

# Türkiye Alüminyum Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası

Ekim 2023



T.C. SANAYİ VE  
TEKNOLOJİ BAKANLIĞI



tarafından desteklenmiştir.

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

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

# İçindekiler

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Kısaltmalar                                                                       | 4         |
| Şekiller Listesi                                                                  | 6         |
| Tablolar Listesi                                                                  | 8         |
| Teşekkür                                                                          | 9         |
| Giriş                                                                             | 10        |
| <b>Yönetici Özeti</b>                                                             | <b>10</b> |
| <b>1. Mevcut Durum Analizi</b>                                                    | <b>25</b> |
| 1.1. Türkiye Alüminyum Sektörüne Genel Bakış                                      | 26        |
| 1.1.1. Kapasite ve Üretim                                                         | 26        |
| 1.1.2. Türkiye'nin Alüminyum Ticareti ve AB'nin payı                              | 28        |
| 1.2. Türkiye Alüminyum Sektörünün Diğer Ülkeler ile Karşılaştırılması             | 29        |
| 1.2.1. Alüminyum Üretim Kapasiteleri                                              | 29        |
| 1.2.2. CO <sub>2</sub> Emisyon Seviyelerinin Karşılaştırılması                    | 30        |
| 1.2.3. Alüminyum Sektörü Karbonsuzlaşma Stratejilerinin Karşılaştırılması         | 31        |
| <b>2. Alüminyum Sektörünün Karbonsuzlaşması için Modelleme ve Senaryo Analizi</b> | <b>33</b> |
| 2.1. Sektörel Büyüme Projeksiyonları                                              | 41        |
| 2.1.1. Metodoloji & Varsayımlar                                                   | 41        |
| 2.1.2. Projeksiyon Sonuçları                                                      | 42        |
| 2.2. Birincil Alüminyum Modelleme Sonuçları                                       | 45        |
| 2.2.1. Düşük Karbonlu Birincil Alüminyum Teknolojileri                            | 45        |
| 2.2.2. Senaryo Analizi ve Modelleme Yaklaşımı                                     | 48        |
| 2.2.3. Model Sonuçları                                                            | 49        |
| 2.3. Alüminyum İşleme Modelleme Sonuçları                                         | 53        |
| 2.3.1. Düşük Karbon Alüminyum İşleme Teknolojileri                                | 53        |
| 2.3.2. Senaryo Analizi ve Modelleme Yaklaşımı                                     | 54        |
| 2.3.3. Model Sonuçları                                                            | 55        |
| 2.4. Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyonları                                          | 59        |
| 2.4.1. Senaryo Analizi ve Modelleme Yaklaşımı                                     | 60        |
| 2.4.2. Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Analizi Sonuçları                                  | 61        |
| 2.5. Karbon Azaltıcı Yatırım İhtiyacı                                             | 63        |
| 2.5.1. Senaryo Bazlı Yatırım Maliyeti Projeksiyonları                             | 63        |
| <b>3. Türkiye Alüminyum Sektörü için Karbonsuzlaşma Yol Haritası</b>              | <b>65</b> |
| 3.1. Girdi ve Teknoloji                                                           | 66        |
| 3.2. Politika ve Pazar                                                            | 69        |
| <b>4. Sonuç</b>                                                                   | <b>73</b> |
| <b>5. Ekler</b>                                                                   | <b>75</b> |
| Ek 1: Projeksiyonlarda ETS ve CBAM Etkisi                                         | 76        |
| Ek 2: Alüminyum İşlemede Kullanılan Fırın Tipleri                                 | 77        |



## Kısaltmalar

|                 |                                                                     |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|
| AB              | Avrupa Birliği                                                      |
| ABD             | Amerika Birleşik Devletleri                                         |
| ALUTEAM         | Alüminyum Test, Eğitim ve Araştırma Merkezi                         |
| Ar-Ge           | Araştırma ve Geliştirme                                             |
| BAE             | Birleşik Arap Emirlikleri                                           |
| CAPEX           | Sermaye Harcamaları                                                 |
| CCS             | Karbon Yakalama ve Depolama                                         |
| CCU             | Karbon Yakalama ve Kullanma                                         |
| CCUS            | Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama                               |
| CO <sub>2</sub> | Karbondiyoksit                                                      |
| CST             | Konsantre Güneş Enerjisi                                            |
| EBRD            | Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası                                     |
| ETS             | Emisyon Ticaret Sistemi                                             |
| FTS             | En İyi Teknolojiler Senaryosu (Frontier Technologies Scenario)      |
| GALSİAD         | Girişimci Alüminyum Sanayici ve İş İnsanları Derneği                |
| GAMS            | Genel Cebirsel Modelleme Sistemi                                    |
| H <sub>2</sub>  | Hidrojen                                                            |
| IAI             | Uluslararası Alüminyum Enstitüsü (International Aluminum Institute) |
| IEA             | Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)            |
| LCP             | Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (Low Carbon Pathway Scenario) |
| MPP             | Mission Possible Partnership                                        |
| NBD             | Net Bugünkü Değer                                                   |
| NO <sub>x</sub> | Azot Oksitler                                                       |
| O <sub>2</sub>  | Oksijen Gazı                                                        |
| OPEX            | İşletme Giderleri                                                   |
| PFC             | Perfluorokarbon                                                     |
| SKDM            | Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması                              |

---

|          |                                                                       |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|
| SMR      | Küçük Modüler Nükleer Reaktör                                         |
| SPS      | Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosu (Stated Policy Scenario)       |
| TALSAD   | Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği                                |
| TİM      | Türkiye İhracatçılar Meclisi                                          |
| TOBB     | Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği                                    |
| TÜBİTAK  | Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu                       |
| TÜDÖKSAD | Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği                                    |
| UN       | Birleşmiş Milletler                                                   |
| UNFCCC   | Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi              |
| WoM      | Azaltıcı Önlemlerin Öngörülmediği Senaryo (Without Measures Scenario) |
| YBBO     | Yıllık Bileşik Büyüme Oranı                                           |

## Şekiller Listesi

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Üretim Yolu Bazında Türkiye'nin Alüminyum Üretimi, 2021                                                         | 14 |
| Şekil 2. Değer Bazında Türkiye'nin Alüminyum İhracatı, 2022                                                              | 14 |
| Şekil 3. 2023-2053 Arası Türkiye Alüminyum Sektörünün Kümülatif Toplam Emisyonları, (Mt CO <sub>2</sub> )                | 16 |
| Şekil 4. 2023, 2030, 2040 ve 2053 Dönemine Ait Farklı Senaryolarla Elde Edilen Emisyon Azaltımı (Bin t CO <sub>2</sub> ) | 17 |
| Şekil 5. Farklı Senaryolar Altında Varsayılan Yıllık Kapsam 1&2 Emisyonları (Bin t CO <sub>2</sub> )                     | 18 |
| Şekil 6. Senaryo ve Yıl Bazında Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyonları (Milyon Ton CO <sub>2</sub> )                        | 19 |
| Şekil 7. Senaryolar Bazında Toplam Yatırım İhtiyacı (2023-2053, NBD, Milyon Dolar)                                       | 19 |
| Şekil 8. Birincil Alüminyum - Teknolojik Dönüşüm Öngörüsü                                                                | 20 |
| Şekil 9. Alüminyum İşleme - Teknolojik Dönüşüm Öngörüsü                                                                  | 21 |
| Şekil 10. Karbonsuzlaşma için Politika Önerileri                                                                         | 22 |
| Şekil 11. Türkiye'de Birincil Alüminyum Üretimi (Bin Ton)                                                                | 26 |
| Şekil 12. Türkiye'de Geri Dönüştürülmüş Alüminyum Arzı (Bin Ton)                                                         | 27 |
| Şekil 13. Türkiye'de Ürün Bazında Alüminyum İşleme Hacmi (Ton)                                                           | 28 |
| Şekil 14. Türkiye Alüminyum İhracatının Bölge ve Ülke Bazında Dağılımı, 2022                                             | 29 |
| Şekil 15. Önde Gelen Birincil Alüminyum Üreticisi Ülkelerin Kapasiteleri, 2020 (Milyon Ton)                              | 29 |
| Şekil 16. Önde Gelen Alüminyum İşleme Ülkelerinin Kapasiteleri, 2021 (Milyon Ton)                                        | 30 |
| Şekil 17. Birincil Alüminyum CO <sub>2</sub> Emisyon Yoğunluğu (t CO <sub>2</sub> /t Al)                                 | 31 |
| Şekil 18. Uluslararası Kurumların Alüminyum Karbonsuzlaşma Yol Haritaları                                                | 32 |
| Şekil 19. Emisyon Kapsamları                                                                                             | 35 |
| Şekil 20. Alüminyum Sektörü Toplam Emisyonlar (2023-2053, Mt)                                                            | 37 |
| Şekil 21. Alüminyum Sektörü Yıllık Emisyon Miktarları (Mt)                                                               | 37 |
| Şekil 22. Birincil Alüminyum Sektöründe Kümülatif Emisyonlar (2023-2053, Mt)                                             | 38 |
| Şekil 23. Birincil Alüminyum - Yıllık Emisyonlar (Bin t CO <sub>2</sub> )                                                | 38 |
| Şekil 24. Alüminyum İşleme – Toplam Emisyonlar (2023-2053, Mt)                                                           | 39 |
| Şekil 25. Alüminyum İşlemede Yıllık Emisyon Miktarları (Bin ton)                                                         | 39 |
| Şekil 26. Alüminyum İşleme - Girdi Kaynaklı Toplam Kapsam 3 Emisyonları (2023-2053, Mt)                                  | 40 |
| Şekil 27. Alüminyum İşleme Yıllık Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyonu (Mt)                                                  | 40 |
| Şekil 28. Projeksiyon Metodolojisi                                                                                       | 41 |
| Şekil 29. Alüminyum Talep Tahmini (Milyon Ton)                                                                           | 42 |
| Şekil 30. Seçili Ülkelerde Kişi Başı Alüminyum Tüketimi ve Türkiye'de Kişi Başı Alüminyum Tüketimi Projeksiyonu (Kg)     | 43 |
| Şekil 31. Yarı Mamul Ürünler İçin İthalat Tahmini (Milyon Ton)                                                           | 43 |
| Şekil 32. Yarı Mamul Ürünler için İhracat Tahmini (Milyon Ton)                                                           | 44 |

---

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 33. Yarı Mamul Ürünler için Üretim Tahmini (Milyon Ton)                                                                 | 44 |
| Şekil 34. Süreç Bazlı Teknolojiler (MPP)                                                                                      | 46 |
| Şekil 35. Birincil Alüminyum Teknolojileri için Emisyon Seviyeleri                                                            | 47 |
| Şekil 36. Teknolojilerin Ticari Olarak Devreye Girebileceği Yıllar                                                            | 48 |
| Şekil 37. Birincil Alüminyum Üretim Senaryoları                                                                               | 48 |
| Şekil 38. Birincil Alüminyum Üretim Süreçleri için Teknoloji Seçenekleri                                                      | 49 |
| Şekil 39. Küresel Ortalamalara Kıyasla Türkiye'nin Proses Bazlı Emisyonları (t CO <sub>2</sub> /t Al)                         | 50 |
| Şekil 40. Türkiye Birincil Alüminyum Üretimi - Mevcut Teknolojiler                                                            | 50 |
| Şekil 41. Emisyon Yoğunluğu (t CO <sub>2</sub> / t Al)                                                                        | 51 |
| Şekil 42. Birincil Üretimde 2023-2053 Yılı Toplam Emisyonlar (Mt CO <sub>2</sub> )                                            | 52 |
| Şekil 43. Birincil Alüminyum Üretimi için Teknolojik Dönüşüm*                                                                 | 52 |
| Şekil 44. Fırın Tiplerine göre Emisyon Seviyesi (t CO <sub>2</sub> /t Al)                                                     | 53 |
| Şekil 45. Alüminyum İşleme Senaryoları                                                                                        | 54 |
| Şekil 46. Fırın Tipine göre Türkiye'de Alüminyum İşlemenin Dağılımı ve Emisyon Seviyeleri                                     | 55 |
| Şekil 47. Kapsam 1 & 2 Emisyon Yoğunluğu (t CO <sub>2</sub> /t Al)                                                            | 56 |
| Şekil 48. Yıllık Toplam Kapsam 1&2 Emisyon Seviyeleri (Mt CO <sub>2</sub> )                                                   | 56 |
| Şekil 49. Mevcut Üretim Miktarlarına Göre Fırın Dağılımı                                                                      | 57 |
| Şekil 50. Alüminyum İşleme için Teknolojik Dönüşüm Öngörüsü                                                                   | 58 |
| Şekil 51. Alüminyum İşleme için Fırın Dönüşümü                                                                                | 59 |
| Şekil 52. Senaryo Bazında 2053 Yılında Emisyonlar (Mt CO <sub>2</sub> )                                                       | 59 |
| Şekil 53. Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyon Senaryoları                                                                         | 60 |
| Şekil 54. Türkiye'nin Külçe Alüminyum İthal Ettiği Ülkeler                                                                    | 60 |
| Şekil 55. Türkiye'nin En Çok İthalat Yaptığı Ülkelerin Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyon Yoğunlukları (t CO <sub>2</sub> /t Al) | 61 |
| Şekil 56. Yıllara Göre Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyon Yoğunluğu (t CO <sub>2</sub> /t Al)                                    | 62 |
| Şekil 57. 2053'te Senaryo Bazında Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyonları (Mt CO <sub>2</sub> )                                   | 62 |
| Şekil 58. 2023-2053 Arası Toplam Emisyonları (Mt CO <sub>2</sub> )                                                            | 62 |
| Şekil 59. Senaryo Bazında Yatırım Maliyeti & NBD (Milyon Dolar)                                                               | 63 |
| Şekil 60. 2023-2053 Arasında Gerekli Toplam Yatırım (Milyar Dolar)                                                            | 64 |
| Şekil 61. 2023-2053 Arasında Gerekli Yatırımın NBD'si (Milyar Dolar)                                                          | 64 |
| Şekil 62. AB ETS vs TR ETS (Euro) Karşılaştırması                                                                             | 76 |
| Şekil 63. İhracat Azalma Oranı Tahmini                                                                                        | 76 |

## Tablolar Listesi

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1. Birincil Alüminyum Üretiminde Emisyon Azaltım Hedefleri Karşılaştırması (CO <sub>2</sub> , %)           | 15 |
| Tablo 2. Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosunda Modelin Karar Verdiği Öncelikli Alüminyum Üretim Teknolojileri | 15 |
| Tablo 3. Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosunda Modelin Karar Verdiği Öncelikli Alüminyum Üretim Teknolojileri | 36 |

## Teşekkür

Bu rapor, **PwC Türkiye** ve PwC Türkiye'nin konsorsiyum ortakları bünyesinde görev alan uzman, yazar ve danışman ekibi tarafından hazırlanmıştır: Dr. Akif Koca, Prof. Dr. Onuralp Yücel, Prof. Dr. Özgül Keleş, Dr. Halvor Kvande, Dr. Kubilay Kavak ve Dr. Zeynep Yöntem. Bu Proje, Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası'nın (EBRD) finansman desteği ile gerçekleştirilmiştir.

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

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

Proje ekibi, **Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği** (TALSAD) Genel Sekreteri Erol Metin'e, **Alüminyum Test, Eğitim ve Araştırma Merkezi** (ALUTEAM) Müdürü Dr. Ebubekir Koç'a, **Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği** (TÜDÖKSAD) Genel Sekreteri Koray Hatipoğlu'na, **Girişimci Alüminyum Sanayici ve İş İnsanları Derneği** (GALSİAD) Başkanı Celalettin Kırboz'a ve ekiplerine, proje boyunca verdikleri devamlı destek için özel olarak teşekkürlerini sunar. Proje ekibi ayrıca aşağıdaki kurum ve kişilere de destekleri için teşekkür eder:

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

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

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

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

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

## Giriş

Küresel iklim politikaları, Birleşmiş Milletler'in bilime dayalı emisyon azaltım hedefleri doğrultusunda hızla gelişmektedir. Küresel seviyede belirlenen iklim değişikliğiyle mücadele hedefleri, Paris Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi geniş kapsamlı girişimler aracılığıyla devletler için bağlayıcı politikalara dönüşmektedir. Paris Anlaşması, iklim değişikliğiyle mücadele konusunda uluslararası iş birliğinin dönüm noktası sayılabilecek bir girişim olup, taraflarını sera gazı emisyonlarını sınırlandırma konusunda bağlayıcı niteliktedir. Anlaşma, ülkeleri iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamak için birlikte çalışmaya ve taahhütlerini zaman içinde güçlendirmeye çağırılmaktadır. Bu proje, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi doğrultusunda düşük karbon seçeneklerinin yaygınlaştırılmasını desteklemeyi amaçlamaktadır.

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

Alüminyum (ve alaşımları), ağır sanayiden günlük hızlı tüketim ürünlerine kadar geniş kullanım alanına sahip, kritik bir materyaldir. Bununla birlikte sektörün değer zinciri, emisyonlar bakımından ele alındığında, özellikle birincil alüminyum üretiminin yoğun CO<sub>2</sub> emisyonuna sebep olduğu görülmektedir. Birincil alüminyum üretimi, 2021 yılında küresel sanayi kaynaklı emisyonların (9,4 Gt CO<sub>2</sub>) yaklaşık %3'ünden sorumludur.<sup>1</sup> Yüksek emisyonu yol açmasına rağmen alüminyum, karbonsuzlaşma teknolojileri de dahil olmak üzere, yüksek talep gören pek çok teknoloji (ör. elektrikli araçlar, güneş panelleri gibi) için kritik bir girdi olarak önemini arttıracaktır.

Alüminyum doğası gereği, teoride, sonsuz sefer geri dönüştürülebilen bir metaldir. Küresel alüminyum değer zinciri, boksit madenciliğinden başlayarak birincil alüminyum üretimi ile yeni ve eski alüminyum hurdasının kademeli olarak geri dönüştürülmesi aşamalarını içermektedir. Türkiye'nin alüminyum üretim yapısı göz önünde bulundurulduğunda birincil alüminyum üretimi ile alüminyum işleme arasındaki emisyon farkı özellikle öne çıkmaktadır. Türkiye alüminyum sektörü verimli, ancak sınırlı bir birincil alüminyum üretim kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, ülkede gelişmiş ve yüksek ölçekte üretim yapan bir alüminyum işleme kapasitesi bulunmaktadır. Küresel alüminyum dekarbonizasyon yol haritaları, alüminyum değer zincirinde emisyonların büyük bir kısmını oluşturan birincil alüminyum üretiminde emisyon azaltımını önceliklendirse de Türkiye alüminyum sektörü için alüminyum işleme ve metalin geri dönüştürülmesine odaklı bir

<sup>1</sup> Uluslararası Enerji Ajansı. Alüminyum Tracking Report.

<sup>2</sup> İkincil üretim, alüminyum hurdanın tekrar kullanılabilir bir alüminyuma geri dönüştürme sürecidir. Alüminyum işleme, birincil metal ve hurda metali fırınlarda eriterek yarı mamul ürünlere dönüştürme sürecidir.

---

karbonsuzlaşma yaklaşımı gerekmektedir.

Bu çalışma, uluslararası alüminyum dekarbonizasyon yol haritaları ve hedeflerini de dikkate alarak, Türkiye alüminyum sektörünün yeşil dönüşümüne ilişkin içgörüler sunmakta ve sektör için toplam dönüşüm maliyetlerine ilişkin ek bilgiler sağlamaktadır. Söz konusu çalışma, birincil alüminyum üretimine ek olarak alüminyum işlemeyi modelleyen<sup>2</sup> ilk çalışmalardan biri olması sebebiyle de önem taşımaktadır. Bu yol haritası, ilgili aktörleri bir araya getirip sektör için ortak bir vizyon ortaya koyarak önerilen eylemlerin uygulanmasını hızlandırmaya yardımcı olacak bir yatırım planı ve platform geliştirilmesine temel teşkil edebilir.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın yararlanıcısı, EBRD'nin fonlayıcısı olduğu ve PwC liderliğindeki Konsorsiyum'un yürüttüğü bu proje, ulusal ve Türk alüminyum sektörünün emisyon azaltım hedefleri doğrultusunda atılan iklim alakalı politika adımlarına girdi ve katkı sağlaması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında tüm sektör paydaşlarının görüşlerini en doğru ve eksiksiz şekilde yansıtmak adına bir Yönlendirme Komitesi oluşturulmuştur. Söz konusu Yönlendirme Komitesi'nde Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ticaret Bakanlığı ve TÜBİTAK gibi birçok kamu kuruluşlarının yanı sıra, Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği (TALSAD), Alüminyum Test, Eğitim ve Araştırma Merkezi (ALUTEAM), Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (TÜDÖKSAD) ve Girişimci Alüminyum Sanayici ve İş İnsanları Derneği (GALSİAD) da yer almıştır.

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

"Türkiye Alüminyum Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası Projesi"nin temel çıktısı olan bu rapor, Türkiye alüminyum sektörünün Paris Anlaşması hedeflerine uygun şekilde yeşil dönüşümünü gerçekleştirmesi için bir zemin hazırlamayı amaçlamaktadır. Raporun ülke iklim stratejisinde anlamlı bir temele oturması için, ele alınan konu ve önerilerin ulusal politika belgeleriyle bağlantısı da incelenmiştir. Türkiye Alüminyum Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası, Ticaret Bakanlığı tarafından hazırlanan "Yeşil Mutabakat Eylem Planı"nda yer alan ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nı sınırda karbon düzenleme mekanizmasına konu olabilecek öncelikli imalat sektörlerinde sera gazı emisyonlarının azaltılmasını destekleyecek ulusal düzeyde bir yol haritası geliştirmekle görevlendiren Eylem 1.1.1'in uygulanması için bir temel oluşturmaktadır. Bu proje aynı zamanda Türkiye'nin 2053 net sıfır sera gazı emisyonu hedefiyle birlikte güncellenmiş ulusal katkı beyanı (NDC) kapsamında belirlenen ara hedeflerine ulaşmasına ve Yeşil Teknoloji Yol Haritaları'nın hazırlanmasına (2023-2024 dönemi için) destek olacaktır.



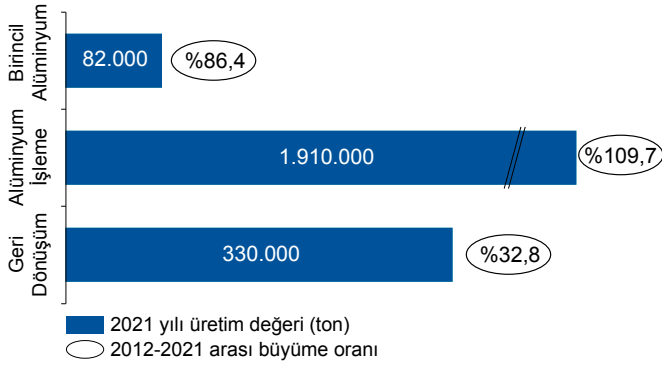
# Yönetici Özeti

## Yönetici Özeti

### Sektörün Mevcut Durumu ve Emisyon Seviyeleri

Türkiye, oldukça verimli bir birincil alüminyum üretim tesisine sahip olmakla birlikte, küresel birincil alüminyum pazarında mütevazı bir paya sahiptir. Türkiye'deki tek birincil alüminyum üreticisi konumundaki ETİ Alüminyum'un üretimi 2012 ve 2022 arasındaki dönemde %86,4 oranında artmış ve 82.000 ton seviyesine ulaşmıştır.<sup>3</sup> Öte yandan, ülkenin alüminyum işleme hacmi 2012-2021 arasında %8,6 yıllık bileşik büyüme oranı (YBBO) ile artarak 1,91 milyon ton seviyesine ulaşmıştır.<sup>4</sup>

#### Şekil 1. Üretim Yolu Bazında Türkiye'nin Alüminyum Üretimi, 2021

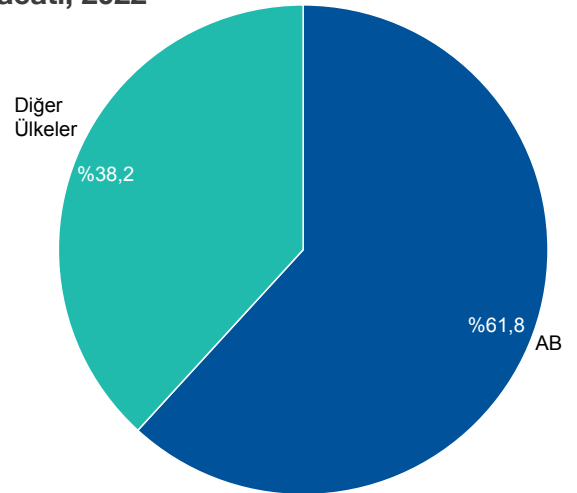


Alüminyum işleme (ekstrüzyon, hadde, döküm, dövme, çizim vb. yollarla alüminyum fabrikasyonu) için kritik öneme sahip alüminyum hurdasının tedariki ise ulusal talebi karşılayabilecek bir hızda büyümektedir. Geri dönüştürülmüş hurdadan yapılan üretim 2012 ve 2021 yılları arasında ancak %32,8 oranında artarak (YBBO: %4,5) 330.000 tona ulaşırken, alüminyum işlemedeki genel artışın (109.7%) gerisinde kalmıştır.<sup>5</sup> Sınırlı miktarda birincil alüminyum üretimi ve sınırlı miktarda yurt içi hurda arzı nedeniyle alüminyum işleme faaliyeti, büyük oranda ithal alüminyum hurdası ile ithal alüminyum külçesine dayanmaktadır. Geri dönüştürülmüş hurda alüminyum hacminin, alüminyum işleme hacminin altında seyretmesi sektörün gelecekteki emisyon azaltım çabaları için olası bir darboğaza işaret etmektedir.

Türkiye, 2022 yılında 100'den fazla ülkeye toplam 6,7 milyar dolar değerinde alüminyum ihracatı gerçekleştirirken bu ihracatın çoğu (%61,8) AB ülkelerine yapılmıştır. Bu yoğunlaşma, Türk ihracatçıların AB'nin iklim politikaları ve özellikle yakında devreye girecek AB SKDM kapsamında hızla eyleme geçmesi gerektiğinin altını çizmektedir.

Türkiye alüminyum sektörünün emisyon yoğunluk seviyesi, dünya ortalaması olan 17 ton CO<sub>2</sub>/ton ve AB ortalaması olan 6,7 ton CO<sub>2</sub> / tona kıyasla 5,34 ton CO<sub>2</sub> / ton seviyesi ile görece olarak daha düşüktür.<sup>6</sup> Bunun temel nedenlerinden biri, emisyon yoğun birincil alüminyum üretiminde ağırlıklı olarak yenilenebilir enerjinin kullanılmasıdır. Hem küresel hem de ulusal seviyede alüminyum işleme tarafındaki kısıtlı emisyon verileri, emisyon yoğunluğuna ilişkin bir kıyaslamaya izin vermemektedir. Ancak, alüminyum işlemede enerji yoğunluğunun, birincil üretime kıyasla önemli ölçüde daha az olduğu bilinmektedir. Çalışmalar, alüminyum işleme üretiminin, birincil alüminyum üretimine göre yaklaşık 10 ila 15 kat daha az enerji gerektirdiğini ortaya koymaktadır.<sup>7</sup>

#### Şekil 2. Değer Bazında Türkiye'nin Alüminyum İhracatı, 2022



#### Küresel Karbonsuzlaşma Hedeflerinin Rapor Bulgularıyla Karşılaştırılması

"Türkiye Alüminyum Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası" çalışması sonucu elde edilen emisyon azaltımı tahminleri, Uluslararası Alüminyum Enstitüsü (IAI) ve Mission Possible Partnership (MPP) tarafından hazırlanan alüminyum karbonsuzlaşma yol haritaları ile karşılaştırılmıştır. Her iki yol haritası da emisyon azaltımı için birincil alüminyum üretimine odaklanmaktadır. Bu raporun yazım tarihi itibarıyla, ikincil alüminyuma ve/veya alüminyum işlemeye odaklanan bir uluslararası veya ulusal karbon azaltım yol haritasına rastlanmamıştır. Bu nedenle çıktılar yalnızca birincil alüminyum bazında karşılaştırılabilmektedir.

**Tablo 1. Birincil Alüminyum Üretiminde Emisyon Azaltım Hedefleri Karşılaştırması (CO<sub>2</sub>, %)<sup>8</sup>**

| Teknoloji Arketipi                                          | 2030 (%) | 2040 (%) | 2050/2053 (%) |
|-------------------------------------------------------------|----------|----------|---------------|
| IAI <sup>9</sup>                                            | 26       | 81,7     | 95,1          |
| MPP <sup>10</sup>                                           | 20       | 80       | 90            |
| Türkiye Düşük Karbonlu Alüminyum Yol Haritası <sup>11</sup> | 15,5     | 87       | 98            |

Türkiye alüminyum sektöründe alüminyum işleme payının birincil alüminyumdan yüksek olması, ağırlıklı birincil üretimine sahip diğer ülkelere kıyasla Türkiye'yi sektör karbon azaltım hedefleri açısından avantajlı bir konuma yerleştirmektedir. Sektörün net sıfır hedeflerine ulaşması ise yeni teknoloji yatırımlarının yapılmasını gerektirmektedir. Geliştirilen

optimizasyon modeli sonuçlarına göre (detaylar bu raporun 2. bölümünde yer almaktadır), Türkiye alüminyum sektörü için önceliklendirilen teknolojiler, bunların emisyon azaltım etkisi ve yatırım gereklilikleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

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

|                                                | Öngörülen Teknoloji Giriş Yılı | Teknoloji Değişim Yılı | Emisyon Azaltım Etkisi | Gereken Yatırım Seviyesi |
|------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| <b>Birincil Alüminyum Teknolojileri</b>        |                                |                        |                        |                          |
| Gaz Kazanı                                     | 2028                           | 2028                   | Orta                   | Düşük                    |
| Güneş Enerjisi Kazanı                          | 2032                           | 2032                   | Orta                   | Yüksek                   |
| Hidrojen Kalsinatörü                           | 2035                           | 2047                   | Düşük-Orta             | Düşük-Orta               |
| İnert Anot                                     | 2040                           | 2040                   | Çok Yüksek             | Çok Yüksek               |
| <b>Alüminyum İşleme Teknolojileri</b>          |                                |                        |                        |                          |
| En İleri Düzey Reverber Fırın                  | Mevcut                         | 2024                   | Yüksek                 | Orta                     |
| Elektrikli Reverber Fırın                      | 2040                           | 2040                   | Yüksek                 | Yüksek                   |
| Pota Fırını +Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) | 2040                           | 2045                   | Düşük                  | Düşük-Orta               |
| Döner Fırın + CCS                              | 2040                           | 2046                   | Düşük                  | Düşük-Orta               |
| En İleri Düzey Reverber Fırın +CCS             | 2040                           | 2047                   | Düşük                  | Yüksek                   |

### Senaryolar Kapsamında Sektörün Emisyon Azaltım Potansiyeli

Alüminyum sektörünün karbonsuzlaştırılması için temel adımlar; ileri seviye üretim teknolojilerinin belirlenmesi ve önceliklendirilmesi, teknoloji yatırımları için finansman sağlanması ve tüm üretim süreçlerinde kullanılan enerjide karbonun azaltılması olmalıdır. Türkiye'nin emisyon azaltım

hedeflerine ulaşabilmesi için de alüminyum sektörünün teknolojik dönüşümünü kolaylaştıracak kısa ve uzun vadeli stratejileri belirlemesi ve buna uygun yatırım ihtiyaçlarını tespit etmesi gerekmektedir. Türkiye alüminyum sektörünün 2053 yılına kadar net sıfır hedefine ulaşabilmesi için, projede tespit

<sup>8</sup>Bu tablo IAI, MPP ve bu proje çıktıları bir araya getirilerek oluşturulmuştur.

