF_%100 yeşil H <sub>2</sub>									1												
DRI-EAF_%50 bio-CH <sub>4</sub>									1	1		1						1		1	
DRI-EAF_%50 yeşil H <sub>2</sub>									1		1							1		1	
DRI-EAF+CCUS												1									
DRI-Melt-BOF													1	1	1						
DRI-Melt-BOF_%100 yeşil H <sub>2</sub>														1							
DRI-Melt-BOF+CCUS															1						
EAF								1	1	1	1	1				1	1	1			
Elektroliz-EAF																	1				
Electrowinning-EAF																		1			
Ergitme azaltma																			1	1	
Ergitme azaltma+CCUS																				1	

Düşük ETS senaryosunda yeni teknolojiler çoğunlukla 2030'lerden sonra sisteme dâhil edilmektedir. Bu senaryoda EAF çelik üretiminde en büyük paya sahip olmaya devam etmektedir. EAF'nin üretimdeki payı 2035 yılında %75'ten %78'e çıkmaktadır. Ancak hurda fiyatlarındaki artış ve yeni BOF teknolojilerinin kullanılmaya başlanmasıyla birlikte EAF'nin üretimdeki payı yıllar içinde %62'ye düşmektedir. EAF-DRI teknolojisi 2029 ve 2040 yılları arasında kullanılmaya başlanmıştır, ancak üretimde düşük bir paya

sahiptir. Geleneksel BOF üretimi ise yıllar içinde yeni BOF teknolojilerine yükseltilmektedir. Bu geçiş esas olarak DRI entegrasyonu yoluyla sağlanmaktadır. 2053 yılına kadar üretimin %62'si geleneksel EAF ile, %28'i doğal gaz girdisi kullanan DRI-BOF ile ve geri kalanı da hidrojen girdisi kullanan DRI-BOF ile yapılmaktadır. Yenilikçi bir teknoloji olan ergitme indirgeme teknolojisi 2045 yılında çok düşük bir payla da olsa üretime dahil olmuştur.

Şekil 36. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): Düşük ETS

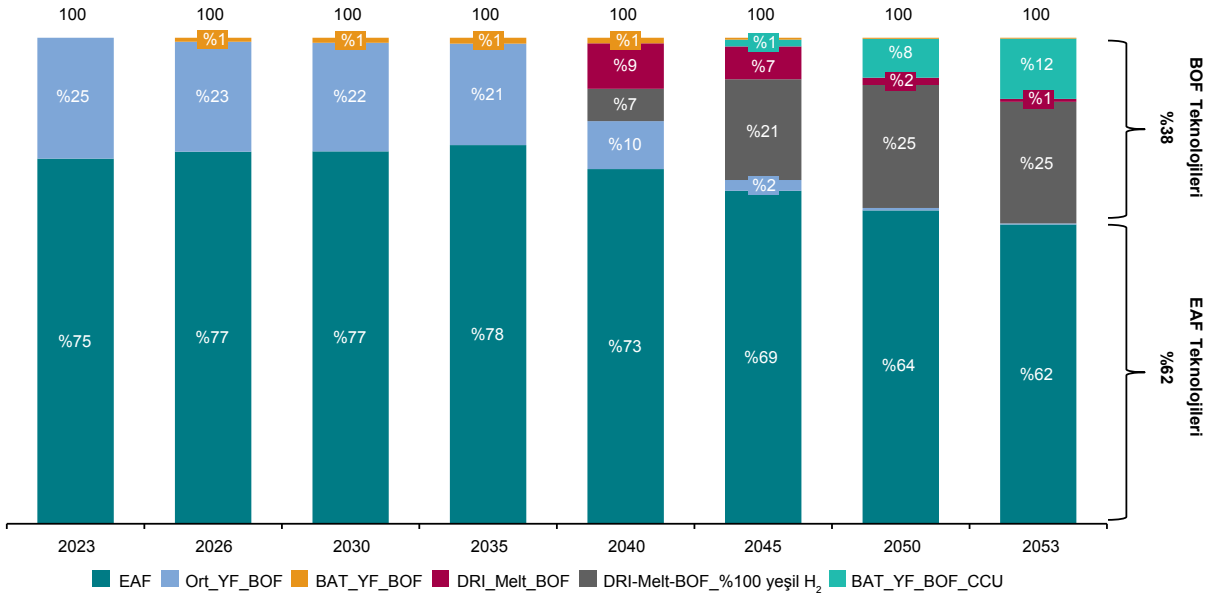


LCP senaryosunda, ulusal hedeflerle uyumlu olarak 2053 yılında sıfır emisyonu ulaşacak şekilde hedef konarak model sonuçları elde edilmiştir. Bu senaryoda farklı teknoloji giriş yılları ve penetrasyon oranlarına sahip dokuz adet teknoloji arketipi bulunmaktadır. Üretimin çoğunluğu hâlâ EAF'ye dayanmaktadır ve EAF'nin üretimdeki payı Düşük ETS senaryosu ile neredeyse aynıdır. Öte yandan LCP senaryosu, sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için BOF'a

CCU entegrasyonunu içermektedir. Ayrıca LCP senaryosunda BOF'de bio-PCI ve DRI-EAF'de hidrojen gibi radikal teknolojiler de üretimde düşük oranlarda kullanılmaktadır. Bu senaryoda teknolojik dönüşüm, hidrojen ve CCU teknolojilerinin bir arada kullanılması ile gerçekleştirilmektedir. 2053 yılında CCU teknolojileri üretimin %12'sini, yeşil hidrojen teknolojileri ise %25'ini oluşturmaktadır.



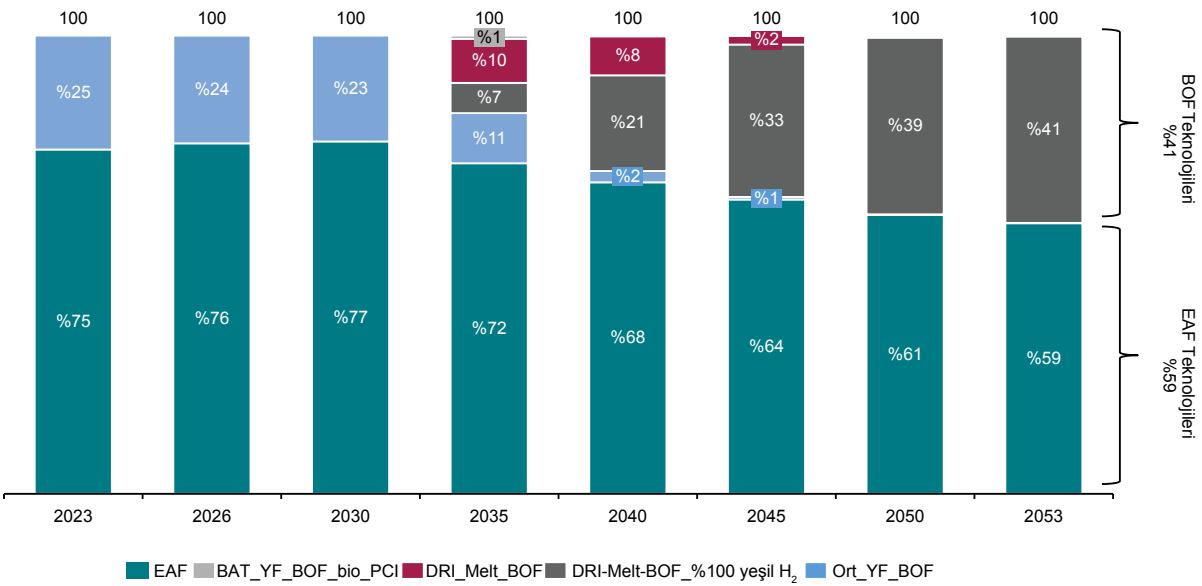
Şekil 37. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): LCP



Agresif senaryo olan Yüksek ETS senaryosunda dönüşüm, Düşük ETS senaryosuna kıyasla daha erken başlamaktadır. Düşük ETS senaryosuna kıyasla 2030'lerden sonra daha fazla BOF tesisi DRI kullanmaya başlamaktadır. 2053 yılına gelindiğinde, EAF üretimin %59'unu oluştururken bu

oranın %41'i DRI-BOF teknolojisine %100 yeşil hidrojen entegrasyonu sayesinde elde edilmektedir. Ayrıca Yüksek ETS senaryosunda diğer senaryolarda tercih edilmeyen BOF-bio-PCI teknolojisi (biyoyakıtların girdi olarak kullanımı) de 2035'ten sonra üretimde düşük bir oranını oluşturmaktadır.

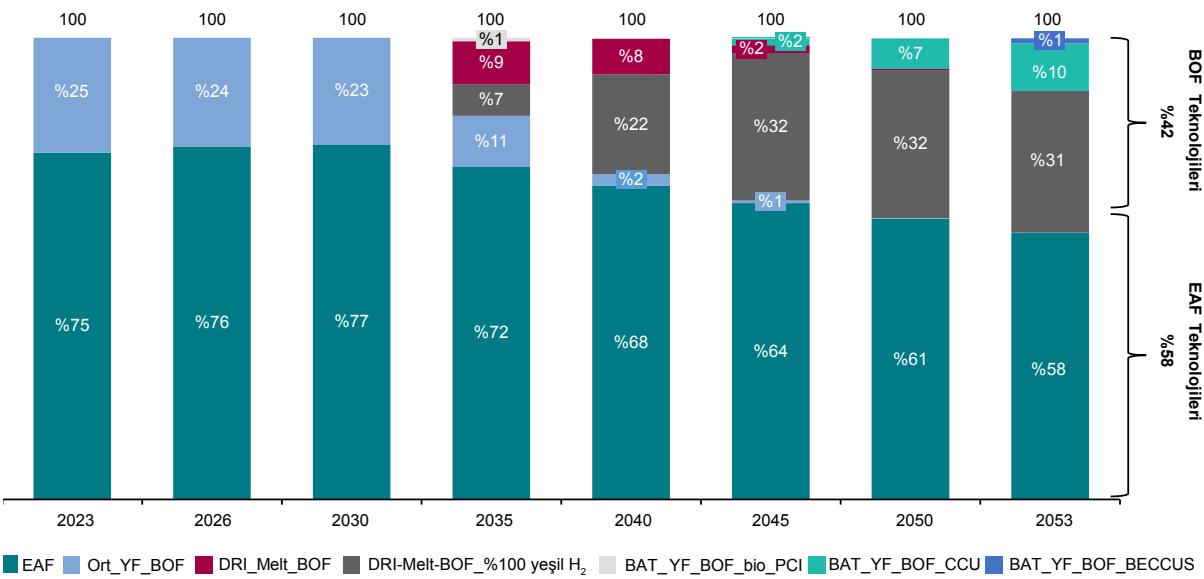
Şekil 38. Üretim Kapasitesindeki Teknoloji Payları (%): Yüksek ETS



