

# Türkiye Çimento Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası

Ocak 2024



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, yükümlülük kabul etmez veya üstlenmez.

# İçindekiler

Kısaltmalar	4
Şekiller Listesi	7
Tablolar Listesi	8
Teşekkür	9
Giriş	10
<b>Yönetici Özeti</b>	<b>13</b>
<b>1. Mevcut Durum ve Kıyaslama Analizi</b>	<b>21</b>
1.1. Çimento Sektörünün Mevcut Durumuna Genel Bakış	22
1.1.1. Küresel ve Ulusal CO <sub>2</sub> Emisyonları	22
1.1.2. Küresel ve Ulusal Çimento Üretimi	28
1.1.3. Küresel ve Ulusal Çimento İhracatı	31
<b>2. Türkiye Çimento Sektörünün Karbonsuzlaşması için Modelleme ve Senaryo Analizi</b>	<b>35</b>
2.1. Sektör Projeksiyonları	36
2.2. Düşük Karbonlu Çimento Üretimi	37
2.3. 2053'e Kadar Düşük Karbon Senaryoları	45
2.4. Sera Gazları ve Politika Etkileşim Modeli	46
2.4.1. Model Yaklaşımı	46
2.4.2. Model Sonuçları	47
2.5. Karbonsuzlaşma için Gereken Yatırımlar	54
2.5.1. Senaryo Bazında Yatırım Projeksiyonları	54
<b>3. Türkiye Çimento Sektörü için Karbonsuzlaşma Yol Haritası</b>	<b>57</b>
3.1. Girdi ve Teknoloji	59
3.2. Politika ve Pazar	62
<b>4. Sonuç</b>	<b>65</b>



## Kısaltmalar

3D	Üç Boyutlu
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
ATY	Atıktan Türetilmiş Yakıt
AYM	Avrupa Yeşil Mutabakatı
BMIĐÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiyum Hidroksit
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum Karbonat (Kalker)
CaO	Kalsiyum Oksit
Capex	Yatırım Maliyeti
CCUS	Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama
CEMBUREAU	Avrupa Çimento Birliği
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
ÇEİS	Çimento Endüstrisi İşverenleri Sendikası
Dr.	Doktor
EBRD	Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası
ECRA	Avrupa Çimento Araştırma Akademisi
ERMCO	Avrupa Hazır Beton Birliği
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
FTS	En İyi Teknolojiler Senaryosu
GCCA	Küresel Çimento ve Beton Derneği
GES	Güneş Enerjisi Santrali
Gt	Gigaton (Milyar Ton)

---

GWh	Gigawatt Saat
H <sub>2</sub>	Hidrojen
IoT	Nesnelerin İnterneti
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
IPPU	Endüstriyel Süreçler ve Ürün Kullanımı
İ&D	İzleme ve Değerlendirme
Kcal	Kilokalori
kg	Kilogram
kWh	Kilowatt Saat
LCP	Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu
LULUCF	Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık
MBT	Mekanik-Biyolojik Arıtma
MET	Mevcut En İyi Teknikler
MJ	Megajul (Milyon Jul)
MPA	Maden Ürünleri Birliği
MPP	Mission Possible Partnership
Mt	Milyon Ton
NBD	Net Bugünkü Değer
OAİB	Orta Anadolu İhracatçı Birlikleri
OpEx	İşletme Giderleri
ORC	Organik Rankine Çevrimi
OSB	Organize Sanayi Bölgeleri
RDF	Atıktan Türetilmiş Yakıt

RES	Rüzgâr Enerjisi Santrali
RMC	Hazır Beton
SCM	Ek Çimento Esaslı Malzeme
SF <sub>6</sub>	Kükürt Hekzaflorür
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
SPS	Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosu
SRF	Evsel Atıktan Türetilmiş Yakıt
STB	Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
THBB	Türkiye Hazır Beton Birliği
TOBB	Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği
TR	Türkiye
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
Türkçimento	Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği
VDZ	Alman Çimento İşleri Birliği
VÖZ	Avusturya Çimento Sanayi Birliği
WHR	Atık Isı Geri Kazanımı
WoM	Azaltıcı Önlemlerin Öngörülmediği Senaryo
YBBO	Yıllık Bileşik Büyüme Oranı

---

## Şekiller Listesi

Şekil 1. Yıllara göre Türkiye Toplam Çimento Sektörü Kaynaklı Emisyon Projeksiyonları (Kapsam 1 ve Kapsam 2, Milyon Ton CO <sub>2</sub> )	16
Şekil 2. 2053 Yılı İtibarıyla LCP Senaryosu için Çimento Karbonsuzlaşma Yol Haritasındaki Kaldıraçların Etkisi (Kapsam 1 + Kapsam 2 Emisyonları, Milyon Ton)	17
Şekil 3. Toplam Yatırımların Net Bugünkü Değeri, 2023-2053 (Milyar Dolar)	17
Şekil 4. En Fazla CO <sub>2</sub> * Salımı Yapan Ülkeler, 2021 (Gigaton CO <sub>2</sub> )	22
Şekil 5. Sektörlere Göre Küresel Sera Gazı Emisyonları, 1990-2020 (Gigaton CO <sub>2e</sub> ) (Sol), Sektörlerin Dünya Sera Gazı Emisyonlarındaki Payı, 2020 (Sağ)	23
Şekil 6. Endüstriyel Proseslerin Enerji Kaynaklı Küresel Sera Gazı Emisyonları İçindeki Payı, 2000-2022	23
Şekil 7. Çimentodan Kaynaklı Yıllık Küresel Proses Emisyonları (Gigaton CO <sub>2</sub> )	24
Şekil 8. Ülkelere Göre Çimento Proses Emisyonları (Milyon Ton CO <sub>2</sub> )	25
Şekil 9. Ülkelere Göre Ton Çimento Üretimi Başına Proses Emisyonları, 2021 (Milyon Ton CO <sub>2</sub> /Milyon Ton Çimento)	26
Şekil 10. Türkiye'nin Toplam Sera Gazı Emisyonları (Milyon Ton CO <sub>2e</sub> )	26
Şekil 11. Türkiye'nin Sektörlere Göre Sera Gazı Emisyonları, 2021 (Milyon Ton)	27
Şekil 12. Türkiye'nin Metal Dışı Maden Ürünleri Sektöründeki Enerji Kaynaklı Emisyonları	27
Şekil 13. Çimento Sektöründen Kaynaklanan IPPU Emisyonları	28
Şekil 14. Küresel Çimento Üretimi, 2013-2022, (Milyar Ton)	28
Şekil 15. Ülkelere Göre Çimento Üretimi, 2015-2022 (Milyon Ton)	29
Şekil 16. Türkiye'nin Çimento ve Klinker Üretimi, 2015-2022 (Milyon Ton)	29
Şekil 17. Türkiye'deki Çimento ve Klinker Üretim Kapasiteleri, 2015-2022 (Milyon Ton)	30
Şekil 18. Çimento ve Klinker Kapasite Kullanım Oranları, 2015-2022	30
Şekil 19. Toplam Küresel Çimento İhracatı (Milyon Ton) ve Ülkelerin Çimento İhracatındaki Payı (%)	31
Şekil 20. Toplam Küresel Çimento İhracatı (Milyar Dolar) ve Ülkelerin Çimento İhracatındaki Payı (%)	31
Şekil 21. Türkiye Çimento İhracatı (Milyon Ton) ve Ülkelerin Türkiye Çimento İhracatındaki Payı (TÜİK, %)	32
Şekil 22. Türkiye Çimento İhracatı (Milyon Dolar) ve Ülkelerin Türkiye Çimento İhracatındaki Payı (%)	32
Şekil 23. Türkiye'nin Çimento ve Klinker İhracatı (Milyon Ton)	33
Şekil 24. Türkiye Çimento İhracatının AB-27 Çimento İthalatı İçindeki Payı (Milyon Ton)	33
Şekil 25. AB-27 Ülkelerinin Türkiye Çimento İhracatı İçindeki Payı (Trademap, Milyon Ton)	34
Şekil 26. Toplam Klinker Üretimi Tahmini (Milyon Ton)	37
Şekil 27. Çimento Sektörü Karbonsuzlaşma Kaldıraçları	38

Şekil 28. Teknolojilerin Termal Enerji Üzerindeki Etkisi (MJ/t Klinker)	39
Şekil 29. Konvansiyonel Fosil Yakıtların Kullanım Oranı Dağılımı- Küresel	40
Şekil 30. Teknolojilerin Elektrik Kullanımı Üzerindeki Etkileri (kWh/t Çimento)	42
Şekil 31. 2050 İtibarıyla Tasarım ve İnşaat Malzeme Verimliliğinin Azaltım Potansiyeli	43
Şekil 32. Rekarbonasyon Süreci	44
Şekil 33. Çimento Sektörü için 2050 İtibarıyla Net Sıfır Emisyon Hedefine Ulaşılmasında Rekarbonasyonun Katkısı (%)	44
Şekil 34. Entegre Tesislerde Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Konsepti	45
Şekil 35. Belirli Çimento Karbonsuzlaşma Yol Haritalarında CCUS Emisyon Azaltımı	45
Şekil 36. Çimento Sektörü Senaryoları	46
Şekil 37. Optimizasyon Modelinin Genel Çerçevesi	47
Şekil 38. 2050 İtibarıyla Net Sıfır Aşmaya Yönelik Küresel Çimento Karbonsuzlaşma Yol Haritaları	48
Şekil 39. Yıllara göre Türkiye Toplam Çimento Sektörü Kaynaklı Emisyon Projeksiyonları (Kapsam 1 + Kapsam 2, Milyon Ton CO <sub>2</sub> )	49
Şekil 40. Emisyon Yoğunlukları (Kapsam 1+Kapsam 2 Emisyonları / Ton Klinker), (Kapsam 1+Kapsam 2 Emisyonları / Ton Çimento)	50
Şekil 41. Türkiye Çimento Sektörü 2023-2053 Kümülatif CO <sub>2</sub> Emisyonları (Kapsam 1+Kapsam 2 Emisyonları, Milyar Ton CO <sub>2</sub> )	51
Şekil 42. Seçili Yıllar için Emisyon Seviyeleri (Kapsam 1+Kapsam 2 Emisyonları, Milyon Ton CO <sub>2</sub> )	51
Şekil 43. 2053 İtibarıyla Azaltım Senaryoları için Çimento Karbonsuzlaşma Yol Haritaları (Kapsam 1 + Kapsam 2 Emisyonları)	52
Şekil 44. Senaryolara Göre Toplam Alternatif Yakıt Gereksinimi Projeksiyonları (Milyon Ton)	53
Şekil 45. Senaryolara Göre Yenilenebilir Enerji Gereksinimi Projeksiyonları (GWh)	53
Şekil 46. Senaryolara Göre Seçili Dönemlerdeki Toplam Yatırım İhtiyacı (Milyar Dolar)	55
Şekil 47. Toplam Yatırımlar ve Toplam Yatırımların Net Bugünkü Değeri (2023-2053, Milyar Dolar)	55
Şekil 48. Önerilen İzleme ve Değerlendirme Komitesi'nin Yapısı	64

## Tablolar Listesi

Tablo 1. Yakıt Özellikleri	41
----------------------------	----



## Teşekkür

Bu rapor, **PwC Türkiye** ve konsorsiyum ortaklarının yanı sıra Dr. Akif Koca, İsmail Boz, Okan Karaca, Serkan Sivel, Yasin Engin, Prof. Dr. Sedef Meral, Tolga Karabaş ve Dr. Zeynep Yöntem'den oluşan uzmanlar, yazarlar ve danışman ekibi tarafından hazırlanmıştır. 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, Ziynet Berna Orhan, Hatice Eksen ve Tuğba Albayrak.
- **EBRD:** Muharrem Aşkın, Gianpiero Nacci, Dimitri Koufos, Hande Islak, Ela Yılmaz ve Mine Işık.

Proje ekibi ayrıca aşağıdaki kurumlara da destekleri için teşekkür eder:

- **Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)**
- **T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı**
- **T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı**
- **T.C. Ticaret Bakanlığı**
- **T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı**

Proje ekibi, **Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği'ne** ve Orta Anadolu İhracatçı Birlikleri (OAİB) bünyesindeki **Çimento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği'ne**, proje boyunca verdikleri devamlı destek için özel olarak teşekkürlerini sunar.

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. Bu Anlaşma, iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamak ve zaman içinde taahhütlerini güçlendirmek için ülkeleri birlikte çalışmaya davet etmektedir. Bu projenin amacı, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi doğrultusunda çimento sektörü için düşük karbon seçeneklerinin ortaya koyulmasını desteklemektir.

Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM) 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'nin ithal ettiği karbon yoğun malların üretimi sırasında ortaya çıkan karbon üzerinden bir bedel tahsil ederek karbon kaçışını önlemeyi, böylece AB üyesi olmayan ülkelerde daha temiz sanayi üretimini teşvik ederek küresel emisyonları azaltmayı amaçlamaktadır. Bu bağlayıcı girişimlerin bir sonucu olarak, küresel ısınmanın sanayi devrimi öncesi seviyelerin 1,5°C üzerinde sınırlandırılması<sup>2</sup> için çabalar yoğunlaşmakta ve çimento sektörü gibi karbonsuzlaşması zor sektörlerin<sup>3</sup> yeşil dönüşümü konusu devletlerin gündeminde üst sıralara taşınmaktadır.

Dünyada en çok kullanılan insan yapımı malzeme olan betonun temel bileşeni olan çimento, tüm ülkeler için stratejik önem taşımaktadır. Stratejik önemiyle birlikte, enerjiyle ilişkili küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu olan çimento sektörü, küresel karbonsuzlaşma ve yeşil dönüşüm hedefleri açısından kritik önem arz etmektedir.<sup>4</sup>

Türkiye'nin coğrafi konumu ve hızla artan nüfusu, mega altyapı projeleri de dahil olmak üzere inşaat faaliyetlerinde artışa yol açarak çimento talebini artırmaktadır. Dolayısıyla çimento endüstrisi, inşaat sektörünün çok önemli bir kolu olmasının yanı sıra kentleşme ve ekonomik kalkınmanın desteklenmesinde önemli bir oyuncu haline gelmiştir. Bu raporun kaleme alındığı dönem itibarıyla 56 entegre çimento fabrikası ve 21 öğütme tesisiyle hizmet veren Türkiye çimento sektörü<sup>5</sup>, 77 milyon tonun üzerinde çimento üretmektedir (2022).<sup>6</sup>

Küreseldeki görünümle paralel şekilde, Türkiye çimento sektörü de ulusal sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Türkiye Sera Gazı Envanteri'ne göre, 2021 yılı itibarıyla, enerjiden kaynaklanan cam, çimento ve seramik üretimi emisyonları 32,7 milyon ton CO<sub>2</sub>, IPPU (Endüstriyel Süreçler ve Ürün Kullanımı) kaynaklı çimento emisyonları ise 44,2 milyon ton CO<sub>2</sub> olarak gerçekleşmiştir.<sup>7</sup> Yakın gelecekte karşılaşılabileceği risklerden dolayı, sektörün karbonsuzlaşması için teknolojik seviyede ve politika düzeyinde adımların atılması gerekmektedir.

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

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

<sup>3</sup>"De karbonizasyonu 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><https://gccassociation.org/news/global-cement-and-concrete-industry-announces-roadmap-to-achieve-groundbreaking-net-zero-co2-emissions-by-2050/> adresinden alınmıştır.

<sup>5</sup>[https://www.turkcimento.org.tr/tr/uye\\_fabrikalar](https://www.turkcimento.org.tr/tr/uye_fabrikalar) adresinden alınmıştır.

<sup>6</sup>TÜİK. Üretim değerleri Türkiye'nin tüm çimento sektörünü kapsamaktadır.

<sup>7</sup>Türkiye Sera Gazı Envanteri, 1990-2021. <https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EVCED/tr/C3%87evreVe%C4%B0klım/%C4%B0klımDe%C4%9Fi%C5%9Fiki%C4%9Fi/UlusalSeraGaz%C4%B1EmisyonEnvanteri/Belgeler/Ek-1.pdf> adresinden alınmıştır.

---

Türkiye'nin 2053 yılına kadar net sıfır hedefine ulaşması için 2021'de Paris Anlaşması'nı onaylaması ve SKDM'nin Ekim 2023 yılında başlayan raporlama zorunluluğu ile birlikte AB'ye ihracat yapacak çimento üreticilerinin, doğrudan ve dolaylı CO<sub>2</sub> emisyonlarını raporlaması ve emisyon azaltım önlemleri alması beklenecektir. Dolayısıyla yüksek miktarda emisyonu sebep olan çimento sektöründe karbon azaltımı eylemlerinin bir an önce hayata geçirilmesi sektör için kritik önem taşımaktadır.

EBRD tarafından finanse edilen, ana faydalanıcısı T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı olan ve PwC Türkiye liderliğinde bir konsorsiyum tarafından yürütülen bu proje, Türkiye çimento sektörünün karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda iklimle ilgili politika eylemlerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Proje kapsamında, tüm sektör paydaşlarının görüşlerini en doğru ve eksiksiz şekilde yansıtmak üzere bir Yönlendirme Komitesi oluşturulmuştur. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, T.C. Ticaret Bakanlığı, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve diğer ilgili kamu kurumlarının yanı sıra Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği (Türkçimento) ve Çimento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği (OAİB bünyesinde) de Yönlendirme Komitesi'nin üyeleridir.

Türkiye çimento sektörüne ilişkin bu yol haritasının geliştirilmesi aşamasında, proje çıktılarının ilgili paydaşlarla paylaşılması ve geri bildirimlerin etkin bir şekilde toplanması amacıyla üç Yönlendirme Komitesi Toplantısı düzenlenmiştir. İlgili toplantılara ek olarak, model sonuçlarını ve politika önerilerini tartışmak üzere birçok farklı paydaş görüşmeleri de düzenlenmiştir.

Emisyon seviyelerinde önemli azaltımlar sağlanması, her çimento üreticisinin kendi şartlarına uygun şekilde belirlenmiş önlemlerin bir bütün olarak ele alınmasına bağlı olacaktır. Burada belirlenen yol haritası, politika yapıcılarının ve sektör oyuncularının, faaliyetlerini veri destekli geçiş senaryolarıyla kıyaslamalarına olanak sağlayacaktır. Türkiye çimento sektörü için düşük karbonlu yol haritasını ortaya koymaya çalışan bu rapor, ilgili aktörlerin bir araya getirilmesi sonucu sektöre yönelik ortak bir vizyonun paylaşılması yoluyla ilgili eylemlerin uygulanmasını destekleyecek bir yatırım planı ve platformun geliştirilmesine temel teşkil edecektir.



# Yönetici Özeti

## Yönetici Özeti

Sanayide karbon emisyonlarını azaltma çabaları önümüzdeki yıllarda Türkiye ekonomisi açısından stratejik bir önem taşıyacaktır. Bu çalışma, Türkiye çimento sektörünün karbon emisyonlarını azaltması için uzun vadeli bir yol haritası geliştirmeyi ve bu yol haritasının uygulanması için gereken yatırım gereksinimlerini ortaya koymayı hedeflemektedir.

Bu projenin amacı, Türkiye'nin genel sürdürülebilir kalkınma ve karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda, Türkiye çimento sektörünün aşamalı olarak karbonsuzlaşmasına yönelik kapsamlı bir yol haritası oluşturmaktır. Türkiye çimento endüstrisinin derinlemesine ele alındığı bu çalışmada, mevcut politika ve girişimler detaylı analiz edilerek kıyaslanmakta, sera gazı emisyonları çeşitli senaryolar çerçevesinde modellenmekte ve aynı zamanda Türkiye'nin genel karbonsuzlaşma stratejisi ve uluslararası taahhütleriyle de uyumlu sektörel politikalar, teknolojiler ve yatırımlar belirlenmektedir.

Projenin nihai çıktısı, ulusal hedefler doğrultusunda Türkiye çimento sektörünün karbonsuzlaşmasını sağlayacak strateji, düzenleme, teknoloji, kurumsal kapasite ve finansman konularına ilişkin önerileri bir araya getiren bir "Karbonsuzlaşma Yol Haritası"dır.

"Karbonsuzlaşma Yol Haritası"nın oluşturan politika önerileri, temelde sektörün mevcut durum analizi ve uzman görüşleri ile modelleme ve senaryo analizi çıktılarına dayanarak geliştirilmiştir. Bununla birlikte, öneriler Yönlendirme Komitesi üyeleri başta olmak üzere, sektör temsilcileri tarafından verilen geri bildirimler doğrultusunda güncellenmiştir.

## Önemli Bulgular ve Sonuçlar:

### Küresel Çimento Üretimi ve Ticareti

Küresel çimento üretimi 2022 yılında **4,1 milyar ton** olarak gerçekleşmiştir. Çimento üretiminde 2018 yılından bu yana görülen artış eğilimi, 2022 yılında dünyanın en büyük çimento pazarı olan Çin'in çimento üretiminde yaşanan daralma nedeniyle düşüş eğilimine girmiştir. 2022 itibarıyla dünya çimento üretiminin %51,1'ini Çin gerçekleştirirken, **toplam çimento üretiminde Türkiye'nin payı ise %1,9'dur (77 milyon ton)**.<sup>8</sup>

2018'de 209,6 milyon ton olan küresel çimento ihracatı<sup>9</sup> %4,9'luk bir YBBO ile daralarak (2018-2022) 2022 yılında **171,4 milyon ton** seviyesine düşmüştür. 2019 ve 2020 yıllarında dünyanın büyük çimento ihracatçısı Vietnam olurken, **2022 yılında Türkiye miktar bazında 29 milyon ton ihracat gerçekleştirerek, Vietnam'ı geçmiş ve %16,9'luk pay ile en büyük ihracatçı konumuna gelmiştir.** 2022 yılı küresel çimento ihracatında Vietnam %15,8'lik (27,0 milyon ton) payla ikinci, Japonya ise %5,6'lık (9,6 milyon ton) payla üçüncü sırada yer almıştır.<sup>10</sup>

Küresel çimento ihracatı **2022 yılında 13,2 milyar dolar** değerinde gerçekleşmiştir. **2018-2022 döneminde değer bazında %3,34** YBBO ile artan küresel çimento ihracatı, geçen yıl bir önceki yıla göre %2 daralmıştır. Ülke sıralamasına göre, **değer bazında %13,8'lik payla Vietnam ilk sırayı alırken, %12,6'lık payla Türkiye ikinci ve %4,5'lik payla Almanya üçüncü sırada yer almıştır.** Türkiye 2022 yılında toplam 1,7 milyar dolarlık çimento ihracatına ulaşmıştır.<sup>11</sup>

### Türkiye Çimento Sektörüne Genel Bakış: Üretim ve İhracat

#### Üretim ve Kapasite

2022 yılında Türkiye'de **72,4 milyon ton klinker ve 77 milyon ton çimento** üretilmiştir.<sup>12</sup> 2015-2022 arası dönemde Türkiye'deki çimento ve klinker üretimi sırasıyla %0,8 ve %2,3'lük YBBO oranında büyüme kaydetmiştir.

Türkiye çimento sektörü, 2022 yılında 147,2 milyon ton çimento ve 96,6 milyon ton klinker üretim kapasitesine sahip **56 entegre çimento fabrikası ve 21 öğütme tesisi** ile iç ve dış talebi karşılamıştır.<sup>13</sup> 2022 rakamları, çimento ve klinker kapasite kullanım oranlarının sırasıyla %52,3 ve %74,9 olduğunu göstermektedir.<sup>14</sup>

#### İhracat

Türkiye'nin çimento ihracatı 2013 yılında 12,4 milyon ton iken, **2022 yılında 27,2 milyon ton** seviyesine ulaşmıştır.<sup>15</sup> Çimento sektörü ihracat hacmi miktar bazında son 10 yılda toplam %9,1'lik bir YBBO oranında büyümüş olsa da, esas büyüme %23,9'luk bir YBBO ile 2015-2020 yılları arasında gerçekleşmiştir. 2020 yılında yaklaşık 31,3 milyon tona ulaşan çimento ihracatı son 10 yılın (2013-2022) en yüksek seviyesine ulaşmıştır.<sup>16</sup>

<sup>8</sup>CEMBUREAU. Faaliyet Raporu 2022, 2021, 2020, Türkçimento, OAİB, PwC Analizi

<sup>9</sup>GKüresel çimento ihracatı, SKDM kapsamına giren çimento sektörüne ilişkin ürün grupları üzerinden hesaplanmıştır.

<sup>10</sup>Trademap. Küresel çimento ihracatı, SKDM kapsamına giren çimento sektörüne ilişkin ürün grupları üzerinden hesaplanmıştır.

<sup>11</sup>Trademap. Küresel çimento ihracatı, SKDM kapsamına giren çimento sektörüne ilişkin ürün grupları üzerinden hesaplanmıştır.

<sup>12</sup>Türkçimento, TÜİK, PwC Analizi. Üretim değerleri Türkiye'nin tüm çimento sektörünü kapsamaktadır.

<sup>13</sup>Türkçimento, OAİB, PwC Analizi. Kapasite değerleri Türkiye'nin tüm çimento sektörünü kapsamaktadır.

<sup>14</sup>Türkçimento, TÜİK, PwC Analizi

<sup>15</sup>SKDM kapsamına giren ürünlerden farklı olarak ulusal verilerden tasnif edilmiştir.

<sup>16</sup>TÜİK

Türkiye'nin 2022 yılı çimento ihracatı içinde %36'lık payla ilk sırayı **Amerika Birleşik Devletleri** alırken, ikinci sırada %11,7'lik payla İsrail yer almıştır. Suriye ise %5,1'lik payıyla bu iki ülkeyi takip etmektedir. ABD, Türkiye çimento ihracatında son üç yıldır liderliğini korumaktadır.<sup>17</sup>

Türkiye'nin AB ülkelerine ihracatı özellikle 2018 sonrasında istikrarlı bir şekilde artış göstermiştir. 2018-2022 arasında Türkiye'nin AB ülkelerine ihracatı miktar bazında %37,5'lik bir YBBO ile artmıştır. Türkiye'nin toplam çimento ihracatının (tonaj olarak) %16,6'sını AB ülkeleri oluşturmaktadır.<sup>18</sup>

AB ülkelerinin SKDM kapsamına giren toplam çimento ürünleri ithalatı 2022 yılında 23,2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir.<sup>19</sup> Bu ürünlerde, **Türkiye'nin AB ülkelerine ihracatı 2022 yılında 4,8 milyon ton seviyesine ulaşırken, Türkiye çimento ihracatının AB çimento ithalatı içindeki payı ise %20,8'e gelmiştir.**

Değer bazında değerlendirildiğinde ise, 2022 yılında Türkiye çimento ihracatının AB çimento ithalatı içindeki payı %8,7 olarak gerçekleşmiştir. Bu oran yaklaşık 266 milyon dolara tekabül etmektedir.<sup>20</sup>

## Küresel Çimento Sektöründen Kaynaklanan Emisyonlara Genel Bakış

Dünya genelinde çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonları, 2015 yılında Çin pazarındaki daralma nedeniyle yaşanan hafif düşüş dışında artmaya devam etmiştir. 2010 yılında 1,25 gigaton CO<sub>2</sub> seviyesindeki emisyonlar %2,2'lik bir YBBO ile artarak 2021'de **1,67 gigaton seviyesine ulaşmıştır.**<sup>21</sup>

Çimento üretiminden kaynaklanan emisyonların en yüksek olduğu ülke aynı zamanda dünyanın en büyük çimento üreticisi konumundaki Çin'dir. 2021 yılında dünya genelindeki çimento kaynaklı proses emisyonlarının %51'i (853 milyon ton CO<sub>2</sub>) Çin'e aittir. **Türkiye, 2021 yılında çimento üretiminden kaynaklanan endüstriyel süreçler ve ürün kullanımı (IPPU) ile ilgili toplam emisyonlar içinde %2,6'lık payıyla (44,2 milyon ton CO<sub>2</sub>) dünyada en çok emisyonu yol açan beşinci ülke olmuştur.**<sup>22</sup>

## Türkiye Çimento Sektörünün Karbonsuzlaşma Potansiyeli

**Klinker/çimento oranının azaltılması için alternatif ham maddelerin ve karbon çıktısı düşük yakıtların kullanılması**, sektörün karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşması açısından hayati önem arz edecektir. Ülkede Mekanik-Biyolojik İşleme (MBT) tesislerinin kurulması sektörün emisyon azaltım çabalarına destek olacaktır. Bunun yanı sıra Türkiye'nin yakın zamanda açıkladığı ulusal hidrojen strateji belgesi<sup>23</sup> doğrultusunda, hidrojenin önümüzdeki yıllarda çimento sektöründe yakıt olarak kullanıma potansiyeli de sektör kaynaklı emisyonların azaltılmasına katkıda bulunacaktır.

**Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojisinin geliştirilmesi**, sektörün 2053 net sıfır hedefine ulaşmasında en önemli yeri tutacaktır. Çimento sektöründe proses emisyonları azaltımı sınırlı seviyede kalmakta olup bunların azaltılması için CCUS teknolojilerine yönelik yatırım çalışmaları hız kazanmalıdır. Dolayısıyla, CCUS teknolojilerine yönelik Ar-Ge çalışmaları ve diğer ülkelerde geliştirilen projelerin de yakından takip edilmesi kritik önem taşıyacaktır.

Yapılan modelleme çalışması sonucunda, herhangi bir emisyon azaltım önlemi ve teknolojik dönüşüm dikkate alınmadığı takdirde (**Azaltıcı Önlemlerin Öngörülmediği Senaryo- WoM**), emisyonların 2021'deki 76,6 milyon ton (Kapsam 1 + Kapsam 2) seviyesinden **2053 yılına kadar 89,4 milyon ton (Kapsam 1 + Kapsam 2) seviyesine ulaşması** beklenmektedir.

İlave bir yeni teknoloji yatırımı öngörülmeden **Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosuna (SPS) göre ise**, ülkenin yenilenebilir enerjiye yatırım hedefleri, şebeke emisyon faktörünün azaltılması ve duyurulan iklim politikalarını içeren varsayımlar çerçevesinde **2053 yılında 84,8 milyon ton (Kapsam 1 + Kapsam 2) CO<sub>2</sub> emisyonu oluşması tahmin edilmektedir.**

Model sonuçlarına göre, uygulanabilir tüm karbon azaltıcı teknolojilerin yanı sıra düzenleyici politikaların da devreye sokulduğu, en düşük maliyetli ve optimal azaltım senaryosu olan **Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (LCP) senaryosunda**, SPS senaryosuna kıyasla **2053 yılında %92,8 CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı sağlanacağı** ve emisyonların (Kapsam 1 + Kapsam 2) 6,1 milyon ton seviyesine kadar azaltılabileceği tahmin edilmektedir.

<sup>17</sup>TÜİK

<sup>18</sup>Trademap, Avrupa Parlamentosu. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248_EN.pdf) adresinden alınmıştır; PwC Analizi

<sup>19</sup>SKDM kapsamındaki ürünleri (alüminli çimento, çimento klinkerleri, suni olarak renklendirilmiş olsun veya olmasın beyaz portland çimentosu, diğer portland çimentoları ve hidrolik çimento ürünleri) ifade eder.