<sup>9</sup>Emisyon azaltımı 2018 yılı baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>10</sup>Emisyon azaltımı 2020 yılı baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>11</sup>Emisyon azaltımı 2023 yılı baz alınarak hesaplanmıştır.

edilen emisyon azaltım kaldıraçları aşağıdaki gibidir:

- Hurda geri dönüşümünün ve üretimde hurda kullanımının artırılması
- Yeni ve radikal teknolojilerin benimsenmesi
- Düşük emisyonlu enerji kaynaklarına geçiş sağlanması

Bu çalışma, sektörün emisyon azaltımı potansiyelini yukarıdaki kaldıraçların değişen varsayımları ile **referans ve azaltım senaryoları kapsamında modellemiştir.**

Bu senaryolarda, aynı zamanda AB SKDM ve kurulması planlanan ulusal emisyon ticaret sisteminin (ETS) olası etkileri de değerlendirilmiştir.

Referans ve Azaltım senaryoları, birer senaryo çatısı olarak kurgulanmış olup, bu başlıklar altında proje ihtiyaçlarına yönelik alt senaryolar geliştirilmiştir. **“Azaltıcı Önlemlerin Öngörülmediği Senaryo” (WoM)**, hiçbir azaltıcı eylem ya da politikanın uygulanmadığı ve teknolojik dönüşümün öngörülmediği referans senaryodur. Diğer referans senaryo olan **“Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosu” (SPS)** ise yenilenebilir enerji yatırımları, süreç verimliliği iyileştirmeleri, AB SKDM ve ulusal ETS de dahil olmak üzere şu ana kadar açıklanan politikaların olası etkilerini incelemiş ancak hiçbir ek azaltım politikasına ya da yatırımına gidilmeyeceği varsayılmıştır.

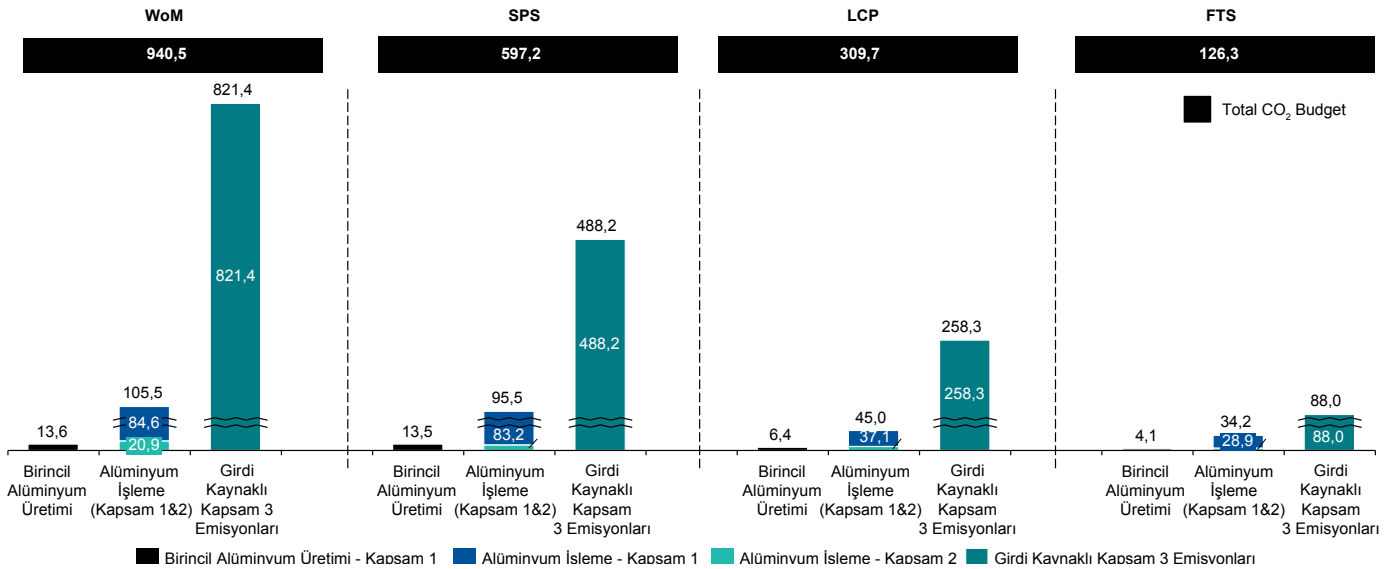
Optimal azaltım senaryosu olarak geliştirilen **“Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu” (LCP)**, tüm uygulanabilir düşük karbon teknolojilerinin ve öngörülen iklim politikaların uygulamaya alındığı en düşük maliyetli azaltım senaryosudur. Emisyon azaltım hedeflerine ulaşılması için en iddialı karbonsuzlaşma senaryosu olarak kurgulanan **“En İyi Teknolojiler Senaryosu”nda (FTS)** ise, en iyi karbonsuzlaşma teknolojilerinin alüminyum üretim süreçlerine, LCP’den daha erken şekilde, uygulanacağı varsayılmıştır.

Modelleme çalışmasının sonuçlarına göre 2023-2053 yılları arasında;

- Alüminyum sektörü kaynaklı toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının, WoM ve SPS senaryolarında sırasıyla 941 Mt ve 597 Mt olacağı tahmin edilmektedir. Optimal azaltım senaryosu LCP’de toplam karbon salımının 310 Mt, daha agresif FTS’de ise yaklaşık 126 Mt olması öngörülmektedir.
- SPS senaryosuna kıyasla LCP senaryosunda %75 ve FTS senaryosunda %98 oranında daha fazla emisyon azaltımı elde edilmektedir.

Model çalışmasının bir diğer kritik çıktısı, Şekil 3’te gösterildiği üzere, Türkiye alüminyum sektöründeki ana emisyon kaynağının alüminyum işlemeden kaynaklanan girdi bazlı kapsam 3 emisyonları olmasıdır.

**Şekil 3. 2023-2053 Arası Türkiye Alüminyum Sektörünün Kümülatif Toplam Emisyonları, (Mt CO<sub>2</sub>)**



## Birincil Alüminyum (Kapsam 1&2) Emisyonları

Model sonuçlarına göre, LCP ve FTS senaryoları farklı zaman dilimlerinde benzer bir teknolojik geçişi öngörmektedir.

Optimal senaryo olan **LCP**, aşağıdaki dönüşüm yolunu izleyerek sektörü daha düşük emisyon seviyelerine ulaştırabilmektedir.

- Öğütme süreci için **2028'de gaz kazanına** ve **2032'de güneş enerjili (CST) kazana** geçiş,
- Kalsinasyon süreci için **2047 yılında hidrojen kalsinatöre** geçiş,
- Ergitme süreci için ise **2040 yılında inert anot teknolojisine** geçiş.

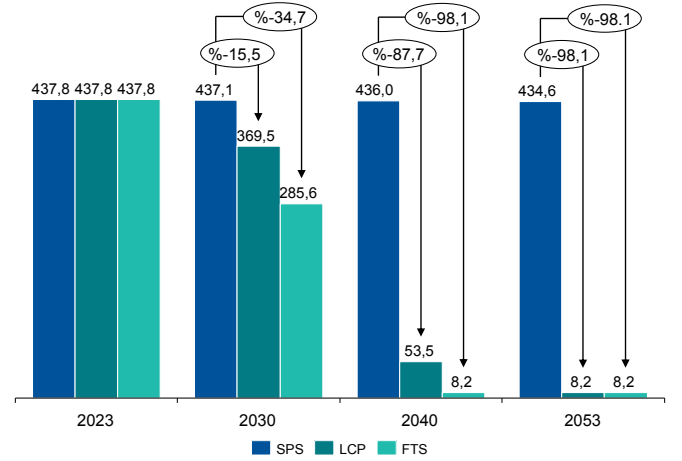
**FTS** senaryosunda "en iyi" teknolojilerin, LCP senaryosuna kıyasla daha erken devreye alınacağı varsayılmaktadır, buna göre aşağıdaki tarihlerde geçiş öngörülmektedir.

- Öğütme süreci için **2025'te gaz kazanına** ve sonrasında **2027'de güneş enerjili (CST) kazana** geçiş
- Kalsinasyon süreci için **2036 yılında hidrojen kalsinatöre** geçiş,
- Ergitme süreci için ise **2035 yılında inert anot teknolojisine** geçiş.

Referans senaryosu olan SPS'ye kıyasla LCP senaryosunun, 2030'a kadar %15,5 oranında 2053'e kadar ise %98 oranında daha fazla emisyon azaltması beklenmektedir. Kümülatif emisyon miktarı bakımından, LCP senaryosunun önümüzdeki 30 yıl içinde SPS'ye kıyasla %53 oranında daha fazla emisyon azaltması beklenmektedir.

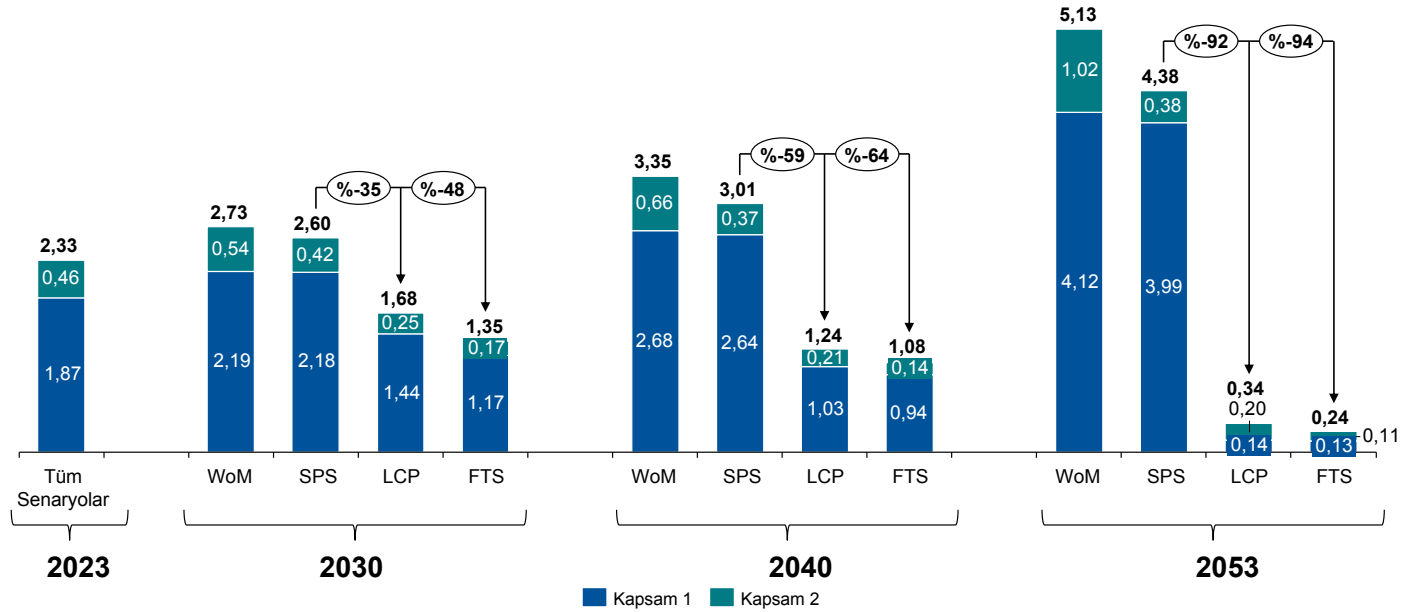
Daha agresif olan FTS senaryosunda ise SPS'ye kıyasla 2030 yılına kadar %34,7, 2053 yılına kadar ise %98 oranında emisyon azaltımı elde edilebilmektedir. Diğer yandan kümülatif emisyonlar önümüzdeki 30 yıl içinde SPS senaryosuna kıyasla FTS senaryosunda %70 oranında daha fazla azalabilmektedir.

**Şekil 4. 2023, 2030, 2040 ve 2053 Dönemine Ait SPS ile Karşılaştırıldığında Farklı Senaryolarla Elde Edilen Emisyon Azaltımı (Bin t CO<sub>2</sub>)**



## Alüminyum İşleme (Kapsam 1 & 2) Emisyonları

Alüminyum işleme sektörünün temel emisyon azaltım rotası, üreticilerin etkin ve daha az emisyonlu fırın teknolojilerine geçmesi olarak tespit edilmiştir. Emisyonu düşük, yüksek teknolojlili fırınlara geçiş ve fırınlara CCS teknolojisinin entegrasyonu bu süreçte öne çıkmaktadır.

**Şekil 5. Farklı Senaryolar Altında Varsayılan Yıllık Kapsam 1&2 Emisyonları (Bin t CO<sub>2</sub>)**

**LCP** senaryosundaki temel teknolojik dönüşüm de yukarıda bahsedildiği şekilde, en ileri düzey reverber fırın fırınlarına CCS entegrasyonu yönündedir ve bu fırın tipinin 2053 yılında üretimin %54'ünü karşılaması beklenmektedir. Bu dönüşümün emisyonları, SPS senaryosuna kıyasla LCP senaryosunda 2030'a kadar %35, 2053'e kadar ise %92 oranında azaltması beklenmektedir. **FTS** senaryosunda ise en ileri düzey reverber fırın +CCS, 2053 yılı itibarıyla üretimde %47'lik bir paya sahip olurken, bu teknolojiyi %32'lik pay ile elektrikli reverber fırınlar takip etmektedir. Reverber olmayan fırınlarında ise, başta döner fırın olmak üzere CCS entegrasyonu öngörülmüştür. FTS senaryosunda SPS'ye kıyasla emisyon azaltımı 2030'a kadar %48'e, 2053'e kadar da %94'e ulaşacaktır.

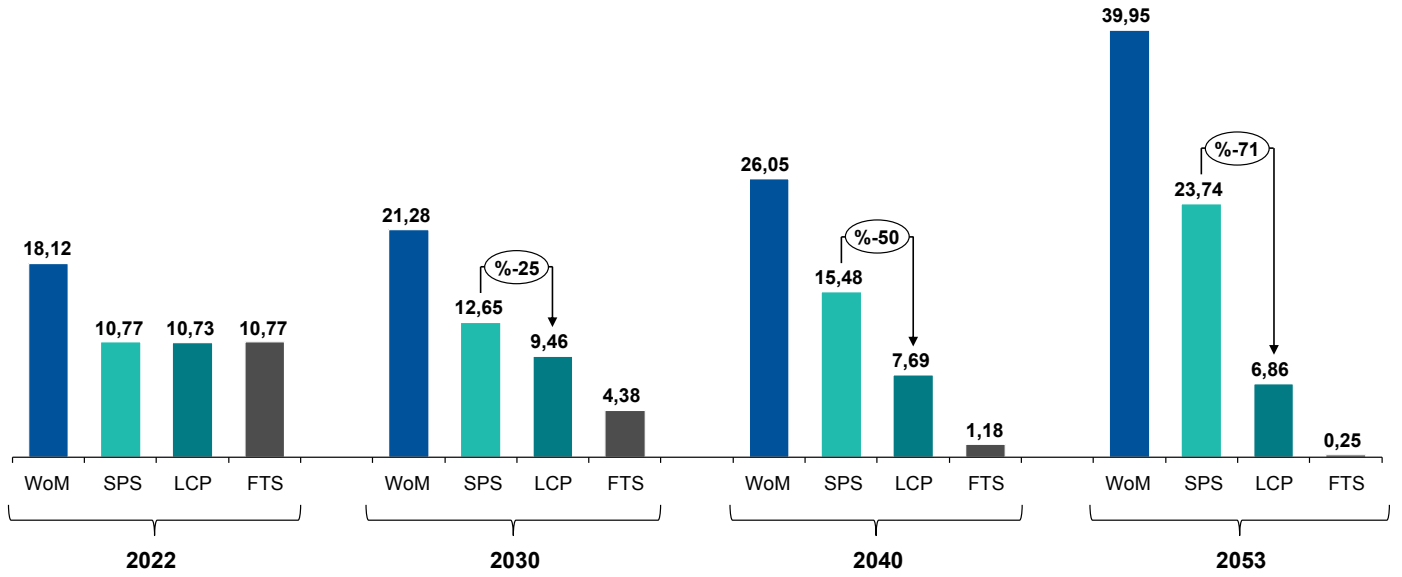
### Girdi Bazlı Kapsam 3 Emisyonları

Sektörün gömülü emisyon seviyesi, hurda kullanım oranı ve girdi ithalatı yapılan ülkelerin emisyon seviyeleri etrafında şekillenmektedir. Dolayısıyla Türkiye Alüminyum Sektörünün girdi bazlı kapsam 3 emisyonlarını azaltmasının yolu, üretimdeki hurda miktarını artırmak ve birincil alüminyum (külçe alüminyum) ithalatında daha düşük emisyon yoğunluğuna sahip ülkeleri önceliklendirmesidir.

Alüminyum kapsam 3 emisyonları ağırlıklı olarak, kaynak ülkelerin birincil metal (külçe alüminyum) üretim süreçlerinde meydana gelen emisyonlardan oluşmaktadır. 2022'de Türkiye 66 ülkeden yaklaşık 1,77 milyon ton işlenmemiş alüminyum ithal etmiştir ve ithal edilen külçe alüminyum miktarı (Kapsam 3'e giren) yaklaşık 18 Mt CO<sub>2</sub> emisyonu denk gelmektedir<sup>12</sup>. Emisyon azaltma kaldıraçlarının uygulanmasıyla birlikte girdi kaynaklı kapsam 3 emisyon yoğunluğu 2053 yılında LCP senaryosunda %67 oranında ve FTS senaryosunda ise %98 oranında azaltılabilmektedir.

Mevcut durumda alüminyum işleme sektörü, %75 oranında birincil alüminyum ve %25 oranında hurda kullanmaktadır. Alüminyum işlemedeki hurda payının 2053'e kadar LCP senaryosunda %35, FTS senaryosunda ise %50 oranında kademeli şekilde artacağı tahmin edilmektedir. **Hurda payındaki artış ve ithalatta düşük emisyon yoğunluklu ülkelerin tercih edilmesi ile birlikte 2053'e kadar girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonlarında LCP ve FTS senaryosunda sırasıyla %71 ve %99 oranında bir azalma sağlanabilmektedir.**

Şekil 6. Senaryo ve Yıl Bazında Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyonları (Milyon Ton CO<sub>2</sub>)

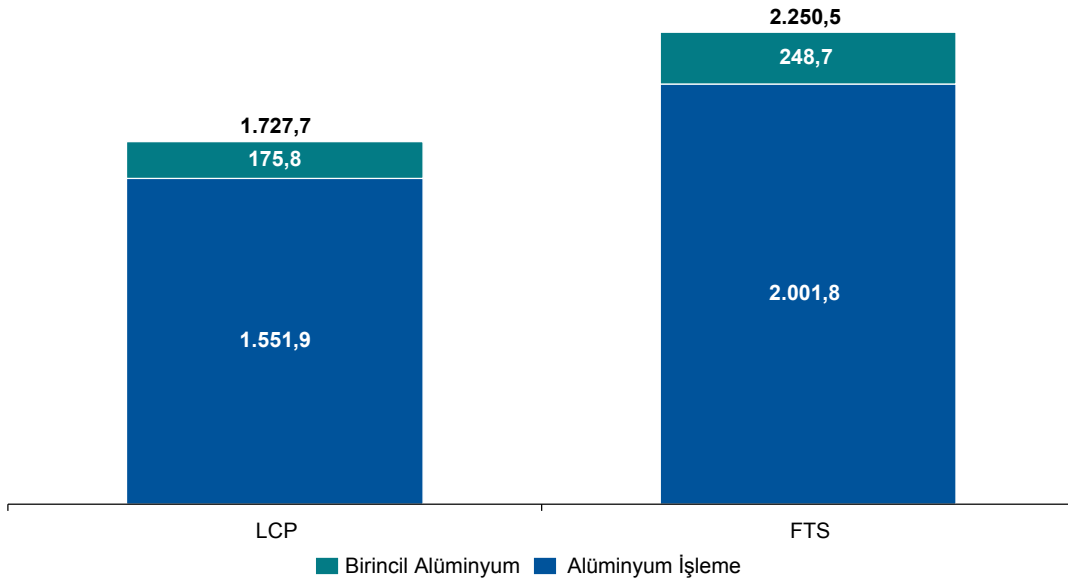


### Yatırım İhtiyaçları

Türkiye alüminyum sektörünün iddialı emisyon azaltımı hedeflerine ulaşması için hızlı bir teknolojik dönüşüm gerekmektedir. Bu hızlı dönüşüm ise önemli bir yatırım ihtiyacı doğurmaktadır. Türkiye alüminyum sektörünün teknolojik dönüşümünün yatırım maliyetlerinin %7'lik bir indirim oranıyla net bugünkü değeri (NBD) hesaplandığında dönüşüm için

gerekli miktar LCP'de 1,73 milyar dolar ve FTS'de 2,25 milyar dolara denk gelmektedir. Alüminyum işleme sektöründeki yatırım gerekliliği her iki azaltım senaryosunda da birincil alüminyuma kıyasla daha yüksektir. LCP senaryosunda alüminyum işleme sektörünün yatırım gerekliliğinin toplam içindeki payı %89.8 iken FTS'de aynı oran %88.9'dur.

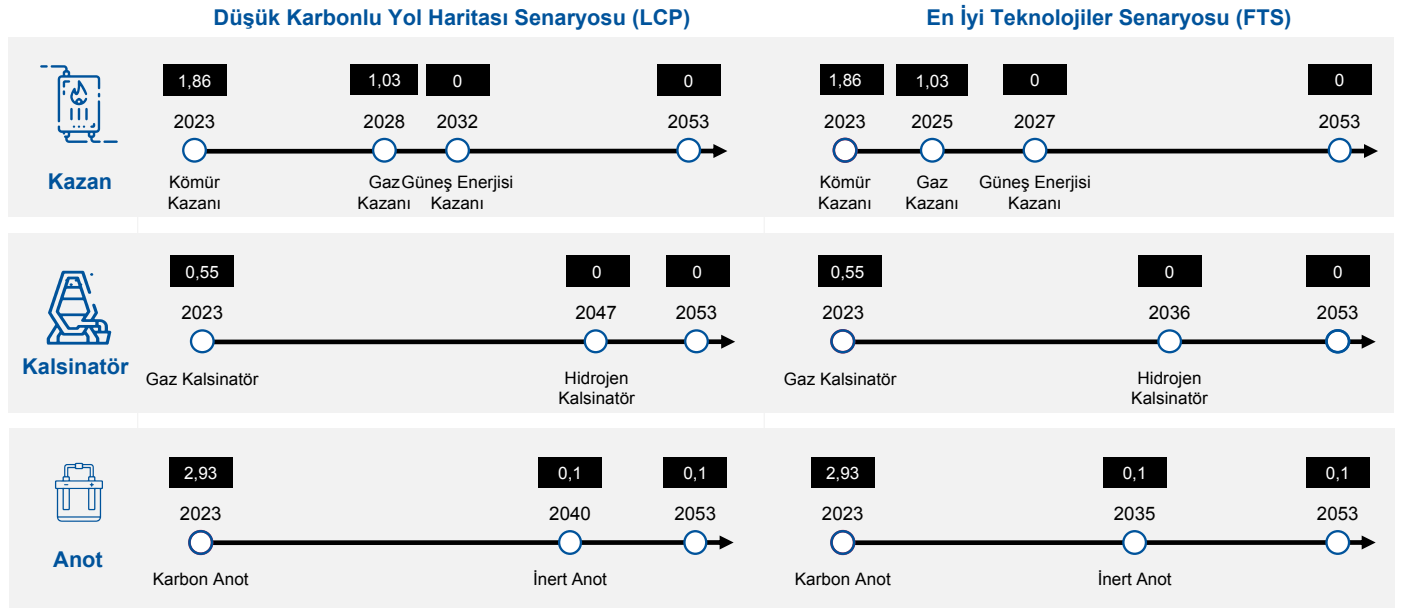
Şekil 7. Senaryolar Bazında Toplam Yatırım İhtiyacı (2023-2053, NBD, Milyon Dolar)



**Birincil alüminyum için teknolojik dönüşüm öngörüsü her iki azaltım senaryosu için de aynıdır ve yaklaşık 500 milyon ABD doları değerinde bir nominal yatırım gerektirmektedir.** LCP senaryosunda ilk teknoloji yatırımının (gaz kazanı) 2028'de yapılması beklenirken,

FTS senaryosunda ilk yatırım 2025'te gerçekleşmektedir. En yüksek yatırım gerektiren teknoloji, yaklaşık 400 milyon dolar ile inert anot olarak öne çıkmaktadır. **Diğer yandan toplam yatırımın net bugünkü değeri LCP ve FTS senaryoları için sırasıyla 176 milyon dolar ve 249 milyon dolardır.**

## Şekil 8. Birincil Alüminyum - Teknolojik Dönüşüm Öngörüsü



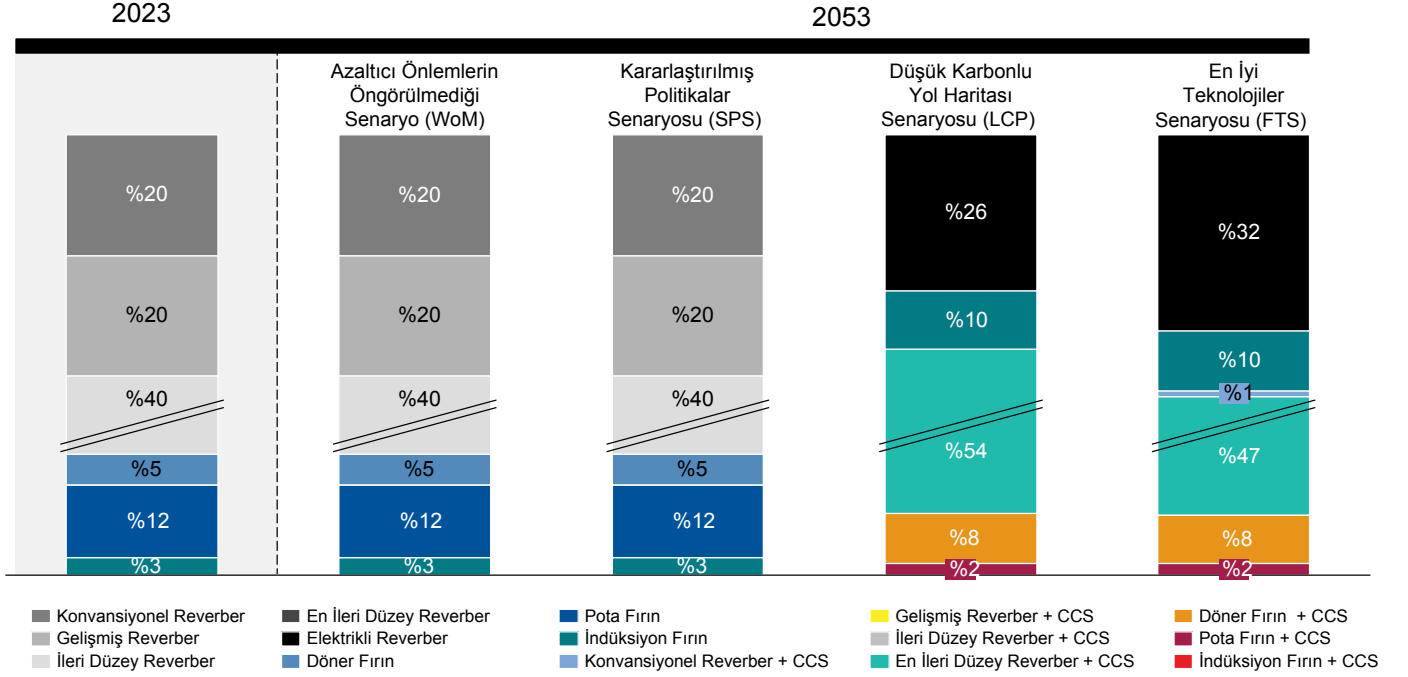
Üretilen bir ton alüminyum başına ortaya çıkan ton CO<sub>2</sub> emisyonu

Model sonuçlarına göre alüminyum işlemedeki temel teknolojik dönüşüm doğalgaz ile çalışan reverber fırınlarda CCS entegrasyonu ve elektrikli fırınlara geçiş olarak öngörülmektedir. Yıllar içinde hem mevcut kapasitenin yüksek teknoloji fırınlara dönüşmesi hem de yeni kapasitenin yüksek teknoloji fırınlar olarak kurulması öngörülmektedir. LCP senaryosunda, halihazırda kullanılan fırınların teknolojik dönüşümü dolayısıyla 0,96 milyar dolarlık bir fırın kapatma maliyeti de söz konusudur. Yeni fırınların inşası için ise ek olarak 2,73 milyar dolar tutarında bir kurulum maliyeti ortaya çıkmaktadır. Ek olarak, enerji tüketiminde yenilenebilir enerji payının 2053'e kadar %50'ye ulaşması varsayıldığından, 0,67

milyar dolarlık bir yenilenebilir enerji yatırımı da gerekmektedir. **Dolayısıyla LCP senaryosundaki toplam yatırım maliyeti 4,37 milyar dolara ulaşmaktadır.**

**Daha agresif bir teknolojik dönüşüm öngören FTS senaryosunda ise toplam yatırım maliyeti 4,82 milyar dolardır.** Bu yatırım maliyetinin 1,28 milyar doları kapanan fırınlardan, 2,41 milyar doları yeni açılan fırınlardan kaynaklanmaktadır. FTS senaryosu için enerjide yenilenebilir enerji oranının 2053'te %75'e ulaşması öngörülmüştür, bu da 1,14 milyar dolarlık bir yatırım maliyeti oluşturmaktadır.