FTS senaryosunda, LCP senaryosuna benzer şekilde, ulusal hedeflerle uyumlu olarak modeli 2053 yılında sıfır emisyonla ulaşacak şekilde bir hedef tanımlanarak model sonuçları elde edilmiştir. FTS senaryosu ve Yüksek ETS senaryosu neredeyse aynı oranda EAF-BOF dağılımına sahiptir. Bu senaryoda BOF teknolojilerinin yaygınlığı, emisyon hedefinin devreye sokulması nedeniyle farklılık göstermektedir. FTS senaryosunda, çelik endüstrisini dönüştürmek amacıyla

farklı yıllarda beş BOF teknoloji arketipi kullanılmaktadır. Yüksek ETS senaryosunda olduğu gibi, doğal gaz bazlı DRI ve hidrojen bazlı DRI teknolojileri dönüşümü başlatmakta ve daha sonra emisyon hedefine ulaşmak için CCUS teknolojileri kullanılmaktadır. 2053 yılında DRI kullanan prosesler çelik üretiminin %31'ini, CCUS teknolojilerini kullananlar ise %11'ini oluşturmaktadır.

**Şekil 39. Üretim Kapasitesinde Teknoloji Payları (%): FTS**



### Karbon Maliyeti\*

Çelik sektörü için geliştirilen optimizasyon modelinde, planlanan ulusal Emisyon Ticaret Sisteminin (ETS) etkisini analiz etmek için farklı senaryolar geliştirilmiştir. Bu bağlamda, planlanan ulusal ETS ve AB karbon fiyatları kapsamında gelecekteki karbon fiyatları, Türkiye'de AB'den daha düşük ulusal karbon fiyatları ve her yıl için eşit fiyat seviyeleri olmak üzere iki senaryo altında öngörülmüştür. Karbon fiyatları, üreticilere ya emisyonlarını azaltarak ücret ödemekten kaçınma ya da emisyon yapmaya devam ederek emisyonları için ödeme yapma seçeneği sunmaktadır.

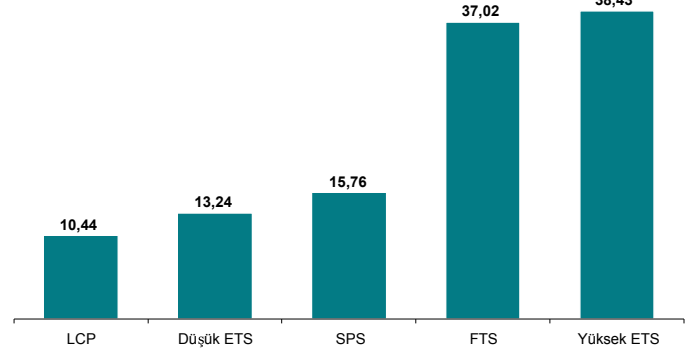
Kapsam 1 emisyonlarına uygulanan senaryo bazlı CO<sub>2</sub> maliyetleri, teknolojik dönüşümün öngörülmediği ve dolayısıyla emisyonların yüksek olduğu SPS senaryosunun 2023-2053 yılları arasında net bugünkü değer bazında 15,76 milyar dolar karbon maliyetine sebep olacağını ortaya koymaktadır.

Düşük ETS senaryosu ve LCP senaryosu, SPS senaryosuna kıyasla 2020-2053 döneminde toplam %16 ve %34 daha düşük CO<sub>2</sub> maliyeti (NBD bazında) ile Türkiye’de daha düşük karbon fiyatları varsaymaktadır. LCP senaryosundaki dönüşümün 2020 ve 2053 yılları arasında NBD bazında 10,44 milyar dolarlık karbon maliyeti gerektirmesi beklenmektedir. Öte yandan, FTS ve Yüksek ETS senaryoları için, Türkiye’nin Ulusal ETS karbon fiyatlarını AB ETS fiyatlarına eşit olarak belirlediği varsayıldığında, karbon maliyeti diğer senaryolara kıyasla önemli ölçüde daha yüksektir. FTS senaryosunun 2020-2053 yılları arasında NBD bazında toplam karbon maliyeti 37,02 milyar dolar iken, daha hızlı emisyon azaltımı varsayılmaktadır.

### Girdi İhtiyacı Projeksiyonları

Modelde ayrıca her bir teknolojik dönüşüm gereksinimi için hammadde ve enerji ihtiyaçları senaryolara göre hesaplanmaktadır. Senaryolara göre 2023 ve 2053 yılları arasında demir cevheri, hurda ve metalürjik kömür ihtiyacı öngörülmektedir. WoM senaryosunda hurda kullanımının SPS senaryosuna kıyasla daha düşük olması beklenmektedir. 2053 yılında hurda kullanımının WoM için 52,6 milyon tona, SPS senaryosu için ise 63,4 milyon tona ulaşacağı öngörülmektedir. SPS senaryosu, EAF’nin üretim projeksiyonundaki payının artması ve teknolojik dönüşümün gerçekleşmemesi nedeniyle diğer senaryolara kıyasla 2053 yılında 63,4 milyon ton hurda kullanımıyla en yüksek hurda kullanımına sahip senaryo olarak öne çıkmaktadır. Düşük ETS senaryosunda, entegre tesisinin yerini alan doğal gaz bazlı DRI gibi teknolojilerin kullanımı nedeniyle demir cevheri kullanımı yıllar içinde artarken EAF teknolojilerinin azalan payı nedeniyle metalürjik kömür kullanımı azalmaktadır. Dolayısıyla, 2053 yılına kadar demir cevheri kullanımının hurda kullanımını aşacağı ve EAF teknolojilerinin üretimdeki payının kademeli olarak azalmasıyla birlikte 46,6 milyon tona ulaşacağı öngörülmektedir. Emisyon limitli LCP senaryosunda, Düşük ETS senaryosundan farklı olarak hurda girdisinin demir cevheri girdisinden daha yüksek bir paya sahip olduğu ve metalürjik kömür kullanımının Düşük ETS’ye kıyasla daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bunun başlıca nedeni LCP entegre tesisinin yerini alan %100 yeşil hidrojen bazlı

**Şekil 40. 2023-2053 Yılları Arasında Toplam CO<sub>2</sub> Maliyetinin NBD’si (Milyar Dolar)**



DRI teknolojisinin payının Düşük ETS senaryosuna kıyasla daha düşük olmasıdır. LCP senaryosu 2053 yılında 43,6 milyon ton demir cevheri, 45,8 milyon ton hurda ve 3,1 milyon ton metalürjik kömür kullanımı öngörmektedir. Daha radikal teknolojilere sahip olan Yüksek ETS teknolojisinde, Düşük ETS senaryosuna benzer şekilde üretimde daha fazla DRI\_ entegre tesisinin yerini alan %100 yeşil hidrojen bazlı DRI teknolojisi nedeniyle hurda yerine demir cevheri kullanma eğilimi görülürken 2053 yılında 0,7 milyon ton metalürjik kömür ile 6 senaryo arasında en az metalürjik kömür kullanımı görülmektedir. Yüksek ETS senaryosuna benzer şekilde FTS senaryosunda da BOF teknolojilerinin üretimdeki payına bağlı olarak demir cevheri hurdaya tercih edilmektedir. FTS senaryosunda 2053 yılında 50,3 milyon ton demir cevheri, 44,3 milyon ton hurda ve 2,9 milyon ton metalürjik kömür kullanılması beklenmektedir.

WoM senaryosunda, metalürjik kömür kullanımı ilerleyen yıllarda artmakta ve 2053 yılında 16,6 milyon tona ulaşmaktadır. Bunun temel nedeni, yıllar içinde üretimdeki BOF payının artmasından kaynaklanmaktadır. SPS senaryosunda, metalürjik kömür kullanımı WoM senaryosuna kıyasla daha düşük bir oranda da olsa artmaktadır, çünkü BOF’un üretimdeki payı hâlâ devam etmektedir. Azaltım senaryolarında, farklı üretim yöntemlerinin ve çeşitli farklı enerji kaynağı malzemelerinin kullanılmaya başlanmasıyla, met kömür kullanımının azalması beklenmektedir.