<sup>20</sup>Trademap, Avrupa Parlamentosu. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248_EN.pdf) adresinden alınmıştır; PwC Analizi

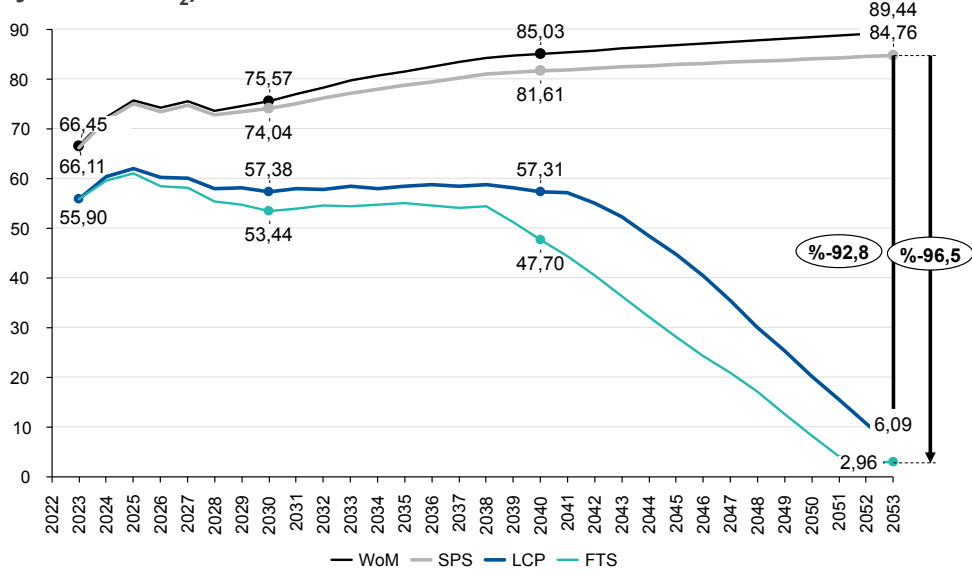
<sup>21</sup>Our World in Data, Türkiye Sera Gazı Envanteri, PwC Analizi

<sup>22</sup>Our World in Data, Türkiye Sera Gazı Envanteri, PwC Analizi

<sup>23</sup>T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2023). Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası Raporu

LCP senaryosuna kıyasla daha agresif düzeyde emisyon azaltım hedefleri olan **En İyi Teknolojiler Senaryosunda (FTS)** ise, SPS senaryosuna kıyasla **2053 yılında %96,5 emisyon azaltımına ulaşabileceği** ve emisyonların (Kapsam 1 + Kapsam 2) 3 milyon ton seviyesine kadar azaltılabileceği öngörülmektedir.

### Şekil 1. Yıllara göre Türkiye Toplam Çimento Sektörü Kaynaklı Emisyon Projeksiyonları (Kapsam 1 ve Kapsam 2, Milyon Ton CO<sub>2</sub>)<sup>24 25</sup>



Rekarbonasyon; beton, malzeme ve tasarımda verimlilik; termal enerji ve elektrik kullanımında verimlilik, yeni ve alternatif yakıtların kullanılması ile karbon yakalama ve depolama teknolojisi gibi temel karbonsuzlaşma kaldıraçları, azaltım senaryolarında net sıfır hedefine ulaşılması açısından elzemdir. Beton verimliliği kaldırıcı, çimento talebi ve buna bağlı olarak çimento üretimi üzerinde yaratacağı etkisi dikkate alınarak, azaltım senaryolarında hem yakıt ve elektrik kaynaklı emisyonların hem de proses kaynaklı emisyonların azaltılmasında modele dahil edilmiştir.<sup>26</sup>

Şekil 2'de emisyon azaltımının kaynakları kırılımlı şekilde gösterilmiştir. 2053 yılında, **şebeke emisyonlarındaki iyileştirmelerin** (emisyon faktöründeki yıllara sâri düşüş sayesinde), hiçbir karbon azaltım kaldırıcının ve iklim politika aracının dahil edilmediği senaryoya (WoM) göre **%5,2** oranında emisyon azaltımı sağlayabileceği öngörülmüştür. Bu öngörülen düşüğe ek olarak **rekarbonasyon kaldırıcının ise %13,5** oranında emisyon düşürücü etkisi olacağı modellenmiştir. Bu şekilde, SPS senaryosunda karbon azaltım teknolojileri ve alternatif yakıtlara geçiş öncesi toplam emisyonların 2053 yılında 84,8 milyon ton CO<sub>2</sub> seviyesine gerileyebileceği tahmin edilmektedir.

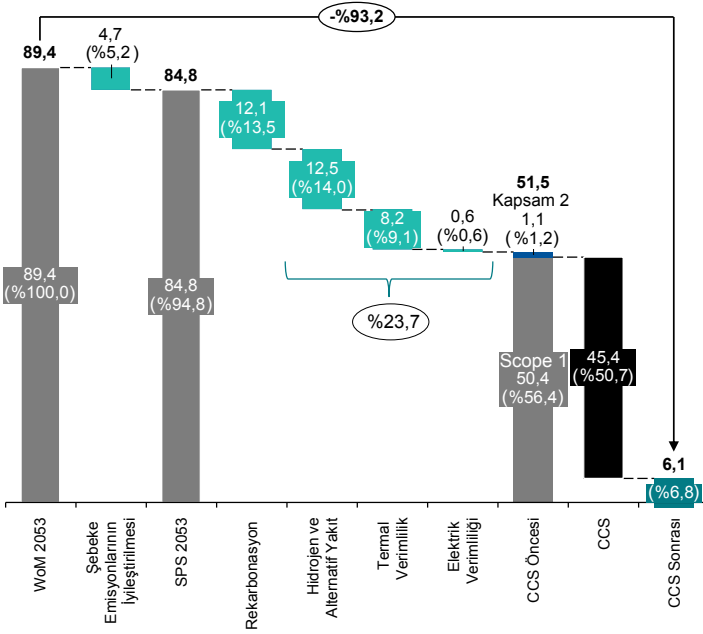
**Termal verimlilik ve elektrik verimliliği teknolojilerine yapılacak yatırımlar ile hidrojen ve alternatif yakıtların kullanımına geçişin**, emisyonlarda toplam %23,7 oranında ilave azaltıcı etkisi olabileceği öngörülmüştür.

**CCUS teknolojisi yalnızca Kapsam 1 emisyonları üzerinde etkiye sahip olup** WoM senaryosuna kıyasla 45,4 milyon ton emisyon azaltımı sağlayabileceği tahmin edilmektedir. Bu değer **toplam emisyonlarda %50,7** oranında bir düşüşe tekabül etmektedir. Diğer çimento sektörü karbonsuzlaşma yol haritaları ile benzer şekilde, CCUS teknolojisi, Türkiye LCP senaryosunda da karbonsuzlaşma kaldıraçları arasında en yüksek paya sahiptir.

Sonuç olarak, LCP senaryosunda, söz konusu tüm kaldıraçların ve emisyon ticaret sistemi gibi iklim politikalarının etkisiyle, 2053 yılında çimento sektörü kaynaklı emisyonların 6,1 milyon ton CO<sub>2</sub> seviyesine kadar (Kapsam 1 + Kapsam 2) düşürülebileceği öngörülmüştür. Bu değer, WoM senaryosuna kıyasla %93,2 seviyesinde bir emisyon azaltımını işaret etmektedir.



## Şekil 2. 2053 Yılı İtibarıyla LCP Senaryosu için Çimento Karbonsuzlaşma Yol Haritasındaki Kaldıraçların Etkisi (Kapsam 1 + Kapsam 2 Emisyonları, Milyon Ton)



## Sektörün Dönüşümü için Gereken Yatırımlar

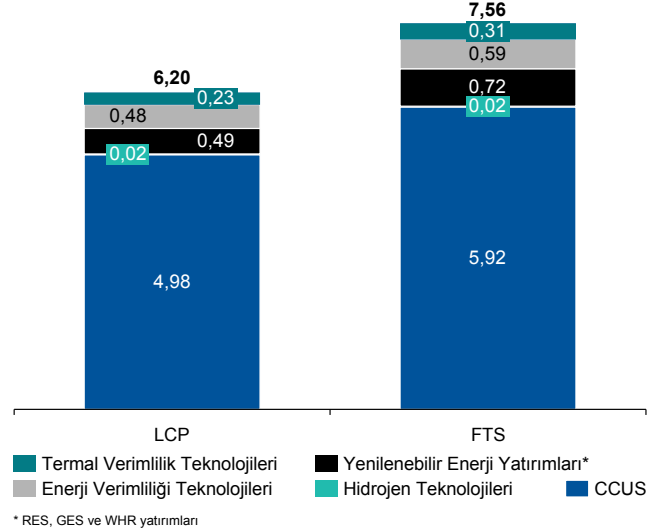
Model sonuçları, Türkiye çimento sektörünün iddialı emisyon azaltım hedeflerine ulaşabilmesi için **alternatif ham madde ve yakıtlara geçişin** sağlanmasının ve **karbon azaltım teknolojilerine** yatırım yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

**Özellikle CCUS yatırımları**, sektörün net sıfır emisyon hedefine ulaşması açısından **en fazla yatırım gerektiren alan olarak karşımıza çıkmaktadır**. Türkiye çimento sektöründe önümüzdeki 30 yıllık dönemde yaşanması gereken dönüşümün toplam yatırım maliyetinin **LCP senaryosunda 29,8 milyar dolar, FTS senaryosunda ise 30,7 milyar dolar** seviyesinde olacağı hesaplanmaktadır.

Önümüzdeki 30 yıllık dönem için hesaplanan bu yatırım maliyetlerinin net bugünkü değerlerinin (NBD) ise **LCP ve FTS senaryolarında sırasıyla yaklaşık 6,2 milyar dolar ve 7,6 milyar dolar** seviyesinde olacağı tahmin edilmektedir.<sup>27</sup>

Karbon yakalama, taşıma ve depolama maliyetlerini göz önünde bulundurarak hesaplanan CCUS teknolojisi için yapılması gereken toplam yatırım bedelinin NBD'sinin ise LCP ve FTS senaryolarında sırasıyla **4,98 milyar dolar ve 5,92 milyar dolar** olması beklenmektedir. Atık ve depolama tesislerinin kurulması gibi süreçlerle ilişkili maliyetler, sektörün karbonsuzlaşması için gerekli maliyet projeksiyonlarına dahil edilmemiştir.

## Şekil 3. Toplam Yatırımların Net Bugünkü Değeri, 2023-2053 (Milyar Dolar)



\* RES, GES ve WHR yatırımları

Çimento sektöründe CCUS teknolojisi devreye alınmadan önce, klinker yerine katkı maddesi kullanımının artırılması ve emisyon azaltımına yönelik alternatif yakıt kullanımının artırılması gibi adımların emisyon azaltımı açısından önemli bir konumda olduğunun altını çizmek önemlidir.

CCUS teknolojisinin uygulanması öncesinde diğer yöntemlerle emisyon azaltımı mümkün olsa da yenilikçi karbon azaltıcı teknolojilerinin kullanım oranlarındaki değişikliklere bağlı olarak yatırım değerleri farklılık göstermektedir. Emisyon azaltım hedeflerine ulaşılmasında en kritik hususlardan biri malzeme tedariki ve erişilebilirliğidir. Bu konular çalışmanın politika önerileri bölümünde detaylı olarak ele alınmaktadır.

<sup>27</sup>2023-2053 dönemi için yatırım maliyetleri %7 iskonto oranı ile NBD olarak hesaplanmıştır.

Türkiye çimento sektörü üzerine yapılmış karbonsuzlaşma öngörülerini, 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 gerekmektedir. Sektörün karbonsuzlaşma yatırımlarını teşvik edecek, büyük ölçekli sermayeye erişebilmesi içinse politika yapımcıların ve finans kuruluşlarının iş birliği yapması kritik önem taşımaktadır.

### Düşük Karbonlu Çimento Sektörü İçin Gelecek 30 Yıla İlişkin Olarak Önerilen Politika Adımları

Çimento sektörünün karbonsuzlaşması, birbiriyle ilişkili olan pek çok politika alanında bütüncül ve eş zamanlı bir çalışma gerektirmektedir. Yol haritası kapsamında atılması gereken

politika adımlarını tespit etmek için aşağıdaki kaynaklar kullanılmıştır:

- Sektör ve kamu paydaşları tarafından paylaşılan sektörel bilgi ve varsayımlar;
- Çimento sektöründe karbonsuzlaşma konusundaki en iyi uygulamalar hakkında proje uzmanlarının ve akademisyenlerin görüşleri;
- Proje kapsamında oluşturulan optimizasyon modeli ve senaryo analizi sonuçları.

Gerçekleştirilen tüm masa başı analiz çalışmaları ve alınan görüşler sonucunda ortaya çıkan politika önerileri iki temel politika temasıyla eşleştirilmiştir: **A) Girdi ve teknoloji** ve **B) Politika ve pazar**. Bu genel temalar altında toplanan politika alanları (karbonsuzlaştırma kaldıraçları olarak da adlandırılabilir) aşağıdaki gibi özetlenmektedir.



## A) Girdi ve Teknoloji

### A.1) Çimento Üretiminde Klinker Kullanımının Azaltılması:

Klinker-çimento oranını azaltmak amacıyla çimento katkı maddesi olarak alternatif malzemelerin kullanımını artırmaya ve teşvik etmeye yönelik çalışmaların yapılması.

### A.2) Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS)

**Teknolojileri:** Özellikle alternatif karbonsuzlaşma çözümlerinin yetersiz kaldığı durumlarda, CCUS teknolojilerini üretim sürecine entegre etmeye yönelik çalışmaların yürütülmesi, CCUS teknolojilerini çimento üretimine entegre etmek için gerekli olan yasal, mali ve teknik çerçevelerin geliştirilmesi.

**A.3) Atık Isı Enerji Geri Kazanımı:** Çimento fabrikalarında enerji tüketiminin azaltılması amacıyla atık ısı geri kazanım sistemlerinin kurulmasına yönelik mevcut teşvik sistemlerinin geliştirilmesi için gerekli çalışmaların yapılması.

**A.4) Alternatif Yakıt Kullanımı:** Enerji kaynaklı emisyonların azaltımı için çimento fabrikalarında kullanılacak, daha düşük emisyonlu atıktan üretilmiş yakıt, geri kazanılmış katı yakıt, slaç gibi alternatif yakıtların kullanılabilirliğini sağlamaya yönelik bilimsel, teknik ve finansal eylemlerin yanı sıra ticaret politikalarının uygulanması.

**A.5) Yeşil Enerji:** Yeşil enerji kaynaklarının kullanımının araştırılmasına ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasını artırmak için gereken altyapının hazırlanmasına yönelik çalışmaların yapılması. Yeşil H<sub>2</sub>'nin ticari amaçlı olarak yaygın bir şekilde kullanılmasına yönelik orta-uzun vadeli stratejilerin hazırlanması.

**A.6) Proses İyileştirilmesi:** Çimento fabrikalarında enerji ve proses verimliliğinin artırılmasına yönelik mevcut en iyi tekniklerin (MET) kullanılması, teknolojik dönüşüm çözümlerinin entegre edilmesi, elektrik ve termal güç tüketiminin azaltılmasını amaçlayan çalışmaların yürütülmesi.

**A.7) Kapsayıcı İstihdam ve Beceriler:** Yeşil dönüşüm süreci kapsamında yeni nitelik ve becerilere sahip işgücünün yetiştirilmesi için çalışmaların yürütülmesi ve herkes için fırsat eşitliği sağlayacak eğitim programlarının uygulanması, sektör paydaşlarının yeşil ve dijital dönüşüm konusunda bilinçlendirilmesine yönelik uygulamalar yapılması.

**A.8) İnşaatta Malzeme Verimliliği:** Hazır beton üretiminde ve şantiyelerde düşük karbonlu çimento kullanımına ve malzeme verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmaların yürütülmesi.

**A.9) Rekarbonasyon:** Karbonsuzlaşmayı teşvik etmek üzere, çimento üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının hesaplanması ve doğrulanması sürecine rekarbonasyonun (yeniden karbonatlaşma) dahil edilmesine yönelik çalışmaların yapılması.

## B) Politika ve Pazar

**B.1) Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge):** Çimento sektöründe yeşil dönüşüm için Ar-Ge ve yenilik teşviklerinin yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmaların yürütülmesi ve bilhassa düşük karbonlu beton ve çimento üretimi için yenilikçi sağlayıcıların araştırılması.

**B.2) Emisyon Ticaret Sistemi (ETS):** CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltımına yönelik en önemli politika adımlarından biri olan ulusal emisyon ticaret sisteminin kurulması, çimento sektöründe faaliyet gösteren firmaların yeşil dönüşüm sürecinde desteklenmesi ve seçili sektörler için ücretsiz tahsisatların sağlanması.

**B.3) Ticaret Modeli:** Küresel çapta gerçekleşmesi olası ticaret kaymalarının ve pazar değişimlerinin analiz edilerek, çimento sektörünün uluslararası rekabet gücünün korunması için gereken önlemlerin alınması.

**B.4) Ulusal Politika Belgeleri:** Yeşil dönüşümle ilgili mevzuatın AB ile uyumlu hale getirilmesine ve ayrıca kamu ve özel sektörün düşük karbonlu çimento kullanımını teşvik edecek düzenlemelerin çıkarılmasına yönelik çalışmaların yapılması.

**B.5) Yeşil Dönüşüm Finansmanı:** Yeşil dönüşüm finansman desteklerinden çimento sektörünün yararlanmasını sağlanmasına ilişkin çalışmaların yürütülmesi.

**B.6) İş Birlikleri:** Çimento sektörünün düşük karbon hedefi için sektörel bazda çözüm üretecek girişimlerin yer aldığı bir ekosistemin oluşturulması ve sektör paydaşları arasındaki iş birliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılması.

**B.7) Endüstriyel Simbiyoz:** Endüstriyel simbiyoz ağı oluşturularak farklı endüstrilere ait atık ve yan ürünlerin çimento üretiminde kullanımını artırmaya ve ürün döngüselliğini daha ileri taşımaya yönelik çalışmaların yürütülmesi.

Politika eylemlerinin sorumluluğunu alabilecek veya alması gereken önemli paydaşların belirlenmesi de dahil olmak üzere, bu politika eylemlerine ilişkin daha ayrıntılı bilgiler bu dokümanın "Bölüm 3. Türkiye Çimento Sektörü için Karbonsuzlaşma Yol Haritası" bölümünde yer almaktadır.



1

## Mevcut Durum ve Kıyaslama Analizi

## 1. Mevcut Durum ve Kıyaslama Analizi

### 1.1. Çimento Sektörünün Mevcut Durumuna Genel Bakış

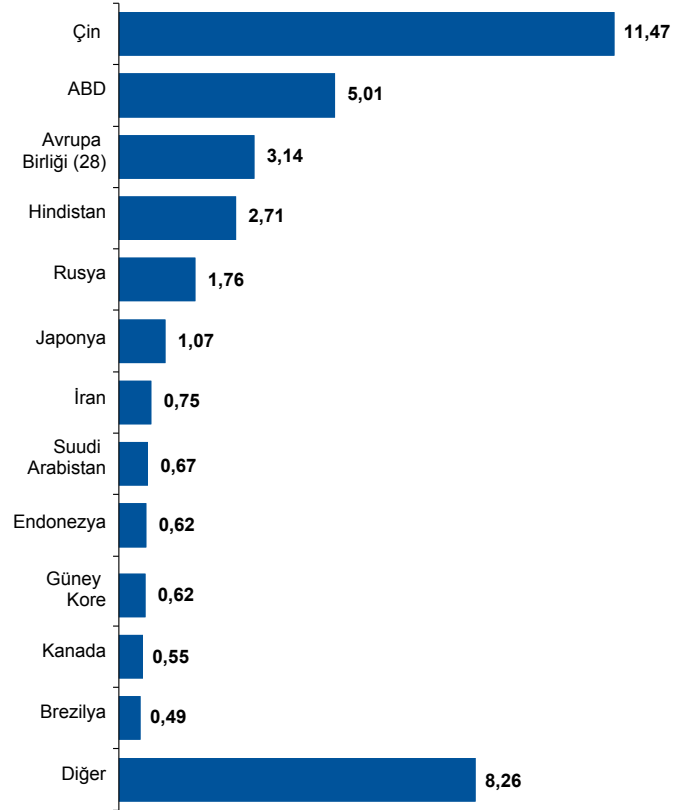
#### 1.1.1. Küresel ve Ulusal CO<sub>2</sub> Emisyonları

##### Ülkelere Göre Küresel CO<sub>2</sub> Emisyonları

Sera gazları, dünya atmosferinde bulunan ve ısıyı hapsedme özelliğine sahip gazlardır.<sup>28</sup> Sera gazları tarafından hapsedilen bu ısı, dünyanın sıcaklığını belirli bir aralıkta tutarak yaşamın desteklenmesine olanak tanıyan doğal bir süreç olan sera etkisine yol açar. Bununla birlikte, bu sera gazlarının atmosferdeki derişimlerini önemli ölçüde artıran beşerî faaliyetler, sera etkisinin artmasına ve küresel ısınmaya sebep olmaktadır. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan en yaygın sera gazı karbondioksittir (CO<sub>2</sub>). Fosil yakıtların (kömür, petrol ve doğal gaz) enerji elde etmek amacıyla yakılması, ormansızlaşma ve bazı endüstriyel işlemler sera gazına sebep olan başlıca unsurlardır. Küresel sera gazı emisyonları, esas olarak Çin ve diğer gelişmekte olan ekonomilerden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki artışa bağlı olarak 21. yüzyılın başından bu yana yükseliş eğilimindedir. Dolayısıyla sera gazlarının atmosferik derişimleri ciddi ölçüde artmış ve bu durum dünyadaki yaşamı olumsuz yönde etkileyebilecek doğal sera etkisini yükseltmiştir.<sup>29</sup>

Küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %65'inden 4 ülke ve AB üyeleri sorumludur. Şekil 4, ülkelerin sebep olduğu fosil yakıt ve sanayi kaynaklı emisyonları göstermektedir. Fosil yakıt ve sanayi kaynaklı küresel CO<sub>2</sub> emisyonları 2021 yılında 37,1 Gt CO<sub>2</sub> seviyesine ulaşmıştır. Tüm emisyonların %31'ine neden olan Çin, dünyanın en fazla karbon salan ülkesi olmaya devam etmektedir. Küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının %13'ünü oluşturan ABD ikinci, %8,5'ini oluşturan AB ülkeleri ise üçüncü sıradadır. 2021 yılında 0,45 gigaton CO<sub>2</sub> salımına neden olan Türkiye ise, küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının %1,2'sinden sorumludur.<sup>30</sup>

Şekil 4. En Fazla CO<sub>2</sub>\* Salımı Yapan Ülkeler, 2021 (Gigaton CO<sub>2</sub>)<sup>31</sup>



\*Fosil yakıt ve sanayi emisyonları

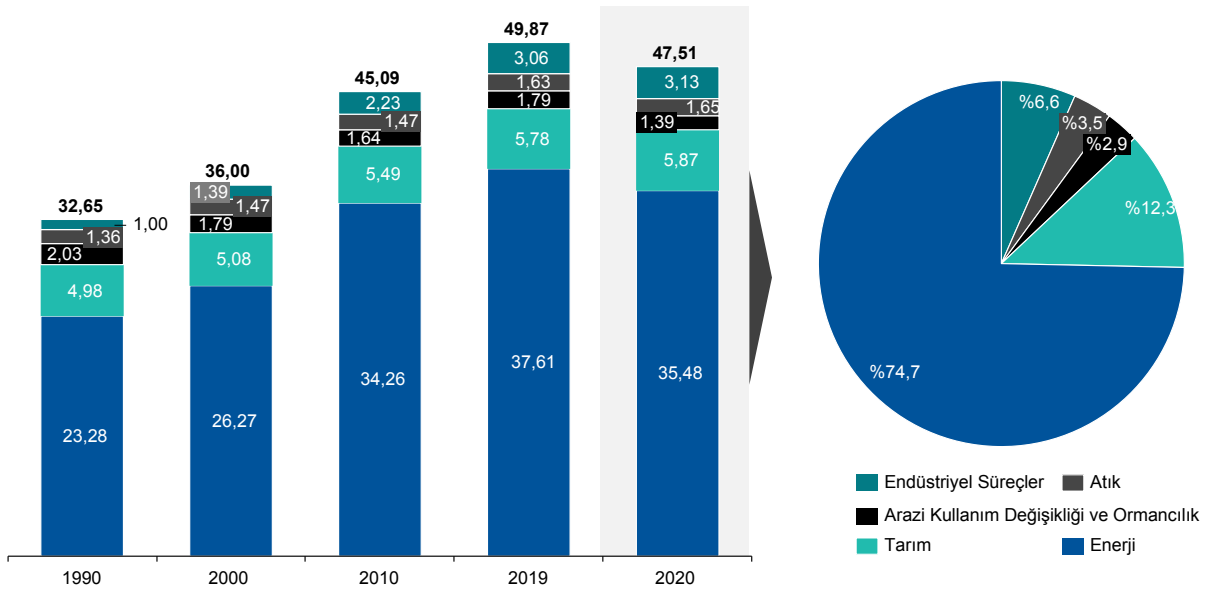
#### Sektörlere Göre Küresel Sera Gazı Emisyonları

İnsan kaynaklı sera gazı emisyonlarının açık ara en büyük kaynağı enerji tüketimidir. Küresel emisyonların neredeyse dörtte üçünü (%74,7) bu sektör oluşturmaktadır. Enerji sektöründeki emisyonlar büyük çoğunlukla elektrik ve ısı üretimi, ardından da imalat ve ulaşım faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Sera gazı emisyonlarının %12,3'ünü

ise tarım sektörü oluşturmaktadır. Sanayiden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının birincil kaynakları, fosil yakıtların kullanılması ve üretim süreçleri için gerekli olan kimyasal

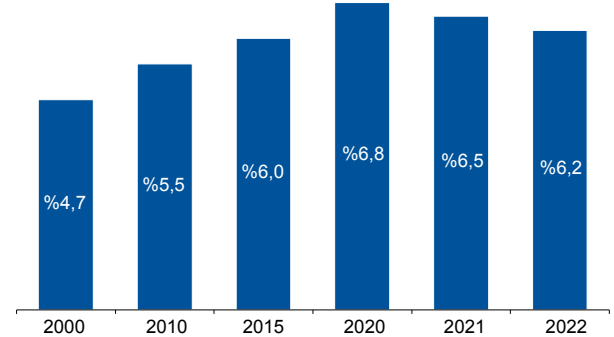
işlemlerdir. 2020 yılında küresel sera gazı emisyonlarının %6,6'sı endüstriyel süreçlerden kaynaklanmıştır.<sup>32</sup>

**Şekil 5. Sektörlere Göre Küresel Sera Gazı Emisyonları, 1990-2020 (Gigaton CO<sub>2</sub>e) (Sol), Sektörlerin Dünya Sera Gazı Emisyonlarındaki Payı, 2020 (Sağ)<sup>33</sup>**



2000 yılından sonra endüstriyel proseslerin enerji kaynaklı emisyon oranlarında artış yaşanırken, 2020 yılından sonra bu eğilim tersine dönmeye başlamıştır. 2000 yılında endüstriyel proses emisyonlarının enerji kaynaklı küresel sera gazı emisyonları içindeki payı %4,7 olmuştur. Endüstriyel proseslerin toplam emisyonlar içindeki payı 2020 yılında %6,8'e ulaşırken, 2022'de bu oran %6,2'ye gerilemiştir.

**Şekil 6. Endüstriyel Proseslerin Enerji Kaynaklı Küresel Sera Gazı Emisyonları İçindeki Payı, 2000-2022<sup>34</sup>**



<sup>32</sup><https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>

<sup>33</sup>Dünya Kaynakları Enstitüsü, PwC Analizi

<sup>34</sup>EIA (2023). Enerji kaynaklı küresel sera gazı emisyonları 2000-2022.

Endüstriyel prosesler, 1990'dan bu yana en hızlı büyüyen emisyon kaynakları olarak öne çıkmaktadır. Bu emisyon kaynağı son 30 yılda neredeyse üçe katlanmıştır. Mineral ürünler (çimento üretimi, kireç üretimi, kalker kullanımı, soda külü üretimi ve kullanımı, asfalt çatı kaplama, yol kaplama), kimya endüstrisi (amonyak, nitrik asit, adipik asit, üre, karbür, kaprolaktam, petrokimyasallar), metal üretimi (demir, çelik ve ferro alaşımlar, alüminyum, magnezyum, diğer metaller) ve diğerleri (hamur ve kağıt, gıda ve içecek üretimi, halokarbon üretimi, halokarbon ve SF6 kullanımı) endüstriyel prosesler arasındadır.<sup>35</sup> Çimento, demir-çelik, alüminyum ve kimya sektörleri, dekarbonizasyonu zor sektörlerden bazılarıdır. "Dekarbonizasyonu zor" sektörler terimi, sera gazı emisyonlarını azaltmanın veya sektörü tamamen karbondan arındırmanın özellikle zor olduğu sektörleri veya faaliyetleri ifade etmektedir.<sup>36</sup>

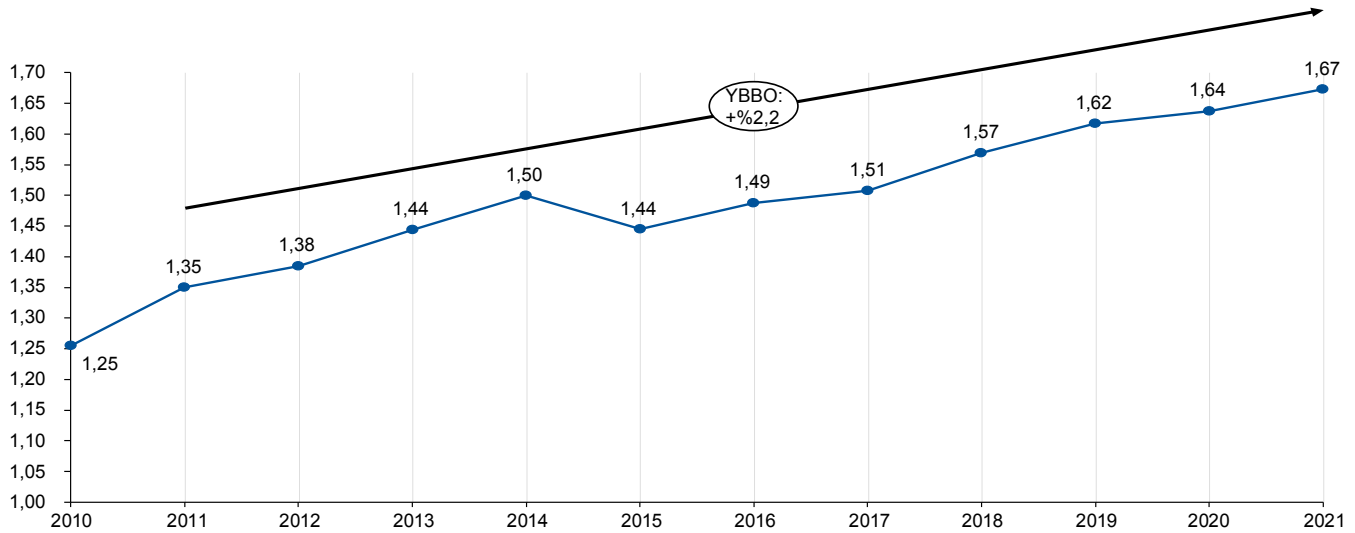
Çimento üretimi, esas itibarıyla içerdiği kimyasal süreçler ve enerji yoğun nitelikte olması nedeniyle önemli bir sera gazı emisyonu kaynağıdır. Küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %7'si çimento üretiminden

kaynaklanmaktadır.<sup>37</sup> Dekarbonizasyonu zor nitelikteki diğer sektörlerden çelik sektörü %7, alüminyum sektörü %2<sup>38</sup> ve kimya sektörü %2'lik bir paya sahiptir.<sup>39</sup>

### Küresel ve Ulusal Çimento Üretiminden Kaynaklanan CO<sub>2</sub> Emisyonları

Çimento ile ilişkili toplam emisyonlardaki artışın temel nedeni, son yıllarda çimento üretimindeki artıştır. 2015 yılındaki hafif düşüş dışında, dünya genelinde proses emisyonları artış göstermiştir. 2015 yılında yaşanan düşüş, esasında Çin'in yavaşlayan ekonomisine ve buna bağlı olarak azalan kömür kullanımından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Çin'in yenilenebilir enerji alanındaki yatırımlarının hızla büyümesi de emisyon azaltımına katkıda bulunmaktadır.<sup>40</sup> Şekil 7'de görüldüğü üzere, 2010 yılında 1,25 gigaton CO<sub>2</sub> seviyesindeki çimento üretim sürecinden kaynaklanan proses emisyonu 2021'de 1,67 gigaton seviyesine ulaşmıştır (%2,2 YBBO).