## Şekil 9. Alüminyum İşleme - Teknolojik Dönüşüm Öngörüsü



**Türkiye alüminyum sektörü üzerine yapılmış karbonsuzlaşma projeksiyonları, öncelikli olarak finansman mekanizmalarının geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır.** Toplam yatırım ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda, sektör paydaşları ve politika yapıcılar ilk yıllardan itibaren büyük ölçekli yatırım planlarını geliştirmeye başlamalıdır. Bunun için de vakit kaybetmeden yeni/ek fonların geliştirilmesine öncelik verilmesi gerekecektir. Sektörün karbonsuzlaşma yatırımlarına olanak sağlayacak, büyük ölçekli sermayeye erişebilmesi içinse politika yapıcılarının ve finans kuruluşlarının iş birliği yapması büyük önem taşımaktadır.

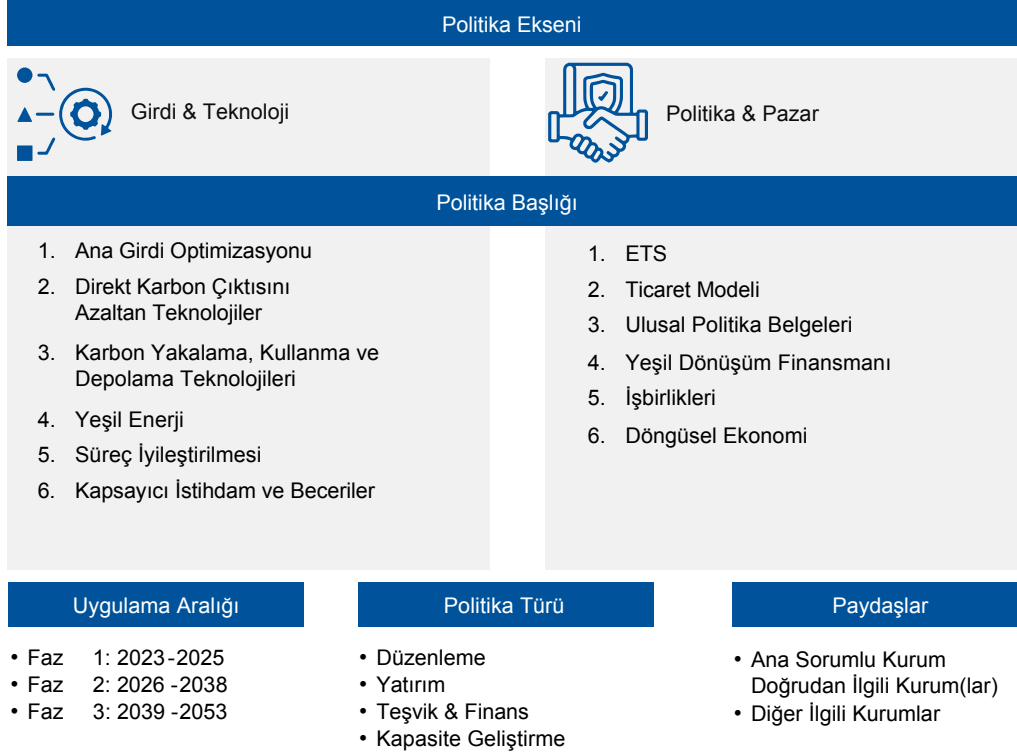
### Düşük Karbonlu Alüminyum Sektörü için Önerilen Politika Adımları

Alüminyum sektörünün karbonsuzlaştırılması, iç içe geçmiş politika alanlarında hedef odaklı bir çalışma gerektirmektedir.

Bu kapsamda oluşturulan bütüncül politika önerileri, proje uzmanlarının görüşlerine, alüminyum sektörünün karbonsuzlaştırılması için en iyi uygulamalara ilişkin akademik araştırmalara, sektöre özel bilgilere, kilit proje paydaşları (resmi kurum görüşlerini temsil eden) tarafından paylaşılan öngörülere ve model ve senaryo analizi sonuçlarına dayanmaktadır. Ortaya çıkan politika önerileri iki temel politika temasında toplanmıştır: A) girdi ve teknoloji ve B) politika ve pazar. Bu üst düzey temalar altında toplanan politika alanları (karbonsuzlaştırma kaldıraçları olarak da adlandırılabilir) aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.<sup>13</sup>

<sup>13</sup>Oluşturulan politika önerilerinin daha ayrıntılı bir değerlendirmesi, bu projenin bir parçası olarak hazırlanan uzun versiyon Final Raporunda yer almaktadır.

Şekil 10. Karbonsuzlaşma için Politika Önerileri



### A) Girdi ve Teknoloji

- 1. Ana Girdi Optimizasyonu:** Alüminyum hurdalarının geri dönüştürülmesi, geri dönüştürülmüş hurda kullanımını artırmak için Türkiye'nin yerli hurda arzının belirlenmesi ve hurda envanterinin hazırlanması, alümina üretiminde kullanılmayan hammaddelerin kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi, yurtiçi ve yurtdışı hurda tedarikinin güvence altına alınması ve düşük karbon ayak izine sahip ülkelerden ve tedarikçilerden birincil alüminyum ithal edilmesi.
- 2. Direkt Karbon Çıktısını Azaltan Teknolojiler:** Mevcut alümina rafinasyonu sürecinden kaynaklanan emisyonların azaltılması ve elektroliz sürecinin daha düşük karbon anodu ve enerji tüketimi ile optimize edilmesi, alümina rafinasyon sürecinde öğütmede

kullanılan kazanların daha düşük emisyonlu kazanlar ile değiştirilmesi, elektrik veya yeşil hidrojen ile yakıt değişimi alanının geliştirilmesi ve kullanılması, inert anot hücre teknolojilerini geliştirmek için çeşitli şirket çalışmalarının araştırılması/yakından takip edilmesi ve gerekli fizibilite çalışmalarının yürütülmesi, kalsinasyon sürecinde ortaya çıkan atık ısıнын alternatif kullanımı için ısı geri kazanım sistemlerinin geliştirilmesi ve entegre edilmesi, şirketleri reverber fırınlara ve indüksiyon fırınlarına yatırım yapmaya teşvik ederek alüminyum işlemede daha düşük emisyonlu fırınların kullanımına öncelik verilmesi.

- 3. Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS) Teknolojileri:** Türkiye'nin karbon yakalama, kullanma ve depolama kapasitesinin artırılmasına yönelik finansal, hukuki ve teknik altyapının güçlendirilmesi.

4. **Yeşil Enerji:** Alüminyum sektörü için gerekli enerjinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması amacıyla yenilenebilir enerji üretimine yönelik altyapının oluşturulması, ulusal düzeyde orta/uzun vadeli planlamanın ve geliştirme çalışmalarının yapılması ve yeşil hidrojeni ticari olarak kullanılabilir ve uygun maliyetli hale getirmek için mevcut, uygun teknolojilerin belirlenmesi ve birincil üretim ve alüminyum ergitme süreçlerinde düşük emisyonlu küçük modüler nükleer reaktörlerin (SMR) kullanımının değerlendirilmesi.
5. **Süreç İyileştirilmesi:** Enerji yönetim sistemleriyle entegre dijital izleme sistemlerinin kurulması, parametrelerin anlık izlenmesi için elektroliz hücreleri ve ergitme birimlerinde gelişmiş otomasyon sistemlerinin kullanılması, alüminyum işlemede enerji verimliliğini artırmak için süreçler ve yöntemler geliştirilmesi ve süreç verimliliğini artırmak ve enerji kullanımını azaltmak için üretim tesislerine modern yenilikçi bakım yaklaşımları uygulanması.
6. **Kapsayıcı İstihdam ve Beceriler:** Alüminyum sektörünün yeşil dönüşümü için gerekli yeni niteliklerin, becerilerin ve eğitimlerin tespit ve koordine edilmesi, herkes için fırsat eşitliği sağlamak amacıyla kadınların ve özel istihdam politikaları gerektiren diğer grupların istihdamının ve niteliklerinin artırılması ve yeşil dönüşümden kaynaklı iş gücü gerekliliklerine cevap verecek eğitim programların hazırlanması ve uygulanması.

## B) Politika ve Pazar

7. **ETS:** Türkiye'de AB mevzuatı ile uyumlu bir ETS kurulması, stratejik sektörlerde faaliyet gösterenlerin yeşil dönüşüme yönelmeleri için uygun teşvik mekanizmalarının oluşturulması, karbon kaçağı riski yüksek emisyon yoğun sektörler başta olmak üzere sektör ortalaması altında emisyon salımı yapan tesislere ücretsiz tahsisat verilmesi ve ETS veya karbon fiyatlandırması kapsamında rasyonel kararlar verilmesi için sektördeki teknolojilere yönelik marjinal azaltım maliyetlerinin hazırlanması.
8. **Ticaret Modeli:** Karbonsuzlaşma adımları atmamış ülkeler arasında artan ticaretten kaynaklanan mevcut/ beklenen ticaret kaymaları ve pazar değişimlerinin analiz edilmesi, sektörün uluslararası rekabet gücünü korumak için tedbirler alınması, SKDM'in olası uygulamasına ilişkin ticaret politikası adımlarının belirlenmesi, Türkiye'nin izleme, raporlama ve doğrulama uygulamalarının AB tarafından AB SKDM kapsamındaki emisyon ölçüm ve raporlama ilkeleri doğrultusunda tanınmasının sağlanması.
9. **Ulusal Politika Belgeleri:** Bütüncül bir bakış açısıyla Ar-Ge ve inovasyona ilişkin ulusal fizibilite çalışmalarının yürütülmesi, alüminyum sektörünün sürdürülebilir enerji geçişine yönelik net ve uzun vadeli bir vizyon geliştirilmesi, ulusal iklim taahhütleri ile uyumlu kapsamlı bir sanayi politika çerçevesinin ve ilgili emisyon hedeflerinin benimsenmesi, Uzun Dönemli İklim Değişikliği Stratejisi ve İklim Değişikliği Eylem Planında sektöre yönelik azaltım hedeflerinin belirlenmesi, ilgili mevzuatta AB'den farklı olan hususların belirlenmesi ve tam uyumu sağlamak için koordinasyonun sağlanması.
10. **Yeşil Dönüşüm Finansmanı:** Düşük emisyonlu teknolojilerin yaygınlaştırılması için kamu teşviklerinin sağlanması, yenilenebilir lisanssız enerji yatırımlarına kolaylık sağlanarak teşvik edici unsurların geliştirilmesi ve düşük emisyonlu teknolojilerin yaygınlaştırılması için özel sermayenin harekete geçirilmesi.
11. **İşbirlikleri:** Enerji ve malzeme konularında projeler yürütmek için fon olanaklarının yaratılması, uluslararası kabul görmüş standartların uygulanmasında şirketlerin işbirliğinin ve etkileşiminin artırılması, uluslararası kuruluşlara katılımın teşvik edilmesi, düşük karbonlu üretime geçiş için hükümet düzeyinde sektör yol haritası çalışmalarına alüminyum üreticilerinin dahil edilmesi ve ilgili ekosistem paydaşlarının katılımıyla alüminyum endüstrisinin izlenmesi için ortak bir veri tabanı oluşturulması.

**12. Döngüsel Ekonomi:** Cüruftan metal geri kazanımı ve kalan atığın değerlendirilmesine yönelik yeşil teknolojilerin kullanılması, kırmızı çamurun içerisindeki değerli metal içeriklerinin geri dönüşümüne yönelik çalışmalar yapılması, alüminyum sektörüne özel ulusal, kapsayıcı, bütüncül bir döngüsel ekonomi eylem planının geliştirilmesi, alüminyum girdileri kullanan son kullanıcı sektörlerinin karbonsuzlaştırılmasına katkıda bulunmak için yüksek kaliteli, katma değerli, geri dönüştürülebilir alüminyum ürünlerinin geliştirilmesi, yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi.

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

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



# 1

## Mevcut Durum Analizi

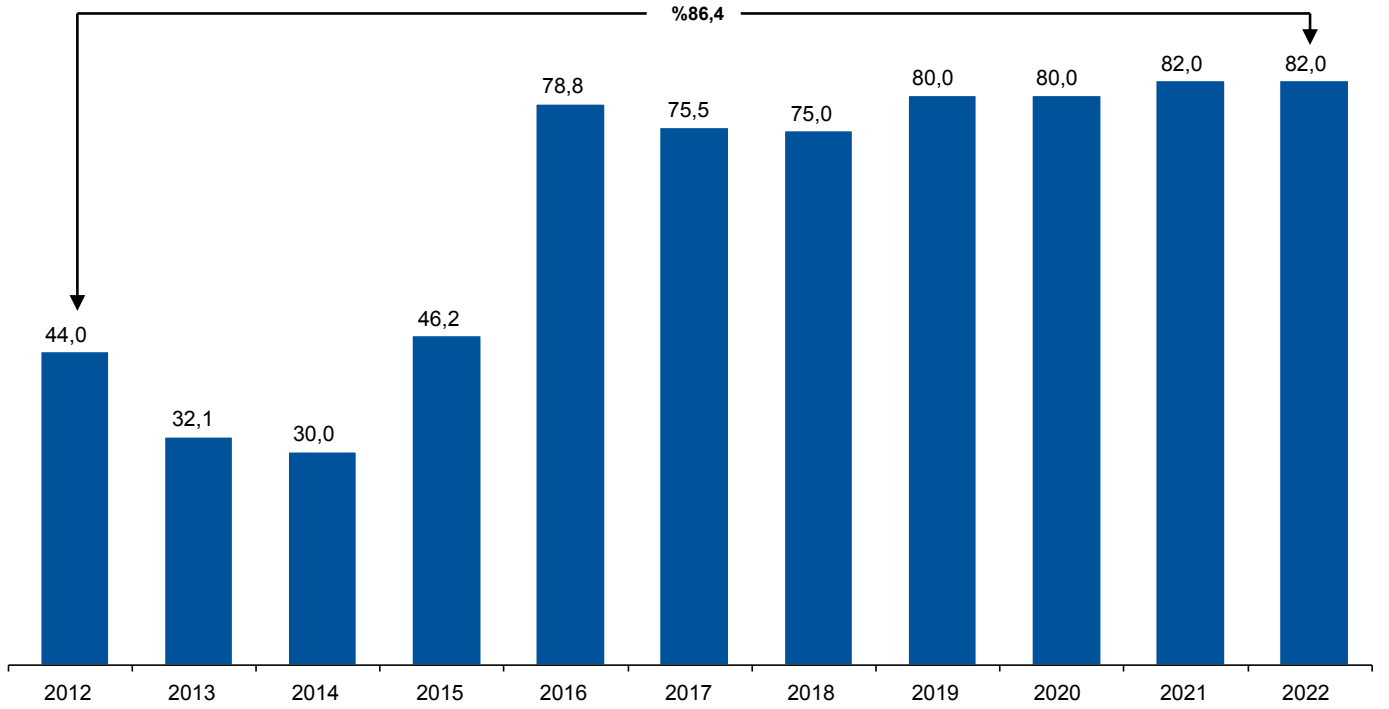
## 1. Mevcut Durum Analizi

### 1.1. Türkiye Alüminyum Sektörüne Genel Bakış 1.1.1. Kapasite ve Üretim

Türkiye'deki tek birincil alüminyum üreticisi Konya, Seydişehir'deki ETİ Alüminyum'dur. Alüminyum üretim tesisinin kapasitesi 2012 yılındaki 44 bin tondan 2016 yılında 78.8 bin tona çıkarılmıştır. 2016 yılındaki bu kapasite artışından sonra başka büyük bir kapasite artışı yapılmamıştır. Son yıllarda yapılan küçük kapasite artışlarıyla birlikte günümüzdeki alüminyum üretim kapasitesi 82 bin tondur<sup>14</sup>. Bu birincil alüminyum üretim kapasitesi ülke için önemli bir artı olsa da, bu üretim hacmi Türkiye'yi dünyada önemli bir

birincil alüminyum oyuncusu yapmadığı gibi, ülkedeki büyüyen alüminyum işleme hacmini desteklemeye de yetmemektedir. Türkiye birincil alüminyumda büyük ölçüde ithalata bağımlıdır ve iç talebin %91.2'sine tekabül eden 1,85 milyon ton alüminyum ithalatla karşılanmaktadır.<sup>15</sup> Türkiye birincil alüminyum sektörü, 2015 yılında yeni teknoloji yatırımlarıyla üretim kapasitesini iki katına çıkarmış olsa da, birincil alüminyumda ithalata bağımlılığın orta-uzun vadede devam etmesi beklenmektedir<sup>16</sup>.

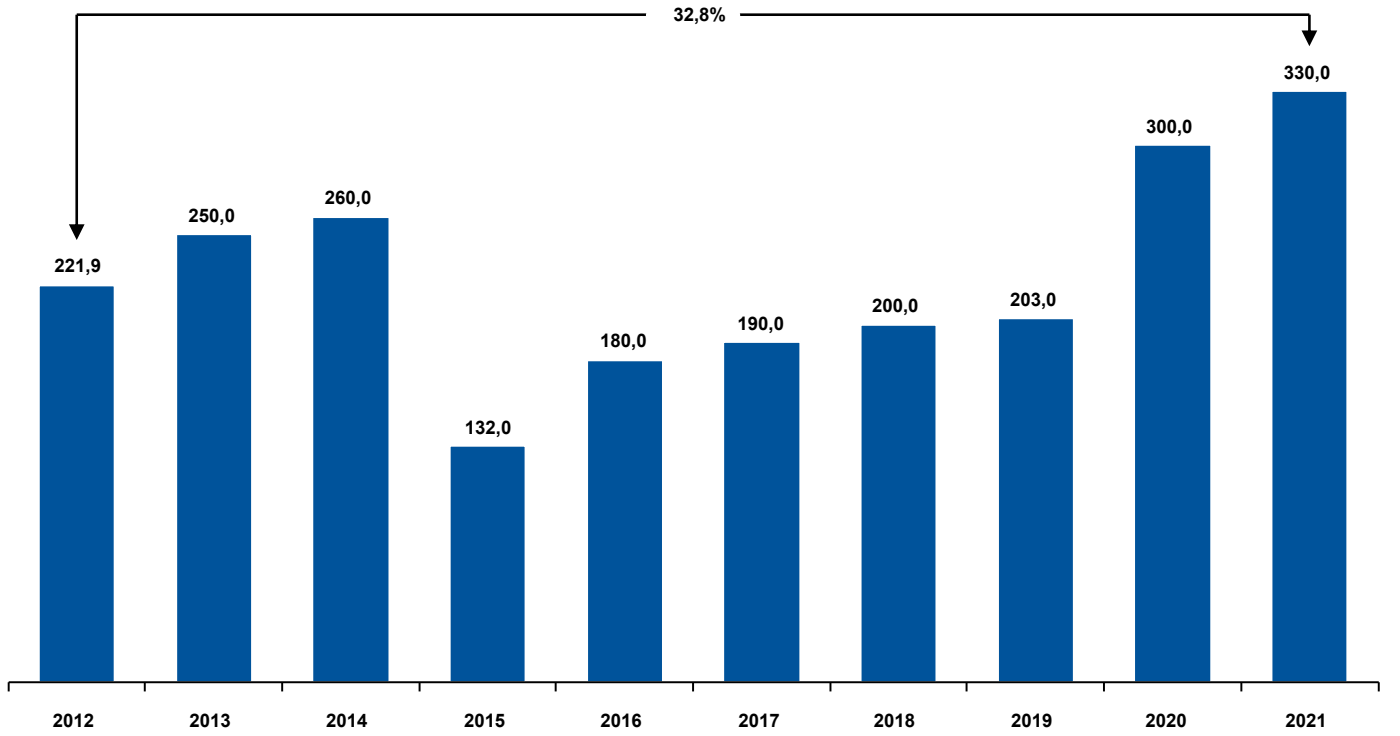
Şekil 11. Türkiye'de Birincil Alüminyum Üretimi (Bin Ton)<sup>17</sup>



Yarı-alüminyum işleme ve emisyon azaltma çabaları için kritik olan hurda alüminyum arzının, artan talebi karşılayacak hızda büyümediği gözlenmektedir. Geri dönüştürülmüş hurdadan yapılan alüminyum üretimi, 2012 ve 2021 arasında %32,8 oranında artarak (YBBO: %4,5) 330.000 tona ulaşmış olsa

da alüminyum işlemedeki toplam artışın gerisinde kalmıştır. Bu eğilim, Türkiye'deki hurda alüminyum işleme altyapısının henüz artan talebi karşılayacak seviyede olmadığına ve dolayısıyla sektörün hurda kullanımı konusunda kısıtlarının olduğuna işaret etmektedir.

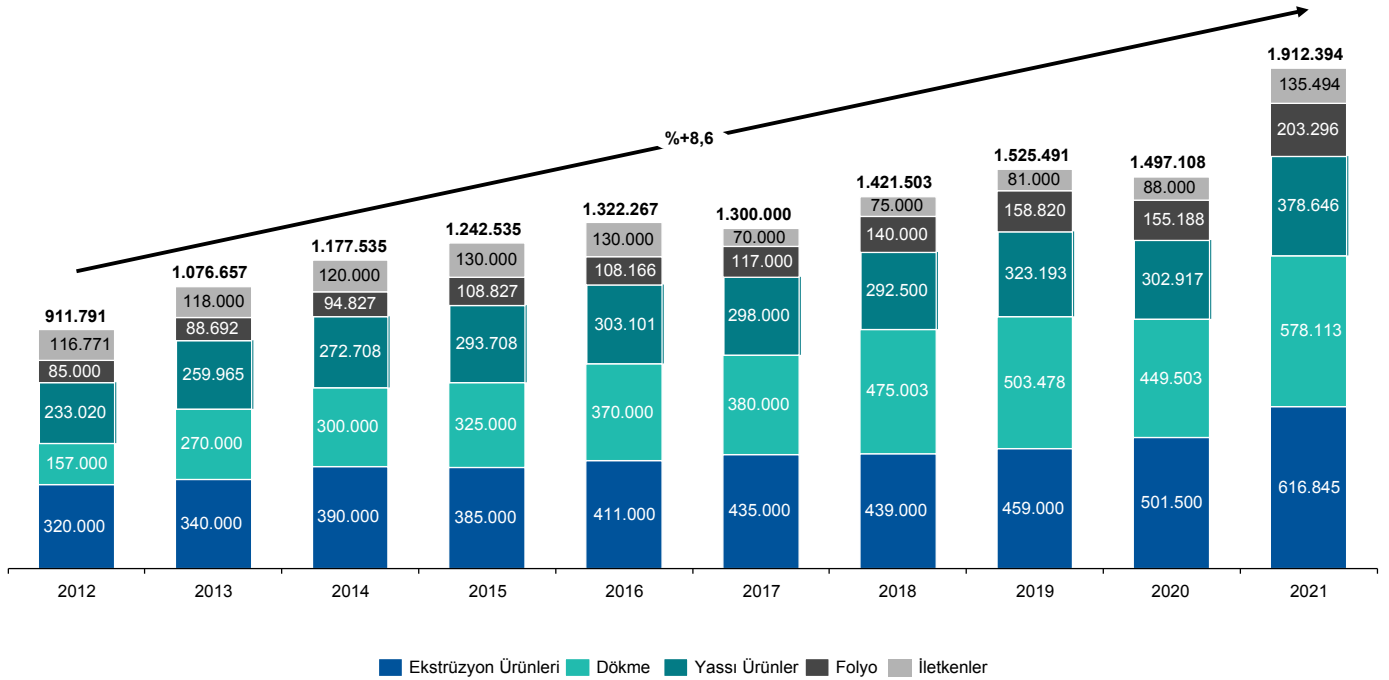
**Şekil 12. Türkiye’de Geri Dönüştürülmüş Alüminyum Arzı (Bin Ton)<sup>18</sup>**



Öte yandan, Türkiye haddemele, ekstrüzyon, dövme, çizim ve dökme gibi alüminyum işleme faaliyetlerinde önemli bir üretim hacmine sahiptir. Ülkedeki alüminyum işleme hacmi 2012 ve 2021 arasında toplam %109,7 oranında artarak (YBBO: %8,6) 1,91 milyon ton seviyesine ulaşmıştır. Bu dönemdeki büyüme, ağırlıklı olarak **dökme** (%15,6'lık bir YBBO ile toplamda %268,2) ve **folyo ürünleri** (%10,2'lik bir YBBO ile toplamda %139,2) ile desteklenmiştir. Bu durum söz konusu ürün gruplarına yönelik yurt içi ve yurt dışı talebin güçlü seyrettiğini göstermektedir. Aynı dönemde, **ekstrüzyon**

**ürünlerinde** gerçekleşen %7,6'lık YBBO ve toplam %92,8 oranındaki büyüme de sektöre önemli bir katkıda bulunmuştur. Aynı dönem, **yassı ürünler** %5,5'lik bir YBBO ile %62,5 oranında önemli ölçüde büyüme kaydederken %1,7'lik bir YBBO ile sadece %16 oranında büyüyen **iletkenler** ise diğer ürün gruplarının gerisinde kalmıştır. Dönem içinde değişen eğilimlere rağmen, 2021 itibarıyla tüm ürün gruplarında gözlenen önemli artış, Türk alüminyum sektörünün olumlu performansını ortaya koymaktadır.

<sup>18</sup>TALSAD, TÜDOKSAD, PwC Analizi

Şekil 13. Türkiye’de Ürün Bazında Alüminyum İşleme Hacmi (Ton)<sup>19</sup>

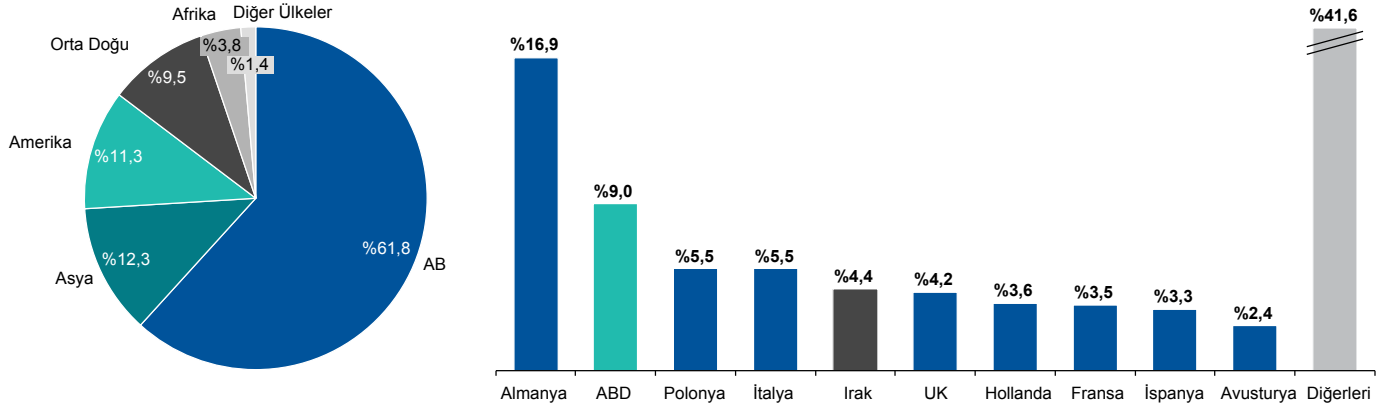
### 1.1.2. Türkiye’nin Alüminyum Ticareti ve AB’nin Payı

2021 yılında, 871.000 ton olarak gerçekleşen yurt içi alüminyum tüketimi, toplam üretimin %45,6’sına denk gelmiştir. Artan alüminyum işleme hacmi ise daha çok ihracat odaklıdır. Pandemi döneminde dahi büyümesini sürdüren tam ve yarı mamul alüminyum ürünlerinin ihracatı 2022 yılında 6,7 milyar dolara ulaşmıştır.<sup>20</sup> Türkiye alüminyum sektörü birçok ülkeye ihracat gerçekleştirirken, değer olarak toplam ihracatın %61,8’ini AB ülkelerine gerçekleştirmektedir.<sup>21</sup> Almanya, ABD, Polonya, İtalya ve Irak, Türkiye alüminyum sektörünün en çok ihracat gerçekleştirdiği ülkeler olarak ön plana çıkarken, sektörün ilk 10 ihracat pazarının 7’sinin AB ülkeleri olduğu görülmektedir.

Türkiye alüminyum sektörü, AB’ye olan yüksek ihracatı dikkate alındığında, Avrupa pazarına olan coğrafi yakınlığını

ve çıktı kalitesini avantaja çevirmiş görünmektedir. Türkiye alüminyum ihracatının başta AB ülkeleri olmak üzere gelişmiş ülkelere odaklı olması, sektörün küresel pazarlardaki gücünü ve rekabet üstünlüğünü de yansıtmaktadır. Bu durum, aynı zamanda sektörü dış kaynaklı ekonomik şoklara ve pazarlardaki talep dalgalanmalarına daha hassas bir pozisyona getirmektedir. Sektörün son 10 yılda ülke bazındaki ihracat performansı incelendiğinde ise ihracat çapının artan şekilde daha geniş bölgelere yayıldığı izlenmektedir.<sup>22</sup> Önümüzdeki dönemde de sektörün ihracat pazarlarını ve ürünlerini daha da çeşitlendirerek, olası şoklara karşını direncini yükseltmesi beklenmektedir.