## Şekil 41. Senaryolara Göre Hammadde Projeksiyonları (Milyon Ton)



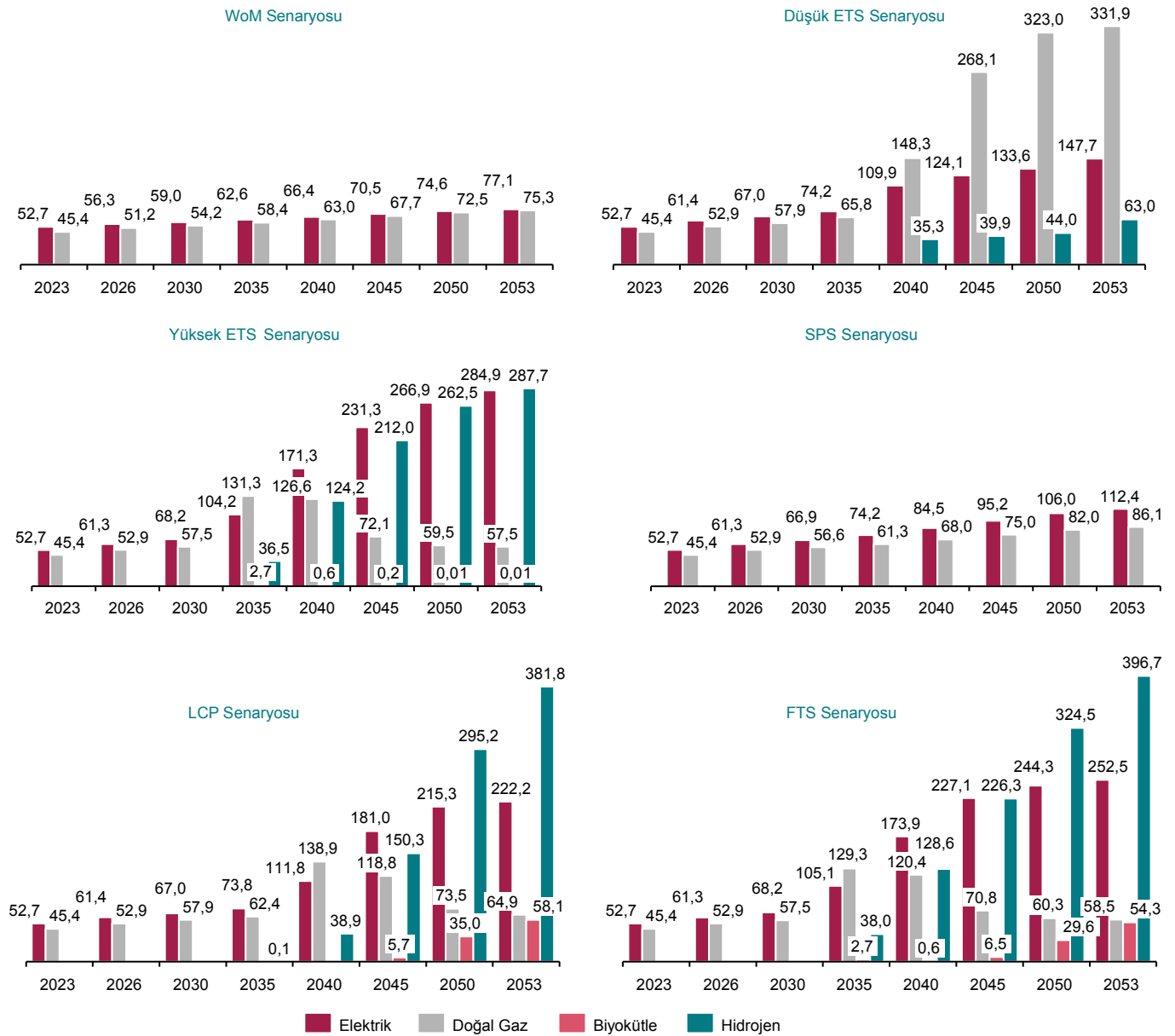
WoM ve SPS senaryolarında teknolojik dönüşüm öngörülmediğinden, şu anda kullanıldığı şekliyle sadece elektrik ve doğal gaz kullanımı gözlemlenmektedir. Düşük ETS senaryosunda 2036 yılında DRI-BOF teknolojisine %100 yeşil hidrojen entegrasyonunun uygulanması sayesinde elektrik ve doğal gaza ek olarak hidrojen de girdiler arasında dâhil olmakta ve 2040 yılına kadar 35,3 milyon GJ'ye ulaşmaktadır. LCP senaryosunda 2043 yılında DRI-EAF teknolojisinde

hidrojen ve 2035 yılında BOF'de biyo-PCI teknolojisinde hidrojen uygulanması ve DRI-BOF teknolojisinde %100 yeşil hidrojen entegrasyonu sonucunda hidrojen talebi 2053 yılında 381,8 milyon GJ'ye ulaşmaktadır. Ayrıca CCU'nun BOF'ye entegre edilmesiyle 2043'ten sonra biyokütle de girdi olarak kullanılmakta ve 2045'te 5,7 milyon GJ'ye ulaşmaktadır. Yüksek ETS senaryosunda pulverize kömür enjeksiyonunun yerine ön işlemden geçirilmiş biyokütle kullanımı teknolojisinin

üretimde kullanılmaya başlamasıyla birlikte 2035 yılından itibaren az miktarda biyokütle kullanımı görülmektedir. Ayrıca, elektrik ve hidrojen kullanım miktarları 2053 yılında birbirine yaklaşarak sırasıyla 284,9 milyon GJ ve 287,7 milyon GJ'ye ulaşmaktadır. Ayrıca entegre tesisinin yerini alan doğal gaz bazlı DRI teknolojisinde %100 yeşil hidrojen entegrasyonuna geçişle birlikte, hidrojen kullanımı arttıkça doğal gaz kullanımı azalmaktadır. FTS senaryosunda hem DRI-BOF teknolojisine %100 yeşil hidrojen entegrasyonu hem de BOF teknolojisine

CCU entegrasyonu sonucunda hidrojen kullanımı artmaktadır. Dolayısıyla FTS senaryosu 6 senaryo arasında en yüksek hidrojen ihtiyacını taşımaktadır. Ayrıca, pulverize kömür enjeksiyonunun yerine ön işlemden geçirilmiş biyokütle kullanımı entegre tesislerde karbon yakalama ve kullanımı ve karbon yakalama, depolama ve kullanımı ile biyoenerji gibi teknolojilerinin devreye girmesiyle biyokütle kullanımı da artarak 2053 yılında 54,3 milyon GJ'ye ulaşmaktadır.

**Şekil 42. Senaryolara Göre Enerji Kaynağı Projeksiyonları (Milyon GJ)**



## 2.6. Karbonsuzlaşmayı Sağlamak için Gereken Yatırım İhtiyacı

Türkiye Çelik Sektörü, Paris Anlaşması'nda taahhüt edilen ulusal emisyon azaltım seviyelerine ulaşmak ve düşük karbonlu bir ekonomiye geçiş yapmak için etkin yatırımlar yoluyla tasarlanacak ve uygulanacak yeni teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. Çelik sektöründeki farklı geçiş yolları için seçilen teknolojilere göre yatırımlar değerlendirilmiştir.

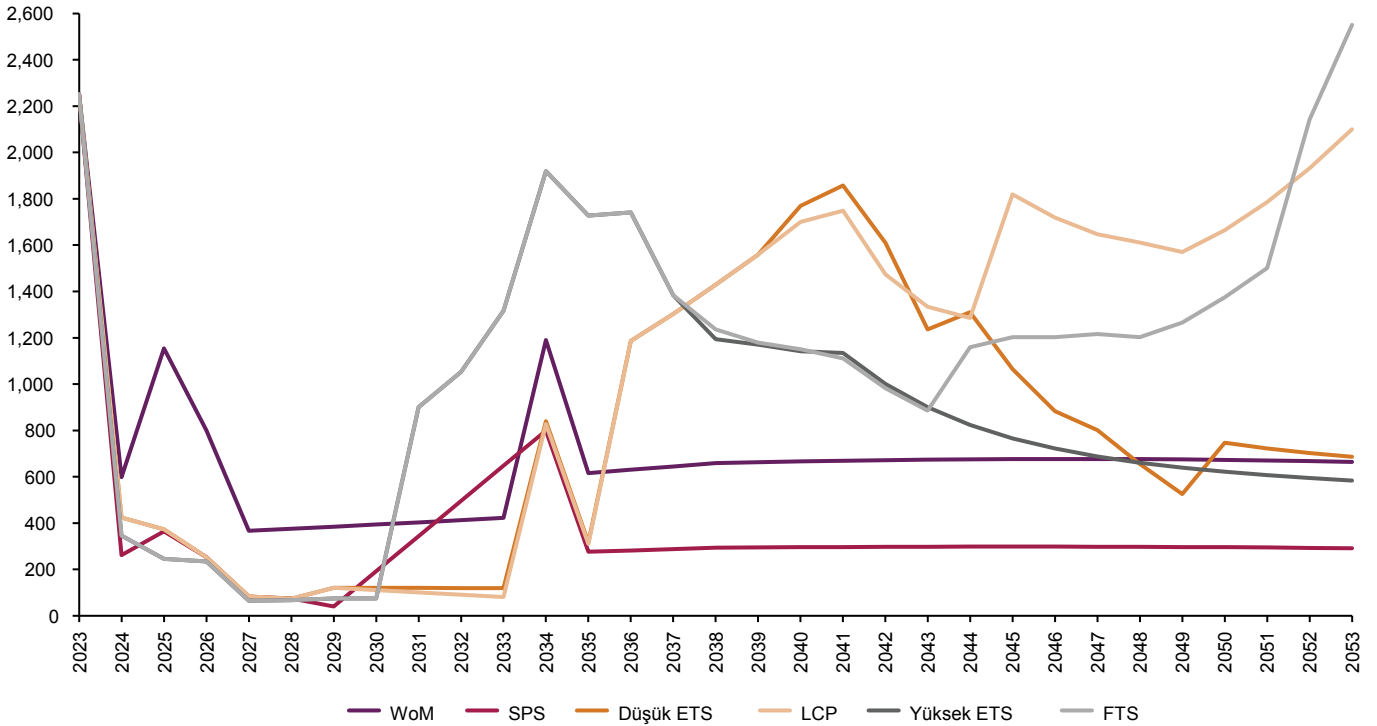
Senaryo sonuçlarının karşılaştırılması, farklı teknoloji giriş yılları, üretim payları ve teknoloji kombinasyonları ile karbonsuzlaşmaya doğru farklı yollar göstermektedir. Girdi ve teknoloji tabanlı veri setlerini kullanan optimizasyon modelinin amacı, senaryolarda tanımlanan emisyon hedeflerini göz önünde bulundurarak maliyeti en aza indirmektir. Böylece, farklı azaltım senaryoları için farklı maliyet ve yatırım ihtiyaçları tahmin edilmektedir.

Yatırım gereksinimleri doğrudan teknolojiye giriş yılları ve teknoloji ile ilgili yatırım maliyetleri (CAPEX) ile ilgilidir. Azaltım senaryolarının toplam yatırım miktarları, yeni teknolojilerin girişi ve mevcut teknolojilerdeki kapasite değişimleri açısından

ayrı ayrı hesaplanmıştır. Modelleme sonuçları, 2030'da başlayan dönemden sonra, özellikle net sıfır emisyon hedefleri olanlar (LCP ve FTS) için beklendiği gibi azaltım senaryolarında yatırım maliyetinin arttığını göstermektedir. Ayrıca MPP (Mission Possible Partnership)<sup>61</sup>, Steelonthenet<sup>62</sup>, SteelOrbis<sup>63</sup> ve IEA (International Energy Agency)<sup>64</sup> verilerinden yararlanılarak farklı teknolojilerde kullanılan girdilerin (yakıt, hammadde vb.) maliyetleri de uzman ve paydaş görüşleri ışığında modele dahil edilmiştir.