Şekil 7. Çimentodan Kaynaklı Yıllık Küresel Proses Emisyonları (Gigaton CO<sub>2</sub>)<sup>41</sup>



<sup>35</sup>O IPCC

<sup>36</sup>OECD (2020). Developing Sustainable Finance Definitions and Taxonomies, Green Finance and Investment. [https://read.oecd-ilibrary.org/finance-and-investment/developing-sustainable-finance-definitions-and-taxonomies\\_134a2dbe-en#page4](https://read.oecd-ilibrary.org/finance-and-investment/developing-sustainable-finance-definitions-and-taxonomies_134a2dbe-en#page4) adresinden alınmıştır

<sup>37</sup>GCCA

<sup>38</sup>MPP

<sup>39</sup>IEA

<sup>40</sup><https://www.nature.com/articles/nature.2015.18965> ve <https://www.nature.com/articles/nature.2015.18440>

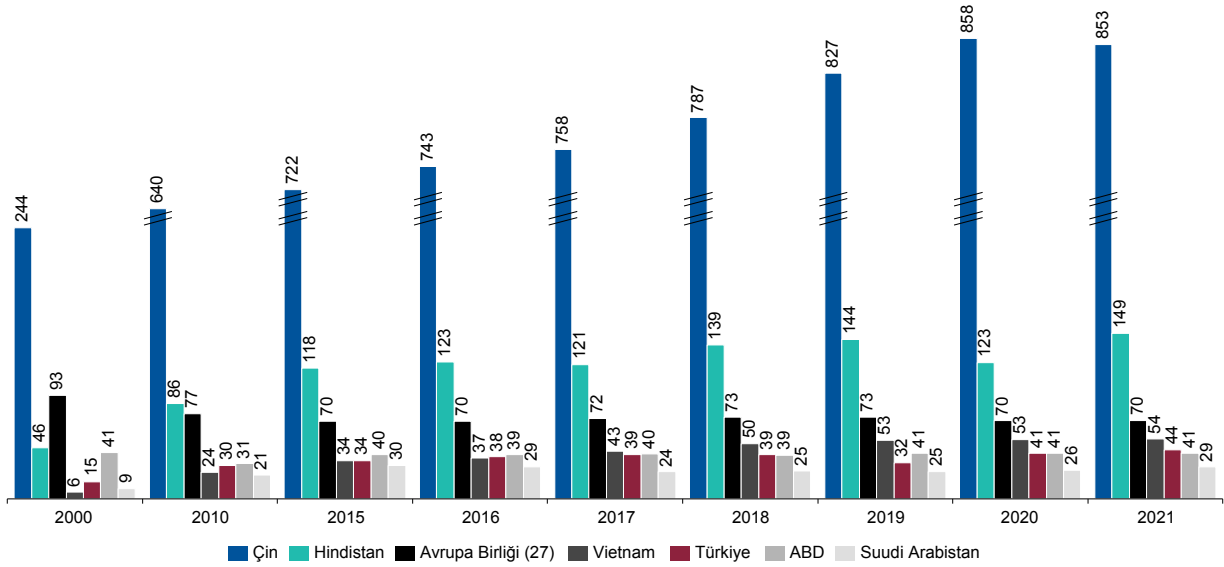
<sup>41</sup>Our World in Data. Çimento kaynaklı yıllık CO<sub>2</sub> emisyonları, PwC Analizi



Ülke bazında, çimento üretimi sonucu ortaya çıkan proses emisyonlarının en büyük kaynağı, dünyanın en büyük çimento üreticisi konumundaki Çin'dir. 2021 yılında dünya genelindeki çimento kaynaklı proses emisyonlarının %51'i (853 milyon ton CO<sub>2</sub>) Çin'e aittir. Çin'i %8,9 (149 milyon ton CO<sub>2</sub>) ile Hindistan,

%4,4 (74,21 milyon ton CO<sub>2</sub>) ile AB27 ve %3,2 (54,12 milyon ton CO<sub>2</sub>) ile Vietnam takip etmektedir. %2,6'lık (44,2 milyon ton CO<sub>2</sub>) paya sahip olan Türkiye çimento sektörü, IPPU kaynaklı emisyon salımına neden olan ülkeler arasında dünyada 5'inci sırada yer almaktadır.

### Şekil 8. Ülkelere Göre Çimento Proses Emisyonları (Milyon Ton CO<sub>2</sub>)<sup>42</sup>



AB dışındaki tüm ülkelerde son 20 yıllık dönemde çimento üretimi kaynaklı proses emisyonlarında yükseliş gözlenmiştir. 2010-2021 arasında çimento üretim sürecinden kaynaklı doğrudan CO<sub>2</sub> emisyonları en fazla artan ülke %5,1'lik YBBO ile Hindistan olmuştur. Çimento sektöründen kaynaklanan proses emisyonlarında artış yaşanan diğer ülkeler ise sırasıyla Türkiye, Suudi Arabistan ve Çin'dir. 2010-2021 döneminde IPPU emisyonlarının %0,8 YBBO ile azaltmayı başaran AB-27'deki çimento üreticileri, 2021 itibarıyla 70 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonu açmıştır.

Türkiye çimento sektöründe IPPU emisyonları 2000-2010 yılları arasında %7'lik bir YBBO ile artarken, bu artış oranı 2010-2021 döneminde %3,6 seviyesine gerilemesine rağmen hâlâ yüksek bir seviyededir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, 2000 yılında 15,2 milyon ton IPPU emisyon salımı yapan Türkiye çimento sektörü, 2010'da emisyon miktarını neredeyse iki katına çıkararak 30 milyon ton CO<sub>2</sub> seviyesine yükseltmiştir. 2021 yılı itibarıyla

Türkiye çimento sektörünün IPPU emisyonu 44,2 milyon ton CO<sub>2</sub> seviyesinde gerçekleşmiştir.<sup>43</sup>

Çimento sektörüyle ilişkili küresel proses emisyon yoğunluğu, 2021 yılı için 0,38 t CO<sub>2</sub>/t çimento olarak karşımıza çıkmaktadır.<sup>44</sup> Vietnam, açık ara çimento üretimi kaynaklı en yüksek emisyon yoğunluğuna sahip ülke olarak öne çıkmaktadır. Bu alanda ikinci sırada yer alan Türkiye ise dünya ortalamasının üzerinde konumlanmaktadır. Çimento kaynaklı toplam emisyonlarda açık ara lider konumda bulunan Çin, klinker/çimento oranındaki iyileştirmeler, düşük kalite çimento kullanımından yakın zamanda uzaklaşılması ve yüksek kalite çimento üretim hacminin artırılması sayesinde emisyon yoğunluğunu önemli ölçüde azaltmayı başarmıştır.<sup>45</sup>

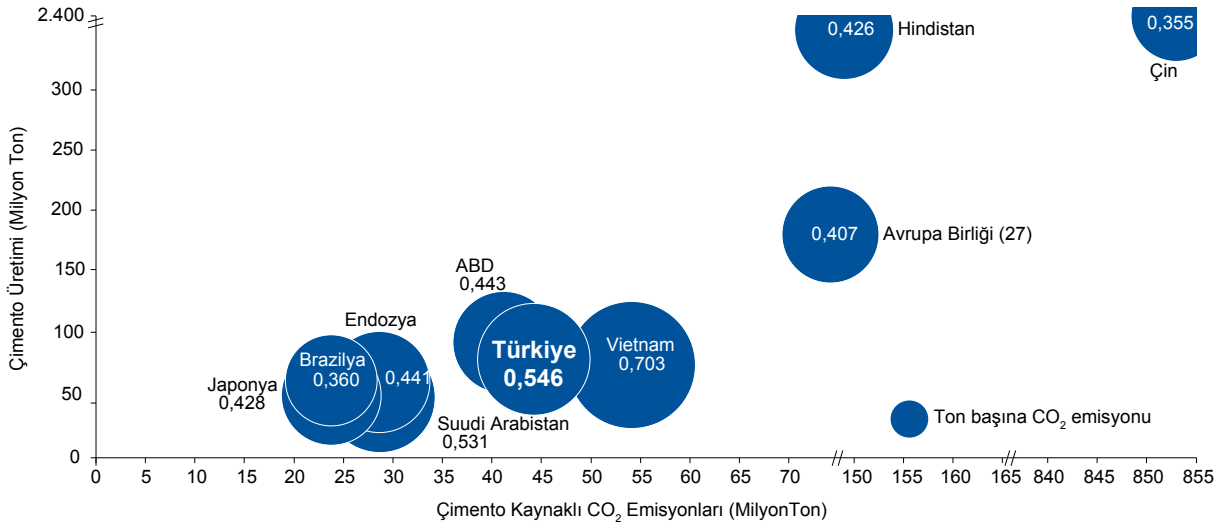
<sup>42</sup>Our World in Data, Türkiye Sera Gazı Envanteri, PwC Analizi

<sup>43</sup>Our World in Data

<sup>44</sup>Our World in Data, CEMBUREAU, Emissions from Cement Production Process, PwC Analizi,

<sup>45</sup>Wu, T., Ng, S. T., & Chen, J. (2022). Deciphering the CO<sub>2</sub> emissions and emission intensity of cement sector in China through decomposition analysis. Journal of Cleaner Production, 352, 131627.

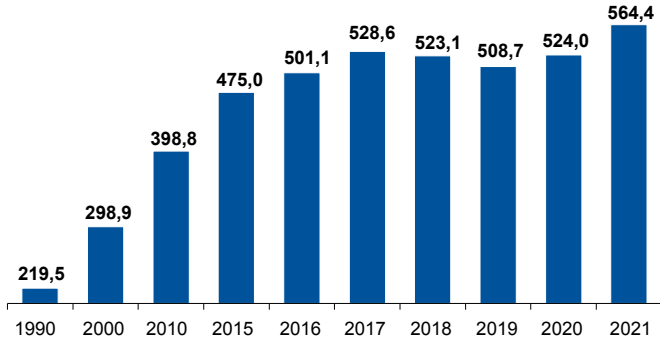
**Şekil 9. Ükelere Göre Ton Çimento Üretimi Başına Proses Emisyonları, 2021 (Milyon Ton CO<sub>2</sub>/ Milyon Ton Çimento) <sup>46</sup>**



## Türkiye'de Emisyonlar

Türkiye'nin emisyon verileri, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) için hazırlanan Türkiye Sera Gazı Envanteri dokümanından derlenmiştir. Raporlama döneminin başladığı 1990 yılından 2021 yılına kadar Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonları yaklaşık 2,5 kat artış göstermiştir. Toplam sera gazı emisyonları, 2010-2021 arasında %3,2'lik YBBO ile 398,8 milyon ton CO<sub>2</sub>'den 564,4 milyon ton CO<sub>2</sub> seviyesine yükselmiştir. Şekil 10'da görüldüğü üzere, 2021 yılında toplam sera gazı emisyonları bir önceki yıla göre %7,7 oranında artmıştır. Kişi başına toplam sera gazı emisyonu 1990'da 3,9 ton CO<sub>2</sub>e seviyesinde iken, 2021'de yılında bu oran 6,7 ton CO<sub>2</sub>e seviyesine yükselmiştir.<sup>47</sup>

**Şekil 10. Türkiye'nin Toplam Sera Gazı Emisyonları (Milyon Ton CO<sub>2e</sub>) <sup>48</sup>**



26

<sup>46</sup>CEMBUREAU, Our World in Data, Türkiye Sera Gazı Envanteri, PwC Analizi

<sup>47</sup>TÜİK, Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2021

<sup>48</sup>TÜİK, PwC Analizi

<sup>49</sup>Türkiye Sera Gazı Envanteri, 1990-2021. <https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EV/CED/tr/%C3%87evreVe%C4%B0klim/%C4%B0klimDe%C4%9Ffi%C5%9Fikli%C4%9Fi/UlusalSeraGaz%C4%B1EmisyonEnvanteri/Belgeler/Ek-1.pdf> adresinden alınmıştır.

Türkiye Sera Gazı Envanteri, ülkenin emisyonlarını 5 sektörde derlemektedir.

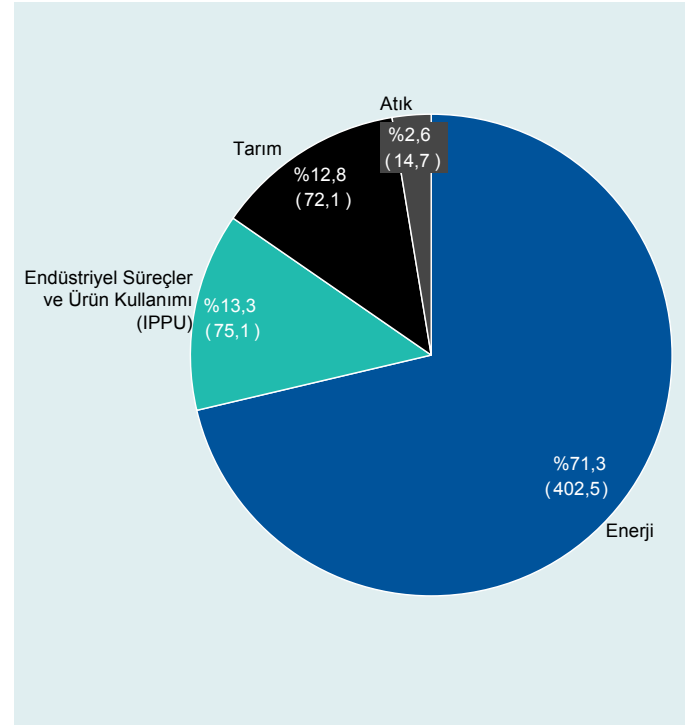
- Enerji
- Endüstriyel Süreçler ve Ürün Kullanımı (IPPU)
- Tarım
- Atık
- Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık (LULUCF)

Enerji sektörü, fosil yakıt kaynaklı emisyonların (enerji, imalat ve inşaat, ulaştırma ve diğer sektörler) yanı sıra fosil yakıtlar ile CO<sub>2</sub> taşıma ve depolama faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları da içermektedir.<sup>49</sup> Endüstriyel süreçler ve ürün kullanımından (IPPU) kaynaklanan sera gazı emisyonları, üretim süreçlerinden kaynaklanan emisyonları temsil etmektedir. Yani, IPPU kategorisi yalnızca proses kaynaklı emisyonları kapsamaktadır. Süreçler özelinde enerjinin temin edilmesi amacıyla kullanılan yakıtın yanmasından kaynaklanan emisyonlar ise bu kapsamda değildir.

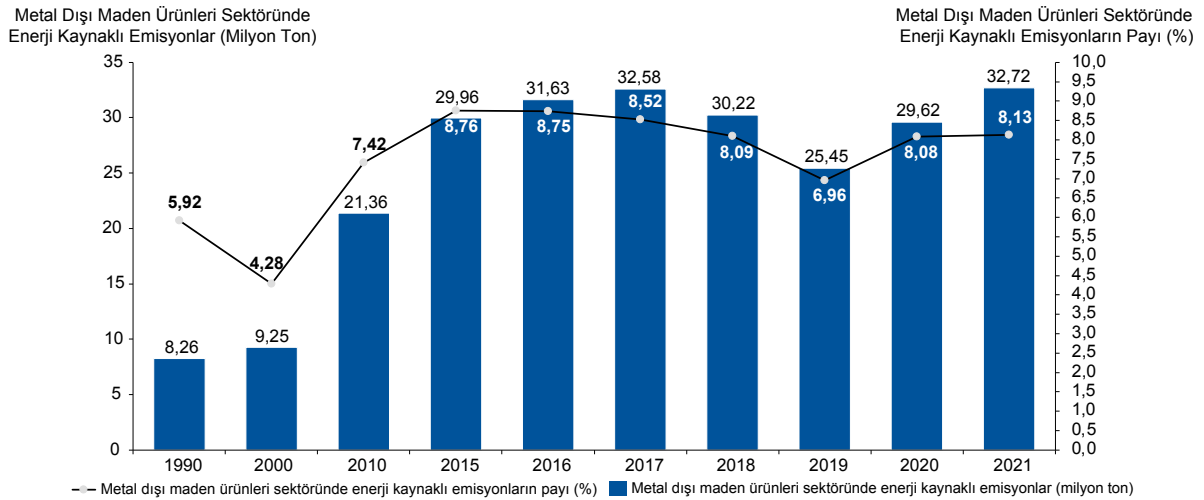
Şekil 11'de görüldüğü üzere toplam sera gazı emisyonları içerisinde en yüksek payı %71,3 ile enerji kaynaklı emisyonlar alırken, bunu %13,3 ile IPPU, %12,8 ile tarım ve %2,6 ile atık sektörü takip etmektedir. Enerji sektörü emisyonları 2010 yılında 287,9 milyon ton CO<sub>2e</sub> iken, 2021'e kadar %3,1'lik YBBO ile artarak 402,5 milyon ton CO<sub>2e</sub> seviyesine ulaşmıştır. 2010'da 49,1 milyon ton CO<sub>2e</sub> olan IPPU kaynaklı emisyonlar ise, %3,9'luk bir YBBO ile artarak 75,1 milyon ton CO<sub>2e</sub> seviyesine gelmiştir.<sup>51</sup>

Çimento sektörüyle ilgili enerji kaynaklı emisyonlar, metal dışı mineraller kategorisinde cam ve seramik ile birlikte hesaplanmaktadır. Çimento enerji yoğun bir sektör olduğundan, pandemi etkisi haricinde, artan talep ve üretimle birlikte enerji kaynaklı emisyonlar yıllar içinde artış göstermiştir. 2010-2021 arası dönemde ise metal dışı maden ürünleri sektöründeki enerji kaynaklı emisyonlar %4,0'lık bir YBBO ile artış göstermiştir. 2010 yılında metal dışı maden ürünleri sektörüyle ilgili olarak enerjiden kaynaklanan emisyonların miktarı 21,36 milyon ton CO<sub>2</sub> ve toplam enerji sektörü içindeki payı %7,42 iken, 2021 yılında emisyon miktarı 32,7 milyon tona ve sektör içindeki payı %8,12'ye ulaşmıştır. Diğer SKDM sektörleriyle kıyaslandığında, metal dışı maden ürünleri sektöründeki enerji kaynaklı emisyonların toplam enerji sektörü içindeki payı, demir-çelikten (%1,45) ve alüminyumdan (%0,22) çok daha yüksektir.<sup>52</sup>

**Şekil 11. Türkiye'nin Sektörlere Göre Sera Gazı Emisyonları, 2021 (Milyon Ton)<sup>50</sup>**



**Şekil 12. Türkiye'nin Metal Dışı Maden Ürünleri Sektöründeki Enerji Kaynaklı Emisyonları<sup>53</sup>**



<sup>50</sup>Türkiye Sera Gazı Envanteri, 1990-2021.

<sup>51</sup>Türkiye Sera Gazı Envanteri, 1990-2021.

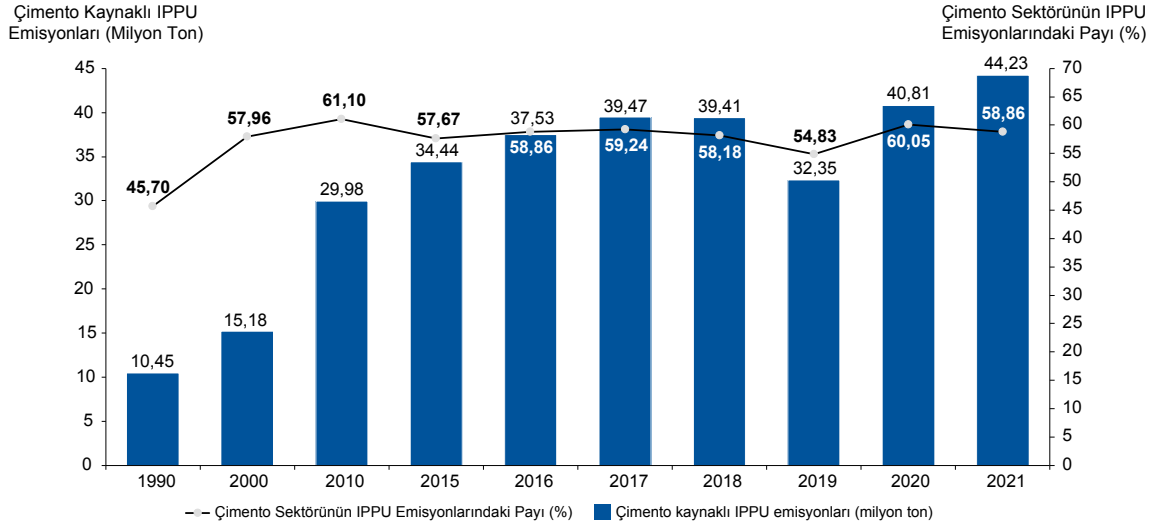
<sup>52</sup>Türkiye Sera Gazı Envanteri, PwC Analizi

<sup>53</sup>Türkiye Sera Gazı Envanteri, PwC Analizi

Çimento üretimi kaynaklı (IPPU<sup>54</sup>) CO<sub>2</sub> emisyonları 1990-2021 yılları arasında %4,8'lik bir YBBO ile artış göstermiştir. 2021 yılında klinker üretimi 84 milyon ton, çimento üretimi ise 81 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Dolayısıyla çimento sektörü, endüstriyel süreçler ve ürün kullanımı (IPPU) kaynaklı 44,2 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonuna neden olmuştur. Çimento sektörünün toplam IPPU içindeki payı %58,9'dur. Türkiye'de çimento üretiminden kaynaklanan toplam

Kapsam 1 emisyonlarının sanayi kaynaklı toplam Kapsam 1 emisyonları içindeki payı 2020 itibarıyla %22,8'dir.<sup>55</sup> Aynı yıl, dekarbonizasyonu zor olarak nitelendirilen diğer SKDM sektörlerinin payları ise çimento sektörüne kıyasla önemli oranda daha düşüktür. 2021 yılında demir-çelik sektörünün toplam IPPU emisyonları içindeki payı %15,8, alüminyumun payı ise %1,57 olmuştur.

### Şekil 13. Çimento Sektöründen Kaynaklanan IPPU Emisyonları<sup>56</sup>

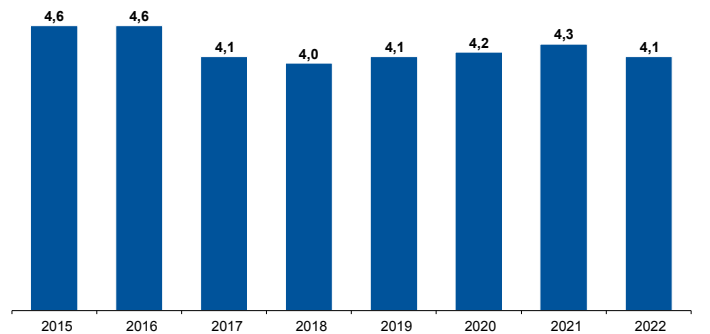


### 1.1.2. Küresel ve Ulusal Çimento Üretimi

#### Küresel Çimento Üretimi

2022 yılında küresel çimento üretimi yaklaşık 4,1 milyar ton olarak gerçekleşmiştir.<sup>57</sup> Çimento üretiminde 2018 yılından bu yana görülen artış eğilimi, 2022 yılında %4,7 oranındaki daralma ile sektöre uğramıştır. Söz konusu daralmanın başlıca nedeni Çin çimento üretimindeki değişimdir. 2022 yılında dünyadaki tüm çimento üretiminin yarısından fazlasını (%51,1) Çin oluşturmaktadır.<sup>58</sup> 2022 yılında Çin'in çimento üretimi bir önceki yıla göre %12,5 azalmıştır. Bu düşüşün nedeni, Çin'in büyük altyapı projelerinin ve en büyük şehirlerinden birçoğunun inşaa çalışmalarının belirli ölçüde tamamlanması ve dolayısıyla çimento talebinin azalmasıdır.<sup>59</sup>

### Şekil 14. Küresel Çimento Üretimi, 2013-2022, (Milyar Ton)<sup>60</sup>



<sup>54</sup>IPPU'lar arasında değerlendirme yapıldığında, çimento üretimi maden endüstrisi kategorisinde ele alınmaktadır.<sup>2</sup>

<sup>55</sup>Uzman görüşü, PwC Analizi

<sup>56</sup>Türkiye Sera Gazı Envanteri, PwC Analizi

<sup>57</sup>CEMBUREAU (2023). Faaliyet Raporu 2022.

<sup>58</sup>CEMBUREAU (2023). Faaliyet Raporu 2022.

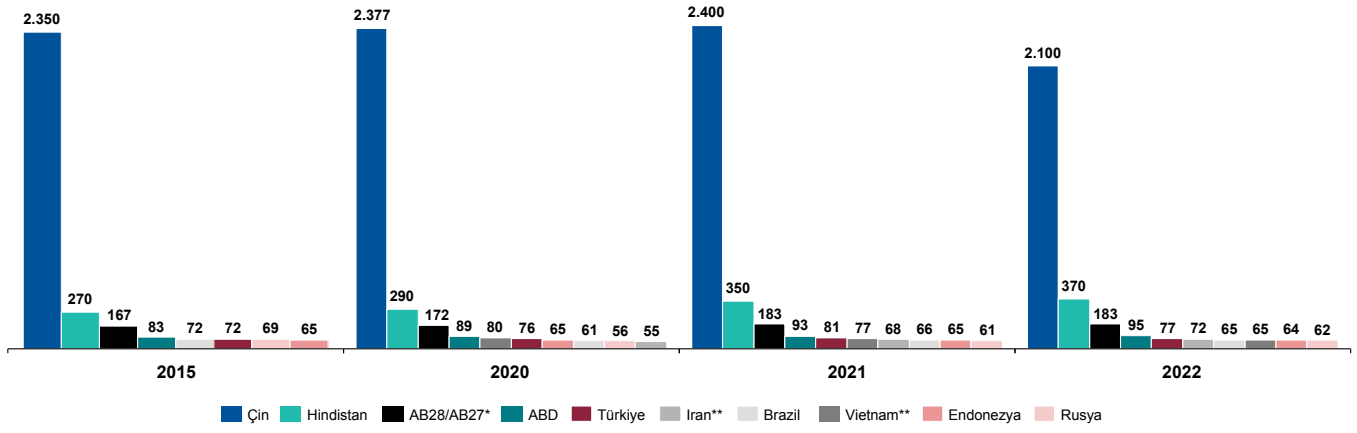
<sup>59</sup>Worldcement (2023). <https://www.worldcement.com/asia-pacific-rim/24052023/the-future-of-chinese-cement-production/> adresinden alınmıştır

<sup>60</sup>CEMBUREAU. Faaliyet Raporları, PwC Analizi

Küresel çimento üretiminde Çin'in ardından %9'luk payla Hindistan gelmektedir. Hindistan, son 8 yılda %4,6 YBBO ile büyüyerek 2022'de 370 milyon ton çimento üretimine ulaşmıştır. Küresel çimento üretiminin %4,5'i ise AB ülkelerine aittir. AB ülkeleri 2015-2022 döneminde çimento üretimini

%1,3 (YBBO) oranında arttırmıştır. Son 8 yıllık dönemde çimento üretiminde %0,8'lik bir artış kaydeden Türkiye, 2022 yılında 77 milyon tonluk üretim gerçekleştirmiştir. 2015 yılında Türkiye'nin küresel çimento üretimi içindeki payı %1,8 iken, 2022 yılında bu pay %1,9'a yükselmiştir.

**Şekil 15. Ülkelere Göre Çimento Üretimi, 2015-2022 (Milyon Ton)<sup>61</sup>**



\* AB28 2019'a kadar / AB27 2020 raporlama yılı itibarıyla

\*\* Vietnam ve İran'ın 2020 yılı itibarıyla çimento üretim miktarı verilerine ulaşılabilir.