**Şekil 14. Türkiye Alüminyum İhracatının Bölge ve Ülke Bazında Dağılımı, 2022<sup>23</sup>**



## 1.2. Türkiye Alüminyum Sektörünün Diğer Ülkeler ile Karşılaştırılması

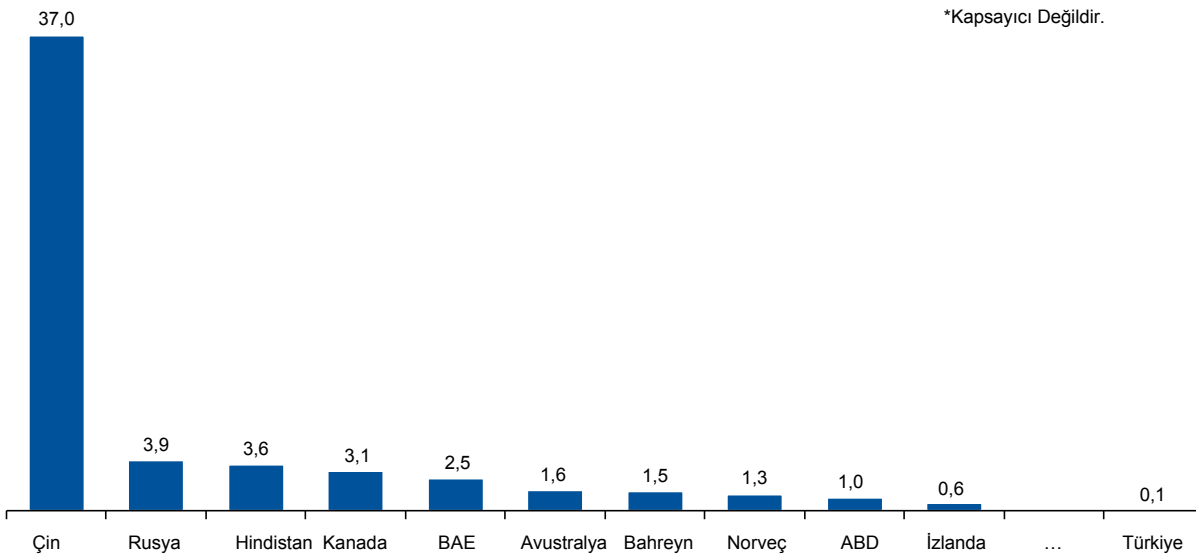
### 1.2.1. Alüminyum Üretim Kapasiteleri

Küresel alüminyum tedarikinin yaklaşık %60'ını gerçekleştiren Çin, birincil alüminyum üretiminde dünya lideridir. Üretimine çoğu güçlü yurt içi talebi karşılamak üzere iç pazarda kullanılsa da Çin, dünyaya yüksek miktarda yarı mamul alüminyum ihraç etmektedir. Yılda 3,7 milyon tonluk birincil alüminyum üretimi ile ikinci en büyük küresel üretici konumundaki Rusya, yüksek oranda kullandığı hidroelektrik

ile emisyon seviyelerini kontrol altında tutmaktadır. Enerjisini büyük oranda kömür yakıtlı enerji santrallerinden sağlayan Hindistan ise en çok alüminyum üretimi yapan üçüncü ülke konumundadır. Kanada, Birleşik Arap Emirlikleri (BAE), Avustralya, Bahreyn, Norveç, ABD ve İzlanda sırasıyla diğer önemli birincil alüminyum üreticileridir<sup>24</sup>.

Yıllık 82.000 ton üretim kapasitesi ile birincil alüminyum üretiminde küresel bir oyuncu olmayan Türkiye ise nihai alüminyum ürünleri üretimi için alüminyum ithalatına bağımlı durumdadır.

**Şekil 15. Seçili Ülkelerin Birincil Alüminyum Üretim Kapasiteleri, 2020 (Milyon Ton)<sup>25</sup>**



\*Kapsayıcı Değildir.

<sup>23</sup>Trademap, PwC Analizi

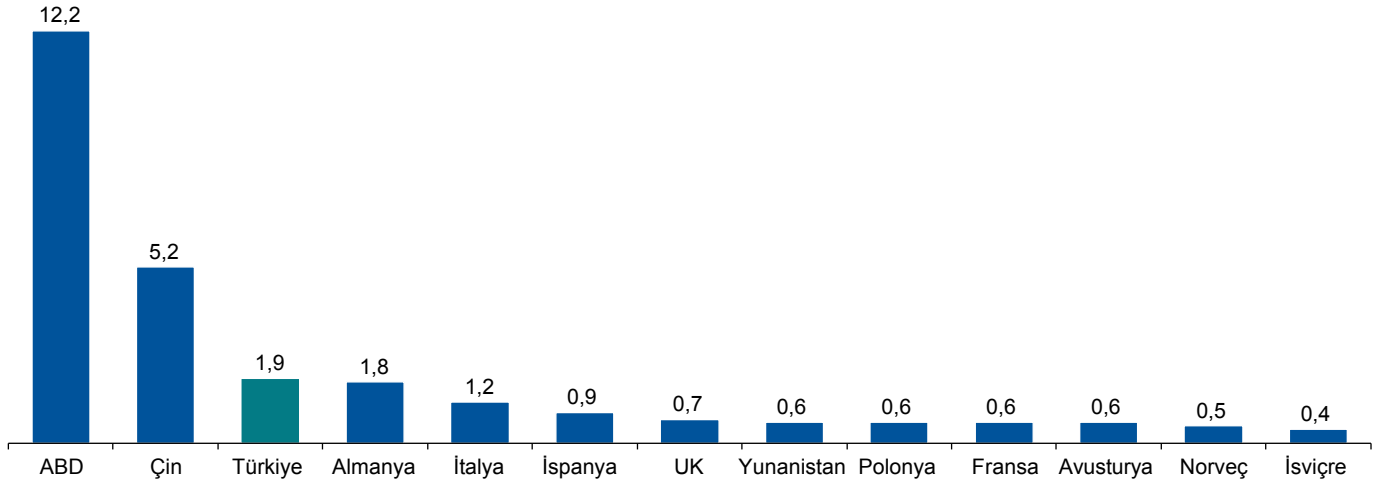
<sup>24</sup>OECD, The Aluminium Value Chain

<sup>25</sup>Harbor Aluminium, Ülke Bazında Alüminyum Üretimi

Birincil alüminyum üretiminde lider oyuncular arasında olmayan ABD, alüminyum işleme tarafında ise dünyada ilk sıradadır. ABD, küresel alüminyum işleme hacminin 44.8%ini tek başına üretmektedir. Birincil alüminyumun aksine, alüminyum işleme tarafında Türkiye de önde gelen

üreticilerden bir tanesidir. Bu önemli işleme kapasitesi ise esas olarak külçe alüminyum ithalatı ile desteklenmektedir. TALSAD rakamları külçe alüminyum ithalatının 2012-2021 arasında %7,8'lik bir YBBO ile 0,9 milyon tondan yaklaşık 1,77 milyon tona yükseldiğini ortaya koymaktadır.<sup>26</sup>

### Şekil 16. Seçili Ülkelerin Alüminyum İşleme Kapasiteleri, 2021 (Milyon Ton)<sup>27</sup>



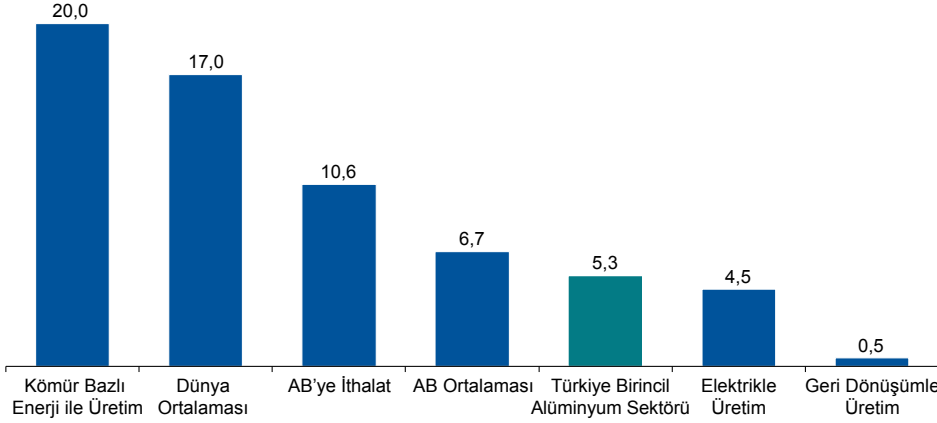
Alüminyum işlemenin hem toplam üretimdeki payının yüksek olması, hem de birincil üretime kıyasla daha az seviyede enerji kullanımı gerektirmesi sebebiyle, Türkiye'nin sektörel emisyon yoğunluğu, çoğunlukla birincil alüminyum üretimi yapan ülkelere kıyasla düşük seviyededir.

#### 1.2.2 CO<sub>2</sub> Emisyon Seviyelerinin Karşılaştırılması

Birincil alüminyum üretiminin başlıca adımları boksit madenciliği, alüminyum arıtımı, alüminyum ergitme ve dökmedir. ETİ Alüminyum tesisinde kullanılan enerji

çoğunlukla hidrolik santralden karşılandığı için, birincil üretimdeki emisyon miktarı nispeten düşüktür. Ayrıca, ETİ yeni yatırımlar yaparak güneş enerjisi santralleri kurup elektrik kaynaklı emisyonlarını da azaltmayı hedeflemektedir. Dünya ortalamasına kıyasla Türkiye birincil alüminyum sektörünün emisyon yoğunluğu (5,3 ton CO<sub>2</sub>/ton alüminyum) düşük seviyededir, ancak elektrikle alüminyum üretimi ortalamasına kıyasla yüksektir. Elektrikli üretim ortalamasındaki ile fark, Türkiye birincil alüminyum sektörünün karbon emisyonlarını azaltmak için farklı politika seçenekleri olduğuna işaret etmektedir.

Şekil 17. Birincil Alüminyum CO<sub>2</sub> Emisyon Yoğunluğu (t CO<sub>2</sub>/t Al)<sup>28</sup>



Hem küresel hem de ulusal alanda alüminyum işleme faaliyetlerine ilişkin çok kısıtlı veri bulunması nedeniyle değer zincirinin bu tarafı için sağlıklı bir emisyon karşılaştırması yapılamamaktadır. Türkiye’de sektörel emisyonun büyük kısmını oluşturan alüminyum işleme kaynaklı emisyonlar, fırınlarda doğalgaz kullanımından ortaya çıkan kapsam 1 emisyonları ve elektrik üretiminden kaynaklanan kapsam 2 emisyonlarından oluşmaktadır. Üretimin alüminyum işlemede yoğunlaşması, yüksek oranda birincil alüminyum üreten ülkelere kıyasla, Türkiye’ye emisyon azaltım sürecinde belli bir avantaj sağlamaktadır. Türkiye alüminyum sektörünün daha az yakıt kullanan ve daha verimli fırın tiplerine geçişi, karbon azaltımı için kritik bir adım olarak ön plana çıkmaktadır. Buna ek olarak, alüminyum işlemede elektrik enerjisinin yoğun şekilde kullanıldığı düşünüldüğünde, şebeke emisyon faktörünün düşürülmesi de Türkiye alüminyum sektörü için öncelikli bir politika adımı olarak ortaya çıkmaktadır.

Türkiye’nin alüminyum işleme faaliyetlerinde kullanılan girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonları birincil alüminyumun ithal edildiği ülkelerin emisyon yoğunluğuna bağlıdır. Bu sebeple, Türkiye’nin birincil alüminyum ithal ettiği ülkelerin emisyonları da sektör için önem arz etmektedir. Ayrıca hem toplam sektör emisyonlarının düşürülmesi hem de alüminyum işlemenin büyüebilmesi için artan miktarlarda alüminyum hurdası temini önem kazanacaktır.

### 1.2.3. Alüminyum Sektörü Karbonsuzlaşma Stratejilerinin Karşılaştırılması

Çalışma bulgularının uluslararası sektörel yol haritalarıyla karşılaştırılabilmesi için IAI<sup>29</sup> ve Mission Possible Partnership (MPP)<sup>30</sup> tarafından hazırlanan raporlardan faydalanılmıştır. IAI çalışması iki azaltım senaryosu ortaya koymaktadır. 1,5 Derece Senaryosu alüminyum sektörü için emisyon azaltımı sağlayan güvenilir ve gerçekçi yaklaşımların devreye alındığı senaryodur. 2 Derece Senaryosu ise Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA) azaltım öngörülleri ile uyumlu olan azaltım senaryosudur. IAI çalışmasında 2053 yılında, referans senaryoya kıyasla, 2 Derece Senaryosunda %77,1, 1,5 Derece Senaryosunda ise %95.1 oranında emisyon azaltımı sağlanabileceği öngörülmüştür. MPP’nin 1,5 Derece Senaryosu ise alüminyum sektörünün net sıfır hedefine ulaşması için enerji, altyapı, finansman gibi alanlarda ilgili politikaların devreye alındığını varsayan senaryodur. MPP çalışmasının sonucuna göre ise 1,5 Derece Senaryosu referans senaryoya kıyasla 2053 yılında %93.3 oranında emisyon azaltımına erişebilmektedir.

<sup>28</sup>Şekil ETİ Alüminyum ve IAI verilerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur.

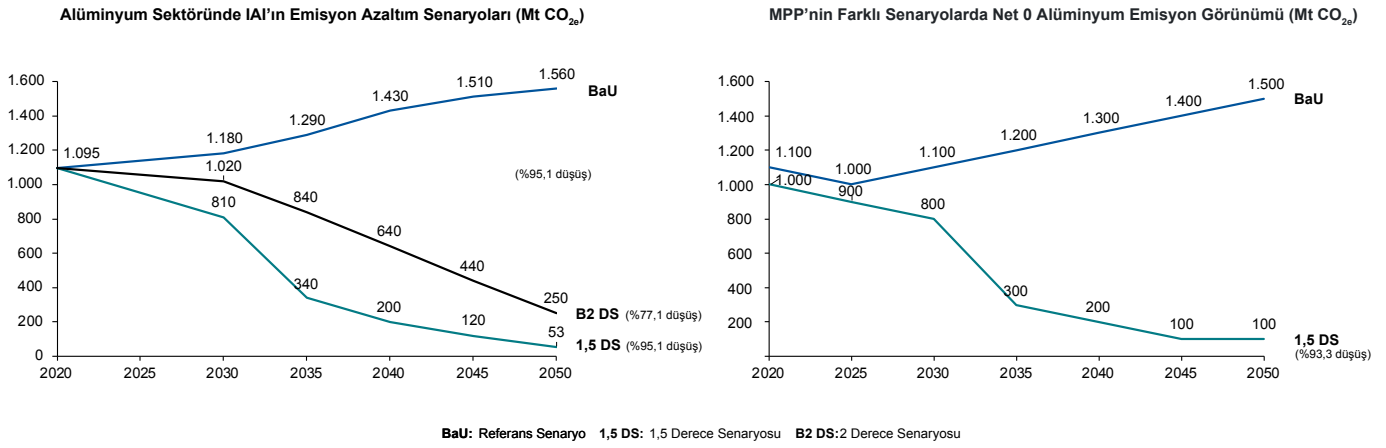
<sup>29</sup>IAI, 1.5 Degrees Scenario: A Model To Drive Emissions Reduction

<sup>30</sup>MPP, Making Net Zero Aluminium Possible

Her iki çalışma da (alüminyum üretimindeki yüksek elektrik ihtiyacı nedeniyle) karbonsuzlaşma yolunda temel adım olarak **elektrik emisyonlarının azaltılmasını** önermektedir. Buna ek olarak, **geri dönüştürülmüş alüminyum** kritik bir konumdadır ve küresel alüminyum tedarikinin %50'sinden fazlasını (2020'de bu rakam %33'tü) oluşturması beklenmektedir.<sup>31</sup> Ancak bu önemli kaldıraçlar alüminyum emisyonlarını sıfıra indirmek için yeterli gelmemektedir. Dolayısıyla, **düşük**

**karbonlu anotlar** gibi sıfıra yakın emisyonlu ergitme teknolojilerinin devreye alınması ve **CCUS'nin** kalan emisyonlara yönelik olarak üretim sürecine entegre edilmesi, karbonsuzlaşma çalışmalarının son aşamalarında önem arz etmektedir.

### Şekil 18. Uluslararası Kurumların Alüminyum Karbonsuzlaşma Yol Haritaları<sup>32</sup>



Dünyanın önde gelen alüminyum üreticilerinin iklim temelli emisyon azaltım hedefleri (ör. Rio Tinto, Alcoa, Hydro) çoğu şirketin uzun dönemli net sıfır taahhütleri ile bu uzun dönem hedeflerine doğru ilerlemeye yönelik ara hedefleri olduğunu

göstermektedir. Genellikle net sıfır hedefi olarak 2050 yılını belirleyen şirketler, kapsam 1 ve 2 emisyon seviyelerini azaltmak için ara hedefler koymaktadır.

# 2

**Alüminyum  
Sektörünün  
Karbonsuzlaşması  
için Modelleme ve  
Senaryo Analizi**

## 2. Alüminyum Sektörünün Karbonsuzlaşması için Modelleme ve Senaryo Analizi

Projenin temel kaldıraçlarından biri farklı politika ve teknoloji kombinasyonlarının sektörün gelecekteki emisyonları üzerindeki etkisini tahminleyen modelleme ve senaryo analizidir. Modelleme çalışmasını yapabilmek için ilk etapta şu analizler tamamlanmıştır:

- 2053 yılına kadar Türkiye alüminyum sektörünün talep ve arz projeksiyonu
- Birincil alüminyum ve alüminyum işleme rotalarına göre farklılık arz eden, sektörde karbonsuzlaşma hedefine ulaşacak öncül karbonsuzlaşma kaldıraçları ve teknolojileri

Modelleme çalışması kapsamında, 2053 yılına kadar farklı varsayımlar altında Türk alüminyum sektörünün arz ve talep projeksiyonları geliştirilmiş ve birincil alüminyum ve alüminyum işleme sektörlerinde karbon azaltımını sağlayacak temel kaldıraç ve teknolojiler belirlenmiştir. Model, Türkiye alüminyum sektörünün 2023-2053 arasındaki emisyon seviyelerini tahmin etmek için 2 temel senaryo (Mevcut Durumun Devamı/Referans ve Azaltım Senaryoları) üzerine geliştirilen alternatif yolları kapsamaktadır. Bu modelleme çalışması 2 referans senaryo ve 2 azaltım senaryosu kullanarak, Türkiye alüminyum sektörünün gelecekte uygulayabileceği politikaları tespit etmek amacıyla geliştirilmiştir.

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

dönüşümün sağlanmadığı durumda emisyon seviyelerini ölçmek için oluşturulmuştur.

2. **Azaltım senaryoları** ise emisyon azaltıcı politika eylemlerinin ve ileri teknoloji yatırımlarının sektörün emisyon seviyeleri üzerindeki etkisini modellemek amacıyla kurulmuştur. Modelleme çalışmasında iki azaltım senaryosu geliştirilmiştir; i) Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (Low Carbon Pathway- LCP) ve ii) En İyi Teknolojiler Senaryosu (Frontier Technologies Scenario – FTS). LCP senaryosu, Türkiye alüminyum sektörünün karbonsuzlaşması için en optimal (maliyet etkin) senaryo olacak şekilde tasarlanmıştır. Daha agresif olan FTS ise radikal teknolojilerin daha erken safhada uygulamaya alınması dolayısıyla LCP senaryosundan farklıdır. Her iki senaryoda da kurulması planlanan ulusal ETS fiyatları değerlendirilmiştir.

Geliştirilen senaryolardan bağımsız olarak, Türkiye alüminyum sektörünün 2053 yılına kadar net sıfır hedefine yaklaşabilmesi için geri dönüşümün artırılması (üretimde hurda miktarının), yeni ve radikal teknolojilerin benimsenmesi ve düşük emisyonlu enerji kaynaklarına geçiş sağlanması gerekmektedir.

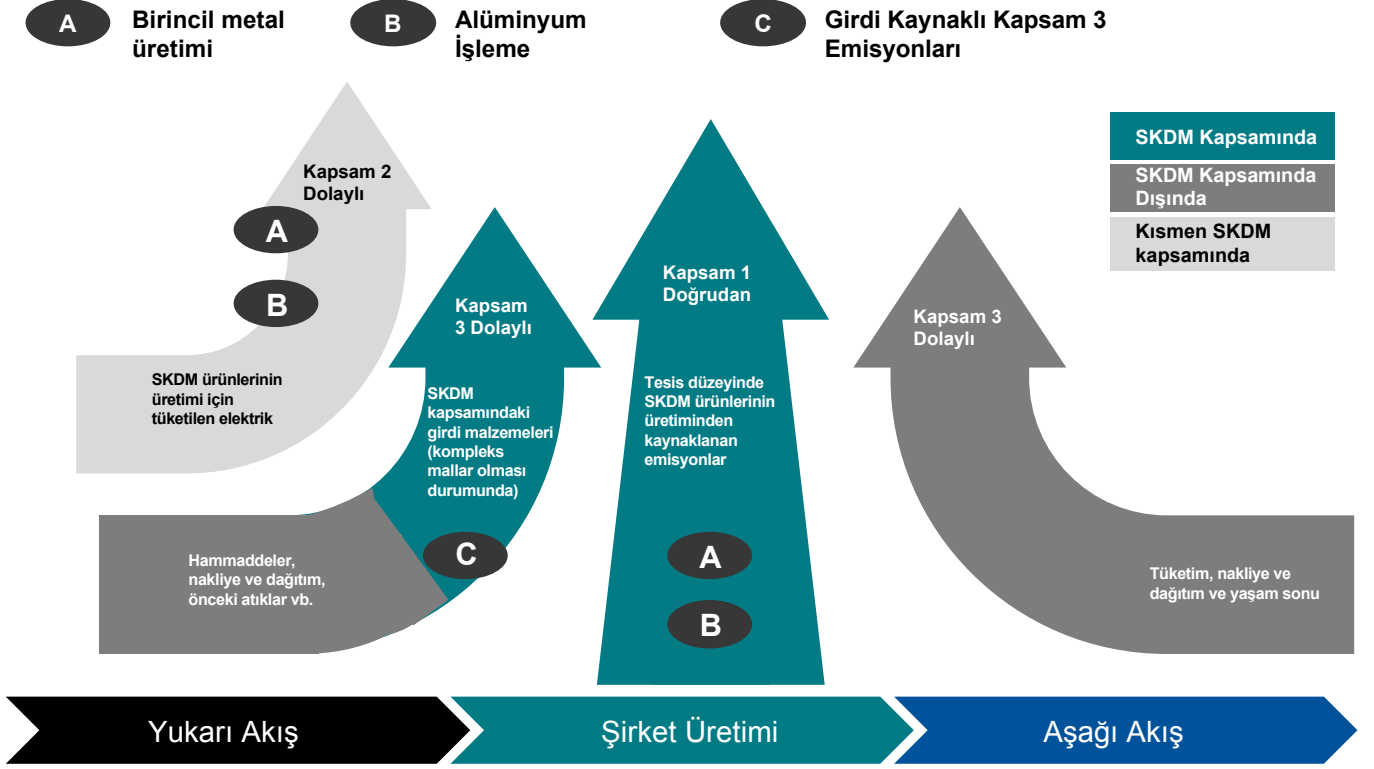
Birincil alüminyum üretiminde **süreç bazlı (öğütme, kalsinasyon, ergitme)** yeni teknolojiler tanımlanmıştır ve ilgili teknolojilerin azaltım etkileri ve maliyetleri analiz edilmiştir. Yakıt değişimi, ergitmede karbon anot kullanımının değiştirilmesi gibi teknolojiler, birincil alüminyumda düşük karbonlu üretimi mümkün kılmaktadır.

Alüminyum işlemede ise **daha düşük emisyonlu üretim yapan fırın tipleri**, üretimde yenilenebilir enerji payının artması ve şebeke emisyonlarında düşüş karbonsuzlaşma yolunda kritik öneme sahip kaldıraçlardır. Fırın teknolojileri, emisyon ve yatırım değerleri, devreye giriş yılları gibi hususlara sektör uzmanları ve sektör birlikleri eşliğinde karar verilmektedir.

Proje kapsamında alüminyum sektörünün emisyonları bütünsel olarak incelenmiş ve geliştirilen emisyon modeline sektörün sebep olduğu kapsam 1, kapsam 2 ve girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonları dahil edilmiştir.<sup>33</sup>

<sup>33</sup>Kapsam 1 emisyonları bir şirketin sahip olduğu veya şirketin uhdesindeki fabrikalar, tesisler, depolar, ofisler, araç filolarından direkt kontrol edilen kaynaklardan gelen emisyonlardır. Kapsam 2 emisyonları bir şirketin satın aldığı enerjinin üretilmesi halinde dolaylı olarak neden olduğu emisyonlardır. Son olarak kapsam 3 emisyonları, şirketin kendisi tarafından üretilmeyen ve şirketin sahipliğinde veya kontrolünde olmayan varlıkların sonucu olmayan ancak şirketin değer zincirinde dolaylı olarak sorumlu olduğu emisyonları kapsamaktadır.

Şekil 19. Emisyon Kapsamları



Birincil ve alüminyum işlemede kapsam 1 ve kapsam 2 emisyonları, GAMS (Genel Cebirsel Modelleme Sistemi)<sup>34</sup> optimizasyonu yazılımında modellenmiştir. Emisyona sebep olan faktörlerin doğru şekilde yansıtılması için birincil alüminyum ve alüminyum işleme rotalarında ayrı optimizasyon modelleri oluşturulmuştur. Diğer yandan, girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonları ticaret analizi ile incelenmiştir.

Türkiye alüminyum sektöründe karbon emisyonlarının azaltılması, ülkenin belirlediği karbonsuzlaşma planlarını destekleyecek şekilde yeni ve radikal teknolojilerin kullanılmasını elzem kılmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon modeli sonuçlarına göre (detayları bu raporun 2. bölümünde verilmiştir) Türkiye alüminyum sektörü için önceliklendirilen teknolojiler Tablo 3'te sunulmaktadır.

<sup>34</sup>GAMS, matematiksel modelleme ve karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için tasarlanmış yüksek seviyeli bir modelleme dilidir ve optimizasyon sistemidir. Kullanıcıların gerçek dünya senaryolarını matematiksel modellere çevirmeyi kolaylaştıran cebirsel denklemler ve kısıtlamalar kullanarak sorunlarını ifade etmelerine olanak tanır. Sistem daha sonra çeşitli optimizasyon algoritmalarını kullanarak formüle edilen problemin en iyi çözümünü bulmak için çalışır.

Tablo 3. Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosunda Modelin Karar Verdiği Öncelikli Alüminyum Üretim Teknolojileri

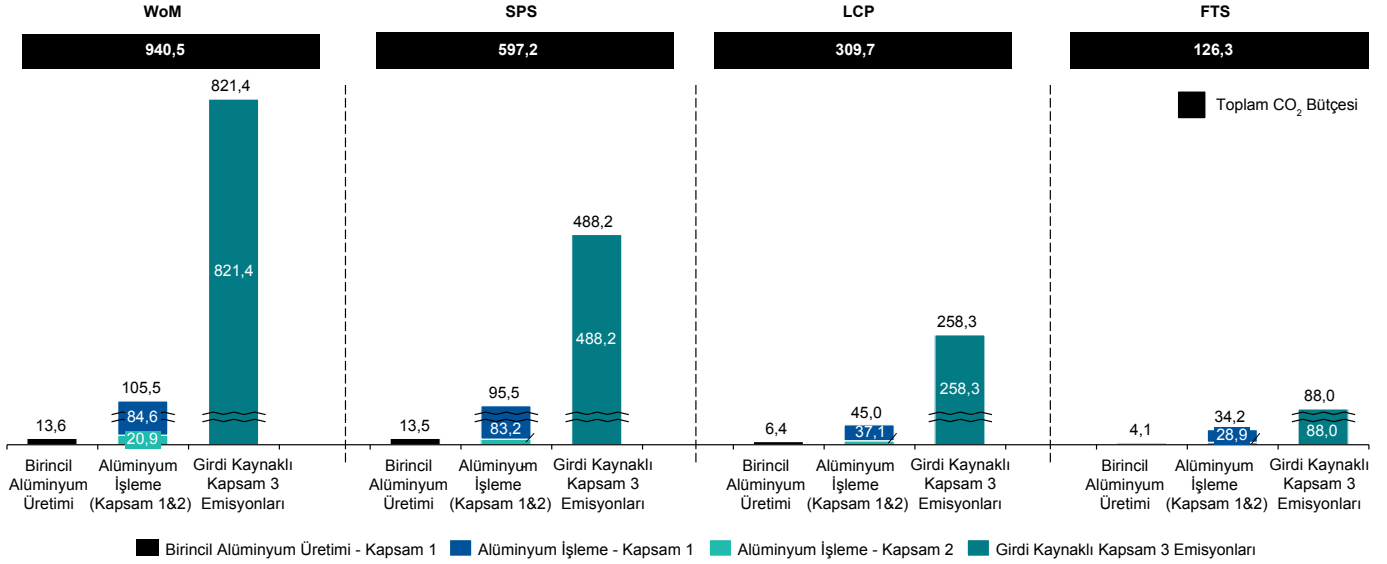
|                                            | Öngörülen Teknoloji Giriş Yılı | Teknoloji Değişim Yılı | Emisyon Azaltımı Etkisi (tCO <sub>2</sub> /t Al) | Gerekli Yatırım Miktarı (Dolar/t Al) | Ton Başına Emisyon Azaltım Maliyeti (Dolar/tCO <sub>2</sub> ) |
|--------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Birincil Alüminyum Teknolojileri</b>    |                                |                        |                                                  |                                      |                                                               |
| <b>Gaz Kazanı</b>                          | 2028                           | 2028                   | 0,7                                              | 30,9                                 | 43,8                                                          |
| <b>Güneş Enerjisi Kazanı</b>               | 2032                           | 2032                   | 0,9                                              | 1000,3                               | 1057,0                                                        |
| <b>Hidrojen Kalsinatörü</b>                | 2035                           | 2047                   | 0,5                                              | 214,8                                | 298,5                                                         |
| <b>İnert Anot</b>                          | 2040                           | 2040                   | 2,8                                              | 4851                                 | 1714,1                                                        |
| <b>Alüminyum İşleme Teknolojileri</b>      |                                |                        |                                                  |                                      |                                                               |
| <b>En İleri Düzey Reverber Fırın</b>       | Mevcut                         | 2024                   | 1,2                                              | 850                                  | 705,3942                                                      |
| <b>Elektrikli Reverber Fırın</b>           | 2040                           | 2040                   | 1,3                                              | 1050                                 | 820,3125                                                      |
| <b>Pota Fırın + CCS</b>                    | 2040                           | 2045                   | 0,2                                              | 345                                  | 2748,184                                                      |
| <b>Döner Fırın+ CCS</b>                    | 2040                           | 2046                   | 0,3                                              | 385                                  | 1013,158                                                      |
| <b>En İleri Düzey Reverber Fırın + CCS</b> | 2040                           | 2047                   | 0,4                                              | 1135                                 | 1352,941                                                      |

### Emisyon Değerleri

Hiçbir teknolojik dönüşümün ve azaltım politikasının hesaba katılmadığı WoM senaryosuna göre, 2020-2053 arası 34 yıllık dönemde alüminyum sektörünün kapsam 1, kapsam 2 ve girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonlarının toplam 940,5 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Aynı dönemde SPS senaryosu için emisyonların ise 597 milyon ton seviyesine

gelmesi öngörülmektedir. Yeni teknolojilerin üretim süreçlerine entegre edilmesi, üretimde hurda payındaki artış ve enerjideki karbonsuzlaşma gibi kaldıraçların devreye girmesi ile birlikte sektörün toplam emisyonunun 2023-2053 yılları arasında, LCP ve FTS senaryolarında sırasıyla yaklaşık 310 Mt CO<sub>2</sub> ve yaklaşık 126 Mt CO<sub>2</sub>'ye düşmesi beklenmektedir.