İlk büyük teknolojik yatırımlar 2034 yılından itibaren gerekli olmakta ve LCP senaryosunda 2041 yılına kadar hızlanmaktadır. Bu senaryoda yıllık yatırımlar 2053 yılında 2,1 milyar doları aşmaktadır. FTS senaryosu, daha iddialı emisyon azaltım hedeflerine sahip olduğu için LCP senaryosuna kıyasla özellikle 2030-2035 döneminde daha erken teknoloji yatırımları önermektedir. FTS senaryosu için yıllık yatırım maliyetinin 2030'lardan önce 1 milyar dolardan düşük olacağı, bu tarihten sonra hızlanacağı ve 2030-2035 döneminde 2,5 milyar dolara ulaşacağı öngörülmektedir.

### Şekil 43. Senaryolara Göre Yıllık Yatırım Maliyeti (Milyon Dolar)<sup>65</sup>



<sup>61</sup>[https://github.com/missionpossiblepartnership/mpp-steel-model/tree/main/mppsteel/data/import\\_data](https://github.com/missionpossiblepartnership/mpp-steel-model/tree/main/mppsteel/data/import_data)

<sup>62</sup><https://www.steelonthenet.com/>

<sup>63</sup><https://www.steelorbis.com/price-forecasters/orbis-HRC-CIS-export-forecaster/>

<sup>64</sup><https://www.iea.org/>

<sup>65</sup>Kapasite artışlarının 2025 ve 2034 yıllarındaki talep ve üretim projeksiyonlarını karşılayacağı varsayılmıştır.

Azaltım senaryolarında yeni kapasite yatırımlarına ek olarak yeni teknolojilere geçiş de öngörülmektedir. Düşük ETS senaryosunda ilk teknolojik kapasite değişikliğinin 2034 yılında yapılması beklenirken Yüksek ETS senaryosunda ilk kapasite değişikliği yatırımı beş yıl daha erken gerçekleşmesi tahmin edilmektedir. LCP senaryosunda projeksiyon döneminin son on yılında yeni yatırımların geçiş yatırımlarından daha fazla ivme kazanması beklenmektedir.

Hem Yüksek ETS hem de FTS senaryolarında yeni kapasite maliyeti çoğu yılda geçiş maliyetinden daha yüksek olmaktadır. Sıfır emisyon hedefine ulaşmak için yeni teknolojilere yapılan yatırımlar 2043'ten itibaren hız kazanmaktadır. FTS senaryosunda toplam yıllık yatırım maliyetinin yaklaşık 2,5 milyar dolara ulaşacağı öngörülmürken, LCP senaryosunda 2053 yılında 2 milyar doları aşacağı tahmin edilmektedir.

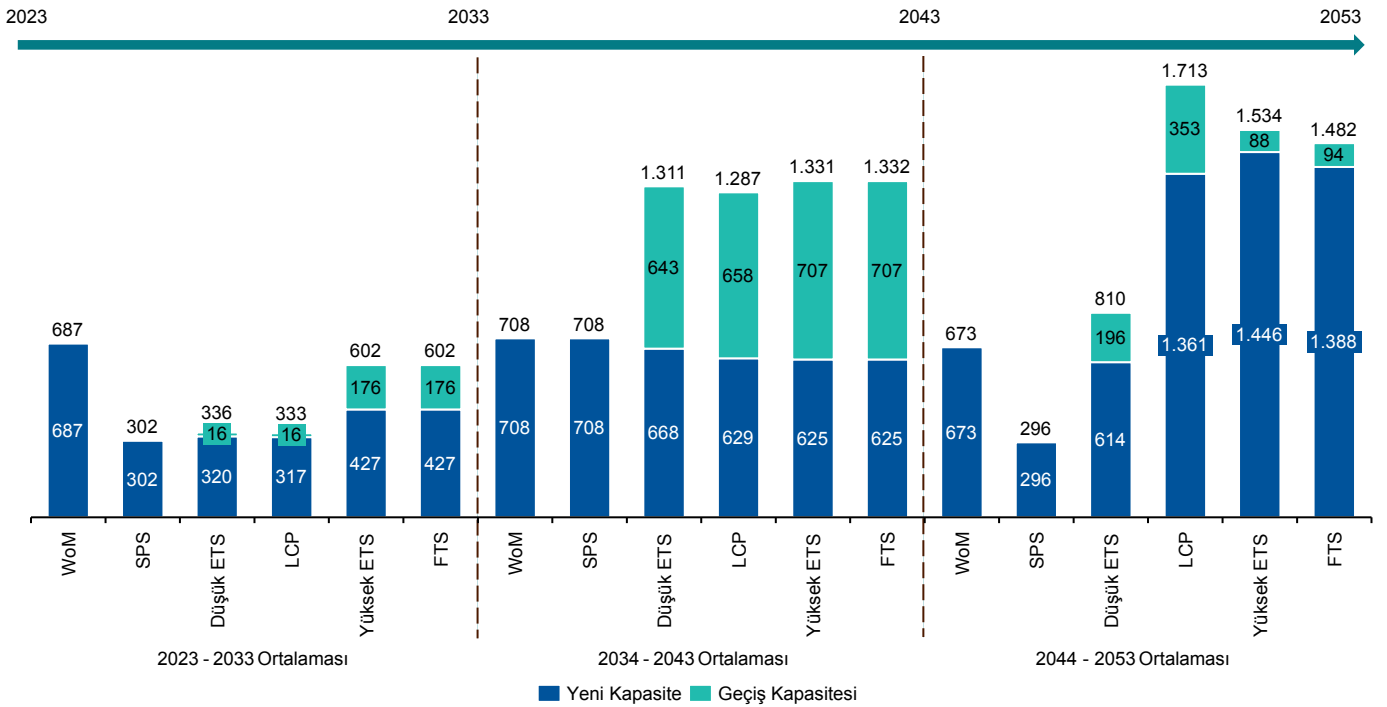
#### Şekil 44. Yıllara Göre Yatırım Maliyeti (Milyon Dolar)



On yıllık aralıklarla hesaplanan ortalama yıllık yatırımlar incelendiğinde, en düşük yatırım gereksinimine sahip senaryonun SPS olduğu görülmektedir. Azaltım senaryoları için 2023-2033 döneminde 1 milyar doların altında olan ortalama yıllık yatırım, 2034-2043 döneminde 1,3 milyar dolara yükselmekte ve 2044-2053 döneminde 1,4-1,7 milyar dolara ulaşmaktadır. Yüksek ETS senaryosunun 2023 ve 2033 yılları arasındaki yatırım gereksinimi, daha agresif teknoloji giriş yılları nedeniyle Düşük ETS senaryosundan daha yüksek

olmaktadır. Aynı dönemde en yüksek yıllık ortalama yatırıma sahip senaryolar Yüksek ETS ve FTS senaryolarıdır. 2034 ve 2043 yılları arasında, Düşük ETS, LCP, Yüksek ETS ve FTS senaryoları, teknolojik yaygınlaşma nedeniyle benzer derecede yüksek ortalama yıllık yatırım değerlerine sahiptir. 2043-2053 döneminde LCP senaryosu net sıfır hedefine ulaşmak için gereken en yüksek ortalama yıllık yatırım maliyetine sahiptir.

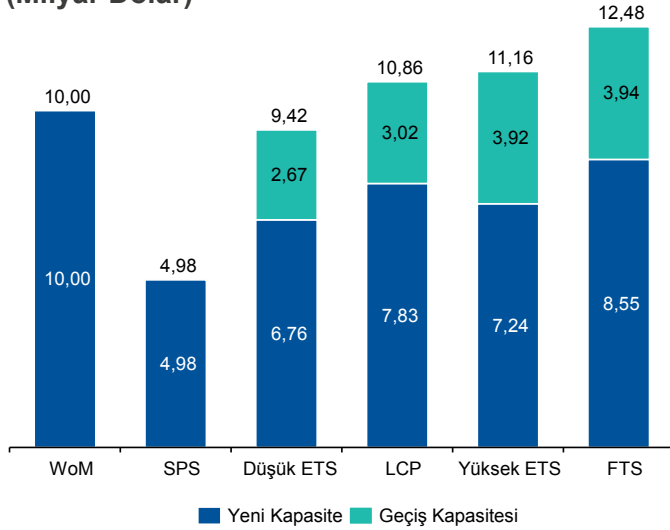
#### Şekil 45. Öngörülen Yıllık Ortalama Yatırım Miktarı (Milyon Dolar)<sup>66</sup>





2023-2053 döneminde %7 iskonto oranı kullanılarak hesaplanan toplam yatırımın NBD'sine dayalı olarak, azaltım senaryoları toplam yatırım maliyetlerinin NBD'sinin 9 ila 13 milyar dolar arasında olacağını göstermektedir. Önümüzdeki 30 yıl içinde net sıfıra ulaşmak için gereken toplam yatırımların NBD'si LCP için yaklaşık 11 milyar dolar iken, FTS için bu yaklaşık 12,5 milyar dolardır. LCP senaryosunda kapasite payını değiştirmek için gereken yatırımların FTS senaryosuna göre daha az olacağı öngörülmektedir. FTS senaryosunda, geçiş kapasitesi yatırımlarının toplam yatırımların %31'ini oluşturması beklenirken, LCP senaryosunda toplam yatırım maliyetinden %28'lik bir pay alacağı tahmin edilmektedir.