## Ulusal Çimento Üretimi

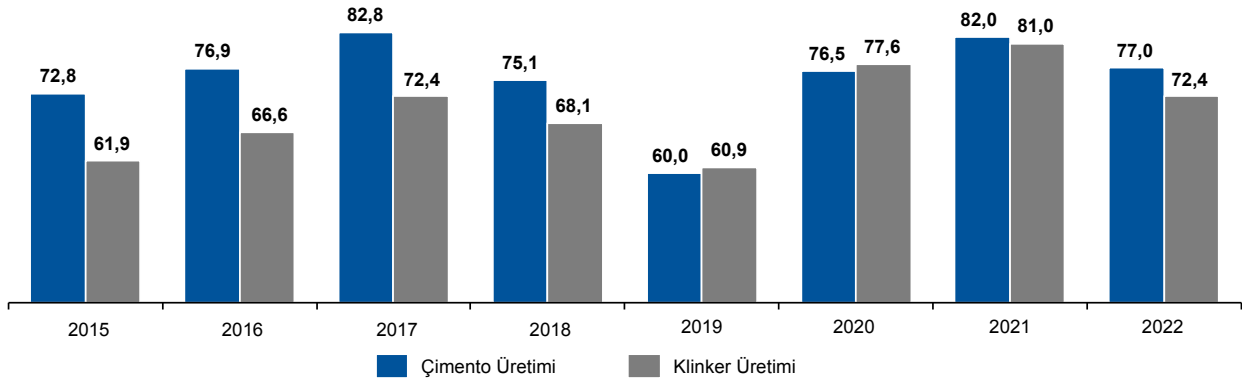
Son sekiz yılda ülkenin çimento üretimi %0,8 YBBO ile artarak 77 milyon tona ulaşırken, aynı dönemde klinker üretimi %2,3'lük YBBO ile artarak 72,4 milyon tona gelmiştir.<sup>62</sup> Ülkenin inşaat sektöründe son 5 yıldır sürekli yaşanan daralma sebebiyle çimentoya olan iç talep son yıllarda azalmıştır. Diğer

yandan, aynı dönemde hem klinker hem çimento ihracatındaki önemli seviyede artışlar görülmüş ve üretim bu yükselen dış talep sebebiyle artmıştır. Ayrıca, son dönemde yaşanan depremlerin çimento talebini etkilemesi ve bu talebin ağırlıklı olarak yakın konumlarda bulunan fabrikalardan karşılanması beklenmektedir.

**Şekil 16. Türkiye'nin Çimento ve Klinker Üretimi, 2015-2022 (Milyon Ton)<sup>63</sup>**

Çimento YBBO (2015 - 2022): %0,8

Klinker YBBO (2015 - 2022): %2,3



<sup>61</sup>CEMBUREAU. Faaliyet Raporu 2022, 2021, 2020; PwC Analizi

<sup>62</sup>Üretim değerleri, Türkiye'nin tüm çimento sektörünü kapsamaktadır.

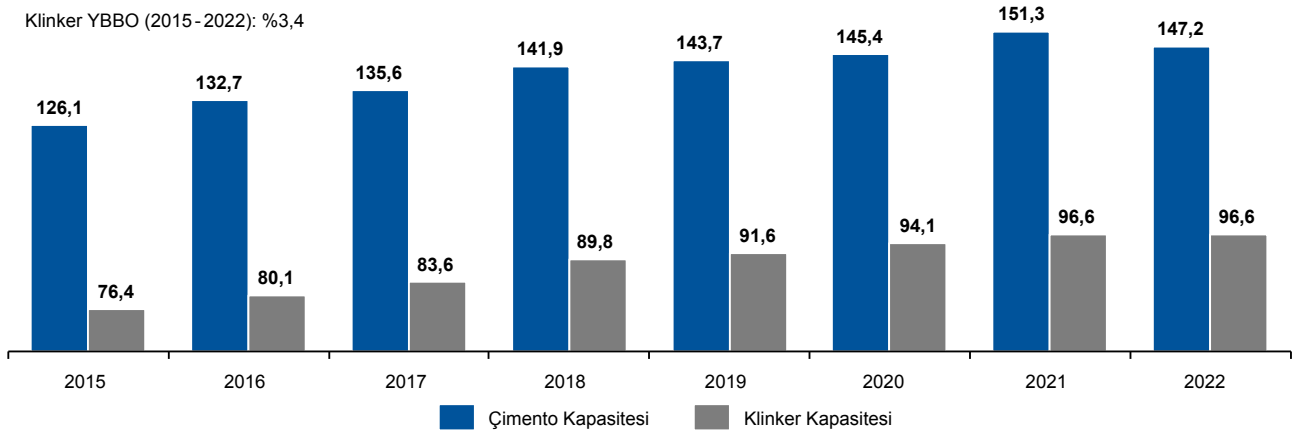
<sup>63</sup>TÜİK, PwC Analizi

2022 yılı itibarıyla Türkiye çimento sektörü 56 entegre çimento fabrikasından ve 21 öğütme tesisinden oluşmaktadır.<sup>64</sup> Son 10 yıllık dönemde ülkenin çimento üretim kapasitesi %37,1 artarak 147,2 milyon tona ulaşırken, klinker üretim kapasitesinde ise aynı dönemde %41,2'lik bir artış kaydedilmiş

ve 2022 yılında toplam 96,6 milyon ton kapasiteye ulaşılmıştır. Yaşanan bu güçlü artışa rağmen hem çimento hem de klinker üretimindeki kapasite artış hızının yavaşladığı görülmektedir. Bu yavaşlamanın, ağırlıklı olarak enerji ve üretim maliyetlerindeki artışa bağlı olduğu söylenebilir.

### Şekil 17. Türkiye'deki Çimento ve Klinker Üretim Kapasiteleri, 2015-2022 (Milyon Ton)<sup>65</sup>

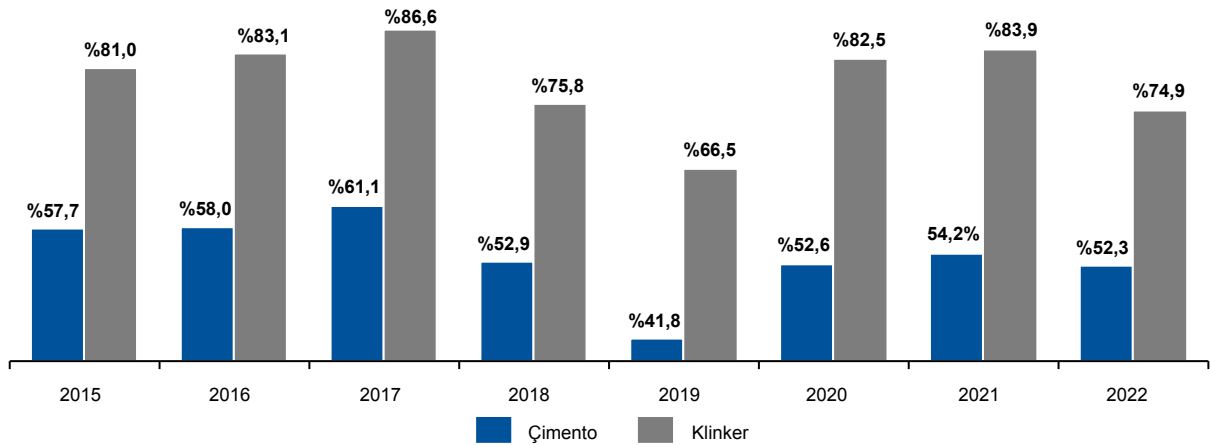
Çimento YBBO (2015 -2022): %2,2  
Klinker YBBO (2015 -2022): %3,4



Şekil 18, 2015-2022 dönemine ait klinker ve çimento kapasite kullanım oranlarını göstermektedir. Çimento üretimindeki yıllık kapasite kullanım oranları son 10 yıllık dönemde düşüş kaydederek yaklaşık %52-53'e kadar gerilerken, yıllık klinker

kapasite kullanım oranları ise nispeten daha sınırlı düşüş göstermiştir. Klinker kapasite kullanım oranının nispeten yüksek olması, Türkiye'nin önemli miktarda klinker ihracatı yapmasıyla desteklenmektedir.

### Şekil 18. Çimento ve Klinker Kapasite Kullanım Oranları, 2015-2022<sup>66</sup>



<sup>64</sup>Türkçimento. [https://www.turkcimento.org.tr/tr/uye\\_fabrikalar](https://www.turkcimento.org.tr/tr/uye_fabrikalar) adresinden alınmıştır.

<sup>65</sup>Türkçimento, Türkiye 2015-2022 Çimento İstatistikleri, PwC Analizi. Kapasite değerleri Türkiye'nin tüm çimento sektörünü kapsamaktadır.

<sup>66</sup>TÜİK, Türkçimento, PwC Analizi

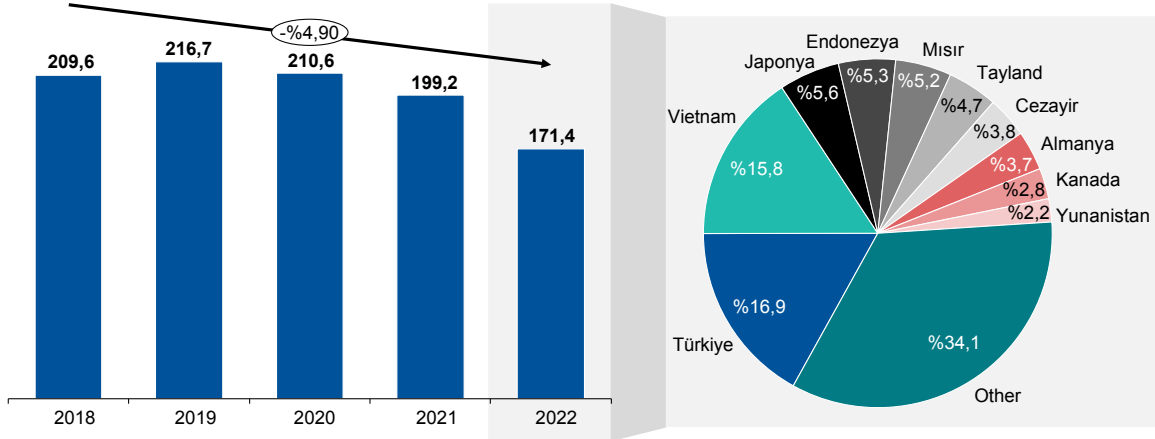
### 1.1.3. Küresel ve Ulusal Çimento İhracatı

#### Küresel Çimento İhracatı

Alüminli çimento, çimento klinkerleri, beyaz portland çimentosu, diğer portland çimentoları ve hidrolik çimento ürünleri, çimento endüstrisinde kullanılan ve SKDM kapsamında değerlendirilen ürünlerdir.<sup>67</sup> SKDM kapsamındaki çimento ürün gruplarını kapsayan dünya küresel çimento ihracatı 2018 yılında 209,6 milyon ton iken, 2022'de 171,4

milyon tona gerilemiştir. Bu düşüş 2018-2022 arasında %4,9'luk bir YBBO'ya tekabül etmektedir. 2019 ve 2020 yıllarında dünyanın büyük çimento ihracatçısı Vietnam olurken, 2022 yılında Türkiye miktar bazında 29 milyon ton ihracat gerçekleştirerek, Vietnam'ı geçmiş ve %16,9'luk pay ile en büyük ihracatçı konumuna gelmiştir. 2022 yılı toplam küresel çimento ihracatında Vietnam %15,8'lik (27,0 milyon ton) payla ikinci, Japonya ise %5,6'lık (9,6 milyon ton) payla üçüncü sırada yer almıştır.<sup>68</sup>

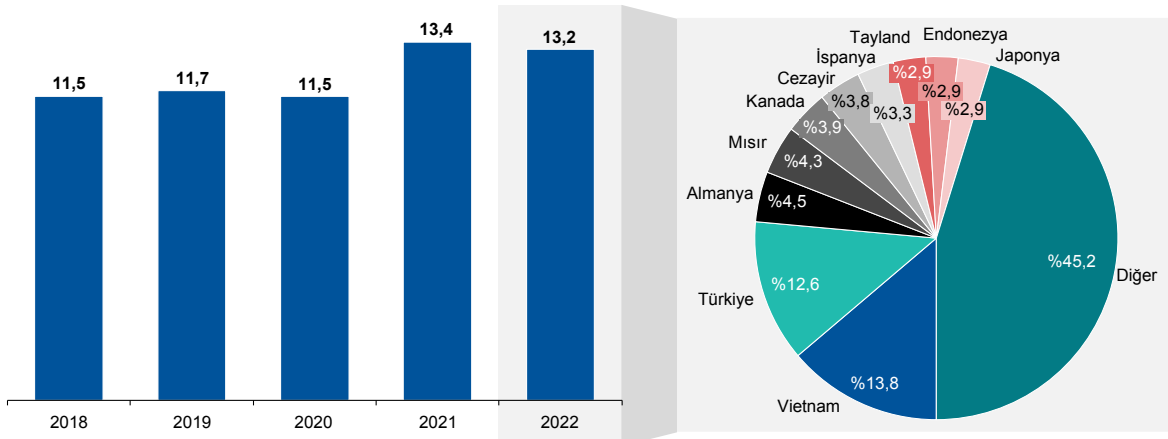
Şekil 19. Toplam Küresel Çimento İhracatı (Milyon Ton) ve Ülkelerin Çimento İhracatındaki Payı (%)<sup>69</sup>



Küresel çimento ihracatı 2022 yılında 13,2 milyar dolar olarak gerçekleşmiştir. 2018-2022 arasında, değer bazında %3,34 YBBO ile artan küresel çimento ihracatı, geçtiğimiz yıl ise %2 daralmıştır. Değer bazında 2022 yılı dünya çimento

ihracatından %13,8'lik pay alan Vietnam ilk sırayı alırken, %12,6'lık payla Türkiye ikinci ve %4,5'lik payla Almanya üçüncü sırada yer almaktadır.

Şekil 20. Toplam Küresel Çimento İhracatı (Milyar Dolar) ve Ülkelerin Çimento İhracatındaki Payı (%)<sup>70</sup>



<sup>67</sup>Avrupa Parlamentosu. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248_EN.pdf) adresinden alınmıştır

<sup>68</sup>Trademap. Küresel çimento ihracatı, SKDM kapsamına giren çimento sektörüne ilişkin ürün grupları üzerinden hesaplanmıştır.

<sup>69</sup>Trademap, Avrupa Parlamentosu. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248_EN.pdf) adresinden alınmıştır; PwC Analizi

<sup>70</sup>Trademap, Avrupa Parlamentosu. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248_EN.pdf) adresinden alınmıştır; PwC Analizi

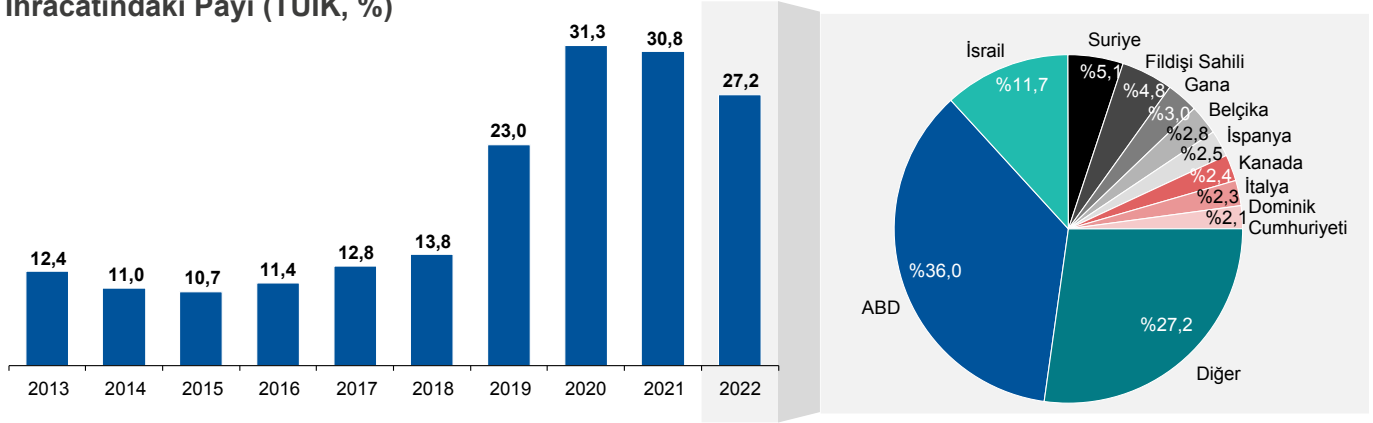
## Ulusal Çimento İhracatı

TÜİK verilerine göre, Türkiye'nin çimento ihracatı 2013 yılında 12,4 milyon ton iken, 2022 yılında 27,2 milyon ton seviyesine ulaşmıştır.<sup>71</sup> Çimento sektörü ihracat hacmi 10 yıllık dönemde toplam %9,1'lik bir YBBO ile büyürken 2015-2020 arasında ise bu artış hızı %23,9 seviyesine çıkmıştır. 2020 yılında yaklaşık 31,3 milyon tona ulaşan Türkiye çimento ihracatı son 10 yılın (2013-2022) en yüksek seviyesine ulaşmıştır.<sup>72</sup> 2020 yılı sonrasında ise, ihracat miktar bazında daralmıştır. Enerji fiyatları ve üretim maliyetlerindeki artış, dünya çimento

ithalatındaki düşüş ve Rusya-Ukrayna gerilimi bu daralmanın başlıca nedenleri arasında sıralanabilir.

Türkiye'de üretilen çimento ürünlerinin son yıllarda en çok ihraç edildiği ülke Amerika Birleşik Devletleri (ABD) olmuştur. ABD, 2022 yılı itibarıyla miktar bazında %36'lık pay ile Türkiye'nin çimento ihracatındaki en büyük pazarı konumundadır. %11,7 payla İsrail ve %5,1 payla Suriye ise sektörün diğer önemli ihracat pazarlarıdır.

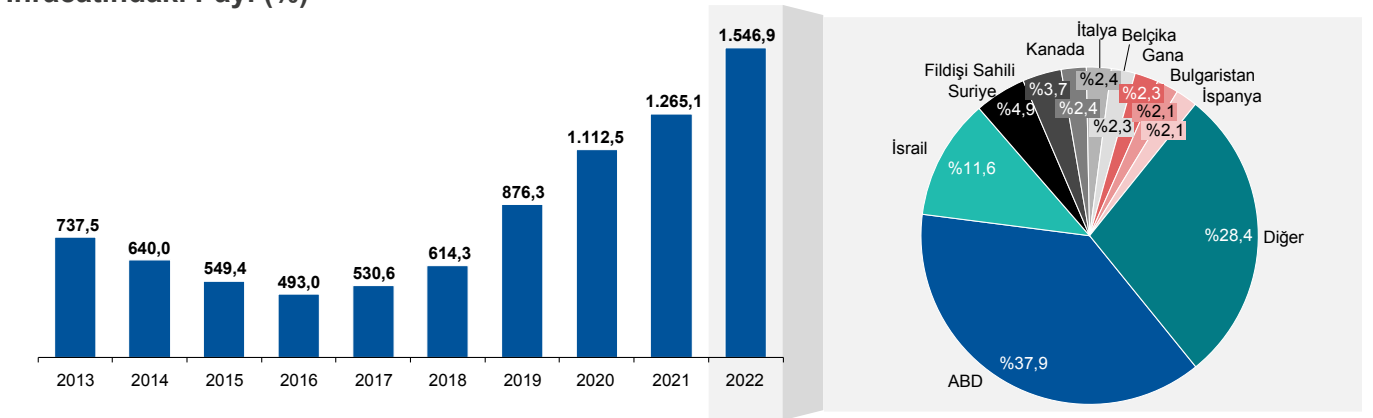
**Şekil 21. Türkiye Çimento İhracatı (Milyon Ton) ve Ülkelerin Türkiye Çimento İhracatındaki Payı (TÜİK, %)**



2022 yılında Türkiye'nin çimento ihracatı değer bazında yaklaşık 1,55 milyar dolar seviyesine ulaşmıştır. 2013-2022 arasında %8,6'lık bir YBBO oranında büyüme kaydedilirken, 2017 yılından sonra bu büyüme hızlanmış ve 2022 yılına

kadar %23,9'luk bir YBBO yakalanmıştır. Ülke sıralamasına göre ABD %37,9'luk payla ilk sırada yer alırken, %11,6'lık payla İsrail ikinci ve %4,9'luk payla Suriye üçüncü sırada kendine yer bulmuştur.

**Şekil 22. Türkiye Çimento İhracatı (Milyon Dolar) ve Ülkelerin Türkiye Çimento İhracatındaki Payı (%)<sup>73</sup>**

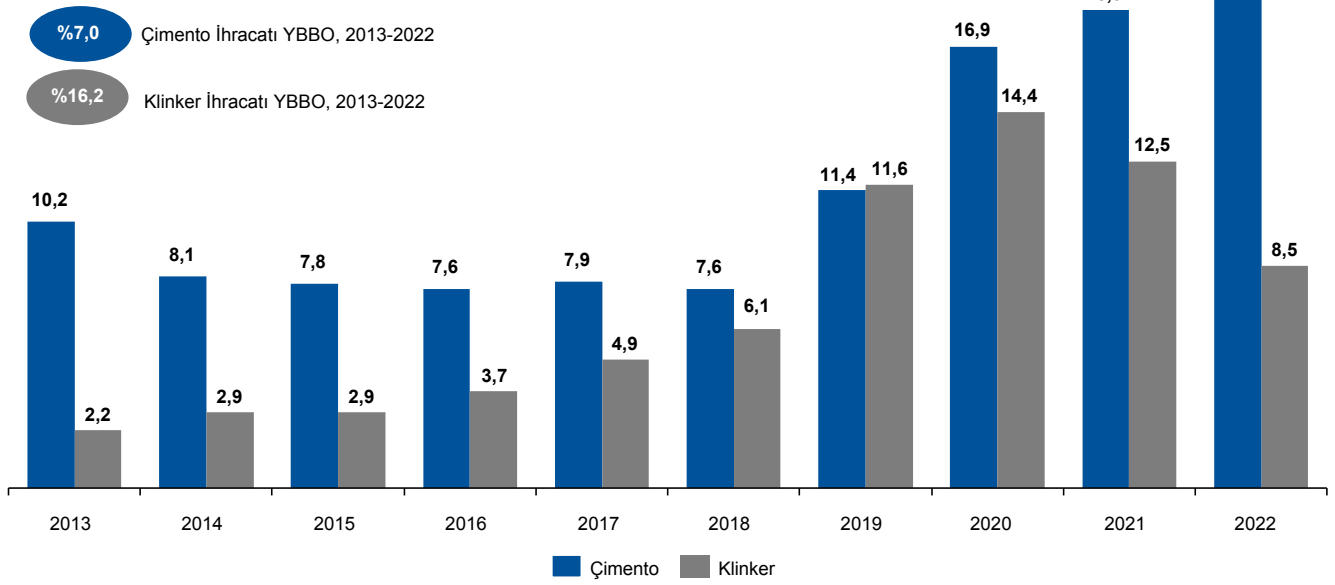




Proje kapsamında, çimento ürünleri ve klinker kırılımında detaylı analiz de yapılmıştır. Bu doğrultuda, 2013-2022 arasında klinker ihracatındaki artış çimento ihracatında yaşanan artıştan daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. 2013 yılında 2,2 milyon ton olan klinker ihracatı, YBBO bazında

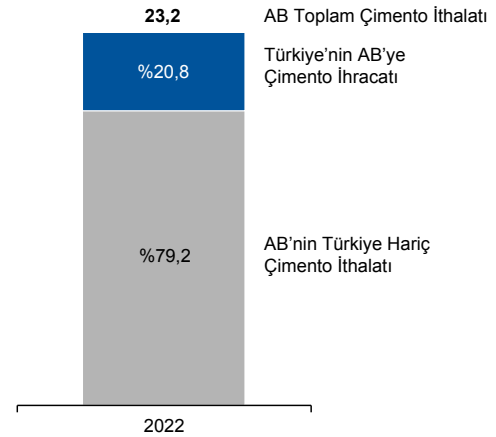
%16,2 oranında artarak 2022'de 8,5 milyon ton seviyesine ulaşmıştır. Benzer şekilde, 2013 yılında 10,2 milyon ton olan çimento ihracatı, YBBO bazında %7 artışla 2022 yılında 18,7 milyon tona yükselmiştir. Bu güçlü büyüme performansının önümüzdeki yıllarda da sürmesi beklenmektedir.

### Şekil 23. Türkiye'nin Çimento ve Klinker İhracatı (Milyon Ton)<sup>74</sup>



Avrupa Birliği ülkelerinin (AB-27) toplam çimento ürünleri ithalatı 2022 yılında 23,2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir.<sup>76</sup> Türkiye AB ülkelerine 2022 yılında 4,8 milyon tonluk ihracat yapmış ve AB çimento ithalatının %20,8'ini karşılamıştır. Ayrıca değer bazında değerlendirildiğinde, 2022 yılında Türkiye çimento ihracatının toplam AB çimento ithalatı içindeki payı %8,7 olarak gerçekleşmiştir. Bu oran yaklaşık 266 milyon dolara tekabül etmektedir.<sup>77</sup>

### Şekil 24. Türkiye Çimento İhracatının AB-27 Çimento İthalatı İçindeki Payı (Milyon Ton)<sup>75</sup>



<sup>74</sup>TÜİK, PwC Analizi

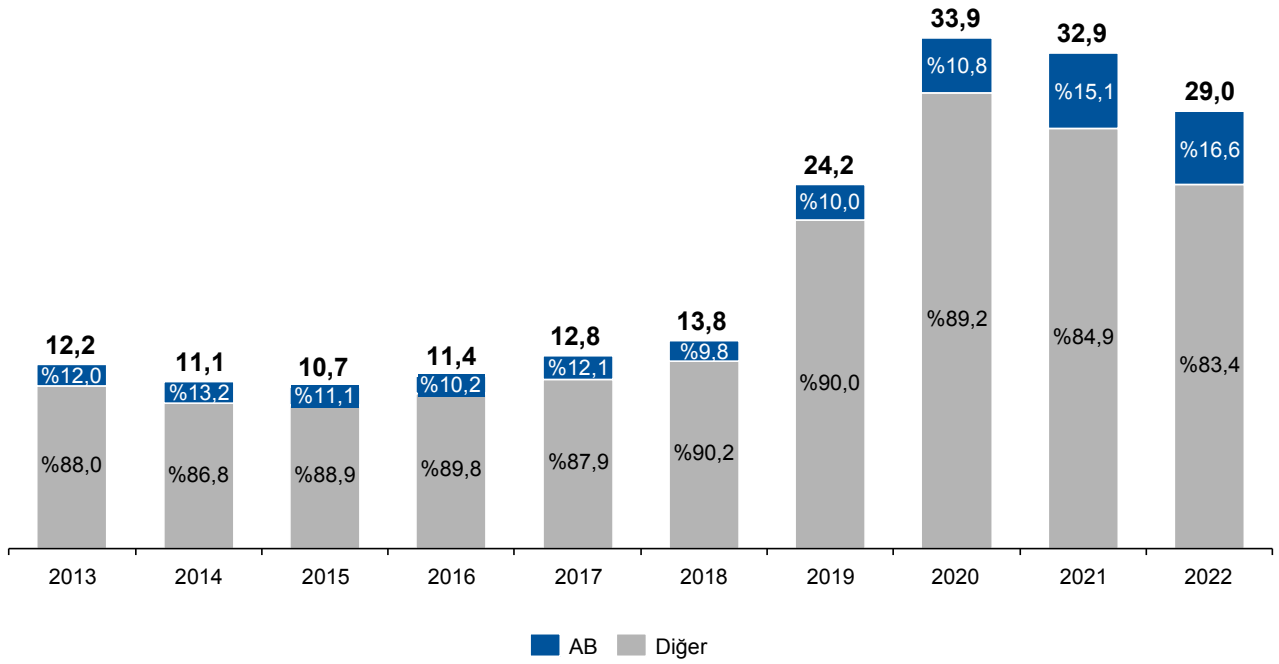
<sup>75</sup>Trademap, Avrupa Parlamentosu. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248_EN.pdf) adresinden alınmıştır; PwC Analizi

<sup>76</sup>SKDM kapsamındaki ürünleri (alüminli çimento, çimento klinkerleri, suni olarak renklendirilmiş olsun veya olmasın beyaz portland çimentosu, diğer portland çimentoları ve hidrolik çimento ürünleri) ifade eder.

<sup>77</sup>Trademap, Avrupa Parlamentosu. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0248_EN.pdf) adresinden alınmıştır; PwC Analizi

Türkiye'nin AB-27 ülkelerine ihracatı özellikle 2018 sonrasında istikrarlı bir şekilde artış göstermiştir. 2018-2022 döneminde Türkiye'nin AB ülkelerine ihracatı miktar bazında %37,5'lik bir YBBO ile artmıştır. Ayrıca, Türkiye 2022 yılında toplam çimento ihracatının (tonaj olarak) %16,6'sını AB ülkelerine gerçekleştirmiştir.<sup>78</sup>

### Şekil 25. AB-27 Ülkelerinin Türkiye Çimento İhracatı İçindeki Payı (Trademap, Milyon Ton)<sup>79</sup>



# 2

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

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

Projenin temel çıktılarından biri, farklı politika ve teknoloji kombinasyonlarının sektörün gelecekteki emisyonları üzerindeki etkisini tahmin eden modelleme ve senaryo analizidir. Modelleme çalışması kapsamında, 2053 yılına kadar farklı varsayımlar altında Türk çimento sektörünün üretim projeksiyonları geliştirilmiş ve sektörde karbon azaltımını sağlayacak temel kaldıraçlar ve teknolojiler belirlenmiştir. Model, 2024-2053 döneminde, sektörün gelecekteki emisyonlarını tahmin etmek ve kıyaslamak amacıyla 2 referans senaryo ve 2 azaltım senaryosu altında Türkiye'deki çimento sektörünün karbonsuzlaştırılması için olası rotaları ortaya çıkarmaktadır.

**Referans senaryolar**, azaltım senaryolarından elde edilen emisyon 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 senaryosu**, hiçbir azaltıcı eylem ya da politikanın uygulanmadığı ve teknolojik dönüşümün öngörülmediği referans senaryosudur. Diğer referans senaryo olan **SPS senaryosunda** ise süreç verimliliği iyileştirmeleri, elektrik şebekesi dekarbonizasyonu ve AB SKDM ile ulusal ETS'nin uygulamaya konulması gibi öngörülen politikaların olası etkileri incelenmiş, bununla birlikte hiçbir ek azaltım politikasına ya da yatırıma gidilmeyeceği varsayılmıştır. Başka bir deyişle SPS, kararlaştırılan politika adımlarına ek olarak teknolojik dönüşüm tahmininin yapılmadığı 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 iki farklı azaltım senaryosu geliştirilmiştir: **i) Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (Low Carbon Pathway- LCP) ve ii) En İyi Teknolojiler Senaryosu** (Frontier Technologies Scenario- FTS). LCP

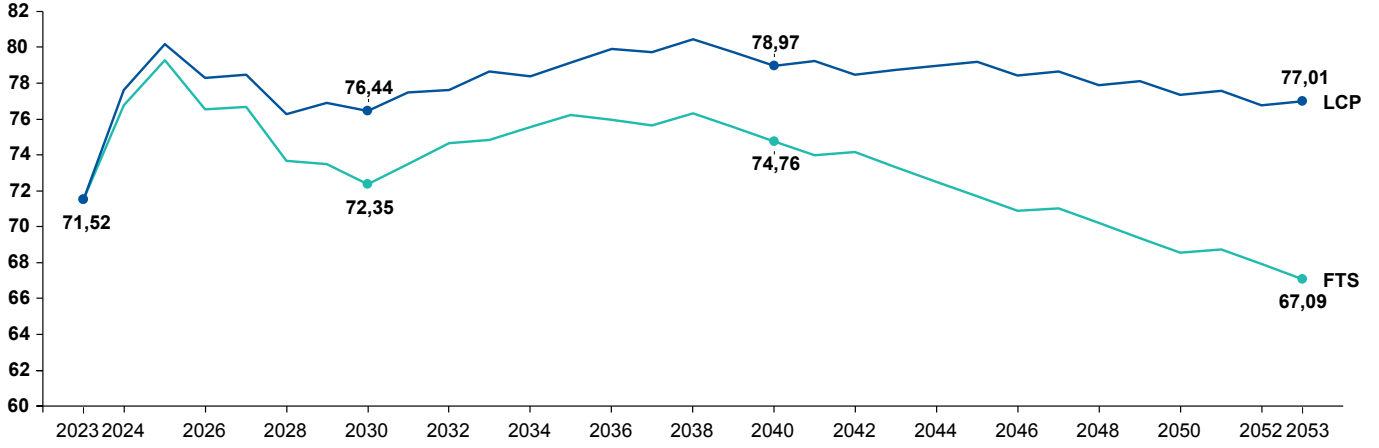
ve FTS, 2053 yılında net sıfır emisyon hedefine ulaşmak adına farklı düzeylerde politika eylemlerini ve karbon azaltıcı teknolojileri modellemektedir. **Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (LCP)**, Türkiye çimento sektörünün karbonsuzlaşmasına yönelik uygun maliyetli ve optimal bir senaryo olacak şekilde tasarlanmıştır. Daha agresif hedefler içeren **En İyi Teknolojiler Senaryosu (FTS)**, en iyi teknolojilerin erken safhada uygulamaya alınması dolayısıyla LCP senaryosundan farklılaşmaktadır. Ayrıca beton, tasarım ve inşaat verimlilik artışı ve rekarbonasyon kaldıraçları, azaltım senaryolarına dahil edilmiştir.