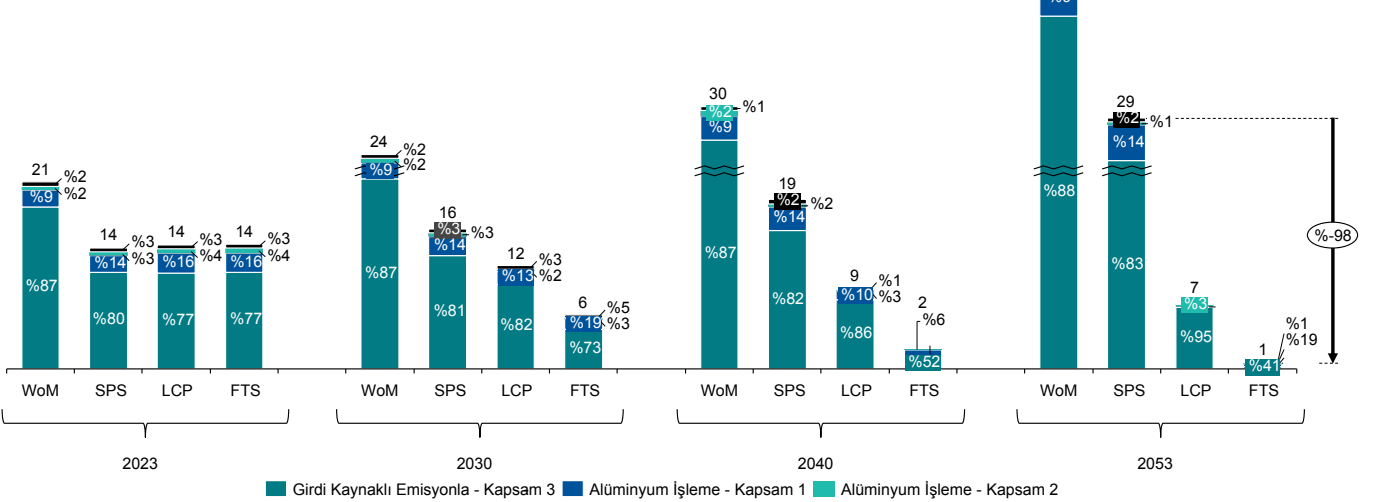
**Şekil 20. Alüminyum Sektörü Toplam Emisyonlar (2023-2053, Mt)**



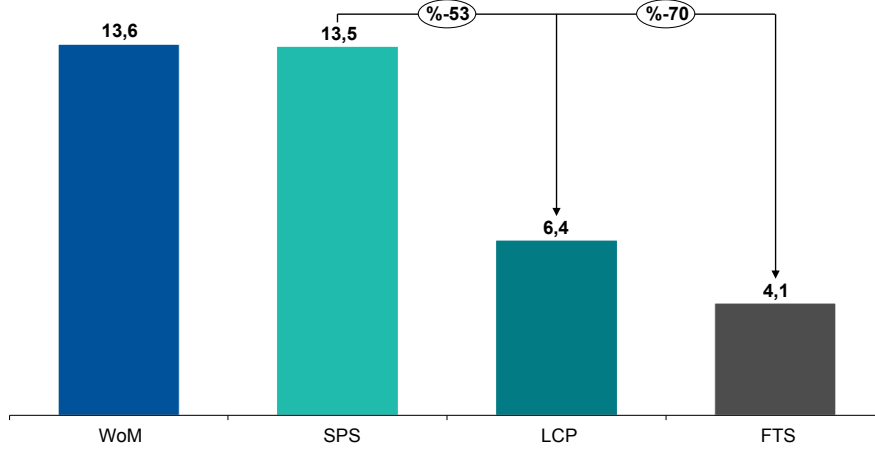
Alüminyum sektörü toplam emisyonu önümüzdeki 2053 yılında SPS senaryosuna kıyasla LCP senaryosunda %75 ve FTS senaryosunda %98 oranında azaltılabilmektedir. Yıllar bazında incelendiğinde ise, 2030'da SPS'ye kıyasla LCP senaryosu emisyonlarını %27 oranında azaltılarak 16 milyon tona düşürebilirken, FTS senaryosunda emisyonlar %62 oranında

azaltılarak 6 milyon tona kadar düşebilmektedir. 2040 yılında ise emisyon azaltım oranları LCP ve FTS senaryoları için %53 ve %88'e ulaşmaktadır. 2053 yılına gelindiğinde ise LCP senaryosu 7 milyon ton emisyonla %75 emisyon azaltımı elde ederken, FTS senaryosu ise 1 milyon ton emisyonla %98 emisyon azaltımı elde etmiştir.

**Şekil 21. Alüminyum Sektörü Yıllık Emisyon Miktarları (Mt)**

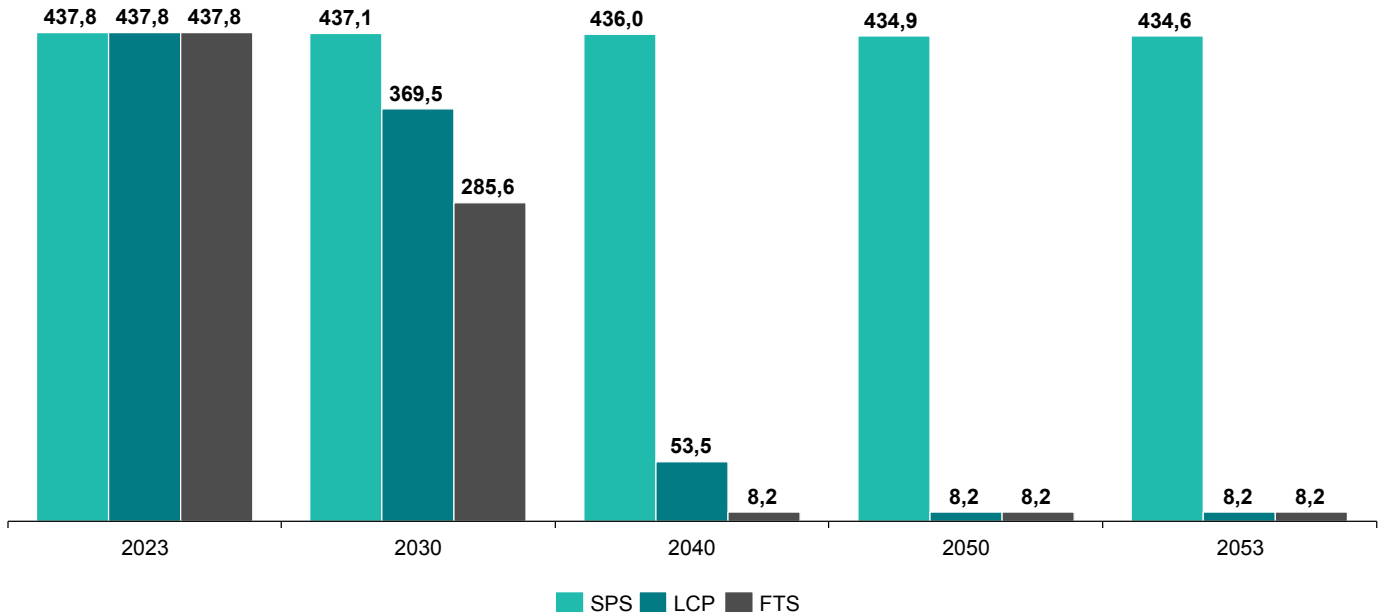


Model sonuçlarına göre birincil alüminyum üretiminde LCP ve FTS senaryoları farklı zamanlarda benzer teknolojik dönüşümler sağlarken FTS senaryosu radikal teknolojileri daha erken devreye almaktadır. Teknolojik dönüşüm sonucunda 2023-2053 arasında birincil alüminyum sektörünün toplam emisyonu SPS'ye kıyasla LCP senaryosunda %53 oranında bir azalmayla 6,4 milyon tona düşerken, FTS senaryosunda ise %70 oranında bir azalmayla 4,1 milyon tona düşebilmektedir.

**Şekil 22. Birincil Alüminyum Sektöründe Kümülatif Emisyonlar (2023-2053, Mt)**

Teknolojik dönüşümün sağladığı emisyon azaltımı sayesinde LCP senaryosu, referans senaryo olan SPS'ye kıyasla 2030 yılında %15,5, 2040 yılına kadar %35 ve 2053 yılına kadar %98 oranında emisyon azaltımı sağlamayı başarabilmektedir.

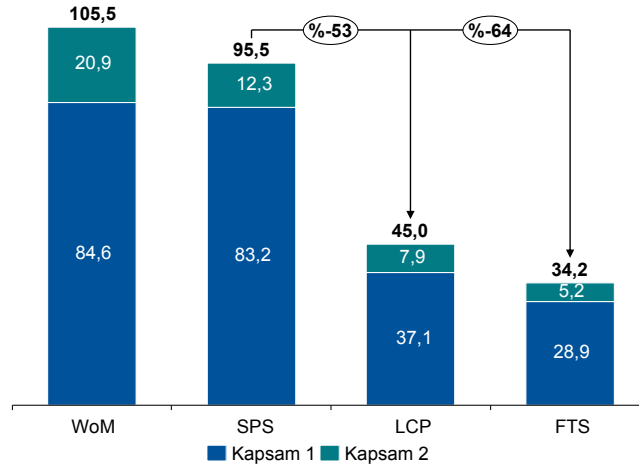
Daha agresif teknolojik dönüşümün görüldüğü FTS senaryosunda ise 2030 yılına kadar %34,7 emisyon azaltımı sağlanmaktadır. 2040 yılında ise maksimum emisyon azaltımı seviyesi olan %98 azaltıma ulaşmaktadır.

**Şekil 23. Birincil Alüminyum - Yıllık Emisyonlar (Bin t CO<sub>2</sub>)**

Alüminyum işleme için geliştirilen optimizasyon modeli sonuçlarına göre, 2053 yılına en ileri düzey reverber fırına CCS entegrasyonu ve elektrikli reverber fırınlar üretimde en yüksek paya sahip fırınlar olarak öne çıkmaktadır. Bu teknolojik dönüşüm sayesinde LCP senaryosunda kapsam

1 ve kapsam 2 emisyonları toplam emisyonlarda SPS senaryosuna kıyasla %53'lük bir azaltım yakalarken, daha agresif olan FTS senaryosunda ise emisyonlarının %64 oranında düşmesi beklenmektedir.

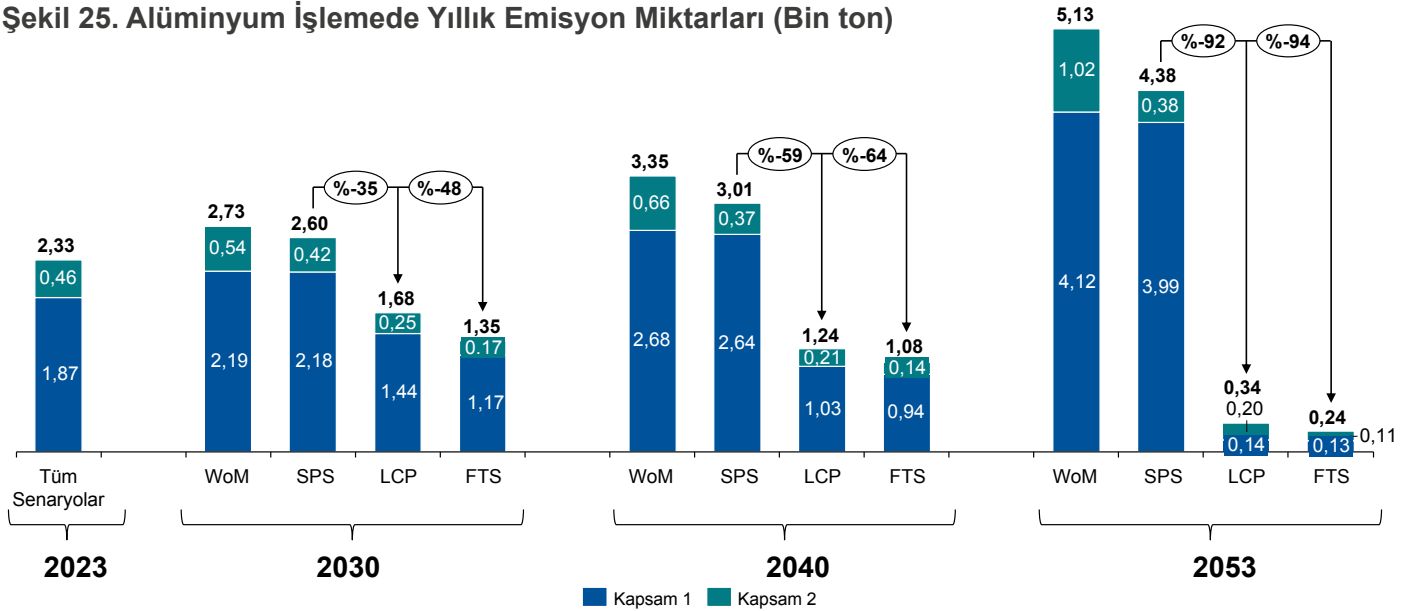
**Şekil 24. Alüminyum İşleme – Toplam Emisyonlar (2023-2053, Mt)**



Modelleme çalışmasının baz aldığı 2023 yılında mevcut fırın dağılımı ile sektörün toplam emisyon miktarı 2,33 milyon tondur. Öngörülen teknolojik değişim sonucunda 2030'da LCP senaryosu emisyonlarda %35'lik azaltım sağlarken FTS senaryosu %48'lik azaltım sağlamaktadır. 2040'a kadar emisyon azaltımları sırasıyla LCP ve FTS senaryoları için

%59 ve %64'e ulaşmaktadır. 2053 yılına gelindiğinde ise LCP senaryosu SPS'ye kıyasla %92 oranında bir azaltıma ulaşarak 0,34 milyon tona düşmektedir. Daha agresif FTS senaryosu ise %94'lük azaltım sağlayarak yıllık 0,24 milyon ton emisyonu düşmektedir.

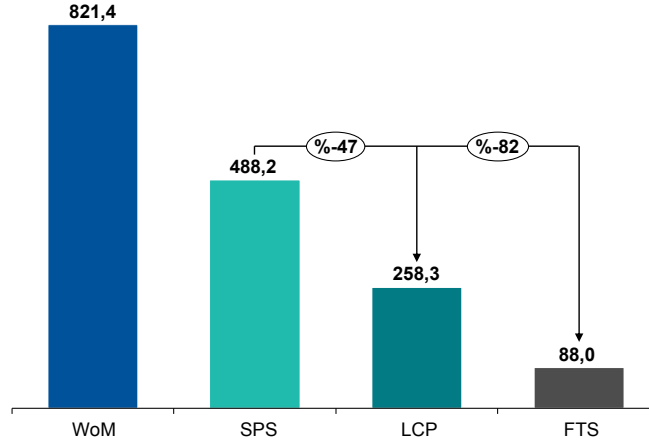
**Şekil 25. Alüminyum İşlemede Yıllık Emisyon Miktarları (Bin ton)**



Alüminyum üretiminde en yüksek emisyonla sebep olan girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonları alüminyum işleme üretiminde hurda/birincil metal oranının değiştirilmesi (hurda oranının artırılması) ve külçe ithal edilen ülkelerin emisyon yoğunlukları baz alınarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda, azaltım

kaldıraçlarının uygulanması ile birlikte LCP senaryosu için toplam emisyonlarda %47'lik bir azalma söz konusu olurken, daha agresif olan FTS senaryosunda %82 oranında emisyon azaltımı sağlanabilmektedir.

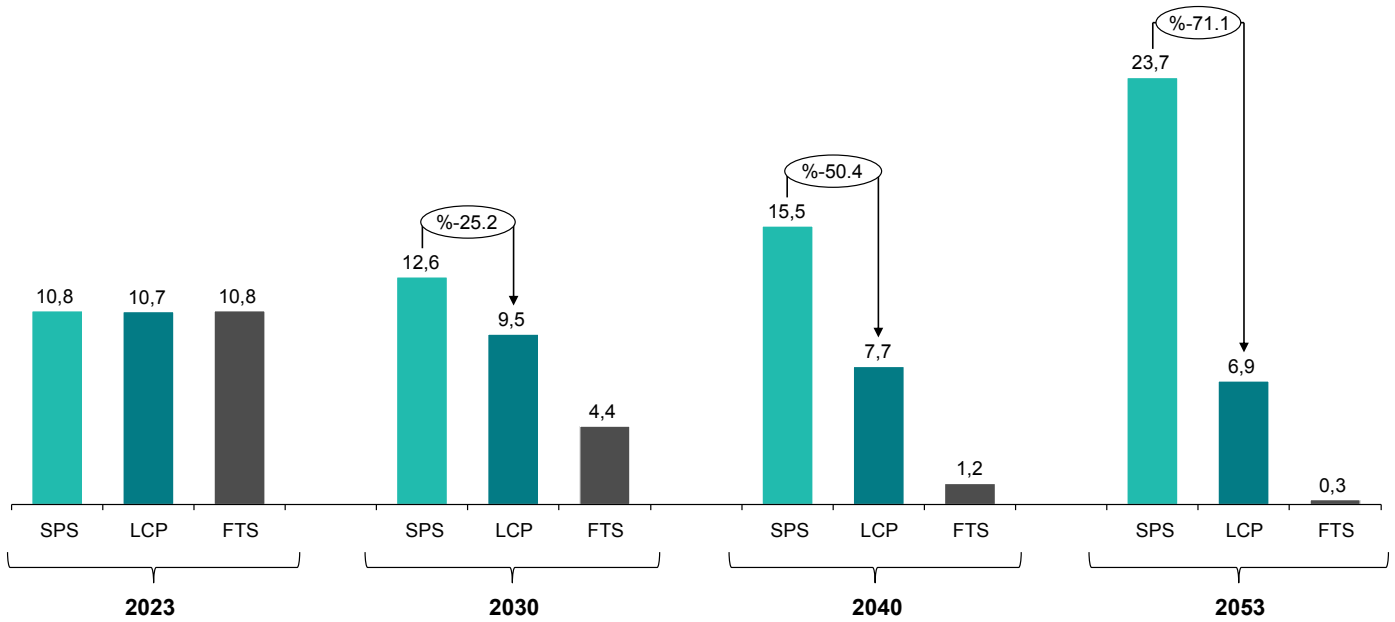
Şekil 26. Alüminyum İşleme Girdi Kaynaklı Toplam Kapsam 3 Emisyonları (2023-2053, Mt)



Üretimindeki hurda payının artırılmasının ve ithalat ortaklarındaki emisyon azaltım adımları ile daha düşük emisyon salımına neden olan ülkelere öncelik verilmesinin yıllar içinde emisyonlarda ciddi bir düşüş meydana getirmesi beklenmektedir. Bu dönüşüm sayesinde 2053 yılına gelindiğinde LCP senaryosunda emisyonlarda %71 azaltım,

FTS senaryosunda ise %99 azaltım sağlanabilmektedir. Yıllar bazlı incelendiğinde (SPS'ye kıyasla) LCP senaryosu ile 2030 yılında %25, 2040 yılında %50 oranında emisyon azaltımına ulaşılabilmektedir. Daha agresif FTS senaryosu ise 2030 yılında %50 ve 2040 yılında %92 emisyon azaltımı sağlayabilmektedir.

Şekil 27. Alüminyum İşleme Yıllık Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyonu (Mt)



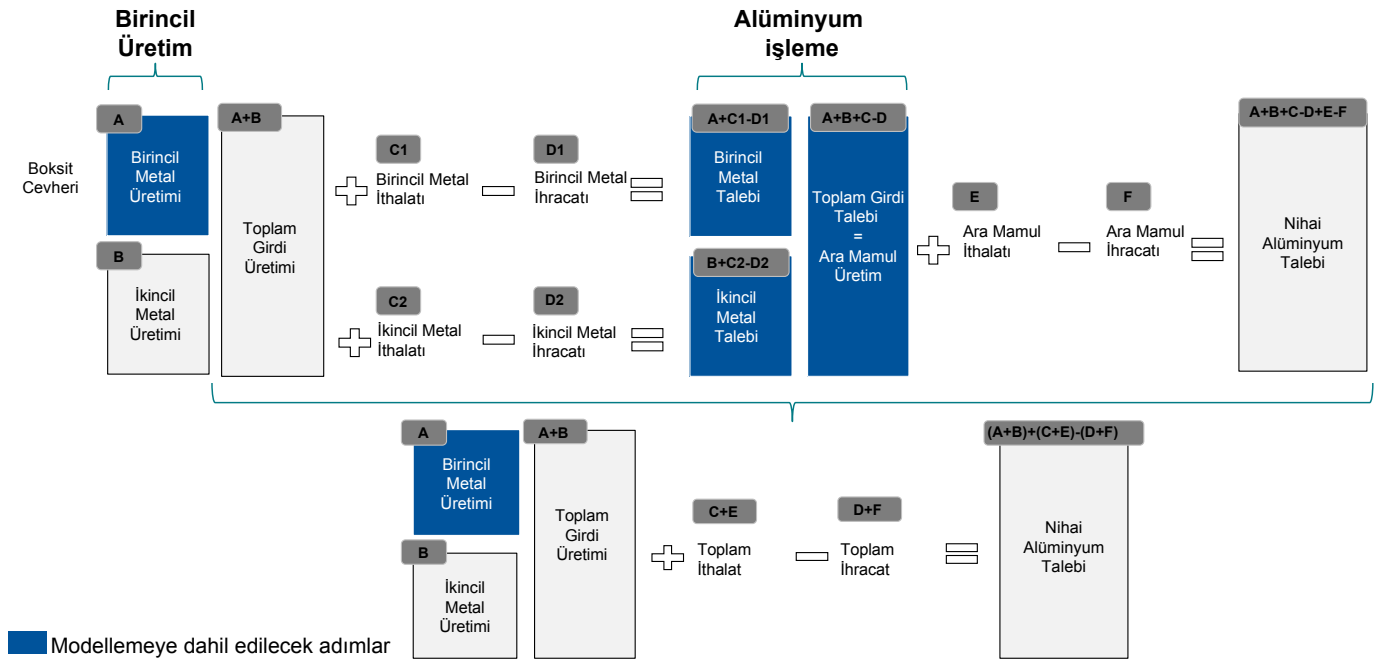
## 2.1. Sektörel Büyüme Projeksiyonları

### 2.1.1. Metodoloji & Varsayımlar

Proje ekibi tarafından bu proje için geliştirilen arz-talep modeli kullanılarak 30 yıllık dönem için alüminyum üretim tahmini yapılmıştır. Birincil ve alüminyum işleme rotalarında ayrı varsayımlar yapılmış ve ayrı sonuçlar elde edilmiştir. Birincil

alüminyum üretim projeksiyonları tek birincil alüminyum üreticisi olan ETİ Alüminyum ile yapılan görüşmeler doğrultusunda modellenmiştir. Diğer yandan alüminyum işleme rotasına ilişkin projeksiyonlar sektörün geçmiş dönem performansı incelenerek oluşturulmuştur. Projeksiyonun metodolojisi ve kullanılan varsayımlar aşağıda belirtilmektedir:

### Şekil 28. Projeksiyon Metodolojisi



Aşağıdaki varsayımlar sektörün arz-talep durumunu tahmin etmek için kullanılmıştır.

#### Talep

- Sektörün geçmiş dönem büyüme performansı, diğer ülke ve bölgelerdeki alüminyum sektörü büyüme tahminleri, çeşitli ülkelerin kişi başına alüminyum tüketimi değerleri dikkate alınmış ve Türkiye alüminyum talebinin 2038 yılına kadar %3,8 YBBO<sup>35</sup> ile büyüyeceği varsayılmaktadır. 2038 yılından sonra ise, talep artışının Avrupa ve Orta Doğu bölgeleri için büyüme tahminlerine yakınsayacağı ve 2053 yılında kademeli olarak %3'e düşeceği öngörülmektedir.<sup>36</sup>
- 2022 yılında birincil metalin toplam üretimdeki payı %75 iken, hurda kullanımının payı %25'tir. Sektörün geri

dönüşüme yatırım yapacağı varsayımına dayanarak, 2053 yılına kadar hurda kullanımının optimal senaryoda %35'e, agresif senaryoda ise %50'ye çıkacağı öngörülmektedir.

#### Kapasite & Üretim

- Türkiye birincil alüminyum endüstrisi için yıllık üretim kapasitesi 2022 yılı itibarıyla 82.000 tondur. Ek üretim kapasitesi için başka bir yatırım planı projeksiyonlarda dikkate alınmamıştır. Alüminyum işleme üretim kapasitesi, iç talep ve ticaret varsayımları ile hesaplanmıştır.

<sup>35</sup>Pandemi etkisi dışında bırakılmıştır.

<sup>36</sup>CM Group

## Ticaret

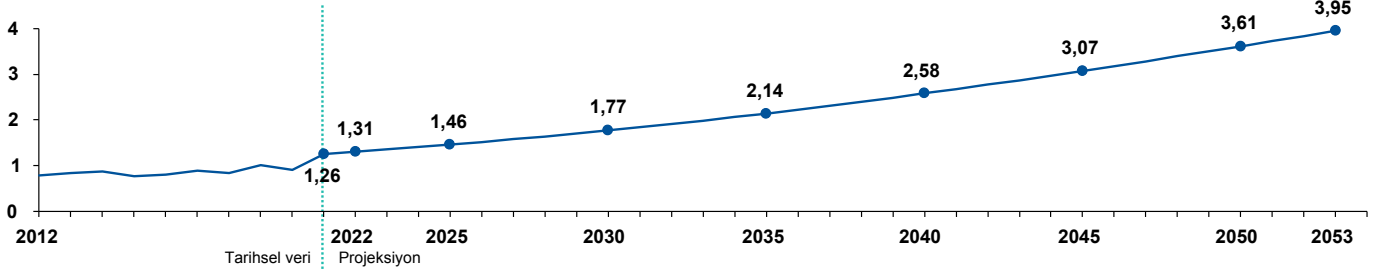
- Sektörün son 10 yıl performansı incelenerek, **yarı işlenmiş mamul ithalatının iç tüketim içindeki payının** benzer seyredeceği varsayılmaktadır (%33). **Yarı işlenmiş mamul toplam üretimi içindeki ihracat oranının** ise %60 olarak seyredeceği varsayılmış, **SKDM ve ETS süreci doğrultusunda %47'ye düşebileceği** değerlendirilmiştir (Ek 1).

### 2.1.2. Projeksiyon Sonuçları

#### Birincil Alüminyum Üretimi

Türkiye birincil alüminyum endüstrisi için yıllık üretim kapasitesi mevcut durumda 82.000 tondur. Ek üretim kapasitesi için daha fazla yatırım planı bulunmadığı varsayılmıştır. Dolayısıyla birincil alüminyum üretimi Türkiye için 2053 yılına kadar 82.000 tonda sabit tutulmuştur.

#### Şekil 29. Alüminyum Talep Tahmini (Milyon Ton)



Alüminyum tüketiminin, artan nüfus ile beraber ulaşım, savunma-havacılık, inşaat sektörlerinde ve genel altyapı yatırımlarında önümüzdeki döneme dair büyüme beklentisi doğrultusunda güçlenmesi öngörülmektedir. **Türkiye’de kişi başı alüminyum tüketimi 2021 yılında 14,9 kg iken, bu**

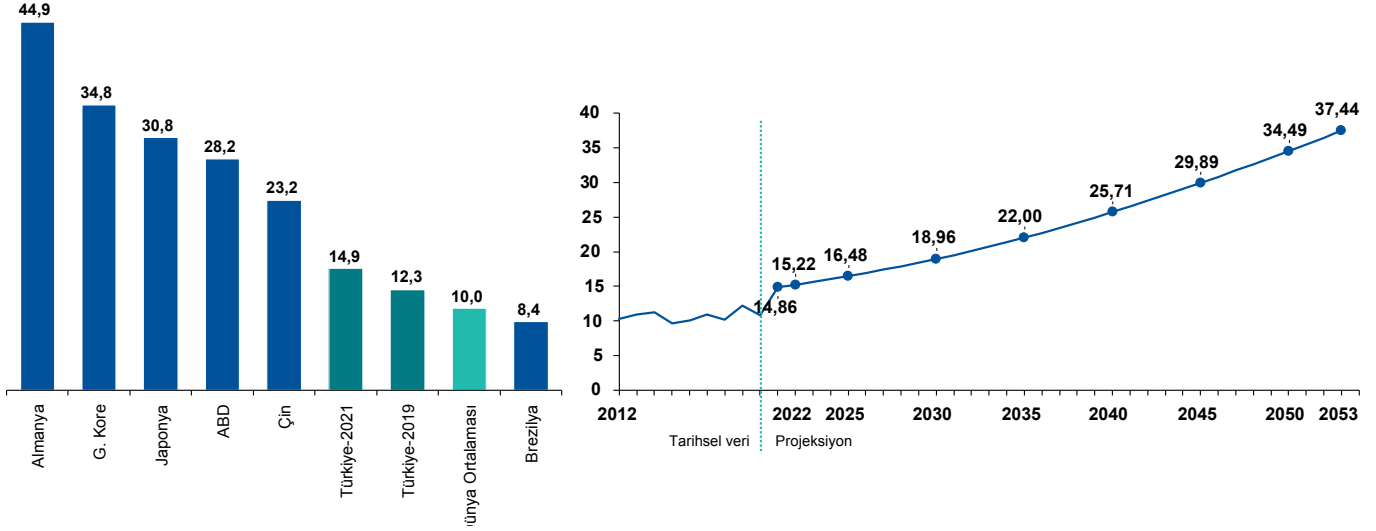
## Alüminyum İşleme

### Yurt içi Talep Tahminleri

Geçmiş dönem performansına göre Türkiye’deki alüminyum talebi yukarı yönlü bir yol izlemektedir. En güncel verilerin 2021 yılına ait olduğu birincil alüminyum talebinin 1,26 milyon ton seviyesinde olduğu hesaplanmaktadır. Alüminyum sektörünün toplam talep büyümesinin 2012 ve 2019 yılları arasında bileşik olarak yıllık %3,86 olduğu görülmektedir<sup>37</sup>. Küresel ve ulusal alüminyum sektörü beklentileri doğrultusunda alüminyum sektör talep büyümesini 2023-2038 yılları arasında benzer seyredeceği, bu dönemden sonra ise yıllık büyüme oranının 2053 yılına kadar kademeli olarak düşerek %3’e ulaşacağı öngörülmektedir. **Bu varsayımlar altında toplam alüminyum talebinin Türkiye’de 2053’te 3,95 metrik tona ulaşacağı tahmin edilmektedir.**

**rakamın 2053’te 37,4 kg’ye ulaşacağı tahmin edilmektedir.** 2053 yılına gelindiğinde kişi başı alüminyum tüketimi Güney Kore seviyesine yaklaşmakta ve böylece dünya ortalamasına kıyasla daha yüksek bir seviyeye ulaşmaktadır.