**Şekil 46. Toplam Yatırımların NBD'si, 2023-2053 (Milyar Dolar)**



## Yatırımların Finansmanı

Türkiye'nin çelik endüstrisinin iddialı emisyon azaltma hedeflerine ulaşabilmesi için teknoloji yatırımlarında ciddi bir artış gerekecektir. Model sonuçları teknolojik dönüşümün 2030'ların başında başlaması gerektiğini ve temiz enerji teknolojilerine yatırımın önümüzdeki 20 yıl içinde hızlanması gerektiğini göstermektedir. Azaltım senaryolarındaki emisyon azaltım hedeflerine ulaşmak için 2023 ve 2053 yılları arasında yıllık yaklaşık 0,8-1,1 milyar dolar yatırım yapılması gerekmektedir. Optimizasyon modeline göre 2023-2033 döneminde Düşük ETS senaryosu için her yıl ortalama 333 milyon dolar, Yüksek ETS senaryosu için ise 602 milyon dolar harcanmalıdır. Optimal senaryoda (LCP) net sıfıra ulaşmak için, 2034-2043 yılları arasında yıllık 1,3 milyar dolar olmak üzere daha da fazla fona ihtiyaç duyulmaktadır ve model döneminin son on yılında gerekli yıllık yatırımın ortalama 1,7 milyar dolara yükseleceği öngörülmektedir. (Şekil 45)

Türkiye çelik sektörünün karbonsuzlaşma hedefleri, finansman mekanizmalarının ve planlarının geliştirilmesi ihtiyacının altını çizmektedir. Yeni teknoloji yatırımlarının çoğunun 2030'lardan sonra yapılması beklense de, sonraki dönemdeki yüksek yatırım miktarlarını hafifletmek için daha uzun vadeli bir perspektifle fon oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle, çelik sektörünün orta ve uzun vadede gerekli teknolojik dönüşümü gerçekleştirebilmesi için kısa vadede ilave fonların harekete geçirilmesine yönelik tedbirlere öncelik verilmesi gerekmektedir. Türkiye çelik sektörünün karbonsuzlaşma yatırımlarını teşvik etmek üzere ölçeklendirilmiş sermaye akışlarına erişebilmesi amacıyla politika yapıcıların ve finans kuruluşlarının iş birliği yapması ve finansman mekanizmaları geliştirmesi gerekmektedir. Sanayi sektörlerinin karbonsuzlaşması için gerekli yatırımları gerçekleştirecek uzun vadeli bir finansal plan yapılması son derece kritik öneme sahiptir. Net sıfır emisyonuna ulaşılmasını sağlayacak teknolojik dönüşüm için Türkiye'nin gerekli yatırımlara erkenden başlaması oldukça önemlidir.



# 3

**Türkiye Çelik  
Sektörü için  
Karbonsuzlaşma  
Yol Haritası**

### 3. Türkiye Çelik Sektörü için Karbonsuzlaşma Yol Haritası

Projenin nihai çıktısı, Türkiye çelik sektörünün ulusal hedefler ve optimal senaryo doğrultusunda karbonsuzlaşmasını sağlayacak strateji, düzenleme, teknoloji, kurumsal kapasite geliştirme ve fon yaratımı konularına ilişkin önerileri derleyen bir "Karbonsuzlaşma Yol Haritası"dır.

Karbonsuzlaşma Yol Haritası'nı oluşturan politika önerileri, temelde sektörün mevcut durum analizi ile modelleme ve senaryo analizi çıktılarından geliştirilmiştir. Bununla birlikte öneriler, Projenin Yönlendirme Komitesi üyeleri başta olmak üzere, sektör tepe temsilcileri tarafından verilen geri bildirimlerle güncellenmiştir.

**Politika Önerileri Kapsamındaki Teknolojilere İlişkin Özel Not:** Yol haritası kapsamında önerilen teknoloji ve teknikler, büyük ölçüde Bölüm 2.3'de tanımlanan "düşük karbonlu çelik üretim teknolojileri"ne dayanmaktadır. Burada yer verilen teknoloji seti, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) "Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Demir-Çelik İhtisas Çalışma Grubu" çıktıları ile desteklenmiştir. TÜBİTAK'ın söz konusu çalışması, bu proje çalışmalarına paralel olarak yürütülmüş, sektör uzmanları, akademisyenler ve TÜBİTAK'ın kendi uzmanları ile birlikte geliştirilmiştir. TÜBİTAK'ın çalışmasındaki teknolojiler ve teknikler, modelleme çalışmasına dahil edilecek kadar kısımlı veriye sahip olmasa da, projenin açıklanan ulusal stratejiler ve politikalarla uyumlu olması hedefi gereği Karbonsuzlaşma Yol Haritası'na dahil edilmiştir.

#### 3.1.A) Girdi ve Teknoloji

##### 1.1.1. Kapasite ve Üretim

Girdi ve teknoloji ile ilgili karbonsuzlaşma politika alanları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Model tarafından öncelik verilen teknolojiler **yeşil renk** ile vurgulanmıştır.<sup>63</sup> Aşağıda belirtilen bazı teknolojiler model sonuçları tarafından önceliklendirilmemiş olmalarına rağmen, TÜBİTAK'ın yürüttüğü Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası çalışmasında öncelikli öneriler olmaları nedeniyle yol haritasında yer almaktadır.

Politika önerileri, **Girdi ve Teknoloji** ile **Politika ve Pazar** olmak üzere iki üst düzey politika teması altında gruplandırılmış ve bu iki politika teması altında **12 ana politika alanı** geliştirilmiştir. Bunlar aşağıdaki gibidir.

#### A) Girdi ve Teknoloji

A.1) Ana Girdi Optimizasyonu

A.2) Doğrudan Karbon Oluşumunu Azaltan Teknolojiler

A.3) Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Teknolojileri (CCUS)

A.4) Süreç İyileştirmesi

A.5) Yeşil Enerji

A.6) Kapsayıcı İstihdam ve Beceriler

#### B) Politika ve Pazar

B.1) Emisyon Ticaret Sistemi

B.2) Ticaret Modelleri

B.3) Ulusal Politika Belgeleri

B.4) Yeşil Dönüşüm Finansmanı

B.5) İş Birlikleri

B.6) Döngüsel Ekonomi

● **Faz 1** (2023-2025)

● **Faz 2** (2026-2038)

● **Faz 3** (2039-2053)

A.1) Ana Girdi Optimizasyonu	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
Türkiye'nin yurt içi hurda arzının tespiti ve geliştirilmesi için çalışmalar yapılması, bu çalışmaların sonuçlarına göre odaklı yatırımlar gerçekleştirilmesi.	●	●	
Türkiye'nin hurda ithal ettiği pazarlarda hurda ihracatını yasaklamaya yönelik girişimlerin yakından takip edilmesi ve hurda ithal kaynaklarının çeşitlendirilmesi amacıyla küresel hurda pazarındaki eğilimlerin değerlendirilmesi.	●	●	●
Tesislerde hurda ayıklama ve hazırlama proseslerinin iyileştirilmesine yönelik yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi.	●		
Yüksek fırın ve diğer demir üretim fırınlarına şarj edilen düşük tenörlü cevherlerin, uygun cevher işleme/zenginleştirme metotları kullanılarak verimliliğin artırılması.		●	
Cevherin redüklenecek doğrudan ark ocaklarında ve indüksiyon ocaklarında kullanıma uygun hale dönüştürülmesi için düşük karbonlu enerji kaynakları/yenilenebilir enerji ile beslenen DRI/HBI teknolojilerine yönelik Ar-Ge, fizibilite ve prototip çalışmalarının yapılması ve bu çalışmalar ışığında teşvik, finansman ve yatırım sağlanması.		●	●
Hurdadan çelik üretiminde alternatif hammaddelerin kullanılmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi.	●		

A.2) Doğrudan Karbon Oluşumunu Azaltan Teknolojiler	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
<b>Türkiye çelik sektörü için "Mevcut En İyi Teknikler (BAT)" olarak sınıflandırılmış teknolojilerin araştırılması ve sektörde uygulanmasının özendirilmesi:</b>			
Katı ve gaz akışlarından ısı veya enerji geri kazanımı, kok kuru söndürme ve kojenerasyon üniteleri kullanılması.		●	
Gelişmiş elektrostatik çöktürücüler, Aktif Karbon Rejenerasyonu (AKR) süreci ve Seçici Katalitik Redaksiyonu (SKR) kullanılması.		●	
Peletleme tesislerinin arıtma tesislerinde Nötrleştirme, Flokülasyon ve Sedimentasyon kullanılması.		●	
Kok fırınının kapsamlı şekilde gözlenmesi, gaz sızdırmaz pompaların kullanılması ve soğurma sistemleriyle kükürt giderilmesi.		●	
Yüksek fırınlar için, elektrostatik çöktürücü ya da torba filtre yardımıyla çıkış gazı temizleme sistemleri ve yanmayı artırmak için uygun brülörlerin kullanılması.		●	
BOF çelik üretimi ve dökümü için elektrostatik çöktürücü yoluyla kuru tozsuzlaştırma, elektrostatik çöktürücü veya yıkayıcı aracılığıyla ıslak tozsuzlaştırma, tozu dağıtmak için üfleme borusuna soygaz veya buhar enjeksiyonu.		●	
EAF çelik üretimi ve dökümü için Elektrik Ark Fırınının hurda ön ısıtma, şarj, ergitme, döküm alma, pota fırını ve ikincil metalürji dâhil olmak üzere birincil ve ikincil tozsuzlaştırması.	●	●	

A.2) Doğrudan Karbon Oluşumunu Azaltan Teknolojiler	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
<b>Türkiye çelik sektörü için “Doğrudan Karbon Oluşumunu Azaltan” olarak sınıflandırılmış teknolojilerin araştırılması ve sektörde uygulanmasının özendirilmesi:</b>			
Yüksek fırınlarda H <sub>2</sub> kullanımı.			●
DRI üretiminde indirgeyici olarak doğal gaz ile birlikte değişen oranlarda H <sub>2</sub> kullanımı.			●
H <sub>2</sub> plazma azaltma (redüksiyon) yöntemiyle ergitme azaltma.			●
Brülörlerde ve diğer ısıtma proseslerinde gereken yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşabilmek için H <sub>2</sub> kullanılması.			●
Sulu alkali elektrolit ortamda düşük sıcaklık (~110°C) ile elektroliz			●
Alüminyum üretimine benzer şekilde, demir cevherinin yüksek sıcaklıkta (~1600°C) elektrolizi			●
Yüksek fırınlarda kok kullanımının azaltılmasına yönelik alternatif hammadde ve girdilerin (bio-CH <sub>4</sub> , bio-PCI vb.) değerlendirilmesi.		●	
Kok fırınlarında iyileştirilmiş ve alternatif kömür hammaddelerinin kullanılması, verimli kömür harman modellerinin (odun kömürü vb.) geliştirilmesi		●	
Sürekli döküm ve yarı mamül işleme için ulusal ve uluslararası iyi uygulama örneklerinin ve teknolojilerin araştırılması, geliştirilmesi ve prototip çalışmalarının gerçekleştirilmesi.		●	