Proje kapsamında hazırlanan model, uzun bir tahmin ufkunda farklı senaryolar dahilinde Türkiye çimento sektörü için çeşitli dekarbonizasyon yollarını değerlendirmek üzere geliştirilmiş bir optimizasyon modelidir. Söz konusu optimizasyon modeli, IBM CPLEX yazılımı kullanılarak çalıştırılmıştır. Bu yazılım, belirlenen emisyon hedefine ulaşılırken, teknoloji seviyesi ile yatırım ve operasyonel maliyetler kısıtları altında toplam maliyetin net bugünkü değerini asgari seviyeye indirmeyi amaçlayan büyük ölçekli bir doğrusal programlama modelidir.

### 2.1. Sektör Projeksiyonları

Kişi başına çimento tüketimi, nüfus artış hızı ve ihracat beklentileri dikkate alınarak önümüzdeki 30 yıllık periyottaki toplam çimento üretimine yönelik tahminler yapılmıştır. Yurt içi klinker tüketimi, klinker ihracatı ve çimento ihracatında kullanılan klinker miktarı projeksiyonları ayrı ayrı oluşturularak, toplam klinker üretimi tahmin edilmiştir. Sektörün karbon emisyonu azaltımına yönelik temel kaldıraçlarından biri klinker/çimento oranının düşürülmesidir. Azaltım senaryolarında klinker/çimento oranına yönelik farklı varsayımlar yapılmış ve buna bağlı olarak toplam klinker üretiminde senaryolar bazında 2 farklı sonuca ulaşılmıştır. **2053 yılında LCP senaryosunda 77 milyon ton, FTS senaryosunda ise 67,1 milyon tonluk klinker üretimi öngörülmüştür.**

Şekil 26. Toplam Klinker Üretimi Tahmini (Milyon Ton)



Sektör uzmanları, kamu kurum ve kuruluşları, Türkçimento ve OAİB temsilcileriyle toplantılar düzenlenerek projeksiyon ve varsayımlar üzerinde görüşülmüştür. Küresel ve yerel çimento sektörüne yönelik daha önceki çalışmalar incelenmiş ve Yönlendirme Komitesi üyelerinin yorumları da dikkate alınmıştır. Nihai projeksiyonun değerlendirilmesi için T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile istişareler yapılmıştır. Sektör projeksiyonlarına ilişkin geliştirilen metodoloji ve varsayımlara ilişkin daha detaylı bilgiler bu raporun daha geniş kapsamlı uzun versiyonunda sunulmaktadır.

## 2.2. Düşük Karbonlu Çimento Üretimi

Düşük karbonlu çimento üretimi için tek bir dönüşüm patikası bulunmamaktadır. Dönüşüm, ülkenin ve üreticilerin koşullarına bağlı olarak teknoloji seçeneklerinin tek veya farklı kombinasyonlarda kullanılmasını sağlayacak bir teknoloji portföyü gerektirmektedir.

Çimento üreticileri elektrik ve termal enerji tasarrufu yaparak, yeni teknolojileri kullanmaya başlayarak ve daha düşük emisyonlu girdi kullanımına yönelerek emisyon azaltımı sağlayabilir. Emisyonları büyük ölçüde azaltmanın yöntemlerinden biri yeni teknolojileri üretim sürecine hızla

entegre etmektir. Bazı düşük karbonlu çimento üretim teknolojileri bugün itibarıyla ticari olarak kullanıma hazırken, bazıları ise henüz pilot/demo veya Ar-Ge aşamasındadır. Hidrojen ve karbon yakalama teknolojisi emisyonları sıfıra yaklaştırabilecek anahtar teknolojiler olmakla beraber, bunların yakın dönemde kullanımına başlanması beklenmemektedir.

Çimento sektöründeki karbonsuzlaşma kaldıraçları, literatür taramasına, sektör paydaşları ve sektör uzmanlarının görüşlerine dayanarak kapsamlı şekilde incelenmiştir. Çimento sektöründe karbonsuzlaşmayı sağlayan başlıca 7 kaldıraç bulunmaktadır: **termal verimlilik; yeni ve alternatif yakıtların kullanılması; klinker/çimento oranının düşürülmesi; elektriğin karbonsuzlaştırılması; beton, tasarım ve inşaat malzeme verimliliği; rekarbonasyon; karbon yakalama, kullanma ve depolama.** Kaldıraçlar kapsamında incelenen teknolojiler; elektrik ve termal enerji tasarrufu potansiyelleri, gelişmişlik durumları ve teknolojik olgunlukları ile yatırım maliyetleri ve işletme giderleri esas alınarak haritalandırılmıştır.

Düşük karbonlu çimento 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. Teknoloji giriş yılları ve bunların gelecekte üretim içindeki paylarının yanı sıra, alternatif yakıt kullanımı, rekarbonasyon, inşaat ve malzeme verimliliği gibi karbonsuzlaşma kaldıraçları da hem Yönlendirme Komitesi toplantılarında hem de sektör çatı kuruluşları (Türkçimento ve OAİB) ile yapılan odak grup toplantılarında tartışılmış, modelleme varsayımlarına dahil edilmiştir.

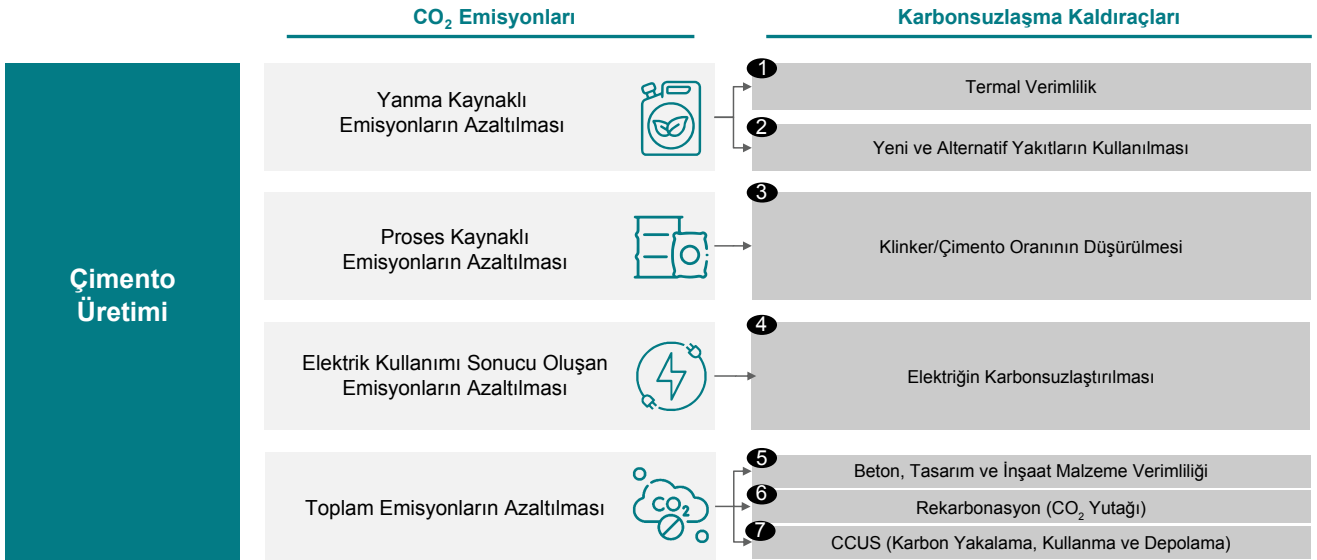
### Çimento Sektörü Karbonsuzlaşma Kaldıraçları

Çeşitli üretim süreçlerine yönelik olarak girdi kombinasyonlarını tanımlayan karbonsuzlaşma kaldıraçları kapsamındaki teknoloji arketipleri, Avrupa Çimento Araştırma Akademisi (ECRA) tarafından yapılan çalışma<sup>80</sup> çerçevesi referans alınarak değerlendirilmiştir. Bu rapor, mevcut durumun yanı sıra orta-uzun vadede küresel çimento üretiminde enerji verimliliğinin artırılmasına ve sera

gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunabilecek teknolojileri ele almaktadır. Toplam 55 teknolojinin enerji tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı üzerindeki etkisi, bu çalışmada ham madde girdileri ve maliyet parametreleri başlıkları altında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, her bir teknoloji için teknolojiye hazırlık seviyeleri de belirlenmiştir.<sup>81</sup>

Çimento sektöründeki başlıca emisyon kaynakları yanma, proses ve elektriktir. Hem belirli emisyon alanlarında hem de toplam sistem emisyonlarının tamamında emisyon azaltımına yönelik karbonsuzlaşma kaldıraçları proje kapsamında tanımlanmıştır.

### Şekil 27. Çimento Sektörü Karbonsuzlaşma Kaldıraçları



Seçilen teknolojilerin Türkiye çimento sektörüne giriş yılları ve üretimdeki penetrasyon oranları farklı senaryolar çerçevesinde belirlenmiştir. Teknolojilerin emisyon azaltım etkileri, öngörülen yatırım maliyeti ve işletme giderleri (Capex, OpEx), girdi gereksinimleri ve kalorifik değerleri gibi birçok veri derlenmiş ve modellemede kullanılmıştır.

## Termal Verimlilik

Termal enerji verimliliği, yanmadan kaynaklanan emisyonların azaltımında önemli bir rol oynamaktadır. Fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan emisyonlar, çimento üretimi kaynaklı toplam emisyonların yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır.<sup>82</sup> Yanma emisyonları, kullanılan yakıt karışımına bağlı olarak farklılık gösterebilir ve gelecekte potansiyel olarak sıfıra indirilebilir. Yanma emisyonları, ağırlıklı olarak, klinker üretim aşamasındaki kimyasal reaksiyonlar için fırın ve ön kalsinatörde ihtiyaç duyulan termal enerjiyi sağlamak amacıyla kullanılan yakıtlardan kaynaklanmaktadır. Çimento fabrikalarının ortalama kapasitesi, ham maddelerin nem içeriği ve yanma özelliği, kullanılabilir fırın tipleri, fırın yaşları, alternatif yakıt kullanım oranı ve çimento standartları gibi faktörler termal enerji kullanımını etkilemektedir.<sup>83</sup>

Ham madde karışımının yanabilirliğinin, mineralleştiriciler vb. gibi yöntemler aracılığıyla iyileştirilmesi, ön ısıtıcı fırınların ön kalsinatörlü fırınlara dönüştürülmesi, daha düşük basınçlı siklonlar aracılığıyla ön ısıtıcı modifikasyonu, ilave ön ısıtıcı siklon kademesi/kademeleri, tek kanallı ana alev borusunun modern çok kanallı ana alev borusuna çevrilmesi, oksijen zenginleştirme teknolojisi, verimli klinker soğutma teknolojisi, konvansiyonel fosil yakıtların yerine alternatif yakıtların kullanılması, ön yanma odaları, gelişmiş tesis kontrolü ve yapay zeka destekli kontrol sistemleri ile elektrifikasyon, plazma ve diğer teknolojilerin kullanılması gibi konular termal verimlilik kaldırıcı kapsamında detaylı olarak incelenmiştir.

Yukarıda belirtilen termal verimlilik kaldırıcı kapsamında incelenen teknolojilerin termal enerji tasarrufu potansiyelleri Şekil 28'de yer almaktadır. ECRA raporunun esas alındığı Şekil 28'de görüldüğü üzere, negatif değerler içeren teknolojiler termal enerji kullanımında verimlilik anlamına gelmektedir. Diğer taraftan pozitif değerler içeren teknolojiler, ton klinker başına termal enerji kullanımındaki artışı göstermektedir. İlgili teknolojilerin Türkiye çimento

sektörü için devreye giriş yılları, penetrasyon oranları, girdi kullanım gereklilikleri, yatırım maliyetleri ve işletme giderleri (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 belirlenmiştir. Teknolojilerin çoğu halihazırda Türkiye çimento sektöründe kullanımda olan mevcut teknolojilerdir. Agresif FTS senaryosunda teknolojilerin maksimum penetrasyon oranları daha yüksek ve küresel öngörülere daha yakınken, daha gerçekçi LCP senaryosunda ise teknolojilerin maksimum penetrasyon oranları Türkiye'nin koşullarına uygun şekilde belirlenmiştir. Termal verimlilik etkisi en yüksek olan elektrifikasyon, plazma ve diğer teknolojiler, sektör uzmanları ve Türkiye'nin koşulları esas alınarak hazırlanan her iki azaltım senaryosunda da 2055 ve sonrasında devreye alınabilecekleri öngörüldüğünden dolayı modelde dikkate alınmamıştır.

## Şekil 28. Teknolojilerin Termal Enerji Üzerindeki Etkisi (MJ/t Klinker)<sup>84</sup>



<sup>82</sup>Lehne, J., & Preston, F. (2018). Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. Chatham House.

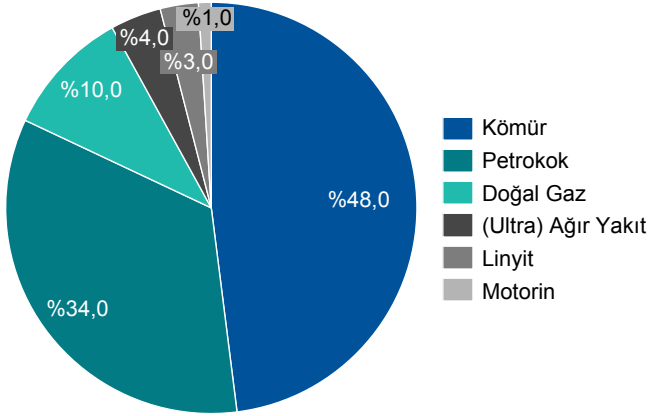
<sup>83</sup>CSI&IEA (2018). Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry

<sup>84</sup>Avrupa Çimento Araştırma Akademisi. The ECRA Technology Papers 2022 & Sektör Uzman Görüşü

## Yeni ve Alternatif Yakıtlar

Çeşitli kısıtlamalara rağmen enerji maliyetleri ve çevre standartları gibi faktörler ele alındığında, çimento üreticileri alternatif yakıtları kullanmayı tercih etmektedir. Çimento fabrikalarında en çok kullanılan yakıtlar beş ana kategoride sınıflandırılabilir: alternatif yakıt olarak kullanılan atıklar, belediye atıkları, biyokütle, tehlikeli olmayan endüstriyel ve ticari atıklar, diğer sınıflandırılmamış alternatif yakıtlar. Araştırmalar ve uluslararası deneyimler ışığında yapılan tahminlere göre, alternatif yakıtlardan hiçbiri çimento üretiminin ısı ihtiyacının tamamını tek başına karşılayamayacaktır. Diğer yandan, karbonsuzlaşma hedefi doğrultusunda talebin alternatif yakıt karışımlarıyla karşılanabileceği varsayılmaktadır.<sup>85</sup>

### Şekil 29. Konvansiyonel Fosil Yakıtların Kullanım Oranı Dağılımı- Küresel<sup>86</sup>



Türkiye'deki çimento fabrikalarından kaynaklanan toplam emisyonların yaklaşık %35'i fırın yakıtları, %5'i ise elektrik tüketimi kaynaklıdır.<sup>87</sup> Yakıt ve enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonların azaltımı için şüphesiz en gerekli adım, ısı ve elektrik enerjisine olan ihtiyacın azaltılmasıdır. Ancak yakıt değişimi, yalnızca konvansiyonel yakıtların oransal olarak değiştirilmesi şeklinde yorumlanmamalıdır. Sera gazı emisyonlarının azaltılması için biyokütle içeren yakıtlarının oranı da artırılmalıdır.

Mevcut termal enerji ihtiyaçları dikkate alındığında, alternatif yakıt ve biyokütle kullanımının bir noktada yetersiz kalacağı ve daha yenilikçi çözümlere ihtiyaç duyulacağı kesindir. Dolayısıyla fırın yakıtı olarak yeşil hidrojenin kullanılması, karbonsuzlaşmaya yönelik en kritik adımlardan biridir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmekte olan yeşil hidrojen, çok büyük miktarda enerji sağlaması ve sera gazı emisyon faktörünün sıfır olabilmesi nedeniyle oldukça avantajlıdır. Ancak mevcut durumda hidrojen üretimi, geçici depolama, hidrojenin yakıt olarak kullanılması vb. gibi süreçler pek çok teknolojik ve finansal zorluğu beraberinde getirmektedir.

Döner fırınların termal enerji ihtiyacını karşılamak için yeşil enerjinin kullanılması, yanmadan kaynaklanan emisyonları büyük ölçüde azaltacaktır. Gelecekte sektör için en öne çıkan yeşil enerji kaynağı hidrojen olarak görülmekle birlikte, plazma ve mikrodalga teknolojileri de dikkate alınması gereken diğer kaynaklar ve teknolojilerdir.

Yeni ve alternatif yakıt kaynaklarının kalorifik değerleri, emisyon faktörleri ve biyokütle oranları modelleme kapsamında detaylı olarak incelenmiş ve model çerçevesindeki yakıt değişimi için gerekli girdiler sağlanmıştır.

<sup>85</sup>IFC (2017). Increasing The Use of Alternative Fuels at Cement Plants: International Best Practice. [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/33180042-b8c1-4797-ac82-cd5167689d39/Alternative\\_Fuels\\_08+04.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IT3Bm3Z](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/33180042-b8c1-4797-ac82-cd5167689d39/Alternative_Fuels_08+04.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IT3Bm3Z) adresinden alınmıştır

<sup>86</sup><https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/> adresinden alınmıştır

<sup>87</sup>Proje uzmanlarının, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerini kullanarak yaptığı hesaplamadır.

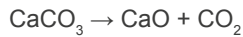


**Tablo 1. Yakıt Özellikleri<sup>88 89</sup>**

Yakıtlar	Net Kalorifik Değer (NKD) (TJ/Gg)				Emisyon Faktörü (t CO <sub>2</sub> /TJ)	Biyokütle Oranı (%)
	2023 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	2050 - 2053		
Petrokok	32,2	32,2	32,2	32,2	97,4	%0
Yerli Linyit	8,3	8,3	8,3	8,3	96,1	%0
İthal Kömür	23,8	23,8	23,8	23,8	94,5	%0
Yerli Kömür	23,8	23,8	23,8	23,8	94,5	%0
Akaryakıt	39,4	39,4	39,4	39,4	77,0	%0
Doğal Gaz	0,03	0,03	0,03	0,03	53,7	%0
Tehlikeli Atıktan Türetilmiş Yakıt	13,6	14,7	15,9	16,7	85,0	%0
Evsel Atıktan Türetilmiş Yakıt (SRF)	15,7	15,7	16,3	16,7	75,0	%40
Diğer Alternatif Yakıtlar	15,1	16,7	17,8	18,8	80,0	%0
Ömrünü Tamamlamış Lastikler	25,7	27,2	27,2	27,2	85,0	%27
Evsel Arıtma Çamuru	8,3	11,2	11,2	11,2	111,8	%100
Hidrojen	120,7	120,7	120,7	120,7	0,0	%0

## Klinker/Çimento Oranının Düşürülmesi

Klinker üretim aşamasında farin, döner fırına girmeden önce ön kalsinasyon işlemine tabi tutulur. Kalsinasyon işlemi sırasında, kalkerin (CaCO<sub>3</sub>) kalsiyum oksit (CaO) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ayrışmasına neden olan kimyasal bir reaksiyon gerçekleşir. Bu süreçten kaynaklanan emisyonlar proses emisyonları olarak tanımlanır.



Üretilen her ton klinker için yaklaşık 0,5 ton CO<sub>2</sub> açığa çıkmaktadır. Proses emisyonları, ham madde değiştirilmediği sürece oluşması beklenen emisyonlardır. Bu bağlamda, klinker oranının azaltılması, birçok karbonsuzlaşma haritasına önemli bir kaldıraç olarak dahil edilmiştir.

Klinker kullanımını azaltmaya yönelik başlıca eylem, çimento esaslı malzemeler olarak da adlandırılan çimento katkı maddelerinin alternatif olarak kullanılmasıdır. Doğal puzolanik malzemeler ve suni çimentomsu malzemeler (ör. yüksek fırın cürufu) gibi doğal ve yapay maddeler iyi bilinen çimento katkıları arasındadır.

Model kapsamında klinker/çimento oranı, Türkiye'de çimento katkı maddelerinin temin edilebilirliği dikkate alınarak modellenmiştir. Bu kapsamda modelleme çalışmasında klinker/çimento oranının her yıl kademeli olarak azalarak, **2053 yılında LCP senaryosunda 0,70'e, daha agresif FTS senaryosunda ise 0,60'a düşeceği** varsayılmıştır.

<sup>88</sup>T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ulusal Envanter Raporu 2020, Uzman Görüşü

<sup>89</sup>Sintine yağı, sıvı atıklar vb. diğer alternatif yakıtlar arasındadır

<sup>90</sup>Dhas, S. (2021). Decarbonization pathways for the cement industry.

## Elektriğin Karbonsuzlaştırılması

CEMBUREAU'ya göre,<sup>91</sup> enerji yoğun bir endüstri olan çimentonun enerji bileşiminin yaklaşık %12'sinin elektrikten, geri kalanının ise çeşitli yakıtlardan karşılandığını bildirilmiştir. Kuru proses dikkate alındığında, toplam elektrik enerjisinin %25'i ham madde hazırlık, %25'i klinker üretimi ve %43'ü çimento öğütme sürecinde sarf edilmektedir.<sup>92</sup> Geriye kalan kısım ise ham madde çıkarma, yakıt öğütme, paketleme ve yükleme işlemlerinde kullanılmaktadır.<sup>93</sup> Ar-Ge çalışmaları sayesinde, yakıt karışım oranlarının ve proses başına enerji kullanım yüzdelерinin değişmesi ile çimento üretimindeki CO<sub>2</sub> salımının azalması beklenmektedir.

Ham madde karışımının yanabilirliğinin, mineralleştiriciler vb. gibi yöntemler aracılığıyla iyileştirilmesi, ön ısıtıcı fırınların ön kalsinatörlü fırınlara dönüştürülmesi, daha düşük basınçlı siklonlar aracılığıyla ön ısıtıcı modifikasyonu, oksijen zenginleştirme teknolojisi, atık ısı geri kazanımı: ORC, konvansiyonel fosil yakıtların yerine alternatif yakıtların kullanılması, ön yanma odaları, gelişmiş tesis kontrolü ve yapay zeka destekli kontrol sistemleri, fanlarda değişken hızlı sürücülerin kullanılması, dik valsli değirmenler ve valsli presler ile çimento öğütme, yardımcı sistem verimliliği, bilyalı değirmenlerin işletilmesinin optimizasyonu, öğütme yardımcılarının optimum kullanımı ve doğal kalsine puzolan kullanımı ile çimentodaki klinker içeriğinin azaltılması, elektriğin karbonsuzlaştırılması kaldırıcı kapsamında detaylı olarak incelenmiştir.

Yukarıda belirtilen elektriğin karbonsuzlaştırılması kaldırıcı kapsamında incelenen teknolojilerin ton çimento başına elektrik tasarrufu potansiyelleri Şekil 30'da yer almaktadır. Uzun vadeli optimizasyon modeli senaryolarında bu teknolojilerin elektrik tasarrufu potansiyeli dikkate alınmıştır. Negatif değerler içeren teknolojiler elektrik kullanımında verimliliği ifade ederken, pozitif değerlere sahip teknolojiler elektrik kullanımındaki artışı göstermektedir.

## Şekil 30. Teknolojilerin Elektrik Kullanımı Üzerindeki Etkileri (kWh/t Çimento)<sup>94</sup>



## Beton, Tasarım ve İnşaat Malzeme Verimliliği

Çimento sektörü için temel karbonsuzlaşma kaldırıcılarından biri de beton, tasarım ve inşaat malzeme verimliliğidir. Bu kaldırıcı, çimento üretimindeki karbonsuzlaşma sürecini dolaylı olarak etkilemektedir. Beton, tasarım ve inşaat malzeme verimliliğinin çimento talebini azaltması ve bu yolla emisyon azaltımı sağlaması beklenmektedir.

Türkiye'de iç piyasada kullanılan çimentonun yaklaşık %60'ı hazır beton (RMC) üretiminde kullanılmaktadır.<sup>95</sup> Çimento üreticilerinin neredeyse tamamı aynı zamanda hazır beton da

<sup>91</sup>CEMBUREAU (2020). Powering The Cement Industry. <https://cembureau.eu/media/ckkpgg1/cembureau-view-cement-sector-electricity-use-in-the-european-cement-industry.pdf> adresinden alınmıştır

<sup>92</sup>Yüzdeler değeri fabrikalara ve girdilere göre farklılık gösterebilir.

<sup>93</sup>Türkçimento (2019). Çimento Endüstrisine Elektrik Enerjisi Temini.

<sup>94</sup>Avrupa Çimento Araştırma Akademisi. ECRA Technology Papers 2022 & Sector Expert View

üretmektedir. Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) verilerine<sup>96</sup> göre, Türkiye 2022 yılında 105 milyon m<sup>3</sup> hazır beton üretimiyle Avrupa'da ilk sırada, dünyada ise ilk 5 içinde yer almaktadır.

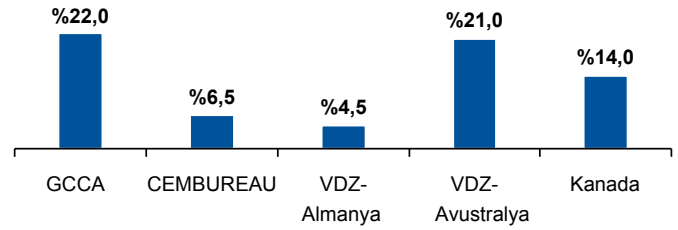
Çimento; harç ve beton yapımında su, agrega, kum ve kimyasal katkı gibi malzemelerle karıştırılmaktadır. Beton katkıları, hazır betonun işlenebilirlik, dayanıklılık, erken ve nihai dayanım gibi belirli özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton karıştırma işlemi sırasında eklenen doğal veya yapay kimyasallardır. Birim hacim beton başına çimento tüketiminin ve katkı maddeleri ile beton bileşiminin optimize edilmesine yönelik araştırmalar, betonun karbonsuzlaşması açısından kritik önem arz etmektedir. Birçok uygulamada, beton yapmak için ihtiyaç duyulan çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül, yüksek fırın cürufu veya silis dumanı gibi çimentomsu malzemeler (SCMler) kullanılabilir ve bu da sera gazı emisyonlarında önemli azaltımlar sağlayabilmektedir. Ancak çimento yerine kullanılacak ikame malzemelerin (mineral katkıları) miktarı, standartlar tarafından sınırlandırılmıştır. Ayrıca bu malzemelerin dayanım kazanma hızı ve priz alma süresi üzerindeki etkileri kullanım oranlarının uygulamaya bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermesine neden olmaktadır.

Hazır beton üretiminde yapay zekâ (makine öğrenmesi) tabanlı tahmine dayalı yöntemlerin kullanılması; kalite kontrol ve beton tasarım süreçlerinde dijital araçların (sensörler, IoT vb.) kullanılması; doğal puzolan, kalsine kil ve dip külü (uçucu kül ve yüksek fırın cürufu dışında) gibi mineral katkı maddelerinin kullanılması ve daha etkili kimyasal katkı maddelerinin kullanılması gibi eylemler sonucunda çimento talebinde gerçekleşen verimlilik artışı dikkate alınmalıdır.

Yapı malzemelerinin karbon ayak izini nasıl azaltılacağına yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bu kapsamda, erken yapısal bozulmanın önlenmesi ve yapının dayanıklı ve uzun ömürlü olmasının sağlanması için karbon azaltımının gerçekleştirilmesi önemlidir. Yapılan ilk çalışmalar, verimli bina tasarımı kullanmanın belirli bina türlerinde karbon çıktısını %30'a kadar azaltabileceğini göstermiştir.<sup>98</sup> Bina yapılarında 3D baskı yoluyla iyileştirmeler de yapılabilmektedir. Yakın tarihlerde yapılan çalışmalara göre, binalarda ve diğer inşaat projelerinde betonun daha verimli kullanılması, bu yapılarda

beton tüketimini azaltabilmektedir. Birçok yol haritasında olduğu gibi, tasarım ve inşaat malzeme verimliliği ile betonda verimliliğin azaltım potansiyeli proje kapsamında dikkate alınmıştır. Bu bağlamda, verimlilik iyileştirmeleri sonrasında net çimento talebinin, LCP senaryosuna göre 2030, 2040 ve 2053 yıllarında kademeli olarak %3, %5 ve %7 oranında azalacağı varsayılmıştır. Daha agresif özellikteki FTS senaryosunda ise bu oranların aynı yıllar için sırasıyla %3, %6 ve %10 olacağı kabul edilmiştir.