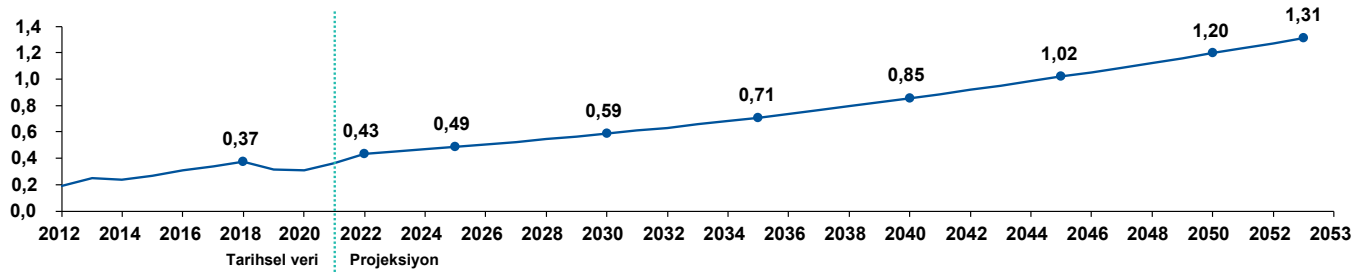
**Şekil 30. Seçili Ülkelerde Kişi Başı Alüminyum Tüketimi ve Türkiye’de Kişi Başına Alüminyum Tüketimi Projeksiyonu (Kg)<sup>38</sup>**



## İthalat

Türkiye’nin alüminyum işleme sektörü ithalatı 2018 yılında 370 bin tona ulaşmış ve bu tarihten itibaren düşüş evresine girmiştir. Alüminyum ihracat projeksiyonlarında toplam talep içindeki ihracat oranının son 10 yılın ortalamasına benzer performans göstereceği varsayılmış (0,33) ve Türkiye’nin artan ürün talebi dikkate alınmıştır. **Bu varsayımlar doğrultusunda yarı mamul ürünlerin ithalatının 2053’te 1,3 milyon tona ulaşması beklenmektedir.**

**Şekil 31. Yarı Mamul Ürünler İçin İthalat Tahmini (Milyon Ton)**

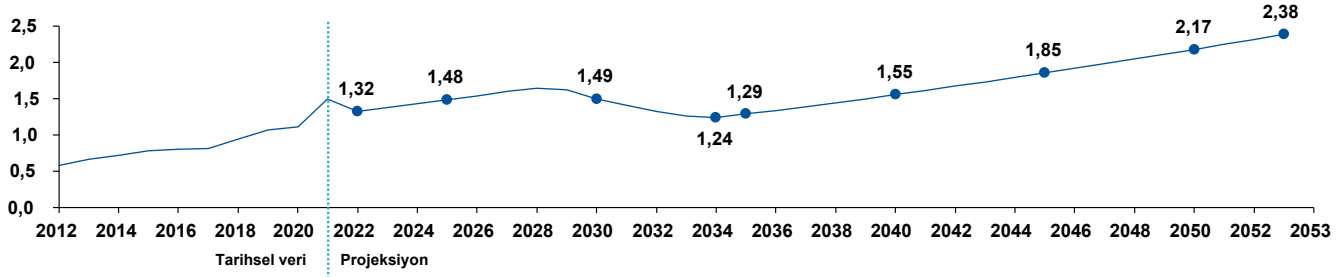


<sup>38</sup>TALSAD, TÜDOKSAD, PwC Analizi

## İhracat

Türkiye alüminyum ihracatındaki en büyük ihracat destinasyonunun AB olduğu düşünüldüğünde (%60,8) SKDM sürecinin sektörü önemli ölçüde etkilemesi beklenmektedir. Bu rapordaki Ek 1'de belirtildiği üzere, **SKDM'in Türkiye'nin AB'ye olan alüminyum ihracattaki etkisinin birkaç yıl sürmesi ve sonuçta 2020'li yılların sonlarında %20 civarında düşüşe neden olabileceği öngörülmektedir.** Bu varsayımlar ışığında toplam alüminyum sektörünün ihracat hacminin 2040 yılında 1,5 milyon tonu aşması, 2053 yılında ise 2,38 milyon tona ulaşması beklenmektedir.

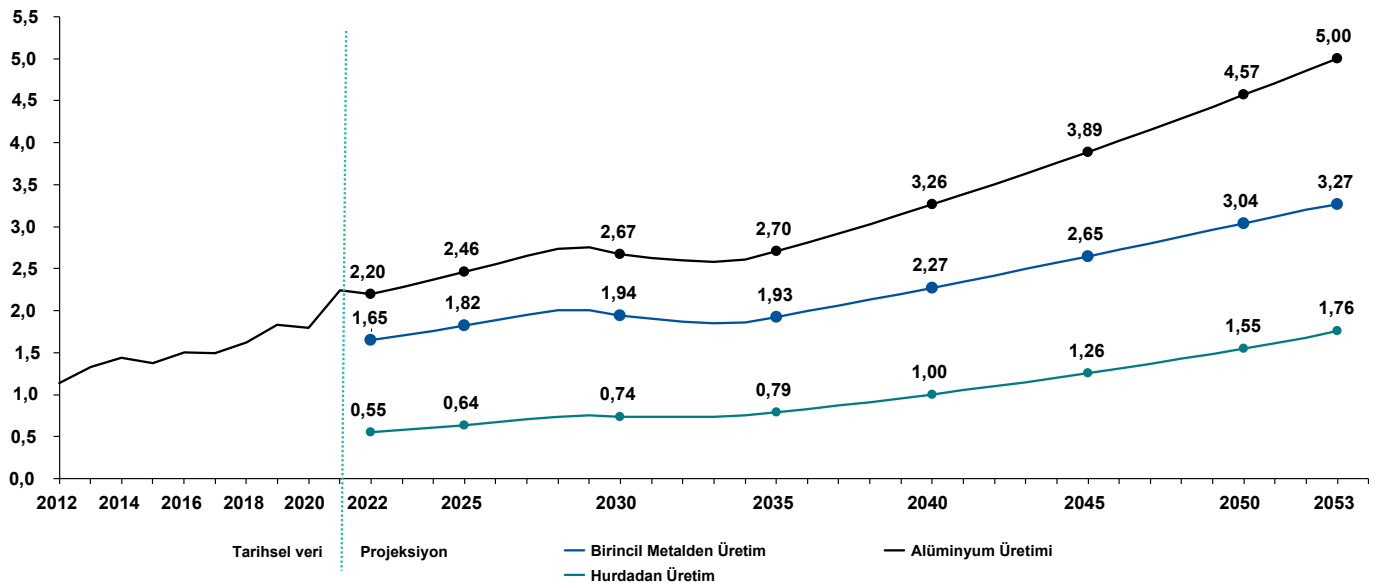
Şekil 32. Yarı Mamul Ürünler için İhracat Tahmini (Milyon Ton)



## Üretim

Sektörün üretim tahminlerine; talep, ithalat ve ihracat tahminleri baz alınarak ulaşılmaktadır. Toplam talebin ithalatla karşılanamayan bölümünün (yurt içi ve yabancı) yurt içi üretim tarafından sağlanacağı varsayılmaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'nin alüminyum üretimine ilişkin tahminlere göre üretim seviyesinin, toplam alüminyum talebindeki artışa paralel olarak artması beklenmektedir.

Şekil 33. Yarı Mamul Ürünler için Üretim Tahmini (Milyon Ton)



**SKDM'nin yarı mamul alüminyum ürünlerinin ihracatında belli seviyede düşüş yaratacağı beklentisiyle üretimde bir azalışa yol açacağı tahmin edilmektedir.** SKDM 2026 yılında devreye girerek büyüme oranını kısa sürede azaltmıştır. 2034 yılına kadar ücretsiz tahsisatların aşamalı olarak kaldırılması sonrasında üretimin projeksiyon dönemi (2053) sonuna kadar tahmini büyüme trendleriyle artması beklenmektedir.

2022 yılı itibarıyla 2,2 milyon ton olan toplam alüminyum üretiminin 5 milyon tona ulaşması beklenmektedir. 2053 yılında birincil metal üretimi 3,27 milyon tona, hurda üretiminin ise 1,76 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Halihazırda üretimde birincil metal ve hurda dağılımı sırasıyla %75 ve %25 oranındadır. Uzmanlarla yapılan değerlendirmeler ve dünyadaki sektör eğilimleri dikkate alındığında üretimde hurdanın payına ilişkin bir artış beklenmektedir. Buna göre üretimdeki birincil metalin payının %65'e, hurdanın payının ise %35'e yakınsayacağı varsayılmıştır.

## 2.2. Birincil Alüminyum Modelleme Sonuçları

Birincil alüminyum üretimi alüminyum değer zincirindeki emisyonların çoğundan sorumludur.<sup>39</sup> Bu sebeple küresel (ve yerel) karbonsuzlaşma yol haritaları ağırlıklı olarak birincil alüminyum rotasının karbonsuzlaşmasına odaklanmaktadır. Sadece bir birincil alüminyum üretim tesisine sahip olan Türkiye'nin, esas olarak alüminyum işlemeye odaklanan bir karbonsuzlaştırma planına ihtiyacı vardır. Birincil üretim için oluşturulan model, Türkiye birincil alüminyum endüstrisinin "mevcut durumu" ve "düşük karbonlu üretim" durumunu yansıtabilmek için sektör temsilcileriyle yapılan görüşmeler ile geliştirilmiştir.

Birincil model için kurulan optimizasyon modelinde, MPP çalışmasında belirlenen birincil alüminyum teknoloji arketipleri kullanılmaktadır. Her bir üretim süreci için farklı teknolojileri değerlendiren modele toplam 144 teknoloji kombinasyonu dahil edilmiştir. Modelleme çalışması için 2 referans (WoM ve SPS) ve 2 azaltım (LCP ve FTS) senaryosu geliştirilmiştir. Azaltım senaryolarında radikal teknolojilerin devreye girişi, şebekenin karbonsuzlaşması, kurulması planlanan ulusal ETS etkisi gibi farklı parametreler gözlemlenmiştir. Model sonuçları,

senaryo bazlı emisyon tahminleri, teknolojik dönüşüm öngörüsü ve bu dönüşümün gerektirdiği yatırım ihtiyacını kapsamaktadır.

Modelleme çalışmasının sonuçlarına göre, optimal senaryo olarak tanımlanan LCP senaryosunda teknolojik dönüşüm 2028 yılında konvensiyonel kömür kazanının gaz kazanı ile değişimiyle başlamaktadır. Daha sonrasında, 2032 yılında güneş enerjili kazana dönüşüm, 2040 yılında inert anot teknolojisinin üretime dahil olması ve son olarak 2047 yılında hidrojen kalsinatöre dönüşüm öngörülmektedir. Bu dönüşüm sonucunda LCP senaryosunda toplam emisyonlar referans senaryosu olan SPS'ye kıyasla %53 oranında azalmakta ve 2053 yılında 6,38 milyon ton CO<sub>2</sub>'ye düşmektedir. Teknolojik dönüşümün gerektirdiği yatırımın net bugünkü değeri (NBD) ise 2023-2053 yılları arası toplam 176 milyon dolar olarak hesaplanmıştır.<sup>40</sup>

Agresif senaryo olarak tanımlanan FTS senaryosunda ise aynı teknolojik dönüşüm öngörülmektedir; fakat FTS senaryosunda teknolojilerin devreye giriş yılları LCP'ye kıyasla daha erken gerçekleşmektedir. Radikal teknolojilerin daha erken devreye girmesiyle daha çok emisyon azaltımı elde edilmesi öngörülen FTS senaryosunda 2023-3053 yılları arası toplam emisyonlar SPS'ye kıyasla %70 azaltılabilmektedir. 2053 yılına gelindiğinde FTS senaryosu için emisyon yoğunluğu 0,1 t CO<sub>2</sub>/t Al iken sektörün toplam emisyonları 4,1 milyon tona düşmektedir. Bu dönüşümün gerektirdiği yatırımın (2023-2053 yılları arası) NBD ise 245 milyar dolar olarak hesaplanmıştır.

### 2.2.1. Düşük Karbonlu Birincil Alüminyum Teknolojileri

Modelleme yaklaşımı süreç bazlı mevcut ve yeni teknolojileri içermektedir. Yeni teknolojiler altında Mission Possible Partnership<sup>41</sup> (MPP) çalışmasının belirlediği süreç teknolojileri değerlendirilmiştir. Bu teknolojilerin, Türkiye birincil alüminyum sektörünün düşük karbonlu üretime ulaşması için kullanabileceği potansiyel teknolojiler olduğu kabul edilmektedir.

<sup>39</sup>Uluslararası Enerji Ajansı

<sup>40</sup>İndirim oranı %7 olarak alınmıştır.

<sup>41</sup>UMPP, Making Net Zero Aluminium Possible

Şekil 34. Süreç Bazlı Teknolojiler (MPP)



Öğütme sürecinde düşük sıcaklıklı (100°C-320°C) kömür, gaz veya petrol kazanları mevcut durumda sektör tarafından tercih edilen geleneksel kazan tipleridir. Bu geleneksel kazanlara ek olarak, 3 yeni kazan tipi sektörün emisyonlarını azaltmak için kullanılabileceği yeni teknolojiler olarak kabul edilmektedir.<sup>42</sup> Yeni kazan tiplerinden elektrikli kazan küresel kaynaklara göre ticari olarak erişilebilir durumdadır. Hidrojen kazanı ve güneş enerjili kazan ise hala geliştirilmekte olup küresel kaynaklar tarafından ticari olarak yaygınlaşabilecekleri yıl 2027 olarak öngörülmüştür.<sup>43</sup>

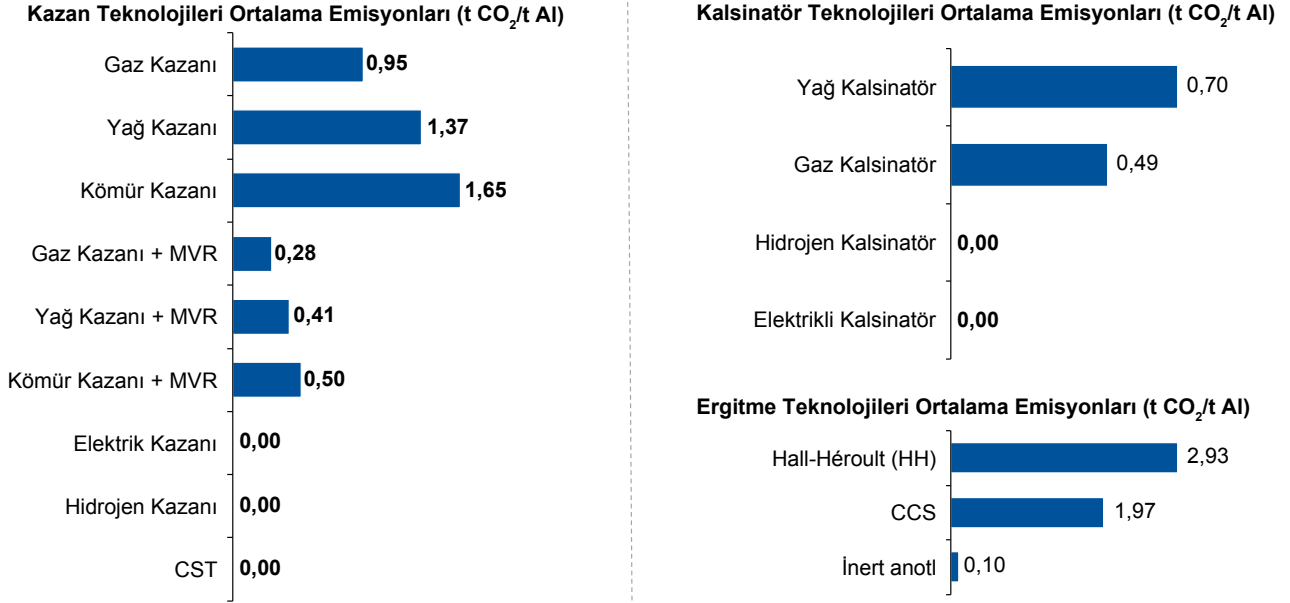
1000°C ila 1300°C arasında değişen sıcaklıklarda ısı üretmek için gaz veya petrol ile çalışan geleneksel kalsinatörler hali hazırda sektör tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrojen ve elektrik bazlı kalsinasyon, kalsinasyon sürecindeki emisyonları azaltmak için geliştirilmekte olan yeni teknolojilerdir. Küresel kaynaklara göre hidrojen ve elektrikli kalsinatörlerin 2030 yılında ticari olarak kullanılabilir hale gelmesi beklenmektedir.<sup>44</sup>

Alüminyum ergitmeye ilişkin en yaygın süreç olan Hall-Héroult (karbon anot) süreci, genelde 950°C civarında eritilmiş kriyolitteki (doğal olarak ortaya çıkan bir mineral) alüminyumun çözünmesini içermektedir.<sup>45</sup> Bu süreçte, anot etkisiyle alüminadan yayılan oksijen tepkimesinin bir sonucu olarak CO<sub>2</sub> ve PFC emisyonu oluşmaktadır.

Ergitme sürecinde meydana gelen doğrudan emisyonları azaltmada iki teknoloji öne çıkmaktadır. Bunlar mevcut Hall-Héroult teknolojisine entegre edilen karbon yakalama ve depolama (CCS) ile yeni inert anot teknolojisidir. Küresel kaynaklara göre her iki teknolojinin de uygulamaya başlama yılının 2030 olması beklenmektedir. Hall-Héroult teknolojisine entegre edilen CCS teknolojisinin ergitme sürecinde meydana gelen CO<sub>2</sub> emisyonlarının %90'ını yakalayacağı tahmin edilmektedir. Diğer yandan, inert anot teknolojisinde karbon anot farklı bir tip anotla değiştirilmekte (ör. seramik oksit), böylece reaksiyondan kaynaklanan emisyonları ortadan kaldırmaktadır.

Birincil alüminyum üretiminde yer alan 3 ana süreç için belirlenen yeni ve gelişmekte olan teknolojilere ilişkin emisyon seviyeleri aşağıdaki grafikte verilmektedir.

### Şekil 35. Birincil Alüminyum Teknolojileri için Emisyon Seviyeleri<sup>47</sup>



Teknolojilerin Türkiye birincil alüminyum endüstrisi için ticari olarak kullanılabilir olacakları yıllar sektörün görüşü alınarak proje uzmanları ile belirlenmiştir. Ayrıca teknoloji giriş yıllarına ilişkin öngörüler projenin Yönlendirme Komitesi toplantılarında da değerlendirilmiştir. Senaryo bazlı tanımlanan teknolojilerin ticari olarak kullanılabilecekleri yıllar Şekil 36'da verilmiştir. Daha agresif FTS senaryosu için HH+CCS

ve inert anot teknolojileri hariç tüm teknolojiler için MPP çalışması tarafından tanımlanan, küresel teknoloji giriş yılları kullanılmıştır. Optimal LCP senaryosunda ise teknolojilerin küresel seviyede ticari olarak kullanılabileceği yıllardan 5 yıl sonra Türkiye'de uygulamaya alınacağı varsayılmıştır.

<sup>46</sup>[www.enplusgroup.com/en/what-we-do/projects/Inert-anode/](http://www.enplusgroup.com/en/what-we-do/projects/Inert-anode/) adresinden alınmıştır.

<sup>47</sup>MPP

Şekil 36. Teknolojilerin Ticari Olarak Devreye Girebileceği Yıllar

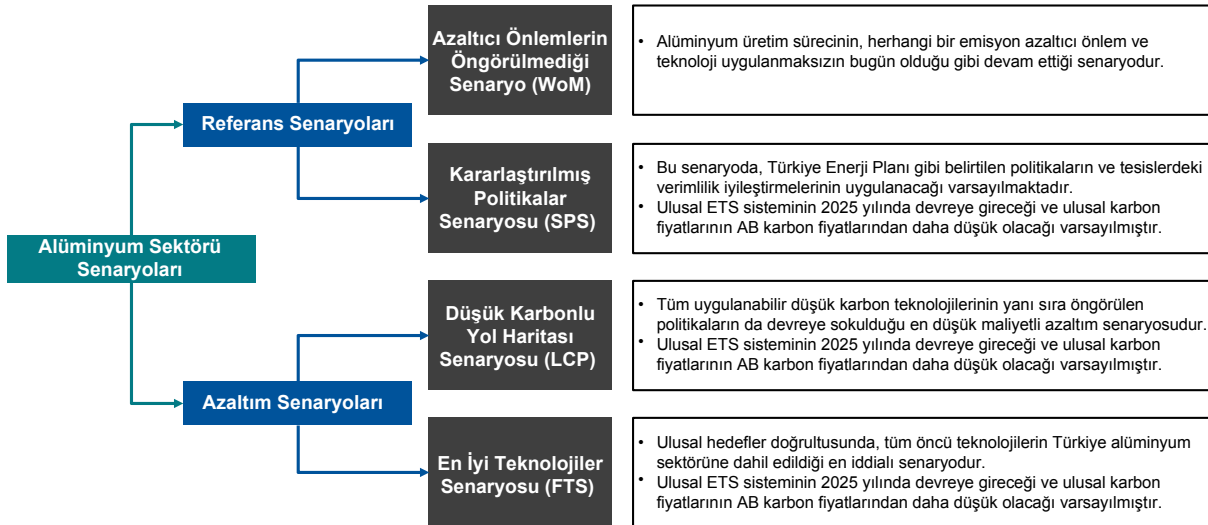
| MPP                                            |                    |  | En İyi Teknolojiler Senaryosu (FTS) |  | Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (LCP) |
|------------------------------------------------|--------------------|--|-------------------------------------|--|---------------------------------------------|
| Teknoloji                                      | Devreye Giriş Yılı |  | Devreye Giriş Yılı                  |  | Devreye Giriş Yılı                          |
| Öğütme Teknolojileri                           |                    |  |                                     |  |                                             |
| Gaz Kazanı                                     | 2023               |  | 2023                                |  | 2028                                        |
| Yağ Kazanı                                     | 2023               |  | 2023                                |  | 2028                                        |
| Kömür Kazanı                                   | 2023               |  | 2023                                |  | 2023                                        |
| Elektrik Kazanı                                | 2023               |  | 2023                                |  | 2028                                        |
| Hidrojen Kazanı                                | 2027               |  | 2027                                |  | 2032                                        |
| CST (Konsantre Solar Termal)                   | 2027               |  | 2027                                |  | 2032                                        |
| MVR (Mekanik Buhar Yeniden Sıkıştırma Sistemi) | 2027               |  | 2027                                |  | 2032                                        |
| Kalsinasyon Teknolojileri                      |                    |  |                                     |  |                                             |
| Gaz Kalsinatör                                 | 2023               |  | 2023                                |  | 2023                                        |
| Yağ Kalsinatör                                 | 2023               |  | 2023                                |  | 2023                                        |
| Hidrojen Kalsinatör                            | 2030               |  | 2030                                |  | 2035                                        |
| Elektrikli Kalsinatör                          | 2030               |  | 2030                                |  | 2035                                        |
| Ergitme Teknolojileri                          |                    |  |                                     |  |                                             |
| Hall-Héroult (HH)                              | 2023               |  | 2023                                |  | 2023                                        |
| HH+CCS                                         | 2030               |  | 2035                                |  | 2040                                        |
| İnert anot                                     | 2030               |  | 2035                                |  | 2040                                        |

## 2.2.2. Senaryo Analizi ve Modelleme Yaklaşımı

Birincil alüminyum için geliştirilen referans senaryolar için herhangi bir teknolojik dönüşüm öngörülmemektedir. SPS referans senaryosu yenilenebilir yatırımlar ve ulusal ETS'nin devreye girişi gibi politikaları dikkate aldığından, WoM

referans senaryosundan farklıdır. Azaltım senaryolarında ise teknolojilerin devreye giriş yılları bir önceki bölümde gösterildiği şekilde farklılaştırılmıştır. FTS senaryosu optimal LCP senaryosuna kıyasla daha agresif azaltım senaryoları sağlamaktadır.

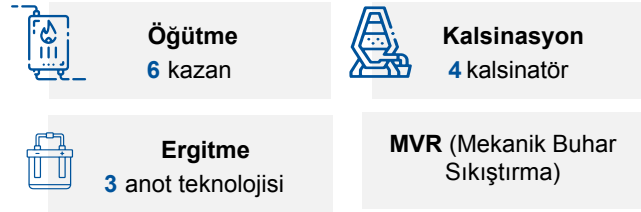
Şekil 37. Birincil Alüminyum Üretim Senaryoları



GAMS yazılımı üzerinde çalışan optimizasyon modeli, Türkiye birincil alüminyum endüstrisi için daha düşük karbonlu üretime giden en uygun yolu bulmak amacıyla uygulanacak teknolojileri ve devreye alınış yıllarını seçmek için matematiksel bir model kullanmaktadır. Birincil alüminyum üretimini, 3 ana süreç bazında MPP teknolojileri tanımlanarak modellenmiştir. Bu süreçler; kazanların kullanıldığı öğütme, kalsinatörlerin kullanıldığı kalsinasyon ve anotların kullanıldığı ergitme prosesleridir. Türkiye birincil alüminyum sektörünün mevcut durumda kullandığı teknolojiler incelenmiştir. Buna göre, Türkiye birincil alüminyum sektörü, modellemede kullanılan 3 ana süreç bazında şu teknolojileri kullanmaktadır: kömür kazanı, gaz kalsinatör ve karbon anot.

Modelleme çalışmasının bir parçası olarak, mevcut birincil alüminyum üretim sürecinden kaynaklanan başlangıç CO<sub>2</sub> emisyon seviyeleri, sektör temsilcileriyle yapılan istişareler doğrultusunda hesaplanmıştır. Ardından, 6 kazan, 4 kalsinatör, 3 ergitme teknolojisi ve ek bir mekanik buhar sıkıştırma sistemi altında alternatif teknolojiler incelenmiştir. Bu teknolojilerin birbiriyle kullanılmaları toplam 144 teknoloji kombinasyonu oluşturmaktadır.

### Şekil 38. Birincil Alüminyum Üretim Süreçleri için Teknoloji Seçenekleri



Model, karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmak için çeşitli teknolojilerin çeşitli kombinasyonlarını oluşturmaktadır. Optimizasyon modeli teknolojilerin devreye giriş yılları, maliyetleri (CAPEX&OPEX), üretim ve talep projeksiyonları, emisyon seviyeleri gibi parametrelili değerlendirilmektedir. Emisyon hedeflerini gözeterek maliyet etkin bir yol haritası çıkaran model, maliyetlerin net bugünkü değerlerinin en az olacağı çözümü bulmaya çalışmaktadır. Model sonucu, teknolojilerin devreye giriş yılları ile ilgili öngörülerini ortaya koyarak senaryo bazlı teknolojik dönüşümü vermektedir.

#### 2.2.3. Model Sonuçları

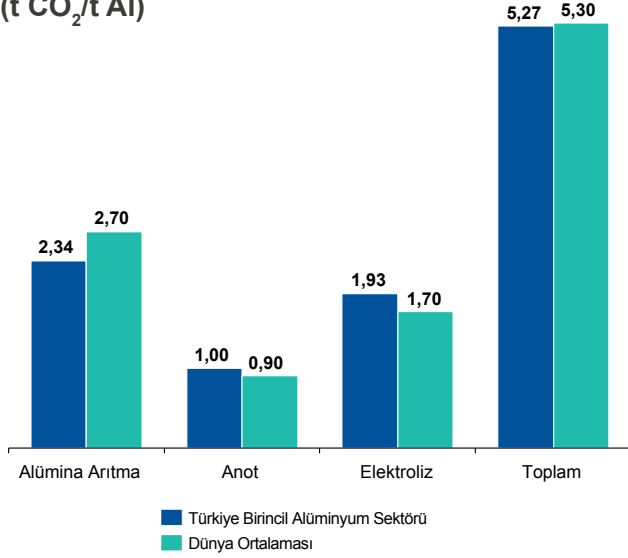
Türkiye'nin anot ve elektrolizden kaynaklanan birincil alüminyum emisyonları küresel ortalamadan daha yüksek olmasına rağmen, alümina rafinasyon sürecinden kaynaklanan emisyonların azalması, ülkenin toplam emisyonlarını küresel ortalama emisyonlardan biraz daha düşük hale getirmektedir.<sup>48</sup>

Sektör temsilcileriyle yapılan görüşmelere dayanarak, yenilenebilir enerjiye yapılması planlanan yatırımlarla birlikte, Türkiye birincil alüminyum sektörünün kapsam 2 emisyonlarının kademeli olarak azalması ve 2023 yılı sonunda sıfıra ulaşması beklenmektedir.

Bir birincil alüminyum üreticisinden alınan bilgilere göre, kullanılan elektrikte yenilenebilir enerjinin payı 2021'de %51'den 2022'de %94'e yükselmiştir. Bununla birlikte şebeke ve kömürün payı sırasıyla %5 ve %1'e düşmüştür. Üretim tesisinde yenilenebilir enerji oranının artması, 2022 yılında şirketin emisyonlarını üretilen ton alüminyum başına 5,52 CO<sub>2</sub>'ye düşürmüştür. Ton alüminyum başına ortaya çıkan CO<sub>2</sub>'nin 5,27'si kapsam 1 emisyonlarından ve 0,25'i kapsam 2 emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Şirketin üretim tesisinde %100 yenilenebilir enerji uygulamayı başarması halinde, 2023 yılı sonunda şirketin toplam emisyonları tamamı kapsam 1 emisyonlarından oluşacak ve 5,27 t CO<sub>2</sub>/ t Al'e düşecektir.