A.3) Karbon Yakalama Kullanma ve Depolama (CCUS) Teknolojileri	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
<b>Türkiye çelik sektörü için “Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama” olarak sınıflandırılmış teknolojilerin araştırılması ve sektörde uygulanmasının özendirilmesi:</b>			
Yüksek fırınlarda gaz dışı H <sub>2</sub> zenginleştirilmesi ve/veya CO <sub>2</sub> azaltımı.			●
Karbon yakalama ile yakalanan çıkış gazlarının yakıtı dönüştürülmesi (CCU).			●
Karbon yakalama ile yakalanan çıkış gazlarının kimyasallara dönüştürülmesi (CCU).			●
DRI için doğal gaz bazlı CO <sub>2</sub> yakalama.		●	
Çeşitli enerji yoğun çelik üretim işleme aşamalarının yerini alan ve CCUS ile birleştirilebilen yeni bir tür kömür bazlı eritme reaktörü (Hısarna işlemi) kullanılması.			●
Türkiye'nin karbon yakalama ve kullanma kapasitesinin artırılmasına yönelik finansal, hukuki ve teknik altyapının güçlendirilmesi.	●	●	

A.4) Süreç İyileştirmesi	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
Enerji verimliliğinin artırılması, üretimin maksimize edilmesi ve bakım uygulamalarının geliştirilmesi amacıyla tesislerde enerji yönetim sistemleriyle entegre dijital izleme sistemlerinin kurulması.	●		
Proses güvenilirliğinin iyileştirilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla çelik üretim tesislerinin bakım gerekliliklerinin ve denetimlerinin artırılması.	●		
Şirketlerin düşük emisyonlu teknolojilere göre tesis güçlendirme/ yenileme/kullanımdan kaldırma çalışmalarını planlaması ve zamanında uygulamaya geçirmesi.		●	●
Sinter ve Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğinin iyileştirilmesi.		●	

A.5) Yeşil Enerji	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
Çelik sektöründe yenilenebilir enerji kullanımının artırılması için kaynak planı yapılması ve Küçük Modüler Reaktörler (SMR) kullanımının değerlendirilmesi.	●	●	●
Gereken enerjinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması amacıyla yenilenebilir enerji üretim altyapıları kurulması ve gerekli ilave teşvik mekanizmalarının devreye alınması.	●	●	
Çelik sektörü için yeşil H <sub>2</sub> 'nin ticari olarak kullanılabilir ve uygun maliyetli hale getirilmesi amacıyla mevcut ve uygun teknolojilerin tespit edilmesi.	●	●	●

A.6) Kapsayıcı İstihdam ve Beceriler	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
Çelik sektörünün yeşil dönüşümü için gerekli olan yeni nitelik ve becerilerin belirlenmesi ve yeni niteliklere sahip iş gücünün yetiştirilmesine yönelik çalışmaların koordinasyonu.	●	●	●
Çelik sektörü istihdamında herkes için fırsat eşitliğinin sağlanması.	●	●	●
Eğitim müfredatının ve yükseköğretim programlarının yeşil çelik beceri ve yetkinlik çerçevesiyle uyumlaştırılması.	●	●	●

### 3.2. B) Politika ve Pazar

Politika ve pazar ile ilgili dekarbonizasyon politika alanları aşağıda detaylandırılmıştır.

● **Faz 1** (2023-2025) ● **Faz 2** (2026-2038) ● **Faz 3** (2039-2053)

B.1) Emisyon Ticaret Sistemi	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
Türkiye'de AB mevzuatı ile uyumlu bir ETS kurulması ve stratejik öncelikli sektörlerde faaliyet gösterenlerin teşvik edilmesi için uygun mekanizmalar oluşturulması.	●	●	
Karbon kaçağı riski yüksek olan emisyon yoğun tesisler ve sektör ortalamasının altında salım yapan tesislere yönelik ücretsiz tahsisat uygulamasının hayata geçirilmesi.	●	●	

B.2) Ticaret Modeli	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
AB SKDM kapsamındaki emisyon ölçümü ve raporlama ilkeleri doğrultusunda, Türkiye'deki uygulamaların AB tarafında gerekli nitelikleri karşılması ve tanınmasının sağlanmasına ilişkin çalışmaların yürütülmesi.	●		
Karbonsuzlaşma adımı atmayan ülkeler arasındaki ticaretin artmasından doğacak ticaret kaymaları ve olası pazar değişimlerinin analiz edilmesi ve sektörün uluslararası rekabet gücünün korunması için önlemler alınması.	●	●	●
Ulusal karbon fiyatlandırma mekanizmasının oluşturulması ve ilgili alanlarda uygulanmasına yönelik gerekli düzenlemelerin yapılması.	●	●	
Türkiye'nin AB ülkelerine ihracatının devamını teminen, AB SKDM uygulaması ile ilintili ticaret politikası adımlarının tespiti.	●		
Türkiye-Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu (AKÇT) Serbest Ticaret Anlaşması (STA) kapsamında sektörün yeşil dönüşüme yönelik yatırım sınırlamalarının gözden geçirilmesi ve AB ile ilgili müzakerelerin yürütülmesi.	●	●	



B.3) Ulusal Politika Belgeleri	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
Ulusal seviyede ve bütünsel bakış açısıyla değerlendirilmesi gereken Ar-Ge ve yenilik konularına yönelik fizibilite çalışmalarının gerçekleştirilmesi.	●	●	●
Çelik endüstrisinin ulusal enerji ve iklim stratejilerinde sürdürülebilir enerji geçişi için uzun vadeli net bir vizyon geliştirilmesi.	●		
Uzun Dönemli İklim Değişikliği Stratejisi ve İklim Değişikliği Eylem Planı belgelerinde sektöre yönelik azaltım politikalarının belirlenmesi.	●		
Ulusal mevzuatta AB mevzuatına göre farklılık gösteren hususların belirlenmesi ve malların serbest dolaşımı hakkını koruyan tam uyumun sağlanması için koordinasyonun sağlanması.	●	●	

B.4) Yeşil Dönüşüm Finansmanı	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
Düşük emisyonlu teknolojilerin yayılımı için kamu teşviki sağlanması.	●	●	●
Yenilenebilir lisanssız enerji yatırımlarına kolaylık sağlanarak yenilenebilir enerji arzının artırılması.	●		
Düşük emisyonlu teknolojilerin yayılımı için finans ve bankacılık sektörünün harekete geçirilmesi.		●	

B.5) İşbirlikleri	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
Çelik üreticisi şirketlerin uluslararası platformlara katılımı konusunda çalışmalar yapılması.	●		

B.6) Döngüsel Ekonomi	Uygulama Süresi / Aralığı		
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2038)	Faz 3 (2039-2053)
Çelik girdisi kullanan son kullanıcı sektörlerin karbonsuzlaşmasına katkı sağlanması amacıyla yüksek nitelikli, katma değerli ve hafifletilmiş çelik ürünleri geliştirilmesi.		●	●
Ülke seviyesinde hazırlanacak Döngüsel Ekonomi Eylem Planı'na çelik sektörü girdi ve çıktılarının yansıtılması.	●	●	
Elektrikli ark ve pota ocaklarından çıkan katı atıkların döngüsel ekonomi süreçleriyle geri dönüşümüne yönelik yenilikçi proseslerin ve uygulamaların geliştirilmesi.	●	●	●
Sürekli döküm ve parça dökümde döküm atıklarının değerlendirilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi.	●	●	●
Demir-çelik tesislerinde yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi.	●	●	●
Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi.	●	●	●

## Teknoloji Takip Platformu

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından kurulacak bir mekanizma olan **Teknoloji Takip Platformu (TTP)**, aşağıda belirtilen teknolojilerin ve Bakanlıkça uygun görülen ve yeşil

dönüşüme katkı sağlayacak diğer teknolojilerin takibini Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı liderliğinde sektör paydaşları ile birlikte gerçekleştirecektir. Aşağıda belirtilen teknolojiler IEA, MPP, TÜBİTAK İÇG ve modelleme çalışmasından yola çıkılarak kısa listeye alınmıştır.