### Şekil 31. 2050 İtibarıyla Tasarım ve İnşaat Malzeme Verimliliğinin Azaltım Potansiyeli<sup>98</sup>



### Rekarbonasyon (CO<sub>2</sub> Yutağı)

Rekarbonasyon veya yeniden karbonatlaşma, çimento üretiminde salınan CO<sub>2</sub>'nin bir kısmının karbonatlaşma yoluyla çimento içeren malzemeler tarafından kimyasal olarak yeniden bağlandığı ve dolayısıyla genel CO<sub>2</sub> emisyonlarında azaltım sağlandığı süreçtir. Rekarbonasyonun gerçekleşme hızı çeşitli parametrelere (ör. çimento cinsi, rutubet, betonun geçirimsizliği vb.) bağlıdır. Çimento üretimi sırasında kalkerin yüksek sıcaklıkta kimyasal olarak parçalanmasıyla (dekompozisyon) açığa çıkan karbondioksitin bir miktarının sıvalar, betonarme binalar, beton yollar, çimento esaslı yapı ürünleri ve hatta beton atıkları tarafından kalıcı olarak yakalanması literatür kapsamında bilimsel bir olgu olduğu için tüm dekarbonizasyon yol haritalarında yer almaktadır. Bu nedenle rekarbonasyon kaldırıcına bu projede de yer verilmiştir.<sup>99</sup>

<sup>96</sup>THBB ve Türkçimento verileri baz alınarak uzman görüşü ile ilgili sektörel tahmin yapılmıştır.

<sup>97</sup>ERMCO (t.y.) <https://ermco.eu/> adresinden alınmıştır

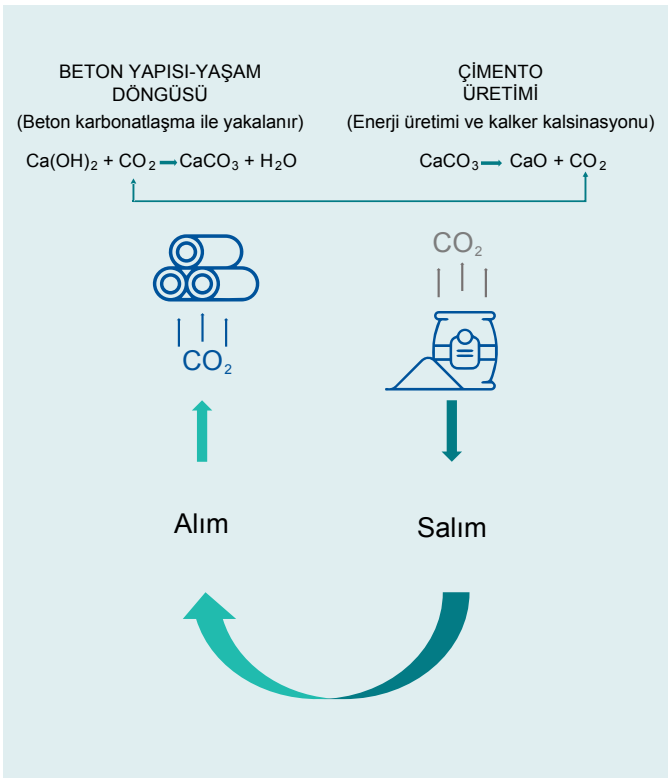
<sup>98</sup>GCCA (2021). The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Cement and Concrete. Cembureau, 2050 Carbon Neutrality Roadmap. VDZ, Decarbonising Cement and Concrete: A CO<sub>2</sub> Roadmap for the German cement industry. VDZ, Decarbonisation Pathways for the Australian Cement and Concrete Sector. Cement Association of Canada, Concrete Zero.

<sup>99</sup>Grten (2011). Yeşil Binalar. Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları – V, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Bölgesel Çevre Merkezi, Ankara. & Uzman Görüşü.

<sup>99</sup>CEMBUREAU. <https://cembureau.eu/media/kvblxuuz/cembureau-view-cement-sector-recarbonation.pdf> adresinden alınmıştır

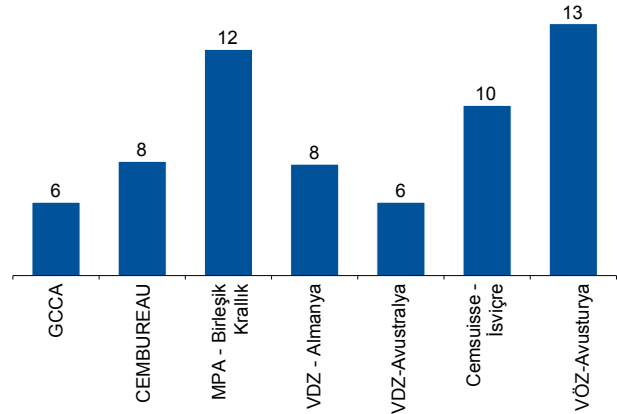
Kalsinasyon reaksiyonu, hidratlı çimento ürünleri kullanılarak betonda doğal yollarla tersine çevrilebilmektedir. Rekarbonasyon olarak adlandırılan bu süreç, tüm betonarme yapıların (binalar, kaldırımlar, tüneller, barajlar, köprüler) kullanım ömrü boyunca oluşmaktadır. Kumun çimento ve su ile karıştırılması suretiyle hazırlanan harç ve sıvalarda da rekarbonasyon meydana gelmektedir. Betona nüfuz eden atmosferdeki karbondioksit, betondaki boşluklarda bulunan suda çözünmekte ve kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) başta olmak üzere hidratlı ürünlerle tepkimeye girerek kireç taşı ve su oluşturmaktadır. Beton bir ürün veya yapıda, kalsinasyon tepkimesi yoluyla açığa çıkan karbondioksitin yarısından fazlası rekarbonasyon mekanizmasıyla geri döndürülse de bunun olduğu zaman ölçeği birkaç ay veya yıldan yüzlerce yıla kadar değişebilmektedir.

Şekil 32. Rekarbonasyon Süreci<sup>100</sup>



Farklı kuruluşlar, 2050 yılına kadar Net Sıfır Emisyon hedeflerine ulaşmada rekarbonasyonun katkısının %6-13 oranında olduğu yönünde varsayımlarda bulunmuştur. Ulusal sera gazı envanter raporlarında henüz rekarbonasyon yer almasa da beton bina, yapı ve ürünlerin karbon ayak izi hesaplama standartlarında, karbonsuzlaşma yol haritalarında ve IPCC raporlarında rekarbonasyona değinilmiştir.

Şekil 33. Çimento Sektörü için 2050 İtibarıyla Net Sıfır Emisyon Hedefine Ulaşılmada Rekarbonasyonun Katkısı (%)<sup>101</sup>



Uluslararası yol haritaları ve uzman görüşleri ışığında rekarbonasyon kaldırıcı proje kapsamında dikkate alınmış olup, bu kaldırıcının uygulanması sonrasında toplam emisyonlarda %13'lük bir azaltım sağlanacağı tahmin edilmiştir.

### CCUS (Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama)

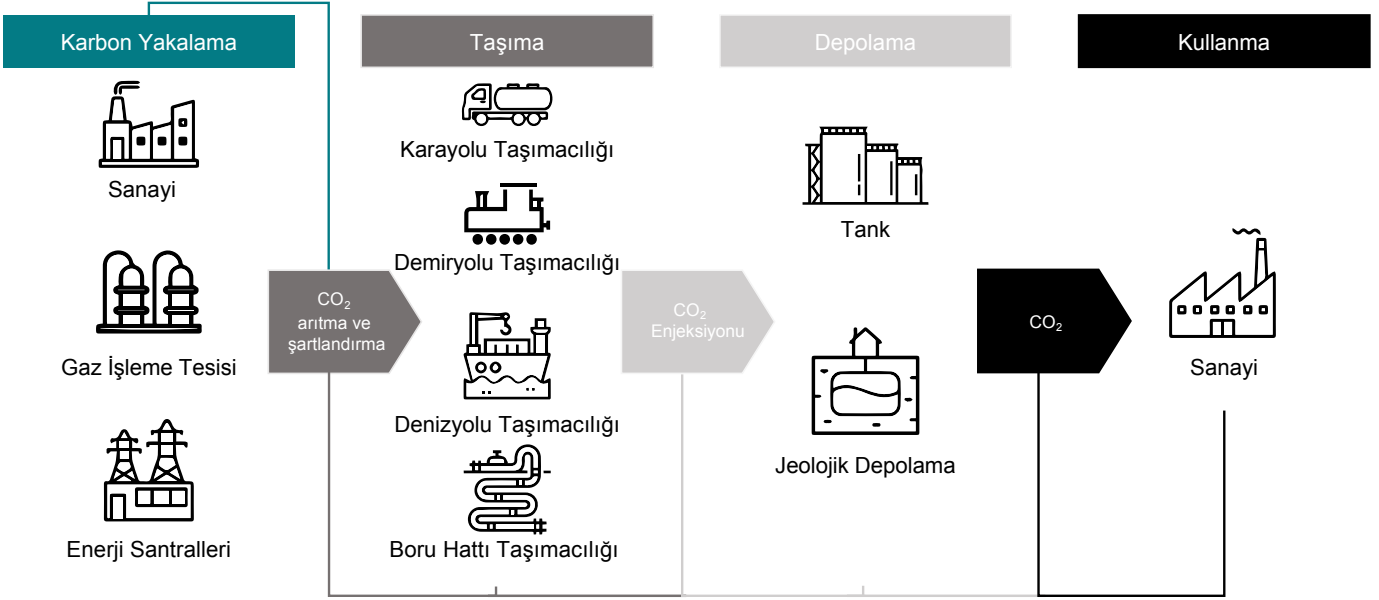
CCUS, sıfır emisyonlu çimento üretimi için uygulanabilecek en önemli teknolojilerden biridir. Özellikle toplam emisyonların %60-65'ini oluşturan kalsinasyon kaynaklı proses emisyonlarını ortadan kaldırabilmektedir. CCUS tesisleri başlangıçta, doğrudan enerji üretimi, sanayi ve gaz işleme tesislerindeki ve yakında bulunan CO<sub>2</sub> depolama sahalarındaki karbondioksiti yakalamak üzere tasarlanmıştır. CO<sub>2</sub> son zamanlarda jeolojik yer altı oluşumlarında taşınmakta ve depolanmaktadır. Ayrıca, yakalanan CO<sub>2</sub> ham madde olarak da kullanılabilir. Örneğin, çimento fabrikalarından yakalanan CO<sub>2</sub> kimyasal madde üretiminde kullanılabilir.<sup>102</sup>

<sup>100</sup>Felix, E. F., & Possan, E. (2018). Balance emissions and CO<sub>2</sub> uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. Revista Ibracon de estruturas e materiais, 11, 135-162.

<sup>101</sup> GCCA (2021). The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Cement and Concrete. Cembureau, 2050 Carbon Neutrality Roadmap. UK (2020). UK Concrete and Cement Industry Roadmap to Beyond Net Zero. VDZ, Decarbonising Cement and Concrete: A CO<sub>2</sub> Roadmap for the German cement industry. VDZ, Decarbonisation Pathways for the Australian Cement and Concrete Sector. Cemsuisse, Roadmap 2050 Klimaneutraler Zement als Ziel, Cemsuisse, 2021. VÖZ (2022). Roadmap zur CO<sub>2</sub>-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050.

<sup>102</sup>CEMBUREAU. <https://cembureau.eu/policy-focus/climate-energy/ccus/> adresinden alınmıştır.

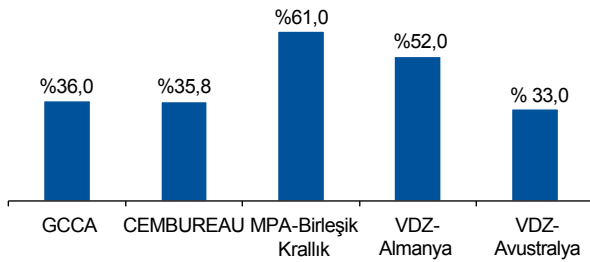
**Şekil 34. Entegre Tesislerde Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Konsepti<sup>103</sup>**



CCUS, çimento sektörüne ilişkin net sıfır karbon yol haritalarının temel unsuru niteliğindedir. Bu teknolojinin uygulanabilir olduğu teknik açıdan kanıtlanmış olsa da CCUS teknolojisinin sektör genelinde kullanılmaya başlanması için üreticiler, politika yapıcılar ve yatırımcılar arasında yeni ve kapsamlı iş birliklerinin kurulması gerekecektir. CCUS teknolojisinin yaygın bir şekilde kullanılmasının çimento sektörünün karbonsuzlaşma sürecinde anahtar rol oynayacak olması, bu alanda daha fazla araştırma ve yatırıma ihtiyaç duyulacağını göstermektedir.

Şekil 35, örnek niteliğindeki bazı teknoloji yol haritalarında yer alan CCUS teknolojisinin CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltma potansiyelini göstermektedir. Yol haritalarında, çimento sektörüne yönelik CO<sub>2</sub> azaltımında en büyük payın CCUS

**Şekil 35. Belirli Çimento Karbonsuzlaşma Yol Haritalarında CCUS Emisyon Azaltımı<sup>104</sup>**



teknolojisine ait olduğu görülmektedir. Yol haritalarına göre CCUS teknolojisinin net sıfır çimento hedefine katkısı %33 ila %61 arasında değişmektedir.

Uygulanabilir tüm teknoloji seçeneklerinin kullanıma girmesinin ardından, CCUS teknolojilerinin uygulanması halinde kalan toplam emisyonların LCP senaryosunda %90, daha agresif FTS senaryosunda ise %95 oranında azaltma potansiyeli olduğu varsayılmıştır.

### 2.3. 2053'e Kadar Düşük Karbon Senaryoları

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

**Referans senaryolar** alternatif senaryolar için bir karşılaştırma 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 tesislerde verimlilik artışı, elektrik şebekesi dekarbonizasyonu, AB SKDM ve planlanan ulusal ETS'nin uygulamaya konulmasının potansiyel etkileri göz önünde bulundurulmuştur.

<sup>103</sup>Türkçimento (2022). Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama. Retrieved from, [https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/karbon\\_yakalama\\_ve\\_depolarama.pdf](https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/karbon_yakalama_ve_depolarama.pdf)

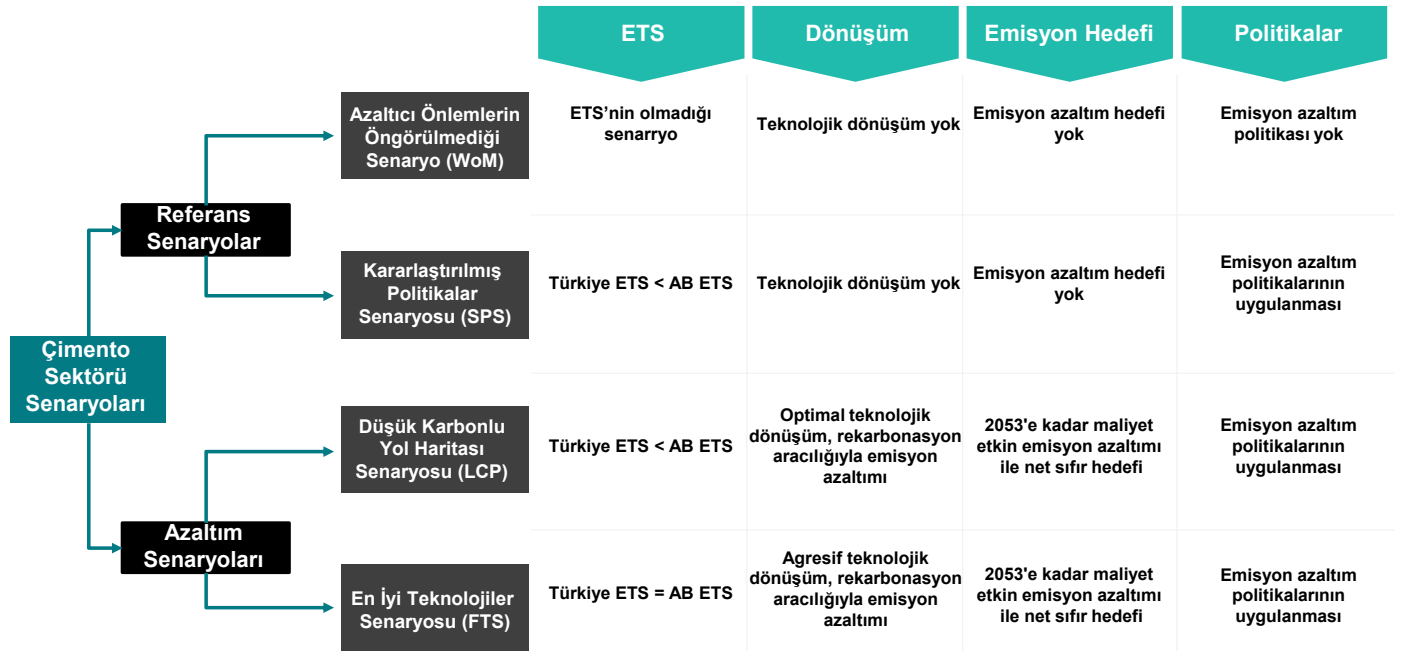
<sup>104</sup>GCCA (2021). The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Cement and Concrete. Cembureau, 2050 Carbon Neutrality Roadmap. UK (2020). UK Concrete and Cement Industry Roadmap to Beyond Net Zero. VDZ, Decarbonising Cement and Concrete: A CO<sub>2</sub> Roadmap for the German cement industry. VDZ, Decarbonisation Pathways for the Australian Cement and Concrete Sector.

**Azaltım senaryoları**, düşük karbonlu üretime geçiş için gereken radikal politikalar ve teknolojik yatırımlar üzerine öngörüler dahil edilerek modellenmiştir. Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda, Türkiye çimento sektörü için iki farklı karbonsuzlaşma senaryosu geliştirilmiştir.

Tüm uygulanabilir düşük karbon teknolojilerinin yanı sıra öngörülen politikaların devreye girdiği en düşük maliyetli azaltım senaryosu olan LCP, Türkiye çimento sektörünün

düşük karbonlu dönüşümü için en optimal senaryo olarak kabul edilmektedir. Daha agresif bir senaryo olan FTS ise, yıkıcı teknolojilerin daha erken ve daha yüksek penetrasyon oranı ile devreye gireceği varsayımları ile LCP Senaryosundan ayrılmaktadır. Her iki azaltım senaryosunda da rekarbonasyon ile beton, tasarım ve inşaat verimlilik kaldıraçları, senaryolara bağlı olarak farklı etkiler içerecek şekilde modele dahil edilmiştir.

### Şekil 36. Çimento Sektörü Senaryoları



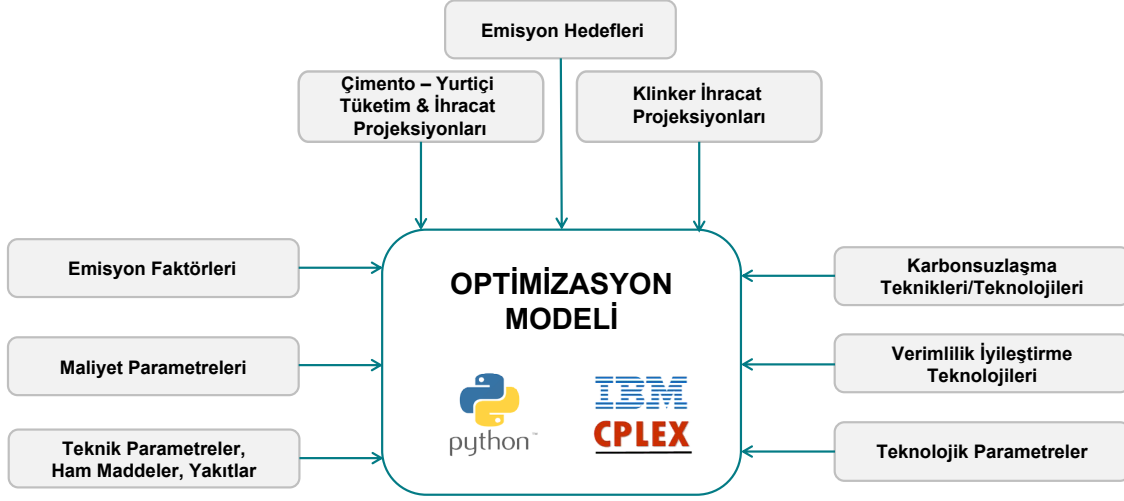
## 2.4. Sera Gazları ve Politika Etkileşim Modeli

### 2.4.1. Model Yaklaşımı

Proje kapsamında hazırlanan çimento sektörü modeli, Türkiye çimento sektörü için çeşitli senaryoları analiz etmek üzere geliştirilmiş, çoklu hedef ve uzun vadeli hesaplamaya izin veren bir optimizasyon modelidir. Bu geniş ölçekli doğrusal programlama modeli, belirli bir emisyon hedefine ulaşırken teknolojik dönüşüm, yatırım ve işletme maliyetleri kısıtları altında toplam maliyeti asgari seviyeye indirmeyi hedeflemektedir. Söz konusu model, 2023-2053 dönemine ilişkin çeşitli emisyon azaltım kaldıraçları için en uygun çözüm setini hesaplamaktadır.

Optimizasyon modelinin genel çerçevesi Şekil 37'de gösterilmektedir. Görselde aktarıldığı şekilde, IBM CPLEX yazılımı kullanılarak geliştirilen optimizasyon modeli; yurt içi çimento talebi ve ihracat projeksiyonları, klinker ihracat projeksiyonları, emisyon hedefleri, mevcut ve gelecekteki teknolojik seçenekler, bunların maliyetleri ve teknik özellikleri ile emisyon parametreleri, yakıt tüketimi dağılımı ve bunların maliyetleri gibi çeşitli girdi setlerinden yararlanmaktadır. Bu şekilde kurulmuş olan optimizasyon modeli, geliştirilen farklı senaryolara göre çalıştırılmaktadır. Model tarafından üretilen çözüm; öngörülen talebi, teknoloji tipi bazında üretimi, toplam emisyonları karşılarken, çözüm zaman aralığına ilişkin olarak her bir teknolojinin üretim, yakıt değişimi ve kullanım içerisindeki payını ve yatırım ihtiyacını ortaya koymaktadır.

## Şekil 37. Optimizasyon Modelinin Genel Çerçevesi



### 2.4.2. Model Sonuçları

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

Model sonuçları, emisyon açısından değerlendirilerek sonraki bölümlerde ayrıntılı şekilde ele alınacaktır. Emisyon bölümünde, senaryo bazlı emisyon azaltım varsayımları ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Çimento sektöründeki alternatif yakıt tüketimi ve yenilenebilir enerji tüketimi konuları ayrıca ele alınmıştır. Senaryolara dayalı olarak karbonsuzlaşma hedefine ulaşmak için gereken yatırım gereksinimleri bölüm 2.5'te açıklanmaktadır.

Model sonuçlarına göre CCUS teknolojisi, beklendiği üzere çimento üretiminden kaynaklanan emisyonların azaltımında en önemli kaldıraç olarak karşımıza çıkmaktadır. Karbon azaltım teknolojilerinin yanı sıra, yeni ve alternatif yakıtlar ile klinker ikame ürünlerinin girdi olarak kullanılması, emisyon seviyelerindeki azaltımı desteklemektedir. Tahmin dönemi sonuna kadar net sıfır emisyonu hedefleyen LCP ve FTS senaryolarına göre, CCUS teknolojisinin devreye girmesiyle birlikte yatırım maliyetlerinin ciddi seviyede artması beklenmektedir.

### Çimento Sektörü için Bazı Karbonsuzlaşma Yol Haritaları

Çimento sektörü özelinde emisyonları azaltmak ve net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için çimento üretiminin farklı aşamalarında uygulanacak birçok yöntem mevcuttur. Çimento üretimi kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasına yönelik olarak çeşitli Ar-Ge projeleri yürütülmektedir. Bu çalışmalarda, klinker/çimento oranının azaltılması için klinker ikame ürünlerinin kullanılması; biyokütle içeriği yüksek alternatif yakıtların tercih edilmesi; CCUS teknolojilerinin ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin kullanımının artırılması ağırlıktadır.

Karşılaştırmalı değerlendirmelerin yapıldığı bu raporda, Küresel Çimento ve Beton Birliği (GCCA), Avrupa Çimento Birliği (CEMBUREAU) ve Birleşik Krallık Maden Ürünleri Birliği (MPA) tarafından hazırlanan üç önemli uluslararası çimento karbonsuzlaşma yol haritası çalışmasına atıfta bulunulmuştur. Proje kapsamında ilgili raporların karbonsuzlaşma kaldıraçları detaylı bir şekilde incelenmiş, sektör paydaşları ve sektör uzmanları ile bu kaldıraçların Türkiye'ye uygulanabilirliği konusunda görüşmeler yapılmıştır.

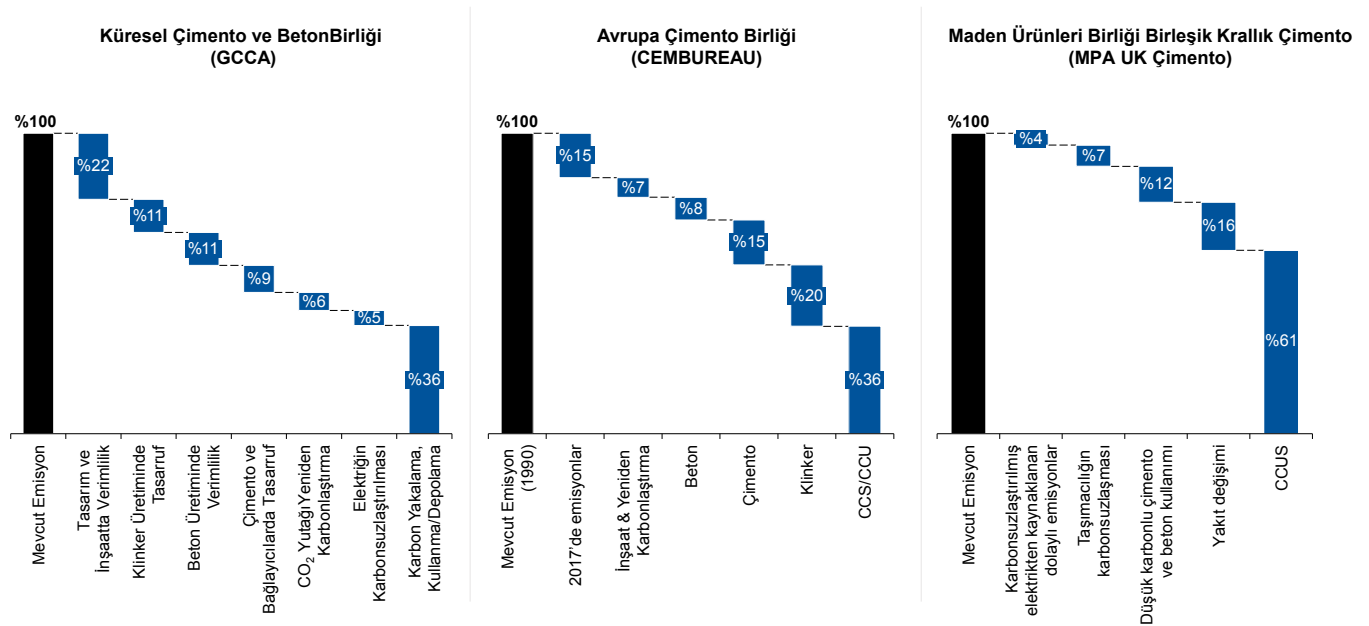
GCCA verilerine göre, 2021 yılı küresel çimento üretimi kaynaklanan toplam küresel CO<sub>2</sub> emisyonu 2,5 Gt'den fazladır. Ayrıca, karbonsuzlaşma hedeflerine uyulmadığı ve sektör tarafından önlem alınmadığı takdirde 2050 yılında 3,8 Gt CO<sub>2</sub> emisyonunun açığa çıkması beklenmektedir. Bu bağlamda GCCA, çimento sektörünün karbonsuzlaşması açısından en önemli 7 kaldırıcı tanımlamış ve 2050 yılında net sıfır hedefine ulaşmak için bir yol haritası oluşturmuştur. Bu yol haritasında emisyon azaltımı konusunda en büyük pay %36 ile CCUS teknolojilerine aittir. Bu kaldırıcı, %22 ile binalarda ve tasarımda verimlilik takip etmektedir. Ayrıca klinker üretiminde yapılabilecek tasarrufların altının çizildiği raporda, ilgili karbonsuzlaşma kaldırıcıları kapsamında emisyon azaltımı için termal verimlilik, yakıt olarak hidrojen kullanımı, ham maddelerin karbonsuzlaşması ve alternatif yakıtların kullanımı vurgulanmaktadır. Raporda ayrıca beton üretiminde verimlilik ve rekarbonasyon, elektriğin karbonsuzlaştırılması, çimento ve bağlayıcılardan tasarruf alanlarında atılacak çeşitli adımlar sayesinde 2050 yılında net sıfır hedefine ulaşılacağı öngörülmektedir.<sup>105</sup>

CEMBUREAU çimento endüstrisi yol haritası, 2050 yılına kadar çimento ve beton değer zincirinde net sıfır emisyon kaldırıcılarını inceleyen bir diğer önemli çalışmadır. Bu

bağlamda ara hedeflere duyulan ihtiyacı gören CEMBUREAU, Paris Anlaşması'nın "2 derece" senaryosu doğrultusunda 2030 yılına kadar brüt CO<sub>2</sub> emisyonlarını çimento için %30 ve değer zinciri için %40 oranında azaltma hedefi belirlemiştir. CEMBUREAU senaryosuna göre, 2050 yılında net sıfır hedefine ulaşmak için 5 ana kaldırıcının önemi vurgulanmıştır: inşaat verimliliği ve rekarbonasyon, betonda verimlilik, çimentoda verimlilik, klinkerde verimlilik ve CCUS. Şekil 38'de görüldüğü üzere, GCCA yol haritasında çimento sektörünün karbonsuzlaşmasında en büyük pay CCUS teknolojilerine aittir.<sup>106</sup>

Birleşik Krallık beton ve çimento endüstrisi net sıfır hedefini yakalamak üzere bir yol haritası geliştirmiştir ve bu yol haritasında her yıl salınandan daha fazla karbondioksitin atmosferden uzaklaştırılması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, üretimle ilgili 5 ana kaldırıcı üzerinde durulmuştur. Bu kaldırıcılar arasında yer alan CCUS teknolojileri, emisyon azaltımında ve net sıfır hedefine ulaşılmasında en büyük katkıya sahip olan temel karbonsuzlaşma kaldırıcısıdır. Net sıfırı aşan bir yol haritası izleyen MPA, termal kütle ve rekarbonasyon yoluyla toplam emisyonlarda sırasıyla %44 ve %12 seviyelerinde azalma sağlamayı hedeflemektedir.<sup>107</sup>

### Şekil 38. 2050 İtibarıyla Net Sıfır Aşmaya Yönelik Küresel Çimento Karbonsuzlaşma Yol Haritaları<sup>108</sup>



<sup>105</sup>GCCA (2021). The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete

<sup>106</sup>CEMBUREAU (2020). Reaching Climate Neutrality Along the Cement and Concrete Value Chain by 2050

<sup>107</sup>MPA UK Cement (2020). UK Concrete and Cement Industry Roadmap to Beyond Net Zero

<sup>108</sup>GCCA, CEMBUREAU, MPA UK Cement, PwC Analizi



## Türkiye Çimento Sektörü için Emisyon Projeksiyonları

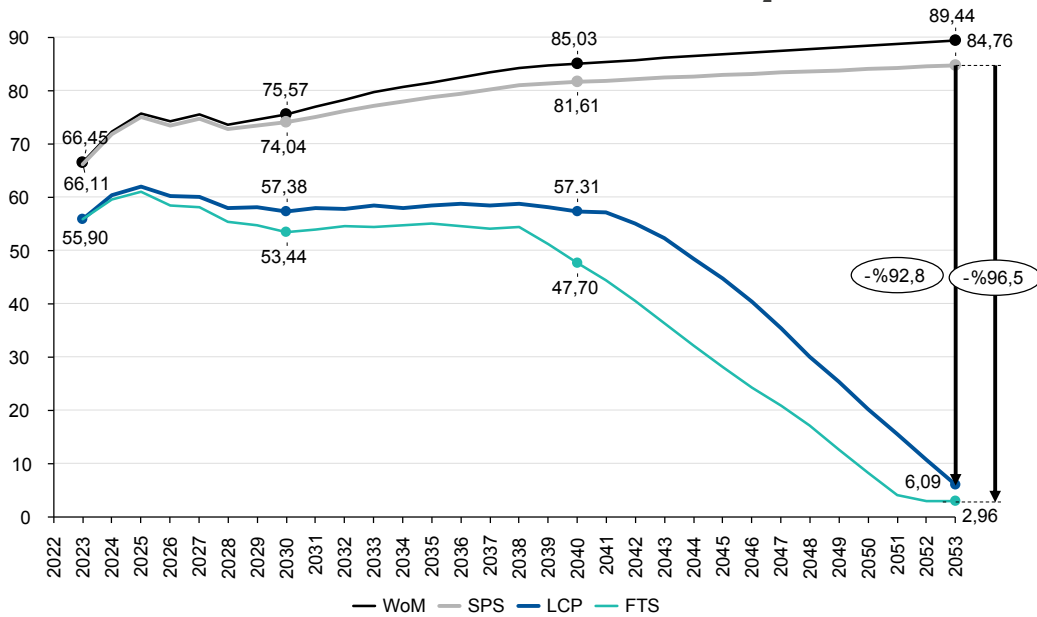
Senaryo bazlı emisyon tahminleri, farklı teknolojik dönüşüm öneren yol haritaları çerçevesinde Türkiye çimento sektörünün emisyon azaltma potansiyelinin anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Şekil 39'da görüldüğü üzere, hiçbir azaltım eyleminin ve teknolojik dönüşümün dikkate alınmadığı **WoM senaryosunda**, emisyonların ciddi ölçüde artması ve **2053 yılına kadar 89,44 milyon tona** ulaşması beklenmektedir. WoM senaryosu en yüksek emisyon öngören senaryodur. SPS senaryosunda herhangi bir yeni teknoloji yatırımı öngörülmezken, şebeke emisyonlarının azaltılmasına ve AB'ye göre daha düşük yurt içi karbon fiyatına yönelik projeksiyonlar yer almaktadır. Tüm bu varsayımlar ışığında, **SPS senaryosunda 2053 yılında 84,76 Mt CO<sub>2</sub> emisyon seviyesine ulaşabileceği öngörülmektedir.**

**LCP senaryosu olarak adlandırılan optimal senaryoda** karbon fiyatlarının öngörülen AB karbon fiyatlarından daha düşük olacağı ve maliyet etkin karbon azaltıcı teknoloji yatırımların yapılacağı varsayılarak, 2053 yılında çimento üretimi kaynaklı emisyonların 6,09 milyon ton CO<sub>2</sub> seviyesine kadar azaltılabileceği tahmin edilmiştir. Bu, SPS senaryosuna kıyasla **2053 yılında toplam emisyonlarda %92,8'lik bir**

**azaltım sağlanacağı anlamına gelmektedir.** Türkiye'deki karbon fiyatlarının AB karbon fiyatlarına eşit olacağı ve daha agresif azaltım hedeflerinin öngörüldüğü en agresif senaryo olan **FTS senaryosunda ise, aynı yıl sektör emisyonlarının 2,96 milyon tona indirilebileceği değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, SPS senaryosuna kıyasla FTS senaryosunda %96,5 emisyon azaltımı sağlanabilmektedir.** Hatırlatmak gerekirse hem LCP hem de FTS senaryosuna göre öngörülen emisyonlar, rekarbonasyon ile beton, malzeme ve tasarımda verimlilik etkisi nedeniyle tahmin dönemi başlangıç yılından itibaren referans senaryoların seviyelerinden (WoM ve SPS) farklıdır.