<sup>48</sup>Sektör Temsilcileri, IAI, Uzman Görüşü

**Şekil 39. Küresel Ortalamalara Kıyasla Türkiye'nin Proses Bazlı Emisyonları (t CO<sub>2</sub>/t Al)**



Türkiye'deki birincil alüminyum endüstrisinin emisyonlarının büyük ölçüde proses emisyonlarından kaynaklanması nedeniyle, bu emisyonları azaltmak için bir optimizasyon modeli tasarlanmıştır. Birincil alüminyum üretimi, üretim süreçlerindeki farklı teknolojiler dikkate alınarak modellenmiştir. Bu bağlamda, birincil alüminyum üretim sürecinde önemli emisyon yoğunluğuna sahip 3 farklı üretim süreci öğütme, kalsinasyon ve ergitme aşamaları altında değerlendirilmiştir. Mevcut üretim teknolojisi; kömür kazanı, gaz kalsinatörü ve karbon anotları kullanmak olup, birincil alüminyum üretiminde Türkiye'deki mevcut durumu incelemek için kullanılmaktadır.

**Şekil 40. Türkiye Birincil Alüminyum Üretimi - Mevcut Teknolojiler**

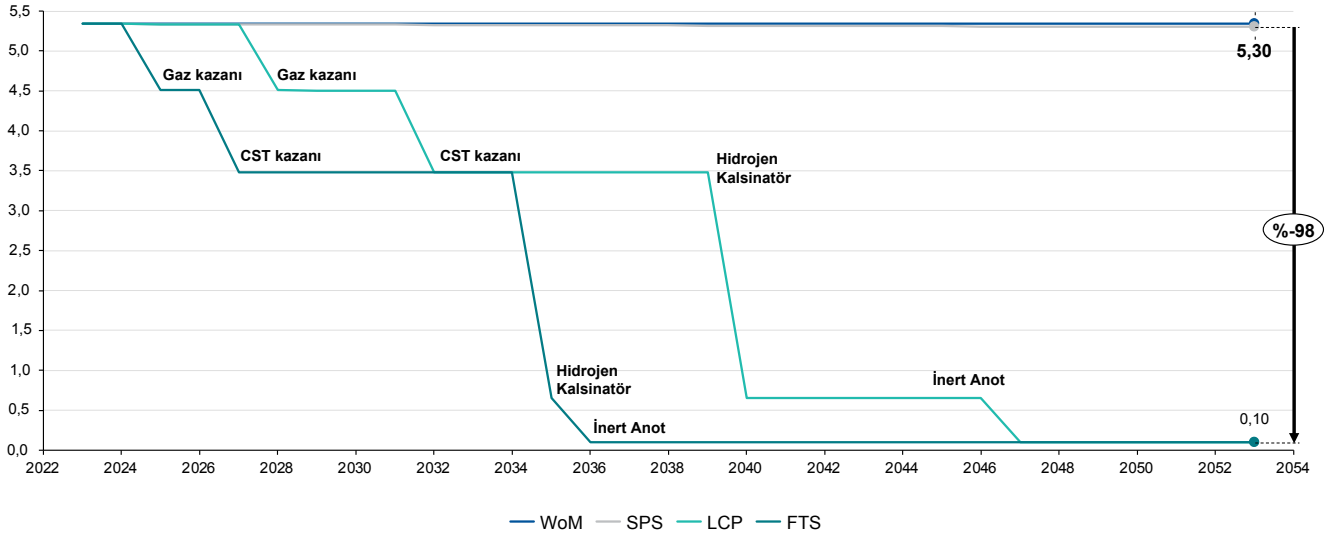


## Emisyonlar

Türkiye birincil alüminyum sektörü için oluşturulan referans senaryolarından WoM senaryosunda emisyon yoğunluk seviyesi, herhangi bir teknolojik dönüşüm öngörülmediği için tahmin ufku boyunca mevcut emisyon yoğunluk seviyesine eşit gerçekleşmektedir. Azaltım senaryolarında ise teknolojik dönüşümle birlikte emisyon yoğunluğunun 2053 yılında %98 oranında azalması beklenmektedir.

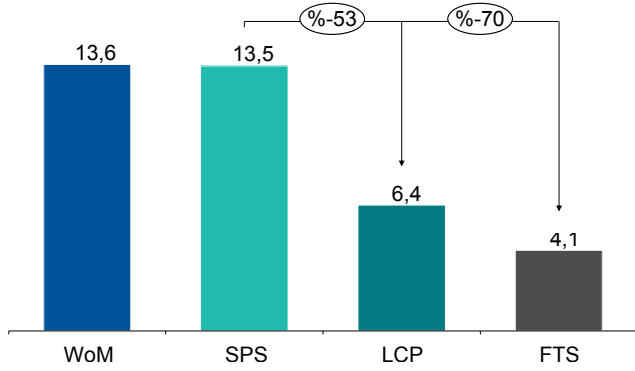
Mevcut durumun devam edeceğini varsayan WoM senaryosundaki emisyon yoğunluğu, ton alüminyum başına 5,34 ton CO<sub>2</sub>'ye karşılık gelmektedir. Yeni teknolojilerin entegrasyonu ile emisyon yoğunluğu LCP ve FTS için 2053 yılına kadar 0,10 t CO<sub>2</sub>/ t Al seviyesine düşmektedir. Her iki azaltım senaryosunun da farklı teknoloji devreye giriş yılları ile birlikte aynı teknolojik dönüşümü gerçekleştirmesi beklenmektedir. Bu nedenle, FTS senaryosunda emisyon yoğunluğu 2036 yılında 0,10'a ulaşırken, LCP senaryosu 2047 yılında aynı yoğunluğa ulaşmaktadır.

**Şekil 41. Emisyon Yoğunluğu (t CO<sub>2</sub>/ t Al)**



Hiçbir teknolojik dönüşümün öngörülmediği WoM senaryosunda, beklendiği üzere diğer senaryolara kıyasla emisyonların en yüksek seviyede gerçekleşmesi beklenmektedir. Modelleme çalışmasına göre WoM senaryosunda, 2023-2053 yılları arasında 12,5 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyon meydana gelmesi tahmin edilmektedir. Diğer bir referans senaryo olan SPS senaryosu için toplam emisyonlar WoM senaryosu ile neredeyse aynıdır. Yeni teknolojilerin devreye alınması ile birlikte önemli ölçüde emisyon azaltımı sağlayabilen LCP senaryosunda 2023-

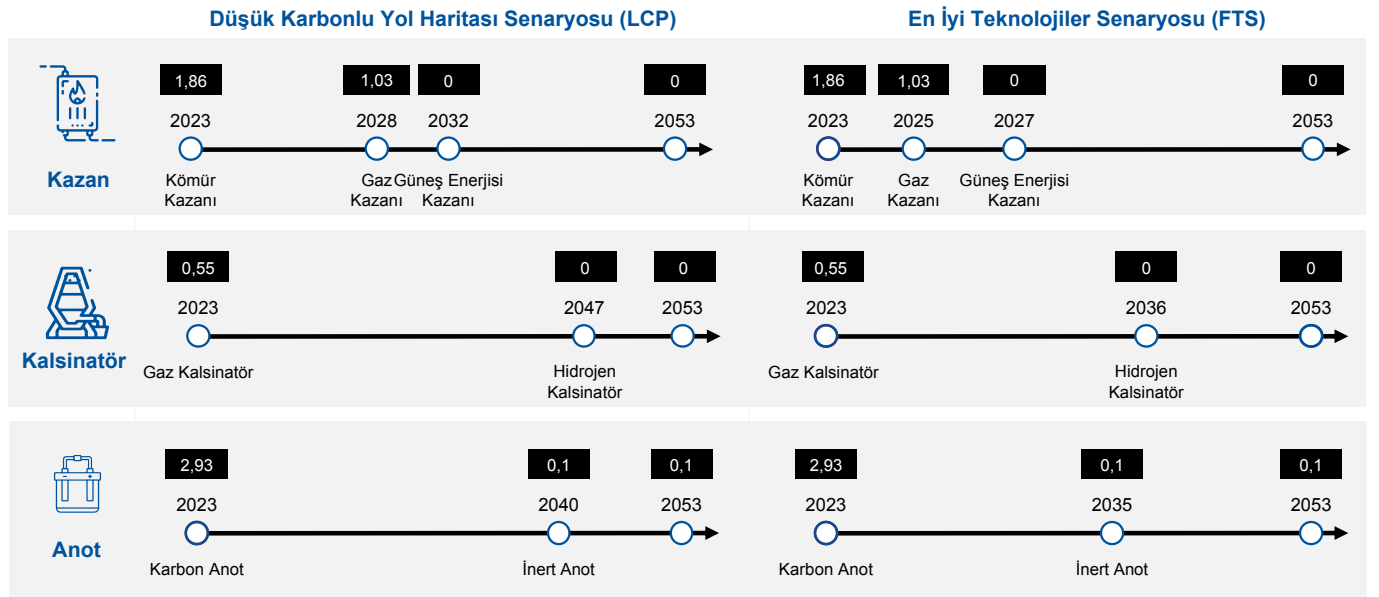
2053 yılları arası toplam emisyon 6,38 milyon ton CO<sub>2</sub> seviyesine kadar gerilemektedir. Daha agresif teknolojik dönüşüm gerçekleştiren FTS senaryosunda ise aynı dönemde toplam emisyonlar 4,10 milyon ton CO<sub>2</sub> seviyesine kadar düşebilmektedir. Bütün modelleme dönemi boyunca senaryo bazlı toplam emisyonlar incelendiğinde ise, referans senaryo olan SPS'ye kıyasla LCP senaryosu %53, FTS senaryosu ise %70 oranında emisyon azaltımı sağlayabilmektedir.

Şekil 42. Birincil Üretimde 2023-2053 Yılı Toplam Emisyonlar (Mt CO<sub>2</sub>)

### Teknolojik Dönüşüm

Yeni teknolojilerin üretim sürecine entegrasyonu emisyonlarda azalma sağlamaktadır. Optimizasyon modelinin sonucuna göre her iki azaltım senaryosu da aynı teknolojik dönüşüm yolunu seçmiş fakat teknolojilerin devreye giriş yılları değişiklik göstermektedir. Bu teknolojik dönüşüm öğütme sürecinde önce gaz kazana daha sonra güneş enerjili kazana dönüşüm ile başlamaktadır. Akabinde kalsinasyon sürecinde geleneksel gaz kalsinatörü LCP senaryosunda 2047 yılında, FTS senaryosunda ise 2036 yılında hidrojen kalsinatöre dönüşmektedir. Son olarak en çok emisyonu sebep olan ergitme sürecinde karbon anot yerini inert anot teknolojisine bırakmaktadır. İnert anot teknolojisinin devreye giriş yılı LCP için 2040, FTS için ise 2035 olarak öngörülmektedir.

Şekil 43. Birincil Alüminyum Üretimi için Teknolojik Dönüşüm



■ Üretilen bir ton alüminyum başına ortaya çıkan ton CO<sub>2</sub> emisyonu

## 2.3. Alüminyum İşleme Modelleme Sonuçları

Alüminyum işlemedeki teknolojik dönüşüm, farklı fırın tiplerine göre modellenmiştir. Proje kapsamında değerlendirilen mevcut ve yeni fırın tiplerinin üretimdeki dağılımı ile bunlara ilişkin maliyetler, verimlilikler ve emisyon yoğunlukları sektör uzmanları ve sektör temsilcileriyle yapılan kapsamlı görüşmeler sonucu oluşturulmuştur. Modelleme çalışması kapsamında 2 referans (WoM ve SPS) ve 2 azaltım (LCP ve FTS) senaryosu geliştirilmiştir.

Referans senaryolarda teknolojik dönüşüm öngörülmemiştir. Azaltım senaryolarından LCP senaryosunda teknolojik dönüşüm ileri düzey reverber fırınlara CCS entegrasyonu ve elektrikli reverberlere dönüş şeklinde öngörülmüştür. Bu dönüşüm sonucunda 30 yıl içinde toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarında SPS senaryosuna kıyasla %53 azaltım sağlanabilmektedir. Emisyon yoğunluğu incelendiğinde ise 2053 yılında SPS senaryosuna kıyasla %92 oranında azaltıma erişilebilmektedir. Üretimde daha gelişmiş fırınlara geçişin gerektirdiği yatırım maliyetinin NBD'si LCP senaryosu için 1,55 milyar dolar olarak hesaplanmaktadır.

FTS senaryosundaki teknolojik dönüşüm LCP ile aynı olsa da teknolojiler daha erken tarihlerde devreye girmektedir. 2053 yılında üretimde fırın dağılımında en yüksek pay ileri seviye reverber+CCS ve elektrikli reverberdir. Ek olarak

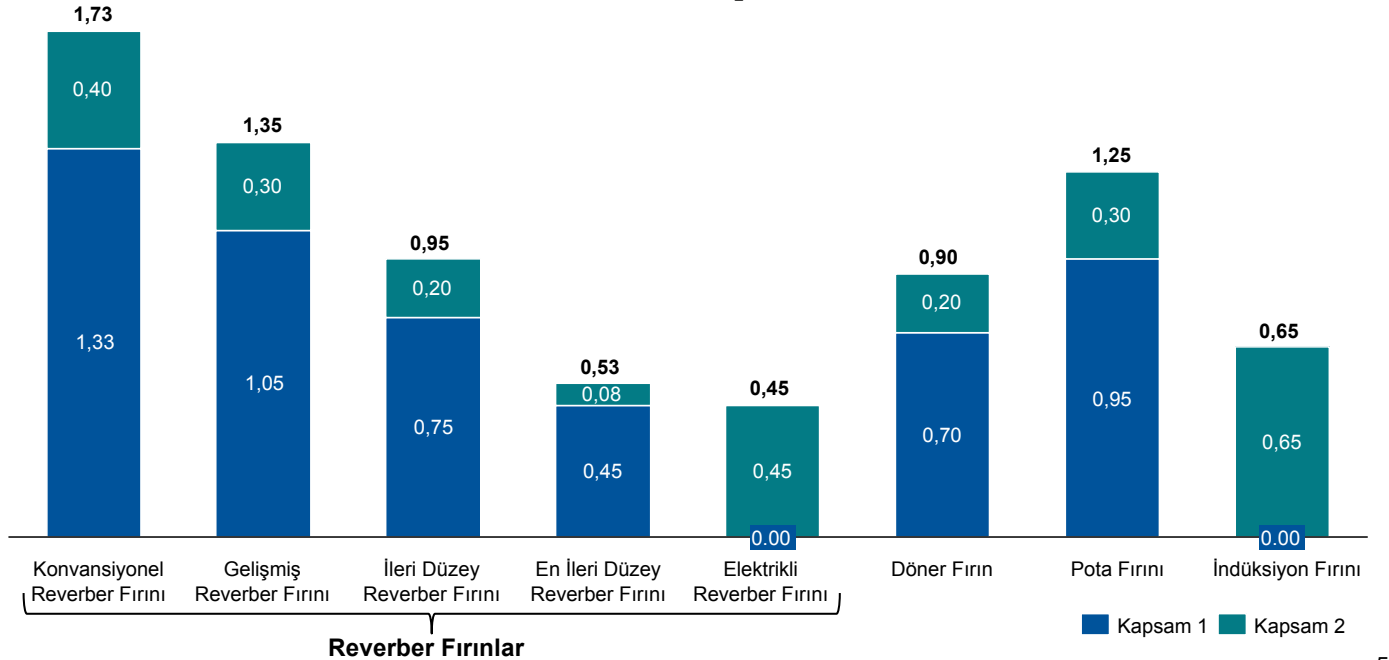
CCS entegrasyonu reverber olmayan diğer fırınlarda da öngörülmektedir. FTS senaryosu SPS senaryosuna kıyasla senaryoda önümüzdeki 30 yıl içinde kümülatif emisyonlarında %64 oranında azaltım sağlayabilmekte ve emisyon yoğunluğunu 2053'te %94 azaltabilmektedir. FTS senaryosuna için öngörülen teknolojik dönüşümün 2 milyar dolarlık (NBD) bir yatırım gerekmektedir. FTS senaryosu daha agresif bir dönüşüm öngördüğü için yatırım gerekliliği LCP senaryosuna kıyasla yaklaşık 500 milyon dolar daha fazladır.

### 2.3.1. Düşük Karbon Alüminyum İşleme Teknolojileri

Alüminyum işleme, birincil metali ve alüminyum hurdasını yarı mamul ve mamul alüminyum ürünlerine dönüştürme sürecini ifade eder. Alüminyum işlemede en yüksek emisyonu yaratan süreç, fırınlar tarafından gerçekleştirilen birincil metal ve hurdayı eritme işlemidir.

**Alüminyum işlemede 4 farklı fırın tipi kullanılmaktadır. Bunlar reverber fırın, pota fırın, döner fırın ve indüksiyon fırındır<sup>49</sup>.** Her ne kadar her fırının farklı bir üretim teknolojisi, kapasitesi ya da kullanım alanı olsa da **halihazırda Türkiye'deki üretimin %80'i reverber fırınlarla yapılmaktadır.** Farklı fırın tiplerinin ortalama emisyonları aşağıda belirtilmektedir.

Şekil 44. Fırın Tiplerine göre Emisyon Seviyesi (t CO<sub>2</sub>/t Al)<sup>50</sup>



<sup>49</sup>Fırın tiplerinin ayrıntılı açıklaması Ek 2'de sunulmaktadır

<sup>50</sup>Uzman görüşü, PwC Analizi

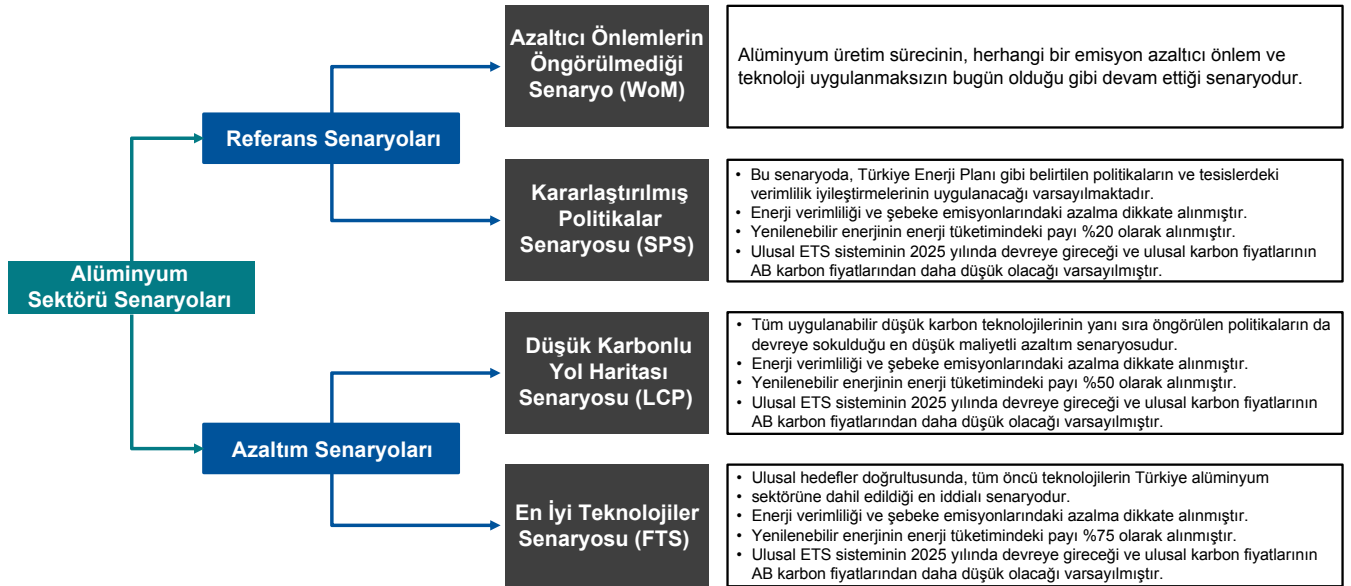
Reverber fırın üretim sürecinde enerji kaynağı olarak doğal gaz ve elektrik kullanılmaktadır. Reverber olmayan fırınlar arasından döner fırın ve pota fırınların ana enerji kaynağı doğalgaz iken, indüksiyon fırınların ana enerji kaynağı elektriktir. Dolayısıyla döner fırın ve pota fırınlar kapsam 1 ve kapsam 2 emisyonu meydana getirirken, indüksiyon fırınların tek emisyon kaynağı elektrikten kaynaklanan kapsam 2 emisyonlarıdır.

### 2.3.2. Senaryo Analizi ve Modelleme Yaklaşımı

Alüminyum işleme için oluşturulan senaryolar Şekil 45'te detaylı halde açıklanmıştır. Alüminyum işleme rotasında referans ve azaltım senaryoları fırın tipi dağılımı ve verimlilik artışı bazında farklılık göstermektedir. Alüminyum işleme modellemesindeki diğer önemli varsayımlar ise şöyledir:

- Fırınlarda CCS entegrasyonu için devreye giriş yılı 2040 olarak belirlenmiştir.
- Türkiye alüminyum sektöründe elektrikli reverber fırının ticari olarak kullanılabileceği yıl 2040 olarak öngörülmüştür.

**Şekil 45. Alüminyum İşleme Senaryoları**

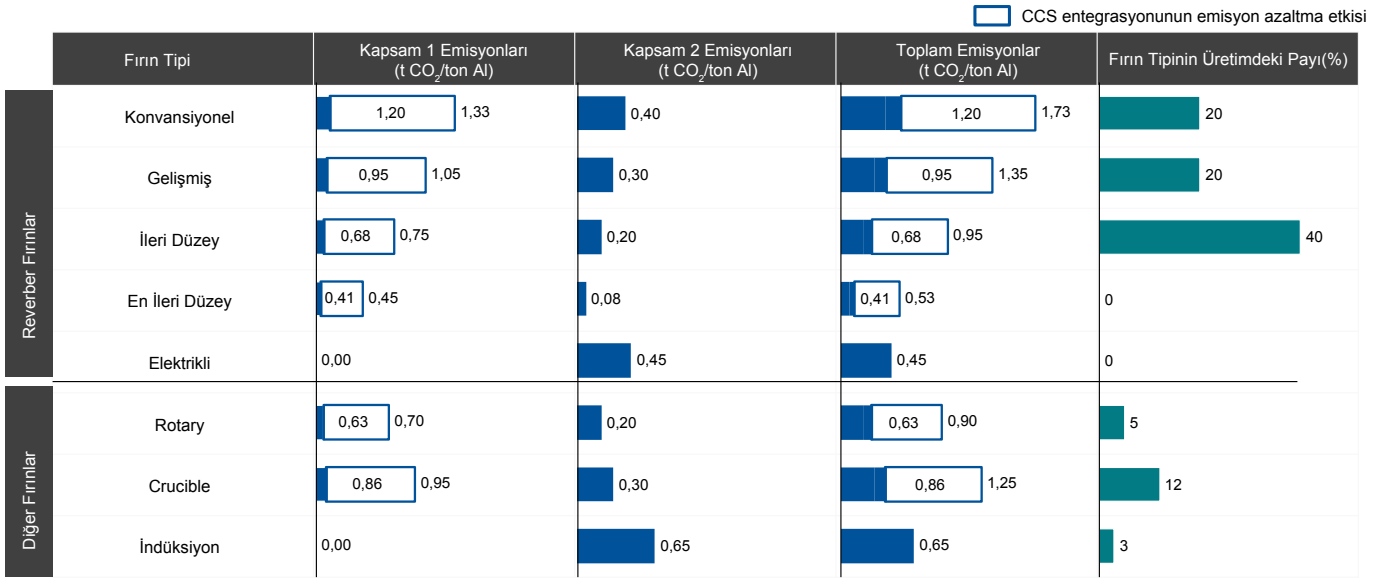


Alüminyum işleme modeli, bir önceki bölümde de açıklandığı şekilde fırın tipleri baz alınarak geliştirilmiştir. Elektrikli reverber fırın ve indüksiyon fırın dışındaki tüm fırınlar birincil enerji olarak doğal gaz kullandığı için daha yüksek kapsam 1 emisyonuna yol açmaktadır.

Başlangıç olarak fırın dağılımı, bu fırınların CO<sub>2</sub> yoğunlukları ve karbon bütçesi açısından Türkiye'nin mevcut durumu incelenerek modelin temeli kurulmuş ve sektör için gelecekteki alternatif olabilecek durumlar geliştirilmiştir. Proje uzmanları

ve sektör temsilcileriyle yapılan görüşmelere göre, reverber fırın ve reverber olmayan fırın arasındaki mevcut üretim dağılımının %80 ile %20 olduğu varsayılmaktadır. Fırın tiplerinin CO<sub>2</sub> yoğunlukları ve bunların Türkiye'deki yaklaşık üretim payı Şekil 46'da görülebilir.

**Şekil 46. Fırın Tipine göre Türkiye'de Alüminyum İşlemenin Dağılımı ve Emisyon Seviyeleri<sup>51</sup>**



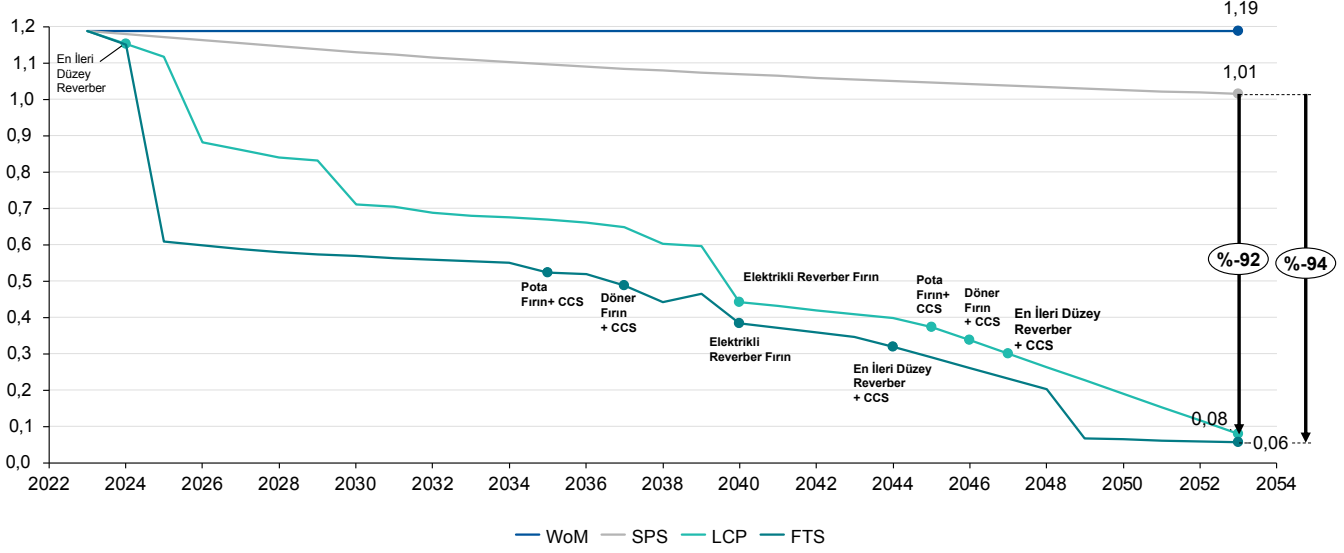
GAMS yazılımı kullanılarak geliştirilen model, üretim ve emisyon hedeflerini dikkate alınırken toplam yatırım NBD'si azaltılma amacı taşımaktadır. Bunu yaparken de fırın tiplerinin yatırım maliyetlerini (CAPEX, OPEX), ETS fiyatı, CO<sub>2</sub> emisyonları, yenilenebilir enerji payı, yıllık verimlilik kazanımları ve şebeke emisyon azaltım projeksiyonu gibi parametreleri dikkate almaktadır.

Modelde sektör temsilcileri ve uzmanların yönlendirmesi ile fırın tiplerinin üretimde alabilecekleri azami paylar belirlenmiştir. Mevcut durumda alüminyum işleme sektöründe reverber fırınların üretimde payı %80, reverber olmayan fırınların oranı ise %20'dir. Bu dağılımın gelecekte de korunacağı öngörülmektedir. Reverber olmayan fırınların toplam üretimde sahip olabilecekleri maksimum paylar ise döner fırın için %12,2, indüksiyon fırın için ise maksimum %7,8 olarak belirlenmiştir. Modelleme sonuçları, Türkiye alüminyum işleme sektörünün düşük karbonlu üretim sürecinde yıl haritasını oluşturmak için kullanılmaktadır.

### 2.3.3. Model Sonuçları Emisyonlar

Proje kapsamında 4 farklı senaryo için yıl bazlı fırın dağılımlarını belirlemek için bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. 9 farklı fırın tipi ve fırınlara CCUS entegrasyonu değerlendirilmiştir. Üretimde fırın dağıtımının mevcut durumdaki gibi devam ettiğinin varsayıldığı WoM senaryosunda emisyon yoğunluğu beklendiği gibi en yüksek (1,19 t CO<sub>2</sub>/t Al) seviyededir. Süreç verimliliği ve şebeke emisyonlarında düşüşün öngörüldüğü SPS senaryosunda ise emisyon yoğunluğu 1,01 t CO<sub>2</sub>/t Al seviyesine düşmektedir. Kapsam 1 ve kapsam 2 emisyon yoğunluğu, 2053 yılında SPS senaryosunda kıyasla LCP'de %92, FTS senaryosunda ise %94 oranında düşüş sağlanabilmektedir.