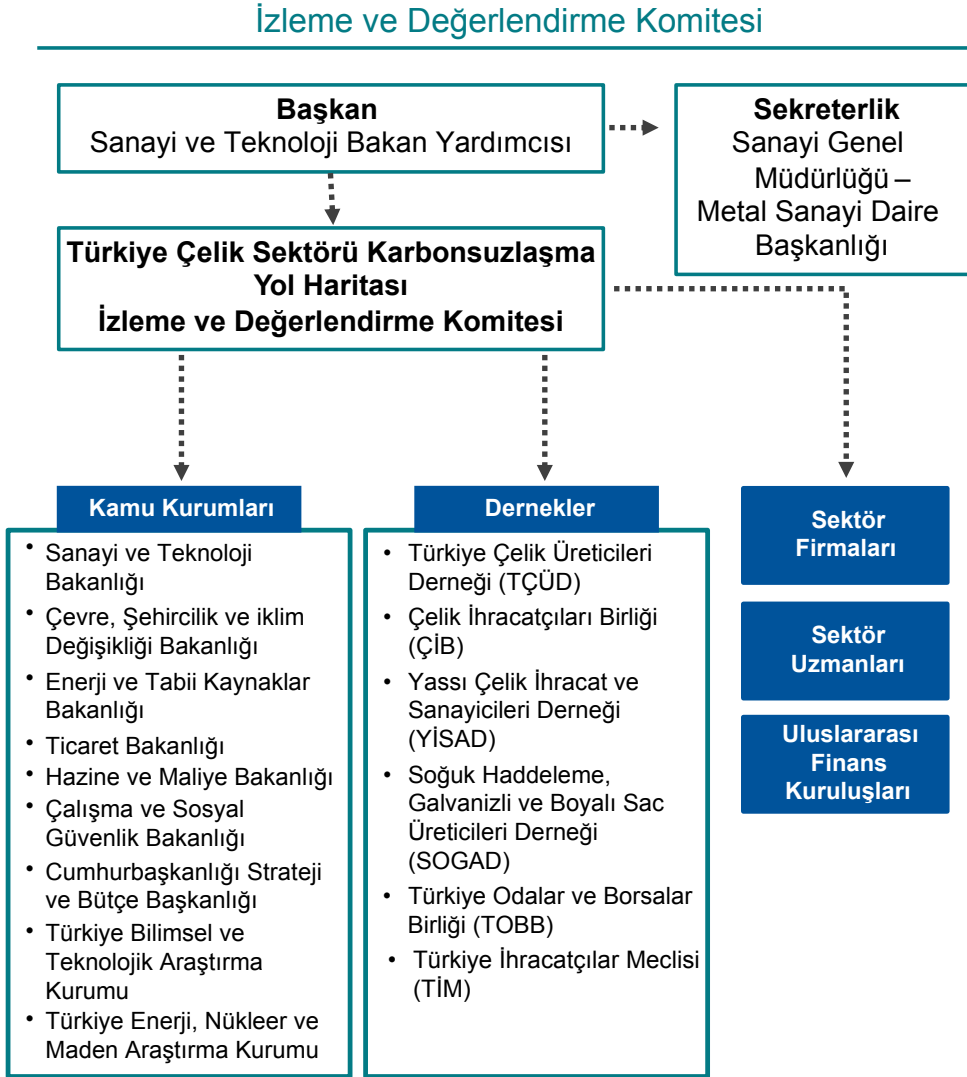
Girdi & Teknoloji	02. Doğrudan Karbon Oluşumunu Azaltan Teknolojiler	<p><b>Türkiye çelik sektörü için "Mevcut En İyi Teknikler (BAT)" olarak sınıflandırılmış teknolojilerin araştırılması ve sektörde uygulanmasının özendirilmesi:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Katı ve gaz akışlarından ısı veya enerji geri kazanımı, kok kuru söndürme ve kojenerasyon üniteleri kullanılması.</li> <li>- Gelişmiş elektrostatik çöktürücüler, Aktif Karbon Rejenerasyonu (AKR) süreci ve Seçici Katalitik Redaksiyonu (SKR) kullanılması.</li> <li>- Peletleme tesislerinin arıtma tesislerinde Nötrleştirme, Flokülasyon ve Sedimentasyon kullanılması.</li> <li>- Kok fırınının kapsamlı şekilde gözlenmesi, gaz sızdırmaz pompaların kullanılması ve soğurma sistemleriyle kükürt giderilmesi.</li> <li>- Yüksek fırınlar için, elektrostatik çöktürücü ya da torba filtre yardımıyla çıkış gazı temizleme sistemleri ve yanmayı artırmak için uygun brülörlerin kullanılması.</li> <li>- BOF çelik üretimi ve dökümü için elektrostatik çöktürücü yoluyla kuru tozsuzlaştırma, elektrostatik çöktürücü veya yıkayıcı aracılığıyla ıslak tozsuzlaştırma, tozu dağıtmak için üfleme borusuna soygaz veya buhar enjeksiyonu.</li> <li>- EAF çelik üretimi ve dökümü için elektrik ark ocağının hurda ön ısıtma, şarj, ergitme, döküm alma, pota fırını ve ikincil metalürji dâhil olmak üzere birincil ve ikincil tozsuzlaştırması.</li> </ul> <p>• Bakanlıkça uygun görülen diğer teknolojiler</p>	<p><b>BAT teknolojileri genel proses verimliliği olarak senaryolara yansıtılmıştır.</b></p> <p>Proses verimliliği oranları SPS, Düşük ETS ve LCP: %0,1 Yüksek ETS ve FTS: %0,25</p> <p>Ek olarak azaltım senaryolarında YF/BOF rotasında BAT entegrasyonu ve bağlı teknolojiler öngörülmüştür.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük ETS Senaryosu: BAT_YF_BOF ve bağlı teknolojiler öngörülmüştür.</li> <li>• LCP: BAT_YF_BOF ve bağlı teknolojiler öngörülmüştür.</li> <li>• Yüksek ETS Senaryosu: Bağlı teknolojiler öngörülmüştür.</li> <li>• FTS: Bağlı teknolojiler öngörülmüştür.</li> </ul>
-------------------	--	---	--

<p>Girdi &amp; Teknoloji</p>	<p>02. Doğrudan Karbon Oluşumunu Azaltan Teknolojiler</p>	<p><b>Türkiye çelik sektörü için “Doğrudan Karbon Oluşumunu Azaltan” olarak sınıflandırılmış teknolojilerin araştırılması ve sektörde uygulanmasının özendirilmesi:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Yüksek fırınlarda H<sub>2</sub> kullanımı.</li> <li>- DRI üretiminde indirgeyici olarak doğalgaz ile birlikte değişen oranlarda H<sub>2</sub> kullanımı.</li> <li>- H<sub>2</sub> plazma azaltma (redüksiyon) yöntemiyle ergitme indirgeme.</li> <li>- Brülörlerde ve diğer ısıtma proseslerinde gereken yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşabilmek için H<sub>2</sub> kullanılması.</li> <li>- Sulu alkali elektrolit ortamda düşük sıcaklık (≈110°C) ile elektroliz.</li> <li>- Alüminyum üretimine benzer şekilde, demir cevherinin yüksek sıcaklıkta (≈1600°C) elektrolizi.</li> <li>- Yüksek fırınlarda kok kullanımının azaltılmasına yönelik alternatif hammadde ve girdilerin (bio-CH<sub>4</sub>, bio-PCI vb.) değerlendirilmesi.</li> <li>- Kok fırınlarında iyileştirilmiş ve alternatif kömür hammaddelerinin kullanılması, verimli kömür harman modellerinin (odun kömürü vb.) geliştirilmesi.</li> <li>- BAT YF-BOF bio-PCI (Pulverize kömür enjeksiyonunun yerine ön işlemden geçirilmiş biyokütle kullanılması (ör. odun kömürü)</li> <li>- BAT YF-BOF H<sub>2</sub> PCI (Pulverize kömür enjeksiyonunun yerine H<sub>2</sub> kullanılması)</li> <li>- DRI-Melt-BOF (Entegre tesisin yerini doğal gaz bazlı DRI'ın alması)</li> <li>- DRI-Melt-BOF 100% yeşil H<sub>2</sub> (Entegre tesisinin yerini %100 yeşil H<sub>2</sub> bazlı DRI'ın alması)</li> <li>- Ergitme indirgeme (Kok kömürü olmadan sıvı metal üretimi)</li> <li>- DRI-EAF ( EAF tesislerinde doğal gaz bazlı DRI kullanılması)</li> <li>- DRI-EAF 50% yeşil H<sub>2</sub> (EAF tesislerinde %50 doğal gaz ve %50 yeşil H<sub>2</sub> bazlı DRI kullanılması)</li> <li>- DRI-EAF 100% yeşil H<sub>2</sub> (EAF tesislerinde %100 yeşil H<sub>2</sub> bazlı DRI kullanılması)</li> <li>- DRI-EAF 50% bio-CH<sub>4</sub> (EAF tesislerinde %50 doğal gaz ve %50 biyometan kullanılması)</li> <li>- Elektrolizör-EAF (Alüminyum eritme işlemine benzer yüksek sıcaklıkta demir cevheri elektrolizi)- Electrowinning-EAF (Alkali çözelti ile düşük sıcaklıkta demir cevheri elektrolizi)</li> </ul> <p>• <i>Bakanlık uygun görülen diğer teknolojiler</i></p>	<p><b>Azaltım senaryolarında önceliklendirilen teknolojiler aşağıdaki gibidir</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük ETS Senaryosu: DRI-EAF, DRI-Melt-BOF, DRI-Melt-BOF 100% yeşil H<sub>2</sub> ve Ergitme indirgeme teknolojileri öngörülmüştür. • LCP: DRI-Melt-BOF ve DRI-Melt-BOF 100% yeşil H<sub>2</sub> teknolojileri öngörülmüştür.</li> <li>• Yüksek ETS Senaryosu: DRI-Melt-BOF, DRI-Melt-BOF 100% yeşil H<sub>2</sub> ve BAT YF-BOF bio-PCI teknolojileri öngörülmüştür</li> <li>• FTS: DRI-Melt-BOF, DRI-Melt-BOF 100% yeşil H<sub>2</sub> ve BAT YF-BOF bio-PCI teknolojileri öngörülmüştür- BAT YF-BOF H<sub>2</sub> PCI, DRI-EAF 100% yeşil H<sub>2</sub>, DRI-EAF 50% yeşil H<sub>2</sub>, DRI-EAF 50% bio-CH<sub>4</sub>, elektroliz, elektrowinning teknoloji arketipleri modele dahil edilmiştir, ancak model sonucunda ilgili teknoloji öncelikli öneriler arasında yer almamıştır.</li> </ul>
<p>Girdi &amp; Teknoloji</p>	<p>03. Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Teknolojileri</p>	<p><b>Türkiye çelik sektörü için “Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama” olarak sınıflandırılmış teknolojilerin araştırılması ve sektörde uygulanmasının özendirilmesi:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Yüksek fırınlarda gaz dışı H<sub>2</sub> zenginleştirilmesi ve/veya CO<sub>2</sub> azaltımı.</li> <li>- Karbon yakalama ile yakalanan çıkış gazlarının yakıtı dönüştürülmesi (CCU).</li> <li>- Karbon yakalama ile yakalanan çıkış gazlarının kimyasallara dönüştürülmesi (CCU).</li> <li>- DRI için doğal gaz bazlı CO<sub>2</sub> yakalama.</li> <li>- Çeşitli enerji yoğun çelik üretim işleme aşamalarının yerini alan ve CCUS ile birleştirilebilen yeni bir tür kömür bazlı eritme reaktörü (Hİsarna işlemi) kullanılması.</li> <li>- BAT YF-BOF + CCS (Entegre tesislerde karbon yakalama ve depolama kullanılması)</li> <li>- BAT YF-BOF + CCU (Entegre tesislerde karbon yakalama ve kullanma teknolojisinin kullanılması)- BAT YF-BOF + BECCUS (Entegre tesislerde karbon yakalama, depolama ve kullanma ile birlikte biyoenerji kullanılması)</li> <li>- DRI-Melt-BOF + CCS (Doğal gaz bazlı BOF-DRI ile karbon yakalama ve depolama kombinasyonunun kullanılması)- Ergitme indirgeme + CCS (Ergitme indirgeme teknolojisinin karbon yakalama ve depolama ile birlikte kullanılması)</li> <li>- DRI-EAF + CCS (Doğal gaz bazlı EAF-DRI ile karbon yakalama ve depolama kombinasyonu kullanılması)</li> </ul> <p>• <i>Bakanlık uygun görülen diğer teknolojiler</i></p>	<p><b>Azaltım senaryolarında önceliklendirilen teknolojiler aşağıdaki gibidir;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük ETS Senaryosu: CCUS teknolojileri öngörülmemiştir.</li> <li>• LCP: BAT YF-BOF + CCU teknolojisi öngörülmüştür.</li> <li>• Yüksek ETS Senaryosu: CCUS teknolojileri öngörülmemiştir.</li> <li>• FTS: BAT YF-BOF + CCU ve BAT YF-BOF + BECCUS teknolojileri öngörülmüştür.-BAT YF-BOF + CCS, DRI-Melt-BOF + CCS, Ergitme indirgeme + CCS, DRI-EAF + CCS teknoloji arketipleri modele dahil edilmiştir, ancak model sonucunda ilgili teknoloji öncelikli öneriler arasında yer almamıştır.</li> </ul>