Emisyonların çoğunun (yaklaşık %60'ı) kalsinasyon sürecinde oluşması nedeniyle, çimento sektörünün karbon azaltımı konusunda izleyebileceği sınırlı sayıda alternatif yol vardır. Bu bağlamda, azaltım senaryolarında net sıfır hedefine ulaşmak için karbon azaltımlarının çoğunun son dönemde CCUS'un devreye alınmasıyla elde edilebileceği değerlendirilmektedir. **CCUS teknolojilerinin LCP senaryosuna göre 2042'de, FTS senaryosuna göre ise 2039'da uygulanmaya başlanacağı** ve emisyon azaltımları üzerindeki etkisini kademeli olarak artıracığı öngörülmektedir. Ancak, yine de her iki senaryoda da emisyonlar 2053 yılında net sıfıra ulaşmamaktadır.

**Şekil 39. Yıllara göre Türkiye Toplam Çimento Sektörü Kaynaklı Emisyon Projeksiyonları (Kapsam 1 + Kapsam 2, Milyon Ton CO<sub>2</sub>)<sup>109 110</sup>**



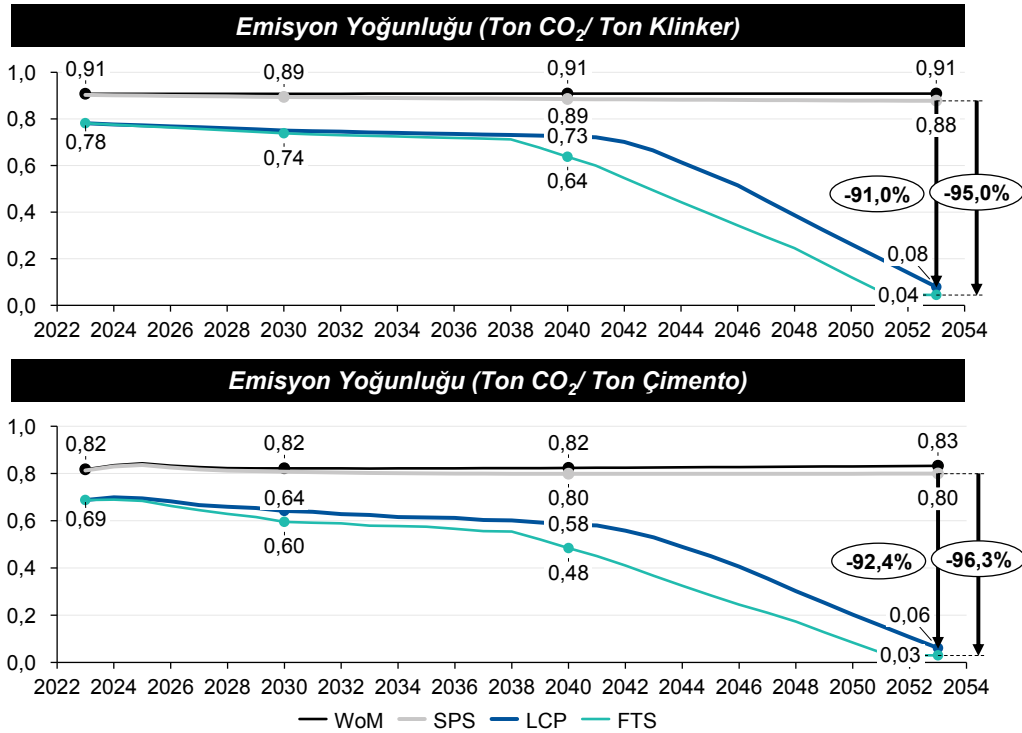
<sup>109</sup>PwC Analizi

<sup>110</sup>Rekarbonasyon, beton, malzeme ve tasarım verimliliği emisyon etkisi LCP ve FTS senaryolarında yer alırken WoM ve SPS senaryolarında yer almamaktadır.

Çeşitli karbonsuzlaşma yatırımlarının uygulanmasıyla birlikte emisyon yoğunluğunda düşüşler sağlanabilecektir. Emisyon yoğunluğu hesaplamalarında hem Kapsam 1 hem de Kapsam 2 emisyonları bir arada dikkate alınmıştır. Klinker emisyon yoğunluğu, 2053'te SPS senaryosuna kıyasla LCP ve FTS senaryoları için sırasıyla %91 ve %95

oranında azaltılabilmektedir. Öte yandan, 2053 yılında çimento emisyon yoğunluğunun, LCP senaryosuna göre ton çimento başına 0,06 ton CO<sub>2</sub>, FTS senaryosuna göre ise 0,03 ton CO<sub>2</sub> seviyesine düşeceği ve SPS senaryosuna kıyasla sırasıyla %92,4 ve %96,3'lük bir azaltım sağlanacağı tahmin edilmektedir.

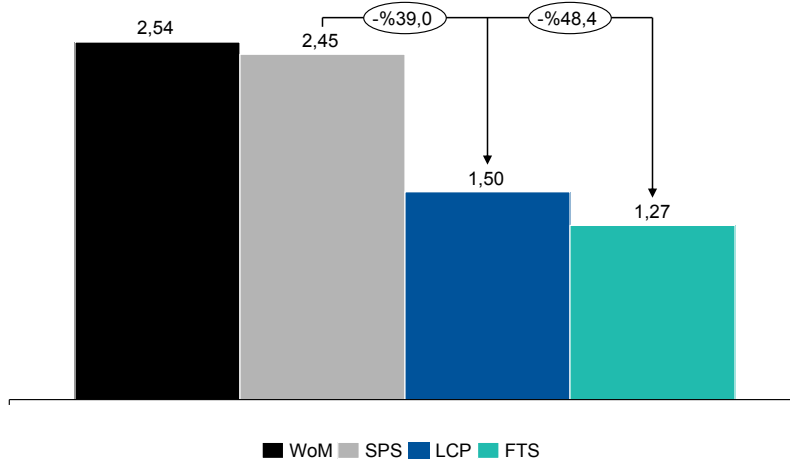
**Şekil 40. Emisyon Yoğunlukları (Kapsam 1+Kapsam 2 Emisyonları / Ton Klinker), (Kapsam 1+Kapsam 2 Emisyonları / Ton Çimento)**<sup>111 112 113</sup>



Şekil 41'de gösterildiği üzere, WoM senaryosunun önümüzdeki 30 yılda en yüksek toplam emisyonu üreteceği ve 2,54 milyar ton CO<sub>2</sub> seviyesinde emisyonla sebep olacağı değerlendirilirken, SPS senaryosunun ise aynı dönemde toplam 2,45 milyar ton CO<sub>2</sub> üreteceği tahmin edilmektedir. SPS senaryosuna göre %39'luk bir azaltım sağlayan LCP senaryosunun, 2023-2053 döneminde kümülatif olarak 1,50 milyar ton CO<sub>2</sub> salımına neden olması beklenmektedir.

İleri teknolojilerin, yeni ve alternatif yakıtların, çimento katkı maddelerinin daha agresif bir şekilde uygulanacağı ve ulusal karbon fiyatının daha yüksek seviyede gerçekleşeceğini varsayan FTS senaryosunda, toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının önümüzdeki 30 yıl içinde diğer senaryolara kıyasla daha fazla azalması öngörülmektedir. FTS senaryosu, LCP senaryosuna kıyasla 229 milyon ton daha fazla emisyon azaltımını başarabilmektedir.

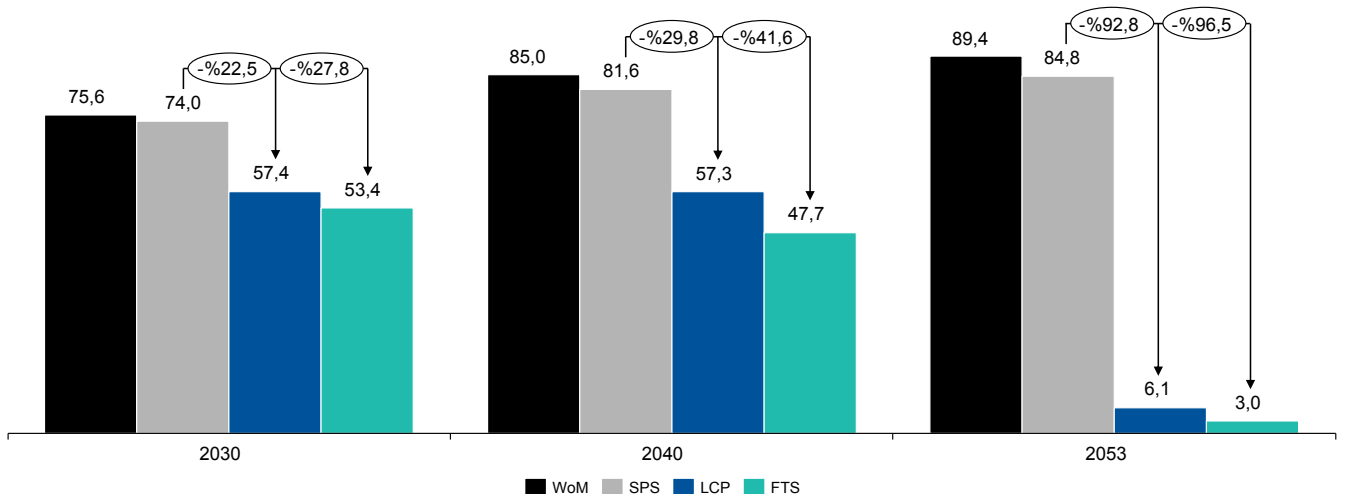
**Şekil 41. Türkiye Çimento Sektörü 2023-2053 Kümülatif CO<sub>2</sub> Emisyonları (Kapsam 1+Kapsam 2 Emisyonları, Milyar Ton CO<sub>2</sub>)<sup>114</sup>**



Emisyonlar farklı dönemler özelinde de incelenmiş olup, 2030, 2040 ve 2053 yılları için öngörülen emisyon azaltım oranları Şekil 42'de gösterilmiştir. Radikal teknolojiler ve yakıtlar henüz yaygınlaşmadığı veya sınırlı miktarlarda kullanıldığından, en düşük azaltım oranı 2030'da olacaktır. Yıllara göre senaryo bazlı emisyonlarla ilgili olarak 2030 yılında, SPS senaryosuna kıyasla LCP ve FTS senaryolarında sırasıyla %22,5 ve %27,8 emisyon azaltımı başarılmaktadır. 2040 yılında,

SPS senaryosuna kıyasla LCP senaryosunda %29,8, FTS senaryosunda ise %41,6 emisyon azaltımı sağlanabilmektedir. 2040 sonrasındaki emisyon azaltımları, CCUS teknolojisinin 2053'e kadar kullanılmaya başlamasıyla ilişkilidir. SPS senaryosuna kıyasla, 2053 yılında LCP senaryosunda %92,8 ve FTS senaryosunda %96,5 emisyon azaltımı sağlanmaktadır.

**Şekil 42. Seçili Yıllar için Emisyon Seviyeleri (Kapsam 1+Kapsam 2 Emisyonları, Milyon Ton CO<sub>2</sub>)<sup>115 116</sup>**



<sup>114</sup>PwC Analizi

<sup>115</sup>PwC Analizi

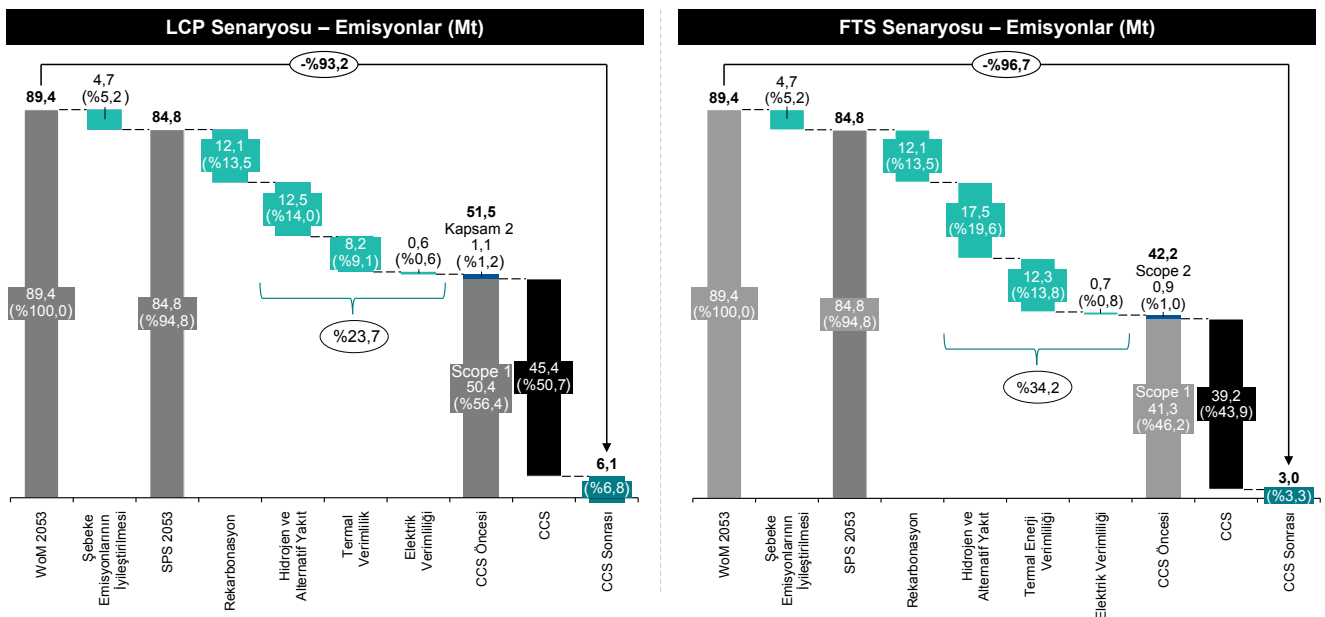
<sup>116</sup>Rekarbonasyon, beton, malzeme ve tasarım verimliliği LCP ve FTS senaryolarında yer alıyor olsa da WoM ve SPS senaryolarında yer almamaktadır.

Şekil 43'te yer verildiği üzere, Türkiye'nin net sıfır hedefi koyduğu 2053 yılındaki emisyon seviyeleri, referans ve azaltım senaryoları özelinde karşılaştırılmıştır. WoM senaryosu ile kıyaslandığında, SPS senaryosunda ortaya çıkan emisyonların 4,7 milyon ton CO<sub>2</sub> daha az olması beklenmektedir. Bunun temel nedeni, şebeke emisyon iyileştirmelerinin emisyon faktörünün azalmasına etkisidir. Temel kaldırılardan biri olan rekarbonasyonun, emisyonları WoM senaryosuna kıyasla 12,1 milyon ton daha (%13,5) azaltarak toplam emisyonları 72,7 milyon CO<sub>2</sub> seviyesine düşürebileceği öngörülmektedir. LCP senaryosunda; elektrik verimliliği, yakıt değişimi ve termal verimlilik yoluyla, WoM senaryosuna kıyasla %23,7'lik bir emisyon azaltımı sağlanabilmekte ve CCUS teknolojisi uygulanmadan önce 51,5 milyon ton büyüklüğünde bir emisyon bütçesine (Kapsam 1 + Kapsam 2) düşülebilmektedir. CCUS teknolojisinin yalnızca Kapsam 1 emisyonları (50,4 milyon ton) üzerinde azaltıcı etkisi vardır. CCUS teknolojisinin, LCP senaryosunda WoM ile kıyaslandığında 45,4 milyon ton (%50,7) emisyon azaltımı sağlayabileceği tahmin edilmektedir. Sonuç itibarıyla, LCP senaryosunda 2053 yılına kadar toplam emisyon seviyesi 6,1 milyon ton CO<sub>2</sub> düzeyine (Kapsam 1 + Kapsam

2) düşürülebilmektedir. Başka bir ifadeyle, LCP senaryosunda, 2053 yılında WoM senaryosuna kıyasla toplam %93,2'lik bir azaltım sağlanabilmektedir.

Benzer şekilde FTS senaryosunda, şebeke faktöründe yapılacak iyileştirmeler sayesinde 4,7 milyon ton emisyon azaltımı öngörülmektedir. Daha sonrasında rekarbonasyon yoluyla 12,1 milyon ton emisyon azaltımı sağlanacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca, alternatif yakıtların ve hidrojenin kullanılması sayesinde 17,5 milyon ton, elektrik verimliliği sayesinde 12,3 milyon ton ve termal enerji verimliliği sayesinde de 0,7 milyon ton emisyon azaltımı başarılabilmektedir. Dolayısıyla, CCUS teknolojisinin uygulanmasından önce 2053 yılı itibarıyla FTS senaryosunda emisyonları 42,2 milyon tona (Kapsam 1 + Kapsam 2) düşmesi beklenmektedir. CCUS teknolojisinin yaygınlaştırılmasıyla birlikte, WoM senaryosuna kıyasla 39,2 milyon ton (%43,9) ilave emisyon azaltımı (yalnızca Kapsam 1 emisyonları üzerinde) sağlanmakta olup, bu da 2053 yılı itibarıyla 3 milyon ton nihai emisyon bütçesi anlamına gelmektedir. FTS senaryosu, 2053 yılında WoM senaryosuna kıyasla %96,7 oranında azaltım sağlanabileceğini göstermektedir.

**Şekil 43. 2053 İtibarıyla Azaltım Senaryoları için Çimento Karbonsuzlaşma Yol Haritaları (Kapsam 1 + Kapsam 2 Emisyonları)<sup>117 118</sup>**

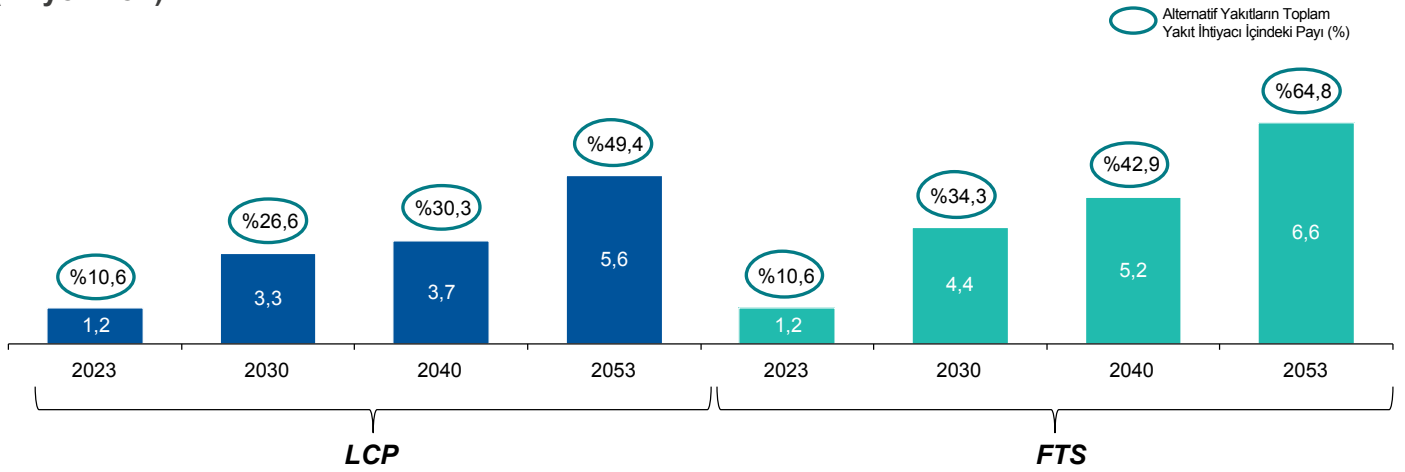


## Alternatif Yakıtlar ve Yenilenebilir Enerji İhtiyacı Projeksiyonları

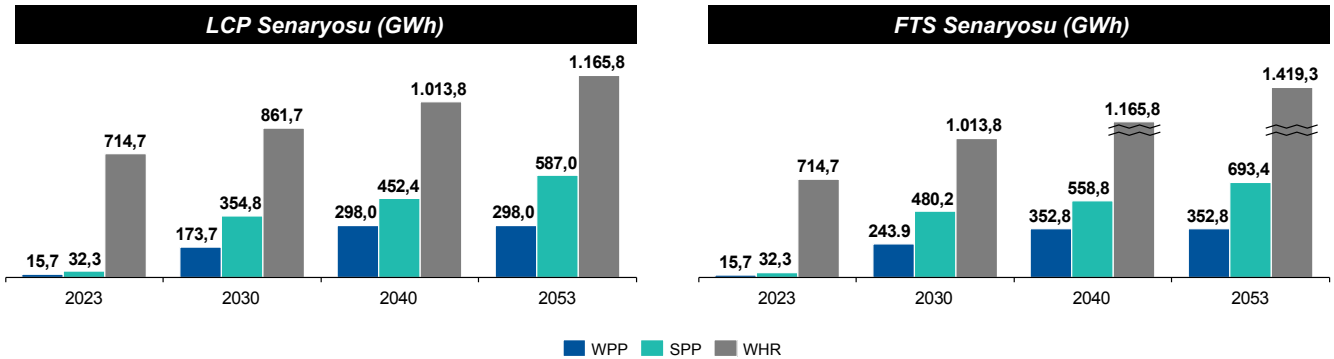
Çimento sektöründe emisyon azaltımı sağlamaya yönelik olarak üzerinde durulması gereken en önemli alanlardan biri, konvansiyonel fosil yakıtların yerine alternatif ve yeni yakıtların kullanımını arttırmaktır. Mevcut ve yeni geliştirilen yakıt türlerinin tamamı modelde dikkate alınmış olup azaltım senaryolarında alternatif yakıtların (tehlikeli atık, evsel ATY, ömrünü tamamlamış lastikler, belediye arıtma çamuru ve diğer alternatif yakıtlar) tonaj içindeki payının yıllar içinde artacağı varsayılmıştır. LCP senaryosunda, 2023 yılında %10,6 (1,2 milyon ton) olan alternatif yakıtların payının 2053'e kadar

artarak %49,4 (5,6 milyon ton) seviyesine ulaşacağı tahmin edilmiştir. Daha agresif FTS senaryosunda ise alternatif yakıtların payının daha da artması ve 2030 yılında %34,3'ü (4,4 milyon ton), 2053'te ise %64,8'i (6,6 milyon ton) aşması öngörülmektedir. Yenilenebilir rüzgâr enerjisi (RES) ve güneş enerjisi (GES) tarafından sağlanan enerjinin yine benzer şekilde tahmin döneminde artması beklenmektedir. Öte yandan yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan atık ısı geri kazanımı (WHR), bu kapsamdaki en yüksek potansiyelli teknoloji olarak öne çıkmaktadır. WHR'nin, LCP senaryosunda 2053 yılı itibarıyla elektrik talebinin 1165,8 GWh'lik ve FTS senaryosunda da 1419,3 GWh'lik kısmını karşılaması beklenmektedir.

Şekil 44. Senaryolara Göre Toplam Alternatif Yakıt Gereksinimi Projeksiyonları (Milyon Ton)<sup>118</sup>



Şekil 45. Senaryolara Göre Yenilenebilir Enerji Gereksinimi Projeksiyonları (GWh)<sup>119</sup>



<sup>119</sup>PwC Analizi  
<sup>120</sup>PwC Analizi

## 2.5. Karbonsuzlaşma için Gereken Yatırımlar

### 2.5.1. Senaryo Bazında Yatırım Projeksiyonları

Türkiye çimento sektörü, Paris Anlaşması'nda taahhüt edilen ulusal emisyon azaltım seviyelerine ulaşmak ve düşük karbonlu bir ekonomiye geçiş yapmak için yüksek yatırımlar ile geliştirilecek ve uygulanacak yeni teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. Bu yatırımlar, çimento sektörüne geçişe ilişkin farklı senaryolar dahilinde karbon azaltım teknolojileri, alternatif ham maddeler ve yakıtlar baz alınarak değerlendirilmektedir.

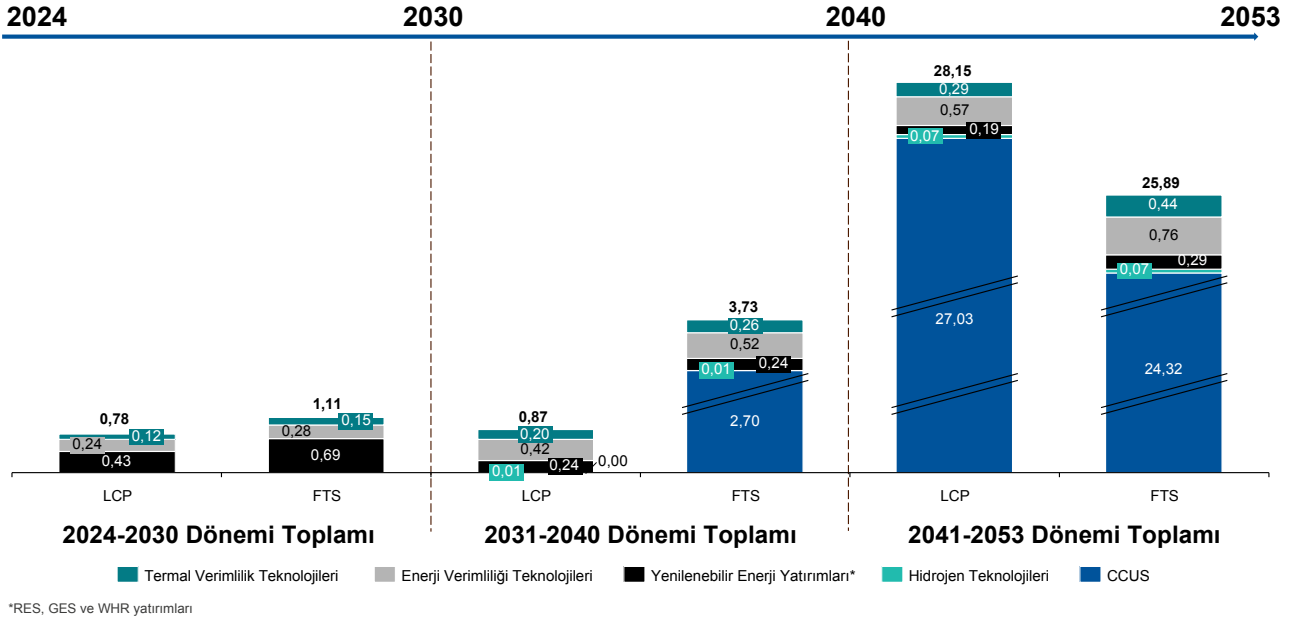
Her senaryo, farklı teknoloji penetrasyon oranları (çoğu teknoloji halihazırda kullanılabilir), üretim payları ve alternatif yakıt tüketim oranları içeren farklı karbonsuzlaşma yol haritalarına işaret etmektedir. Girdi ve teknoloji tabanlı veri setlerini kullanan optimizasyon modelinin amacı, senaryolarda tanımlanan emisyon hedeflerini göz önünde bulundurarak en az maliyetli seçeneği tespit etmektir. Böylece, farklı azaltım senaryoları için farklı maliyet ve yatırım ihtiyaçları tahmin edilmektedir.