## İzleme ve Değerlendirme Komitesi

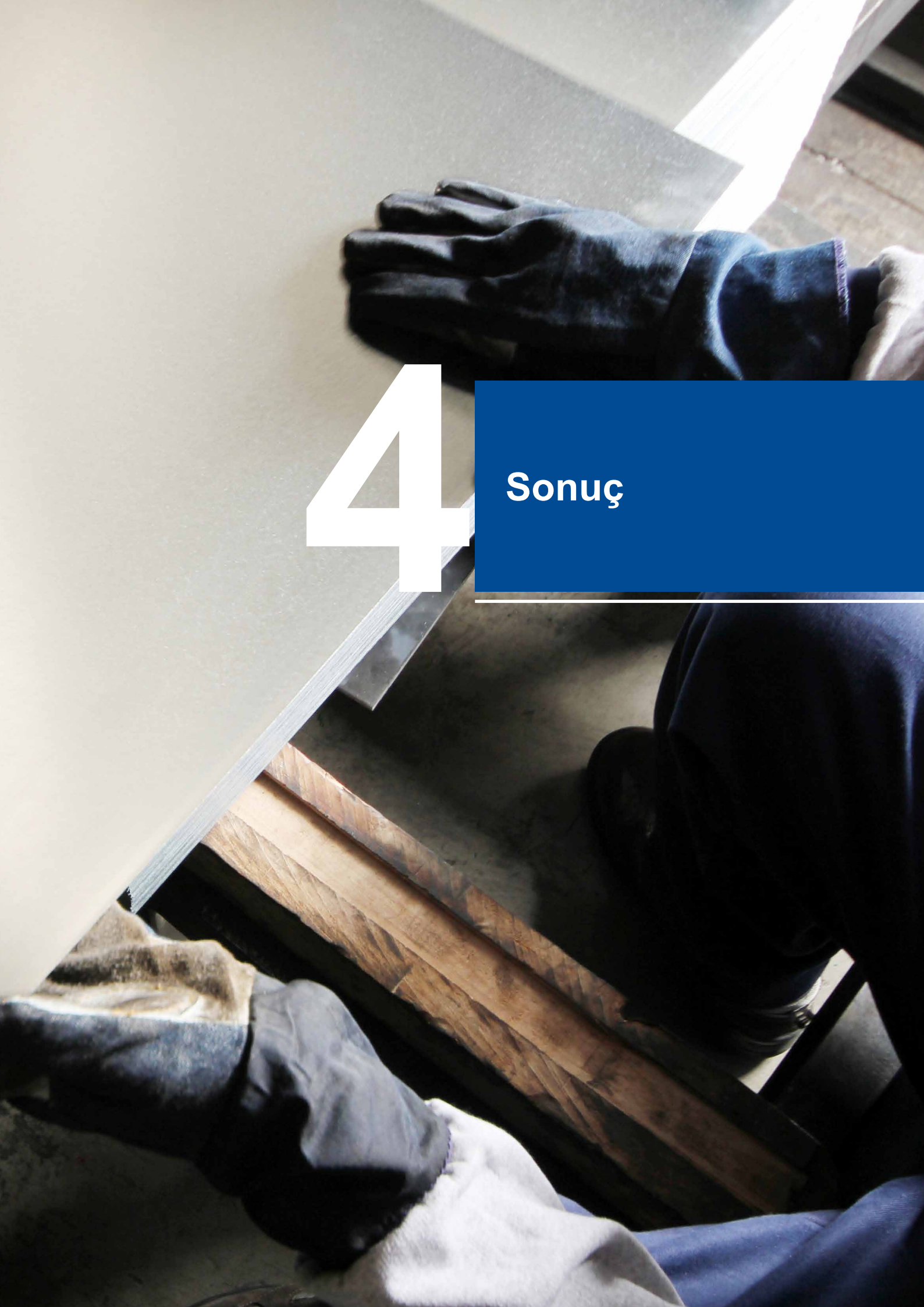
Türkiye Çelik Sektörü Karbonsuzlaşma Yol Haritası kapsamındaki politika önerilerinin uygulanma sürecini ve

sonuçlarını düzenli olarak izleyen ve değerlendiren bir Komite kurulması önem taşımaktadır.



# 4

Sonuç



## 4. Sonuç

Paris Anlaşması ve AB Yeşil Mutabakatı'nın da hızlandırıcı etkisiyle uzun vadeli bir dönüşümün içine giren Türkiye, CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması için sektörel stratejiler geliştirmelidir. Bu yönden ülke, çelik başta olmak üzere kritik sektörlerin düşük karbonlu üretime sorunsuz bir şekilde adapte olmasını sağlamaya yönelik önemli adımlar atmıştır. Söz konusu adımlardan bir tanesi olan bu rapor, Türkiye çelik sektörünün karbonsuzlaşma hedeflerini desteklemeyi, paralelde yürütülen diğer çalışma ve analizleri tamamlamayı amaçlamaktadır.

Çelik, hem inşaat hem de sanayi sektörleri için kilit bir girdi olması nedeniyle tüm ülkeler için stratejik bir öneme sahipken, bunu bir adım öteye taşıyan Türkiye çelik sektörü, yüksek kaliteli ürünlerle iç ve dış pazarlara başarıyla hizmet veren lider bir sektör olmuştur. Bu raporun hazırlanmasında rol alan tüm proje paydaşları, bu lider sektörün çıkarlarını korurken aynı zamanda Türkiye'nin emisyon azaltım hedefleri doğrultusundaki yeşil dönüşümünü teşvik etme gerekliliğinin farkındadır. Bahsedilen gereklilikleri göz önünde bulunduran bu çalışma, Türkiye çelik sektörünün karbonsuzlaşma hedefiyle, veriye dayalı azaltım hedefleri ve tamamlayıcı politika eylemleri ortaya koymaktadır. Bu stratejiyi gerçeğe dönüştürmek için, projeye girdi sağlayan kilit paydaşların sürekli desteği önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın model çıktısı, çelik sektöründe net sıfır hedefine ancak yeşil H<sub>2</sub> ve CCUS teknolojilerinin bir kombinasyonu ile ulaşılabileceğini ortaya koymaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, yeşil hidrojen maliyetini 2035 yılına kadar 2,4 dolar/kg H<sub>2</sub>'ye ve 2053 yılına kadar 1,2 dolar/kg H<sub>2</sub>'nin altına düşürmek gibi yüksek bir hedef açıklamıştır.<sup>64</sup> H<sub>2</sub>, Türkiye'nin dekarbonizasyonu yolunda önemli bir rol oynayacaktır. Bu nedenle, çelik endüstrisinin sektörel iklim hedeflerine ulaşabilmesi ve rekabet gücünü artırabilmesi için gerekli H<sub>2</sub> tedarik edilmesini sağlayacak politikalara ve bunu destekleyici kararlara öncelik verilmelidir.

Türkiye çelik sektörünün karbonsuzlaşma yol haritası, finansman imkân ve planlarının geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır. Çelik sektörünün orta- uzun vadede gerekli teknolojik dönüşümü gerçekleştirebilmesi, kısa vadede bunların temelini atacak bir fon miktarını temin etmesine bağlı olacaktır. Karbonsuzlaşma yatırımları için ölçeklendirilmiş sermaye akışlarına erişimin sağlanması, politika yapıcıların ve finans kurumlarının iş birliği ile mümkün olacaktır.

Bu yol haritasının uygulanması, ilgili tüm paydaşların sürekli desteğini ve etkin koordinasyonunu gerektirmektedir. Kurulması önerilen "İzleme ve Değerlendirme Komitesi", çelik sektörünü etkileyen gelişmelerin takibinde öncü bir rol oynamalı, gerektiğinde güncel tahminler ışığında politika çerçevesini güncellemeli, tüm paydaşlara kendi kontrolleri ve sahiplikleri altındaki ilgili politikaların uygulanmasında rehberlik etmelidir.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve EBRD gözetimindeki proje ekibinin endüstri oyuncularının kendileri de dahil olmak üzere ilgili paydaşların büyük desteği ile yoğun emek harcayarak tamamladığı bu çalışmadan beklenti, Türkiye çelik sektörünün karbonsuzlaşması için yol göstermesi ve belirlenen alanlarda politikaların etkili bir şekilde uygulanmasını sağlamasıdır. Türkiye çelik sektörünün düşük karbonlu yapıya geçişi, sadece ülkenin genel karbonsuzlaşma hedeflerini desteklemekle kalmayacak, aynı zamanda artan sürdürülebilirlik ve çevresel kaygılar karşısında yerel üretimin küresel pazarlarda rekabet edebilirliğini de sağlayacaktır.





© 2023 PwC Türkiye. Tüm hakları saklıdır. Bu belgede PwC ifadesi, PwC ağını veya PwC ağının üyesi olan bağımsız ve farklı tüzel kişiliklerden oluşan PwC Türkiye'yi ifade etmektedir. Daha detaylı bilgi için [www.pwc.com/structure](http://www.pwc.com/structure) adresini ziyaret edebilirsiniz.