Yatırım gereksinimleri; teknoloji giriş yılları, teknoloji yatırım maliyetleri (CAPEX) ve alternatif ham madde maliyetleri ile doğrudan ilişkilidir. Belirlenen teknolojilerin maliyetleri; teknik uzmanlarla yapılan görüşmeler, çimento firmaları ile sahada yapılan görüşmeler ve Türkiye'nin açıkladığı ulusal hedefler dikkate alınarak Türkiye'ye özgü koşullara göre uyarlanmıştır. Model sonuçlarına göre, düşük karbonlu üretim hedefine ulaşmak için özellikle CCUS teknolojisinin kullanılmaya başlanmasıyla birlikte yatırım maliyetlerinde kayda değer bir artış görülmektedir. Maliyet projeksiyonlarında, CCUS teknolojisine ilişkin karbon yakalama, taşıma ve depolama maliyetleri de dikkate alınmıştır. Sektörel karbonsuzlaşma

maliyetine yönelik projeksiyonlarda, atık ve depolama tesislerinin kurulması gibi süreçlere ilişkin maliyetler ise dikkate alınmamıştır.

Modelde, karbonsuzlaşma teknolojilerine yönelik yatırım ihtiyacı 5 kategori altında değerlendirilmektedir: **Termal verimlilik, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji, hidrojen ve CCUS yatırımları**. 2024-2030 arasında teknolojik dönüşümle ilgili toplam yatırım ihtiyacının, LCP ve FTS senaryoları için sırasıyla 0,8 milyar dolar ve 1,1 milyar dolar olması beklenmektedir. Söz konusu yıllarda her iki azaltım senaryosunda da yenilenebilir enerji en yüksek yatırım ihtiyacı duyulan alan olmuştur. 2030 yılını takip eden 10 yıllık dönemde (2031-2040) LCP senaryosunda toplam yatırım ihtiyacının 0,9 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir. FTS senaryosunda ise radikal teknolojilerin giriş yılının daha erken olacağı varsayılmaktadır. Dolayısıyla, FTS senaryosu, 2040 yılında nispeten daha yüksek maliyetli CCUS teknolojisine devreye girmesiyle birlikte aynı dönemde toplam 3,7 milyar dolarlık yatırım maliyetine ihtiyaç duymaktadır. Her iki azaltım senaryosu için de en yüksek yatırım ihtiyacının olduğu dönem 2041-2053 arasındadır. LCP ve FTS senaryoları için bu dönemdeki yatırım ihtiyacı sırasıyla 28,2 ve 25,9 milyar dolar seviyesindedir. Her iki azaltım senaryosuna ilişkin yatırım maliyetinin başlıca kaynağı CCUS teknolojisidir. FTS senaryosunda daha agresif hedefler öngörüldüğünden, FTS senaryosunda CCUS teknolojisine yönelik yatırımların LCP senaryosuna kıyasla daha erken gerçekleşmesi beklenmektedir. FTS senaryosunda CCUS yatırımlarının 2039 yılında başlayacağı tahmin edildiğinden, söz konusu dönem için (2041-2053) LCP senaryosundaki toplam CCUS yatırım maliyetinin daha yüksek olacağı öngörülmektedir.

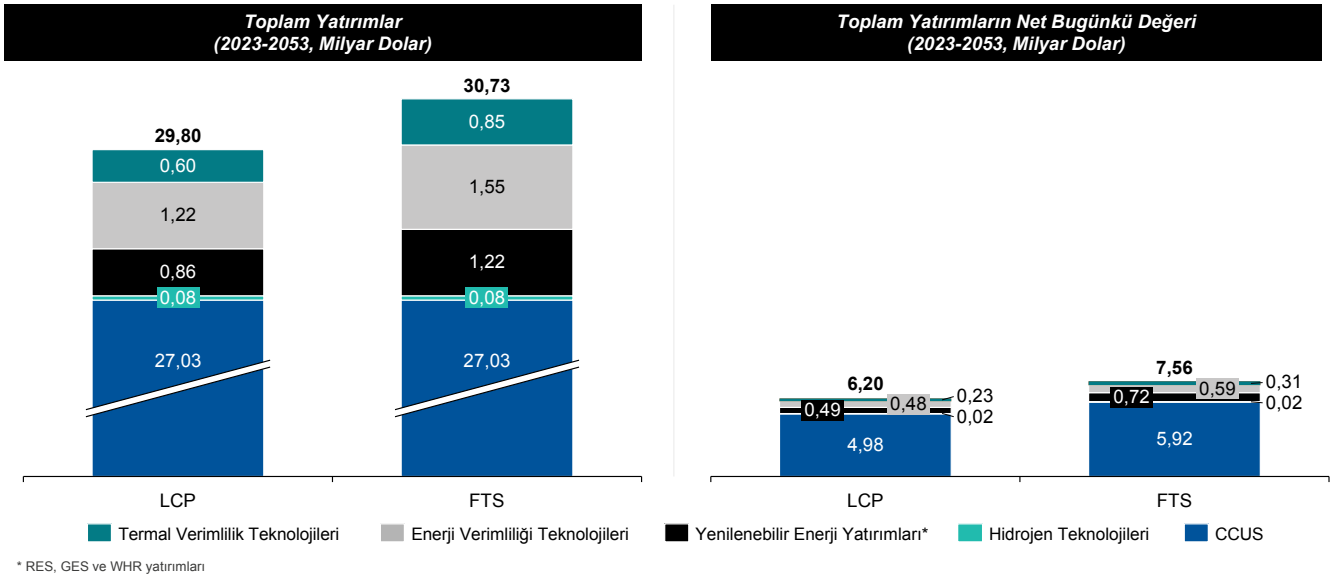
Şekil 46. Senaryolara Göre Seçili Dönemlerdeki Toplam Yatırım İhtiyacı (Milyar Dolar)<sup>121 122</sup>



2023-2053 dönemindeki toplam yatırım ihtiyacı LCP senaryosunda 29,8, FTS senaryosunda ise 30,7 milyar dolar olarak hesaplanmıştır. Net sıfır hedefine ulaşmak doğrultusunda yapılması gereken toplam yatırım miktarlarının %7'lik bir iskonto oranı kullanılarak net bugünkü değeri (NBD) hesaplandığında ise 2023-2053 dönemi için LCP senaryosunda bu tutarın yaklaşık 6,2 milyar dolar, FTS

senaryosunda ise 7,6 milyar dolar olacağı tahmin edilmiştir. CCUS teknolojisiyle ilgili toplam yatırımının NBD'si, LCP ve FTS senaryolarında sırasıyla 5,0 milyar dolar ve 5,9 milyar dolar olarak hesaplanmıştır. 2023-2053 yılları için yıllık ortalama NBD ihtiyacı LCP senaryosunda 499 milyon dolar, FTS senaryosunda ise 609 milyon dolardır.

Şekil 47. Toplam Yatırımlar ve Toplam Yatırımların Net Bugünkü Değeri (2023-2053, Milyar Dolar)<sup>123 124</sup>



<sup>121</sup>PwC Analizi

<sup>122</sup>CCUS yatırımı karbon yakalama, taşıma ve depolama maliyetlerini de içermektedir.

<sup>123</sup>PwC Analizi

<sup>124</sup>CCUS yatırımı karbon yakalama, taşıma ve depolama maliyetlerini de içermektedir.





3

**Türkiye Çimento  
Sektörü için  
Karbonsuzlaşma Yol  
Haritası**

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

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

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

#### **Politika Önerileri Kapsamındaki Teknolojilere**

**İlişkin Özel Not:** Yol haritası kapsamında önerilen teknoloji ve teknikler, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından proje çalışmasına paralel olarak ve sektör uzmanları, akademisyenler ve TÜBİTAK'ta görev alan uzmanlarla birlikte yürütülen "Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası- Çimento Sektörü"<sup>125</sup> adlı çalışma ile güçlendirilmiştir.

#### **Planlanan ulusal emisyon ticaret sistemi (ETS) ve ücretsiz tahsisatlara ilişkin özel not:**

AB Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS), 2005 yılından bu yana kıtanın ekonomiyi karbonsuzlaştırmak için kullandığı temel araç olmuştur. ETS, sebep olunan azami emisyonlara bir üst sınır koyarak sanayiden kaynaklanan toplam emisyonları sınırlamayı hedefleyen bir "üst sınır ve ticaret sistemi"dir (cap-and-trade). Bu sistemin başlıca amacı, karbon verimliliğinin önünü açmak ve emisyon azaltımına yönelik yeni ve yenilikçi yaklaşımları ve yatırımları destekleyecek teşvik programları tasarlamaktır. Bu yaklaşım, çimento sektörü gibi dekarbonizasyonu zor sektörlerin rekabetçi kalmasını sağlamak amacıyla, sektörel karbon kaçağı riski ve emisyon verimliliği hedeflerine dayalı olarak sanayi sektörlerine ücretsiz tahsisat dağıtılmasını sağlamaktadır.

Türkiye, iddialı emisyon hedeflerine ulaşma yolunda kapsamlı bir iklim politikası gündemi oluşturmuştur. Önümüzdeki yıl, karbon emisyonlarının etkin kontrolüne ve kademeli olarak azaltılmasına katkıda bulunmayı amaçlayan ulusal emisyon ticaret sisteminin oluşturulması açısından çok önemli bir yıl olacaktır. Türkiye, politika ve mekanizmaları tasarlarken, özellikle sistemin geliştirme sürecinin ilk aşamaları için çok büyük önem arz eden ETS'nin oluşturulması ve çalıştırılmasına ilişkin genel ilkeleri göz önünde bulunduracaktır. Ücretsiz tahsisatlarının sağlanmasına ilişkin kurallar sistemin temel bir bileşeni olacaktır. Dolayısıyla, sistemin ilk yıllarında çimento sektörü de dahil olmak üzere ağır sanayiye belirli miktarda ücretsiz tahsisat sağlanması, iklim politikaları fazla zorlayıcı olmayan ülkelerle rekabette geri kalınmaması açısından kritik önem taşıyacaktır.

2013 yılında AB'de imalat sektörüne emisyon tahsisatlarının %80'i ücretsiz olarak sağlanmış olsa da bu oran kademeli olarak düşerek 2020 yılında %30'a kadar gerilemiştir. AB, günümüz itibarıyla "Fit for 55" paketi kapsamında ETS'yi daha da sıkılaştırmakta ve bu da çimento şirketlerine çok daha az miktarda ücretsiz tahsisatın verilmesine neden olmaktadır. Ayrıca, AB ETS tahsisatlarının ücretsiz olarak dağıtımı, SKDM'nin aşamalı uygulamaya koyma planı kapsamında kademeli olarak azaltılacaktır. İlk yıllarda bu kademeli azalma süreci yavaş başlayacak, ancak daha sonraki yıllarda azalma oranı yükselecektir. Ulusal ETS'nin uygulamaya başlanacağı dönemde karbon emisyonlarının önemli bir kısmı için ücretsiz tahsisat hakkı sağlanacak olsa da önümüzdeki yıllarda, çimento sektörünün emisyonlarını azaltabilmesi için bu oranın düşürülmesi gerekecektir. Bu geçiş sürecini yönetmek, çimento üreticilerine güven sağlanması ve kısa-orta vadede yeni döneme hazırlanmalarına yardımcı olunması açısından kritik bir rol oynayacaktır.

Politika önerileri, **Girdi ve Teknoloji** ile **Politika ve Pazar** olmak üzere iki üst düzey politika teması altında gruplandırılmış ve bu iki politika teması altında **16 ana politika alanı** geliştirilmiştir.

### A) Girdi ve Teknoloji

- A.1) Çimento Üretiminde Klinker Kullanımının Azaltılması
- A.2) Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS) Teknolojileri
- A.3) Atık Isı Enerji Kazanımı
- A.4) Alternatif Yakıt Kullanımı
- A.5) Yeşil Enerji
- A.6) Proses İyileştirilmesi
- A.7) Kapsayıcı İstihdam ve Beceriler
- A.8) İnşaat Malzeme Verimliliği
- A.9) Rekarbonasyon

### B) Politika ve Pazar

- B.1) Araştırma ve Geliştirme
- B.2) Emisyon Ticaret Sistemi
- B.3) Ticaret Modelleri
- B.4) Ulusal Politika Belgeleri
- B.5) Yeşil Dönüşüm Finansmanı
- B.6) İş Birlikleri
- B.7) Endüstriyel Simbiyoz

## 3.1. Girdi ve Teknoloji

Girdi ve teknoloji ile ilgili karbonsuzlaşma politika alanları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

● **Faz 1** (2023-2025) ● **Faz 2** (2026-2033) ● **Faz 3** (2034-2038) ● **Faz 4** (2039-2053)

A.1) Çimento Üretiminde Klinker Kullanımının Azaltılması	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Yüksek fırın cürufu ve uçucu külün Türkiye içindeki çimento fabrikalarında kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmaların yürütülmesi.	●	●	●	●
Türkiye’de olası kalsine kil yatırımının ve kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmaların yürütülmesi ve bu çalışmalar ile beraber olası kalsine kil kaynaklarının da detaylandırılması.	●	●	●	●
Çimento katkısı olarak kullanılabilen alternatif malzemelerin kullanımının yaygınlaştırılması.	●	●	●	●
Ülke genelinde klinker ikamesinde kullanılabilen, çimentomsu esaslı olarak adlandırılacak doğal (puzolan), yan ürün (yüksek fırın cürufu ve kül) ve atık malzemelere ilişkin kaynak haritalamasına yönelik çalışmalar yapılması.	●	●	●	●

	Uygulama Zamanı / Aralığı			
A.2) Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS) Teknolojileri	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Türk çimento sektöründe karbon yakalama ve kullanma kapasitesinin artırılmasına yönelik faaliyetlerin gerçekleştirilmesi.	●	●	●	●
Çimento sektörünün kullanımına açık kamu ve/veya özel bölgesel karbon taşıma ve depolama ağının oluşturulması.		●	●	●
Çimento içerikli malzemelerde karbon kürü veya enjeksiyonu yoluyla karbon kullanımı yöntemlerinin araştırılması ve teknolojilerin geliştirilmesi.		●	●	●
A.3) Atık Isı Enerji Kazanımı	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Yeni kurulacak atık ısı geri kazanımı (WHR) tesisleri için mevcut teşvik sistemlerinin geliştirilmesi.	●	●	●	
A.4) Alternatif Yakıt Kullanımı	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Endüstriyel ATY (RDF) tedarikinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılması.	●	●	●	●
Büyükşehir Belediyesi/Belediye katı atık sahalarında, katı atıklardan evsel ATY üretiminin sağlanması için biyolojik kurutma prosesini içeren Mekanik-Biyolojik İşleme (MBT) tesisleri kurulmasının değerlendirilmesi.	●	●	●	●
Büyükşehir belediyeleri, OSB'ler ve sanayi tesisleri atık su arıtma tesislerinden çıkan kurutulmuş arıtma çamurlarının çimento sektöründe kullanımının sağlanması.	●	●	●	●
Limanlarda gemilerden kaynaklanan sintine ve slaç gibi sıvı atıkların susuzlaştırılarak çimento sektöründe kullanımının yaygınlaştırılması.	●	●	●	●
Alternatif yakıtların biyokütle analizlerinin yapılması amacıyla yetkilendirilmiş laboratuvarların kurulmasının sağlanması.	●	●	●	●
Zorunlu enerji etütleri ve kıyaslama çalışmaları kapsamında alternatif yakıt oranının artırılması için mali veya finansal desteklerin geliştirilmesine ilişkin faaliyetlerin yürütülmesi.	●	●	●	●
Alternatif yakıtların kullanım oranlarının artırılması için kapalı alternatif yakıt stok alanı ve besleme sistemleri yatırımlarının yapılması.	●	●	●	●

	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
<b>A.5) Yeşil Enerji</b>				
Termal enerji için yeşil enerji kaynaklarının (hidrojen, plazma, mikrodalga vb.) ve teknolojilerinin kullanılmasına yönelik çalışmaların yaygınlaştırılması.	●	●	●	●
Çimento sektörü için yeşil hidrojenin ticari olarak kullanılabilir ve uygun maliyetli hale getirilmesi için mevcut ve uygun teknolojilerin tespit edilmesine yönelik çalışmaların yaygınlaştırılması.	●	●	●	●
Çimento sektörü özelinde değerlendirme çalışmaları yapılarak yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılmasının sağlanması.	●	●	●	
	Uygulama Zamanı / Aralığı			
<b>A.6) Proses İyileştirilmesi</b>	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Çimento fabrikalarının CO <sub>2</sub> azaltımına yönelik mevcut en iyi teknikleri (MET) adapte etmesinin artırılmasına yönelik kıyaslama çalışmalarına devam edilmesi.	●	●		
Çimento döner fırın ısı gücü tüketiminin (kcal/kg klinker) azaltılmasına yönelik kıyaslama ve denetim çalışmalarının sürdürülmesi.	●	●	●	●
Çimento üretim süreçlerinde karbon salımını en aza indirecek teknolojik dönüşüm çözümlerinin geliştirilmesi.	●	●	●	
Çimento sektöründe elektrik enerjisi tüketiminin (kWh/ton çimento) azaltılmasına yönelik kıyaslama ve denetim çalışmalarına devam edilmesi.	●	●	●	●
	Uygulama Zamanı / Aralığı			
<b>A.7) Kapsayıcı İstihdam ve Beceriler</b>	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Çimento sektöründe herkes için fırsat eşitliği sağlanarak kadınlar ile diğer özel politika gerektiren grupların istihdamının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılması.	●	●	●	●
Çimento sektöründe yeşil dönüşüm süreci kapsamında yeni nitelik ve becerilere sahip iş gücünün yetiştirilmesine yönelik çalışmaların yürütülmesi.	●	●	●	●
Yeşil ve dijital dönüşüm konusunda sektör paydaşlarının farkındalıklarının artırılması amacıyla karbon azaltımıyla ilgili gelişim programlarının hazırlanması ve uygulanması	●	●	●	●
Yeşil dönüşüm sürecinin gerektirdiği iş gücü ihtiyacı doğrultusunda gerekli eğitim programlarının hazırlanması ve uygulanması.	●	●	●	●

A.8) İnşaat Malzeme Verimliliği	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Hazır beton üretiminde ve inşaat sahalarında düşük karbonlu çimentonun kullanımının teşvik edilmesi.	●	●	●	●

A.9) Rekarbonasyon	Application Time/Interval			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Çimento üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında ve doğrulanmasında rekarbonasyonun (yeniden karbonatlaşma) CO <sub>2</sub> yutağı olarak dahil edilmesine yönelik çalışmaların yapılması.	●			

### 3.2. Politika ve Pazar

Politika ve pazar ile ilgili dekarbonizasyon politika alanları aşağıda detaylandırılmıştır.

● Faz 1 (2023-2025) ● Faz 2 (2026-2033) ● Faz 3 (2034-2038) ● Faz 4 (2039-2053)

B.1) Araştırma ve Geliştirme	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Düşük karbonlu beton ve çimento üretimi için yenilikçi bağlayıcıların araştırılması ve uygulama projelerinin desteklenmesi.	●	●	●	●
Çimento sektöründe yeşil dönüşüm için Ar-Ge ve yenilik teşviklerinin yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmaların yürütülmesi.	●	●	●	●

B.2) Emisyon Ticaret Sistemi	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
ETS'ye uyum kapsamında yeşil dönüşüme yönelik çimento sektöründe faaliyet gösterenlerin desteklenmesi.		●	●	
SKDM kapsamında emisyon ölçüm ve raporlama esasları belirlendiğinde bu alandaki uygulamamızın AB nezdinde tanınırlığının sağlanması için girişimlerde bulunulması.	●	●		

B.3) Ticaret Modelleri	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Karbonsuzlaşma adımı atmayan ülkeler arasındaki ticaretin artmasından doğacak pazar değişimlerinin analiz edilerek, sektörün uluslararası rekabet gücünün korunması için önlemler alınması.	●	●	●	●

B.4) Ulusal Politika Belgeleri	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Gümrük Birliği ile elde edilmiş ve teknik mevzuat uyumuna dayalı olarak sürdürülen malların serbest dolaşımı hakkının devamı amacıyla ilgili mevzuatın (emisyon ticaret sistemi, atık yönetimi, ham madde, döngüsel ekonomi vb.) AB mevzuatı ile farklılaştığı yerlerin belirlenmesi ve tam uyumlu hale getirilmesine yönelik çalışmaların yürütülmesi.	●	●	●	
Kamu ve özel sektörün düşük karbonlu çimento kullanımını teşvik edecek düzenlemeler yapılması.	●	●	●	●

B.5) Yeşil Dönüşüm Finansmanı	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Yeşil dönüşüm finansman desteklerinden çimento sektörünün yararlanmasının sağlanmasına ilişkin çalışmaların yürütülmesi.	●	●	●	

B.6) İş Birlikleri	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Çimento sektörünün düşük karbon hedefi için sektörel bazda çözüm üretecek girişimlerin yer aldığı bir ekosistemin oluşturulması.	●	●	●	●
İlgili kamu kurumları, bağlı kuruluşları ve üniversiteler ile çimento fabrikaları arasındaki iş birliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılması.	●	●	●	●

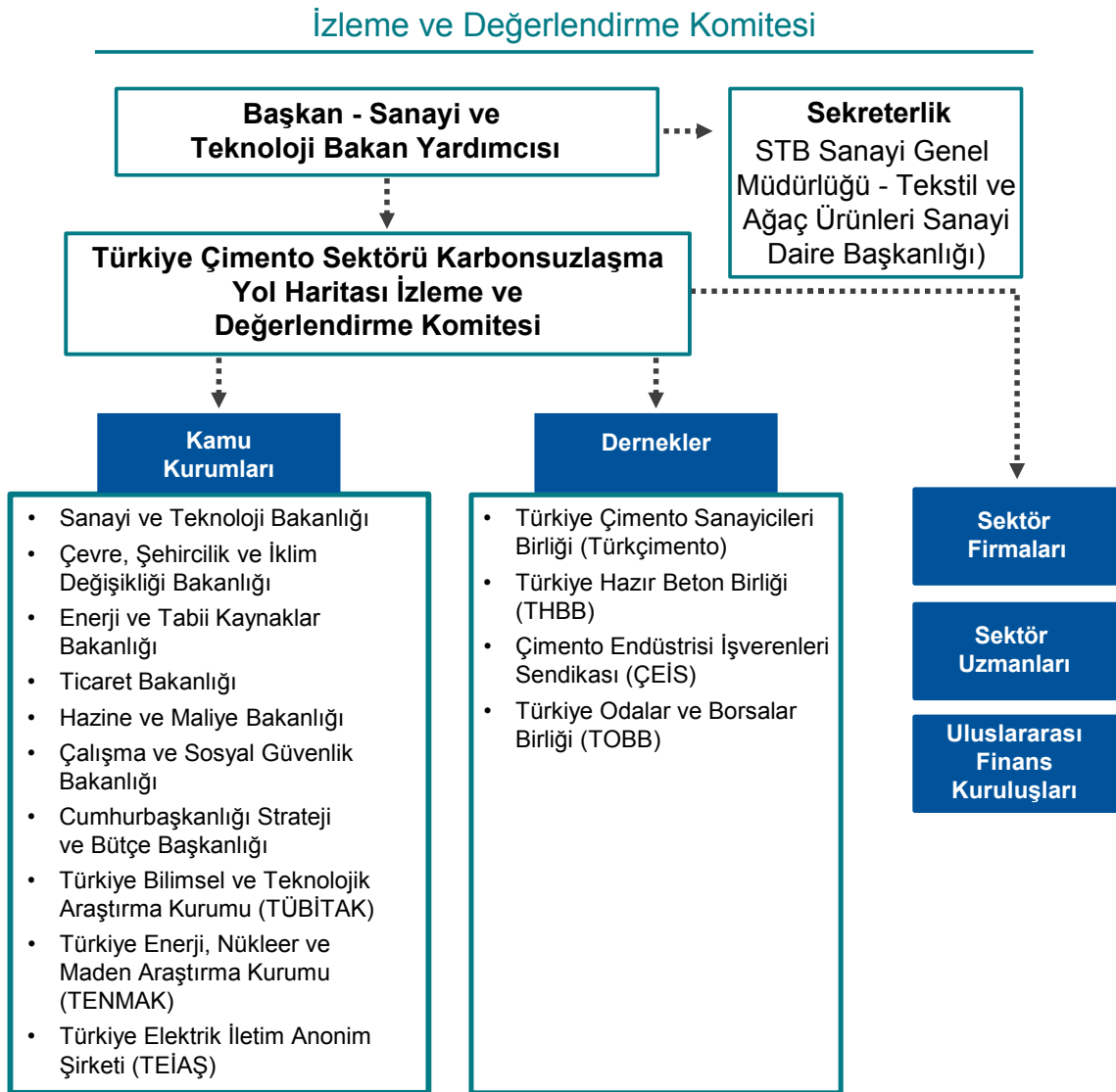
B.7) Endüstriyel Simbiyoz	Uygulama Zamanı / Aralığı			
	Faz 1 (2023-2025)	Faz 2 (2026-2033)	Faz 3 (2034-2038)	Faz 4 (2039-2053)
Endüstriyel simbiyoz ağı oluşturularak farklı endüstrilere ait atık ve yan ürünlerin çimentoda kullanım açısından analiz edilmesi ve kullanıma uygun olanların belirlenmesi.	●	●	●	●

## İzleme ve Değerlendirme Komitesi

Türkiye Çimento Sektörü Karbonsuzlaşma Yol Haritası kapsamındaki politika önerilerinin uygulanma sürecini ve sonuçlarını düzenli olarak izleyen ve değerlendiren bir Komite kurulması önem taşımaktadır. Bu nedenle, belirlenen yol

haritasının uygulanmasına ilişkin yüksek standartların tutarlı bir şekilde karşılanabilmesi amacıyla, uygulama sürecini ve sonuçlarını düzenli olarak takip eden ve değerlendiren bir izleme ve değerlendirme mekanizmasının oluşturulması şarttır. Bu maksatla, **bir İzleme ve Değerlendirme (İ&D) Komitesi'nin kurulması önerilmiştir.**

### Şekil 48. Önerilen İzleme ve Değerlendirme Komitesi'nin Yapısı





# 4

Sonuç



## 4. Sonuç

Paris Anlaşması ve AB Yeşil Mutabakatının da hızlandırıcı etkisiyle uzun vadeli bir dönüşümün içine giren Türkiye, enerji yoğun endüstrilerin karbonsuzlaşması için sektörel stratejiler geliştirmektedir. Ülke bu yönden, çimento dahil olmak üzere kritik sektörlerin düşük karbonlu üretime sorunsuz bir şekilde adapte olmasını sağlamaya yönelik önemli adımlar atmaktadır. Söz konusu adımlardan biri olan bu rapor, Türkiye çimento sektörünün karbonsuzlaşma hedeflerini desteklemeyi, paralelde yürütülen diğer çalışma ve analizleri tamamlamayı amaçlamaktadır.

Türkiye açısından büyük bir stratejik öneme sahip olan çimento sektörü, kaliteli ürünleri sayesinde yurt içi ve yurt dışı pazarlara başarıyla hizmet veren bir sektör haline gelmiştir. Bu raporun hazırlanmasında rol alan tüm proje paydaşları, bu lider sektörün çıkarlarını korurken aynı zamanda Türkiye'nin emisyon azaltım hedefleri doğrultusundaki karbonsuzlaşmasını teşvik etme gerekliliğinin farkındadır. Bahsedilen gereklilikleri göz önünde bulunduran bu çalışma, Türkiye çimento sektörünün karbonsuzlaşma çalışmalarına zemin hazırlayan, veriye dayalı azaltım hedefleri ve tamamlayıcı politika eylemleri ortaya koymaktadır. Bu stratejiyi gerçeğe dönüştürmek için, projeye girdi sağlayan anahtar paydaşların sürekli desteği önem arz etmektedir.

Türkiye çimento sektöründe net sıfır hedefine ulaşmak, teknolojide önemli adımlar atılmasının yanı sıra kararlı ve güçlü politikaların hayata geçirilmesini gerektirecektir. Çimento sektörünün net sıfıra ulaşma taahhüdünde; termal verimliliğin artırılması, klinker/çimento oranının azaltılması, biyokütle yakıt ikame oranlarının artırılması, alternatif ve yeni yakıtların kullanılması, fosil yakıtların azaltılması ve kısa-orta vadede elektrikte karbonsuzlaşma sağlanmasını içeren birçok kaldıraç esas alınacaktır. Düşük karbonlu bir gelecek hedefine ulaşabilmek açısından, çimento sektörüne yönelik uzun vadeli net sıfır stratejisinin önemli bir bileşeni olarak hidrojen ve CCUS teknolojisinin kullanılması büyük önem arz edecektir. Beton üretiminde ve kullanımında verimlilik, sektörün karbonsuzlaşma yol haritası için diğer önemli faktörlerdir.

Türkiye çimento sektörü üzerine yapılmış karbonsuzlaşma projeksiyonları, öncelikli olarak etkin finansman mekanizmalarının geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, çimento sektörünün orta-uzun vadede gerekli teknolojik dönüşümü gerçekleştirebilmesi için kısa vadede ilave fonların harekete geçirilmesine yönelik tedbirlere öncelik verilmesi gerekmektedir. Türkiye çimento sektörünün, bu yol haritası kapsamında karbonsuzlaşma yatırımlarını teşvik etmek üzere büyük ölçekli sermayeye erişebilmesi içinse, politika yapıcılarının ve finans kuruluşlarının iş birliği yapması ve yenilikçi finansman mekanizmaları geliştirilmesi kritik önem taşıyacaktır.

Bu yol haritasının uygulanması, ilgili tüm paydaşların sürekli desteğini ve etkin koordinasyonunu gerektirmektedir. Kurulması önerilen izleme ve değerlendirme mekanizması, çimento sektörünün etkileyen gelişmelerin takibinde öncü bir rol oynamalı, gerektiğinde tahminler ve politika çerçevesi güncellenmeli ve tüm paydaşlara kendi kontrolleri ve sahiplikleri altındaki ilgili politikaların uygulanmasında etkin rehberlik edilmelidir.

Bu proje, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile EBRD'nin yönlendirmesi sonucu proje ekibinin kapsamlı çalışmaları yürütmesi ve sektör oyuncularını da dahil olmak üzere ilgili paydaşların yoğun katkısı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın, Türkiye çimento sektörünün karbonsuzlaşması için optimal yol haritasını belirlemesine, ilgili tarafların destek ve finansman kanallarını tasarlamasına ve politikaların belirlenen alanlarda etkin bir şekilde uygulanmasına girdi sağlaması beklenmektedir. Türkiye çimento 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.