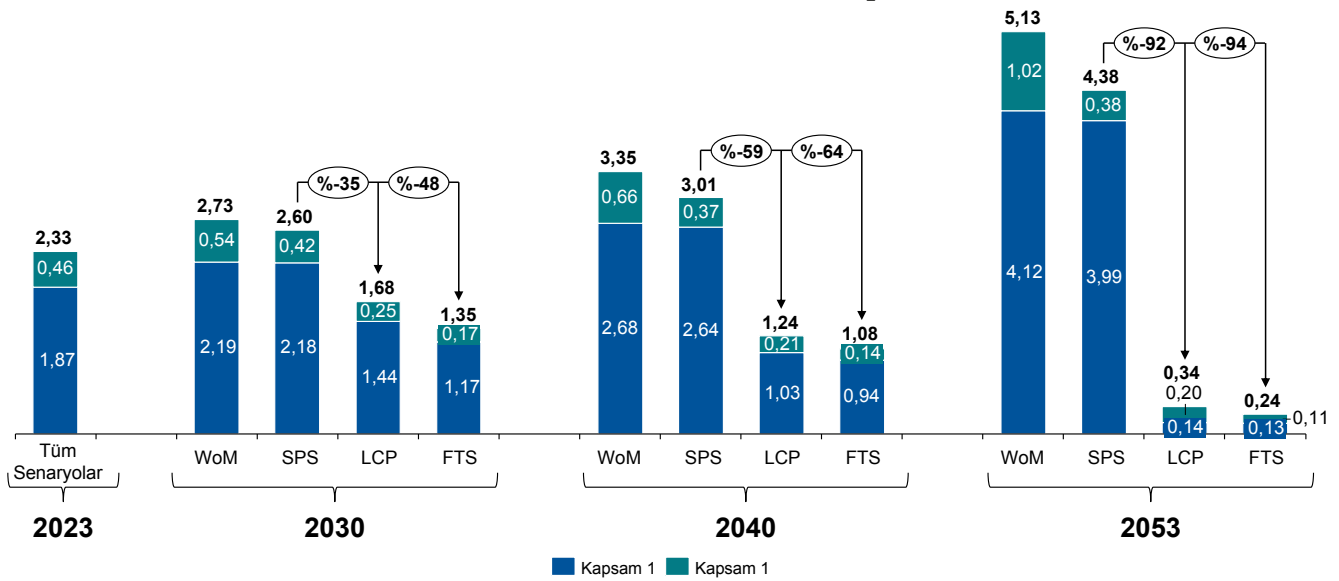
<sup>51</sup>Uzman görüşü, PwC Analizi

Şekil 47. Kapsam 1 & 2 Emisyon Yoğunluğu (t CO<sub>2</sub>/t Al)

2030 sonrasında daha gelişmiş fırınlara geçiş ve CCS teknolojisinin devreye alınması ile emisyonlarda düşüş elde edileceği öngörülmektedir. Kapsam 1 emisyonlarının ileri teknoloji fırınlara geçiş dolayısıyla düşmesi; Kapsam 2 emisyonlarının ise elektrik şebeke emisyonlarındaki kademeli düşüş nedeniyle azalması beklenmektedir.

2023 yılında, mevcut fırın dağılımı ile alüminyum işlemenin sebep olduğu toplam emisyon miktarı 2,33 milyon tondur

(1,87'si kapsam 1; 0,46'sı ise kapsam 2 dahilindedir). 2053 yılında WoM ve SPS senaryolarındaki toplam yıllık emisyonlar sırasıyla 5,13 milyon ton ve 4,38 milyon tondur. Azaltım senaryolarından LCP senaryosu SPS'ye kıyasla %92 oranında bir azaltım sağlayabilir ve 2053'te 0,34 milyon tona emisyonu düşürebilmektedir. Daha agresif FTS senaryosu ise SPS'ye kıyasla %94'lük azaltım sağlayabilmekte ve toplam yıllık emisyonlarını 0,24 milyon ton seviyesine düşürebilmektedir.

Şekil 48. Yıllık Toplam Kapsam 1&2 Emisyon Seviyeleri (Mt CO<sub>2</sub>)

## Teknolojik Dönüşüm

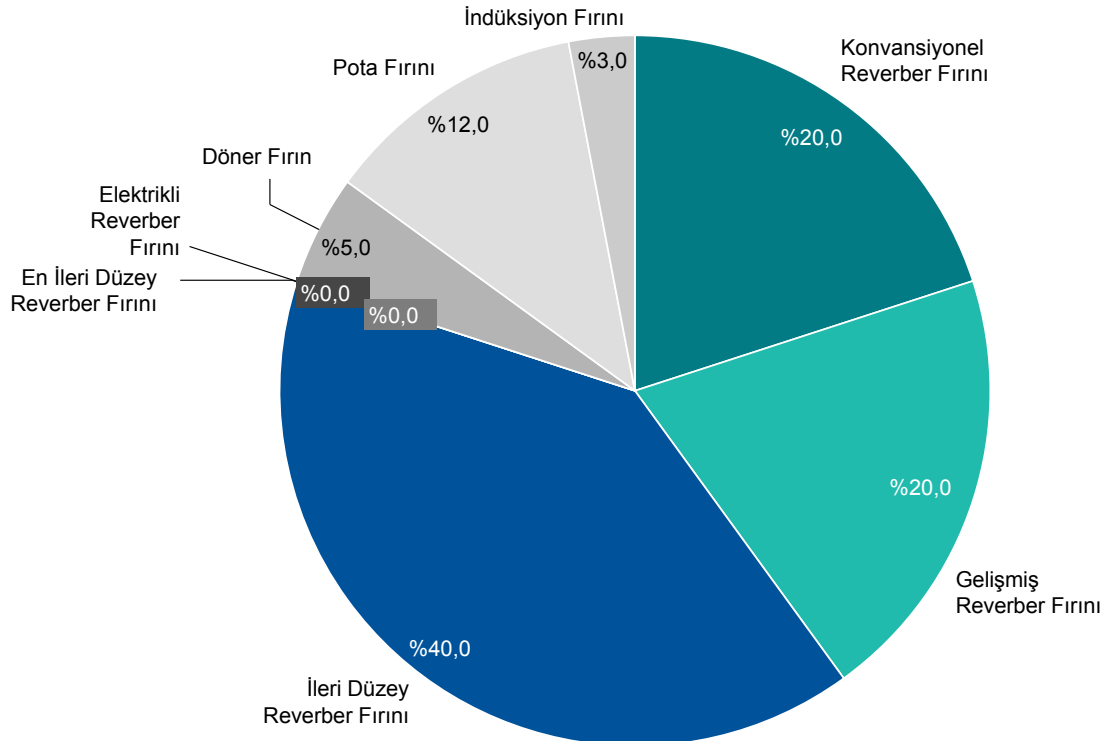
Alüminyum işlemede emisyon azaltımı üretimde kullanılan fırın tipleri ile doğrudan alakalıdır. Proje uzmanları ve sektör temsilcileriyle yapılan kapsamlı görüşmeler sonrasında üretimdeki fırın dağılımının %80 oranında reverber fırın ve %20 oranında ise diğer fırınlar şeklinde olacağı varsayılmaktadır. Üretimdeki reverber fırınların kendi içerisindeki dağılımı ise %20 geleneksel reverber, %20 gelişmiş reverber ve %40 ileri derecede gelişmiş reverber fırınlar olarak belirlenmiştir. Reverber olmayan fırınların üretimdeki payları ise %5 döner fırın, %12 pota fırın ve %3 indüksiyon fırını olarak belirlenmiştir.

WoM ve SPS senaryolarında fırın dağılımının olduğu gibi devam ettiği varsayılırken azaltım senaryosunda ise optimal fırın dağılımı modelleme sonucunda elde edilmektedir. Optimal

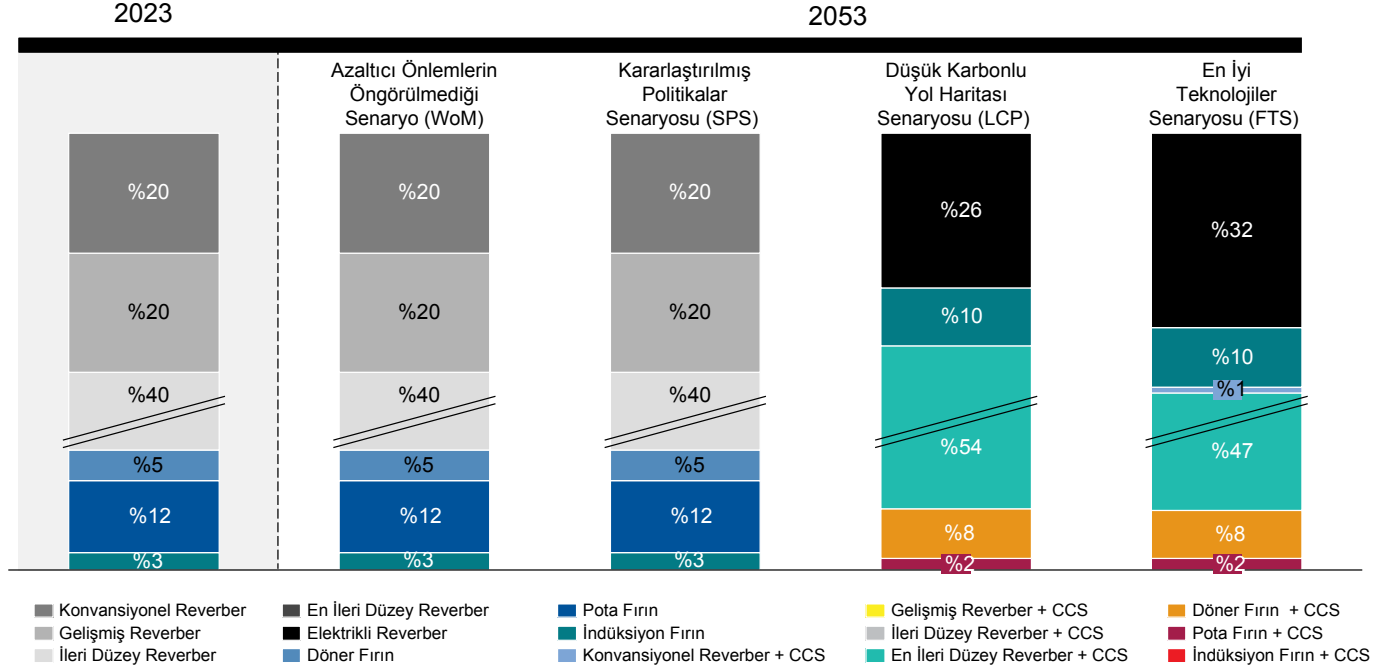
senaryo olan LCP senaryosunda 2053'te en yüksek üretim payına sahip fırın tipi %54'lük bir payla ileri teknoloji reverber fırınıdır. Bunu %26'lık payla elektrikli reverber fırın, %10'lık payla indüksiyon fırın ve %8'lik payla döner fırın+CCS takip etmektedir. Üretimdeki en düşük paya sahip fırın tipi %2'lik payla pota fırını+CCS'dir.

Dönüşümün daha agresif olduğu FTS senaryosunda ileri teknoloji reverber + CCS payı %47 iken, elektrikli reverber payı %32'ye çıkmaktadır. İndüksiyon fırınların payı her iki azaltım senaryosunda da aynıdır.

**Şekil 49. Mevcut Üretim Miktarlarına Göre Fırın Dağılımı**



Şekil 50. Alüminyum İşleme için Teknolojik Dönüşüm Öngörüsü

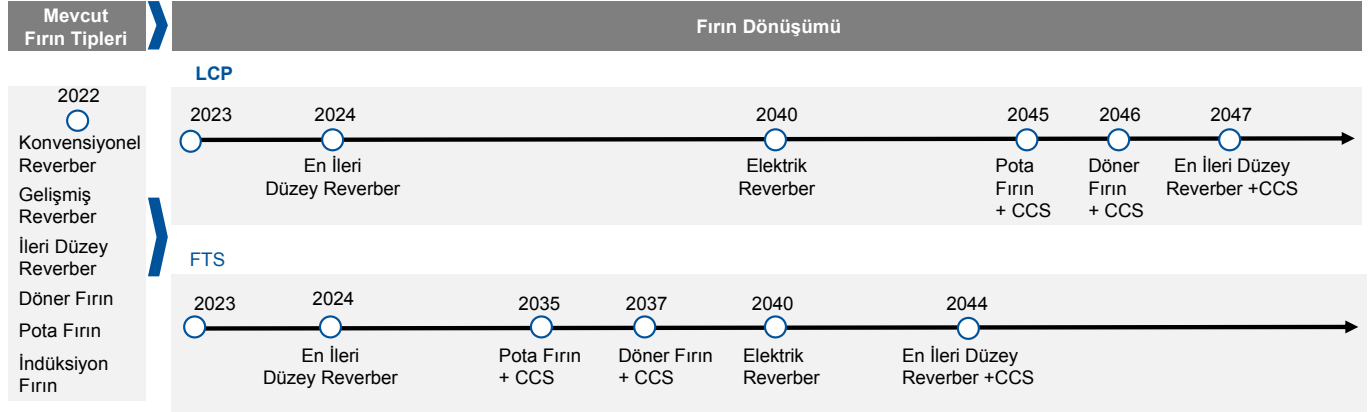


İki azaltım senaryosu da farklı zaman dilimlerinde olmak üzere aynı teknolojik dönüşümü öngörmüştür. Emisyon azaltımı hedefleri doğrultusunda en ileri düzey reverber fırın her iki azaltım senaryosunda da modelleme periyodunun yılında devreye alınmaktadır.

LCP senaryosu için ilk fırın dönüşümü 2024 yılında ileri düzey reverber fırının devreye girmesiyle gerçekleşmektedir. Elektrikli reverber fırın ise Türkiye alüminyum sektöründe ticari olarak kullanılabileceği ilk yıl olan 2040 yılında devreye alınmaktadır. Reverber olmayan fırındaki ilk geçiş pota fırında CCS entegrasyonudur. CCS entegrasyonu bir yıllık aralıklarla döner fırın ve ileri düzey reverber fırınlara da uygulanmaktadır.

FTS senaryosunda ileri teknoloji reverber fırın ve elektriklik reverber fırınların devreye giriş yılları LCP senaryosu ile aynıdır. Reverber olmayan fırında ise CCS entegrasyonunun pota fırınlarda 2035'de devreye alınmasıyla LCP'den daha erken başlamaktadır. Bu dönüşümü 2037'de döner fırın+CCS, 2044'te ise en ileri teknoloji reverber+CCS takip etmektedir.

## Şekil 51. Alüminyum İşleme için Fırın Dönüşümü



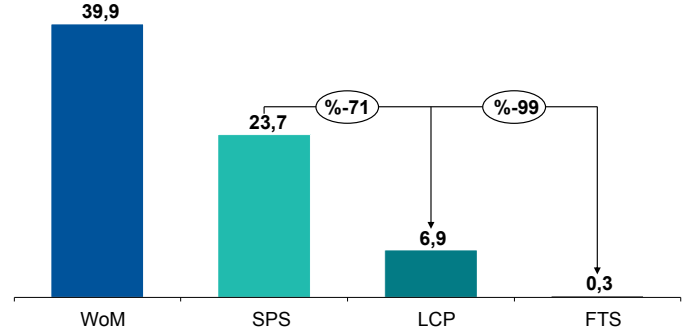
### 2.4. Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyonları

Türkiye 2022 yılında yaklaşık 1,77 milyon ton işlenmemiş alüminyum ithal etmiştir.<sup>52</sup> İthal edilen alüminyuma gömülü olarak yaklaşık 18 milyon ton CO<sub>2</sub> girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonu bulunmakta ve Türkiye alüminyum endüstrisinin toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının neredeyse %85'ini oluşturmaktadır.

Girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonları için temel emisyon azaltım yolu, üretimdeki hurda payının artırılması ve ithalat ortaklarındaki emisyon azaltım adımları ile daha düşük emisyon salımına neden olan ülkelere öncelik verilmesidir. Bu nedenle, girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonlarının analizi için geliştirilen dört senaryo, farklı hurda kullanım seviyeleri ve farklı birincil metal ithalat rotalarıyla tasarlanmıştır.

Mevcut durumda ithal edilen külçe alüminyumun ortalama emisyon yoğunluğu, 10,6 t CO<sub>2</sub>/t Al olarak hesaplanmaktadır. LCP senaryosunda ithal edilen külçe alüminyumun emisyon yoğunluğu 2053'te %67 oranında düşerek 2,1 t CO<sub>2</sub>/t Al değerine gerileyebilmektedir. FTS senaryosu için ithal edilen külçe alüminyum emisyon yoğunluğu kaynak ülkelerdeki teknolojik gelişmeler sayesinde 0,1 t CO<sub>2</sub>/t Al değerine kadar düşebilmektedir. Diğer yandan, alüminyum işlemedeki üretimde mevcut durumda hurda payı %25'tir. Bu oranın LCP senaryosunda %35, FTS senaryosunda ise %50'ye çıkacağı varsayılmaktadır.

### Şekil 52. Senaryo Bazında 2053 Yılında Emisyonlar (Mt CO<sub>2</sub>)



İthal edilen külçe alüminyumun sebep olduğu girdi kaynaklı kapsam 3 toplam emisyonlarının 2053 yılında WoM senaryosunda 39,9 milyon tona ulaşması, SPS senaryosunda ise 23,7 milyon tona düşmesi beklenmektedir. Azaltım senaryolarında ise hem üretimde hurda payının artışı hem de düşük emisyonlu ülkelere ithalatın artmasıyla beraber emisyonlar LCP senaryosunda 6,9 milyon tona, FTS senaryosunda ise 0,3 milyon tona düşmektedir. Bu emisyon azaltımı SPS senaryosu ile kıyaslandığında LCP senaryosunda %71, FTS senaryosunda ise %99 emisyon azaltımına tekabül etmektedir.

<sup>52</sup>Comtrade, PwC Analizi

### 2.4.1. Senaryo Analizi ve Modelleme Yaklaşımı

Alüminyum işlemede girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonları, değer zincirindeki yukarı ve aşağı faaliyetlerinde meydana gelen sera gazı emisyonlarını ifade etmektedir. Bu emisyonlara katkıda bulunan en büyük faktör, alüminyum işlemede kullanılmak üzere ithal edilen külçe üretimidir. Gömülü emisyon hesaplamaları için, birincil metal ve hurda dağılımı senaryolara göre değiştirilmiştir. Ayrıca, Türkiye'nin külçe ithal ettiği ülkelerin emisyon faktörleri de dikkate alınmıştır. Girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonları için senaryolar Şekil 57'de verilmektedir.

Türkiye'nin alüminyum külçe ithal ettiği ticaret ortaklarını bulmak için uluslararası ticaret veri tabanları incelenmiştir. Türkiye'nin külçe alüminyum ithal ettiği başlıca ülkeler Rusya, Malezya, İran, Hindistan, Bahreyn, Katar, BAE, Umman, Tacikistan ve Kazakistan'dır.

### Şekil 53. Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyon Senaryoları

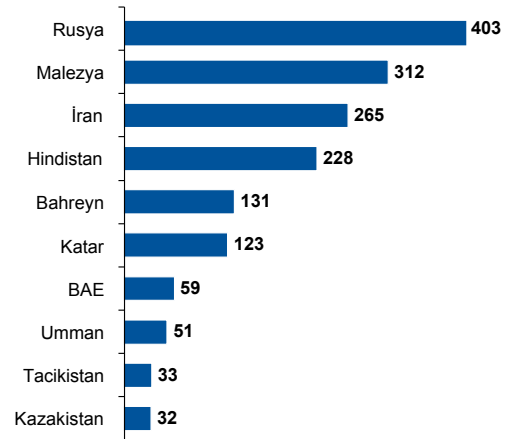


### Şekil 54. Türkiye'nin Külçe Alüminyum İthal Ettiği Ülkeler<sup>53</sup>

Türkiye'nin Ülkelere Göre İşlenmemiş Alüminyum İthalatı (2022, Ton)



Türkiye'nin En Çok İşlenmemiş Alüminyum İthal Ettiği 10 Ülke (2022, Bin Ton)

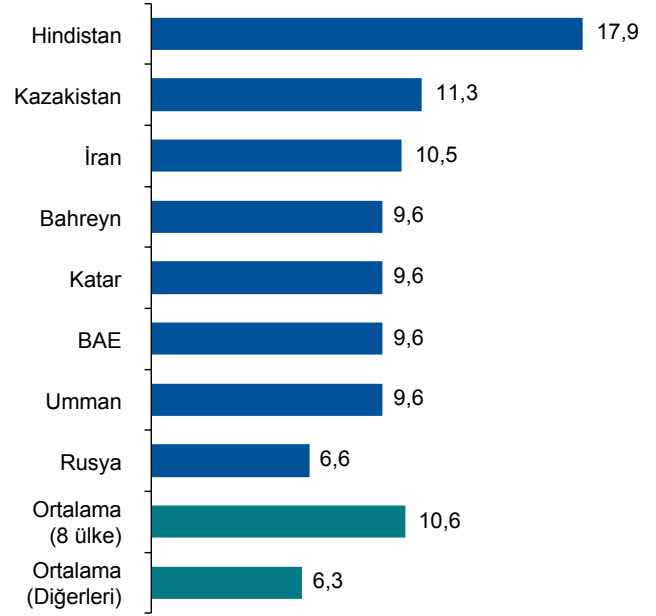


Türkiye'nin alüminyum külçe ithal ettiği ülkelerin emisyon yoğunlukları MPP verilerine dayanmaktadır. Türkiye'nin ticaret yaptığı ülkelerin tanımlanmasının ardından o ülkelerdeki çeşitli şirket arketipleri için CO<sub>2</sub> emisyonları kararlaştırılmıştır. Kamuya açık verilerin yokluğunda hangi şirket arketipleri ile ticaret yapıldığının tespit edilmesi mümkün olmamış ve bu sebeple ilgili ülkeleri temsil edecek şekilde ülkelerin CO<sub>2</sub> emisyonlarının ortalaması kullanılmıştır. Şirket arketipleri ve ülke üreticileri eşleştirilmiş, böylece ilgili ülkelerin ortalama CO<sub>2</sub> yoğunlukları belirlenmiştir. Türkiye'nin ithalat yaptığı ülkelerin emisyon yoğunlukları Şekil 55'te görülmektedir.

WoM senaryosunda Türk üreticilerin külçe alüminyumu en çok ithal ettikleri ülkelere devam edecekleri varsayılmaktadır. İlk sekiz ithalat ülkesinin her birinin emisyon yoğunluğu ortalamadan daha yüksektir. Bu 8 ülkenin ortalama CO<sub>2</sub> emisyon yoğunluğu her bir ton alüminyum için 10,6 t CO<sub>2</sub> değerindedir. Diğer üç senaryo için, külçe ithal edilen ülkelerde artan karbonsuzlaştırma politikalarının etkisi ve Türkiye'nin nispeten daha düşük CO<sub>2</sub> emisyon yoğunluklarına sahip ithalat ortaklarının sayısını artıracak varsayımı, CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltabilecek ana faktörler olarak kabul edilmiştir. Model, SPS senaryosunda üretilen alüminyum tonu başına 6,3 ton CO<sub>2</sub> seviyesine ulaşabilmektedir. Azaltım senaryolarında ise LCP ve FTS için girdi kaynaklı kapsam 3 CO<sub>2</sub> yoğunluğunda SPS'ye kıyasla sırasıyla %69 ve %98 azalma sağlanabilmektedir.

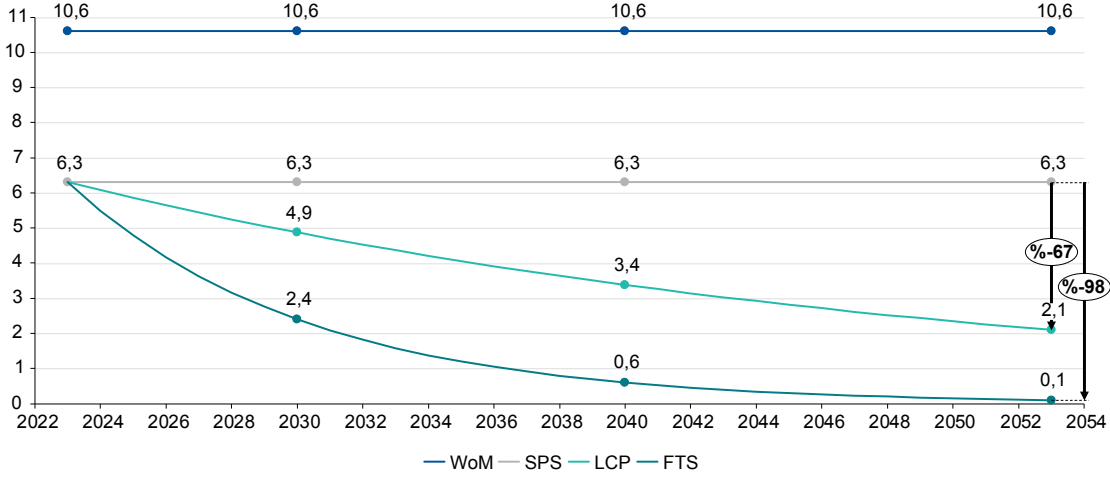
Alüminyum işleminin girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonlarını azaltmak için ikinci bir kaldıraç, girdi olarak alüminyum proses hurdası/ikincil alüminyum kullanımını artırarak ithal külçe ihtiyacını azaltmaktır. WoM ve SPS senaryoları için üretimde hurda payı %25'te sabit tutulurken, LCP ve FTS için üretimde hurda payının kademeli olarak sırasıyla %35 ve %50'ye yükseleceği tahmin edilmektedir.

**Şekil 55. Türkiye'nin En Çok İthalat Yaptığı Ülkelerin Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyon Yoğunlukları (t CO<sub>2</sub>/t Al)**

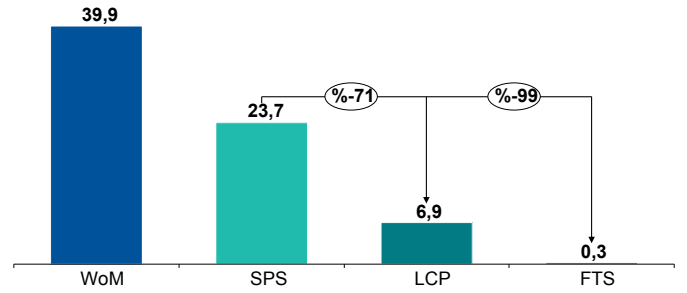


#### 2.4.2. Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Analizi Sonuçları

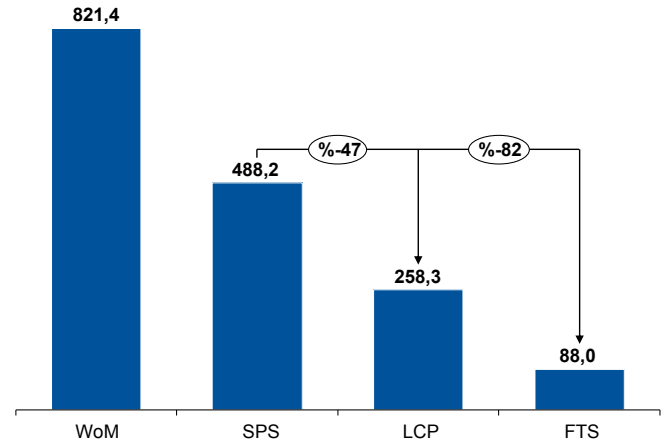
Alüminyum külçe ithal edilen ülkelerdeki teknolojik gelişmeler, verimlilik artışları ve ithalat yapılacak ülkenin seçimi, alüminyum işlemede girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonlarında büyük rol oynamaktadır. Senaryo bazında girdi kaynaklı kapsam 3 emisyon yoğunlukları Şekil 56'da görülmektedir.

**Şekil 56. Yıllara Göre Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyon Yoğunluğu (t CO<sub>2</sub> / t Al)**

Emisyon yoğunluklarındaki değişiklikler, özellikle sonraki yıllarda, farklı senaryolardaki girdi kaynaklı kapsam 3 emisyonları arasında önemli farklılıklara neden olmaktadır. 2053 yılında emisyonları WoM, SPS, LCP ve FTS için sırasıyla 39,9, 23,7, 6,9 ve 0,3 milyon tondur. Sağdaki şekilde, SPS'ye kıyasla LCP senaryosunun %71 oranında emisyon azaltımı sağladığı, FTS'nin ise yaklaşık %99 oranında emisyon azaltımı sağladığı görülmektedir.

**Şekil 57. 2053'te Senaryo Bazında Girdi Kaynaklı Kapsam 3 Emisyonları (Mt CO<sub>2</sub>)**

2023-2053 arası toplam emisyonlar incelendiğinde, azaltım senaryolarının emisyon azaltımındaki radikal etkisi görülmektedir. Hiçbir değişikliğin öngörülmediği WoM senaryosunda toplam emisyonlar 821, diğer referans senaryosu olan SPS senaryosunda ise 488 milyon tonu bulmaktadır. Öte yandan LCP senaryosu SPS'ye kıyasla emisyonlarını %47 düşürerek 2023-2053 yılları arası toplamda 258 milyon ton emisyon salımına sebep olmaktadır. Daha radikal değişikliklerin öngörüldüğü FTS senaryosunda ise bu yıllarda SPS'ye kıyasla %82 emisyon azaltımı gerçekleşmekte ve toplam emisyon 88 milyon tona gerilemektedir.

**Şekil 58. 2023-2053 Arası Toplam Emisyonları (Mt CO<sub>2</sub>)**

## 2.5. Karbon Azaltıcı Yatırım İhtiyacı

Türkiye alüminyum sektörünün ulusal karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşması karbon azaltıcı yeni teknolojileri devreye almasına bağlıdır. Proje kapsamında, senaryolar dahilinde sektörün karbon azaltımı için ihtiyaç duyduğu gerekli teknoloji yatırımları değerlendirilmektedir.

Türkiye alüminyum sektörünün net sıfır hedefine ilişkin toplam yatırım maliyetinin net bugünkü değerinin (NBD) LCP senaryosu için 1,7 milyar dolar FTS senaryosu için ise 2,2 milyar dolar seviyesinde olacağı hesaplanmaktadır. Birincil alüminyum üretiminin toplam üretimindeki payının düşük olması sebebiyle, teknolojik dönüşüm alüminyum işleme üretiminde daha fazla olmalıdır. (%88,9).

Türkiye alüminyum sektörünün karbonsuzlaşma hedefleri, finansman mekanizmalarının ve planlarının geliştirilmesi ihtiyacının altını çizmektedir. Bu nedenle, alüminyum sektörünün orta ve uzun vadede gerekli teknolojik dönüşümü gerçekleştirebilmesi adına zaman kaybetmeden kısa vadede ilave fonların harekete geçirilmesine yönelik tedbirlere öncelik verilmesi kritik önem taşımaktadır. Türkiye alüminyum sektörünün karbonsuzlaşma yatırımlarını teşvik etmek üzere ölçeklendirilmiş sermaye akışlarına erişebilmesi amacıyla politika yapıcıların ve finans kuruluşlarının iş birliği yapması ve finansman mekanizmaları geliştirmesi gerekmektedir.

### 2.5.1. Senaryo Bazlı Yatırım Maliyeti Projeksiyonları

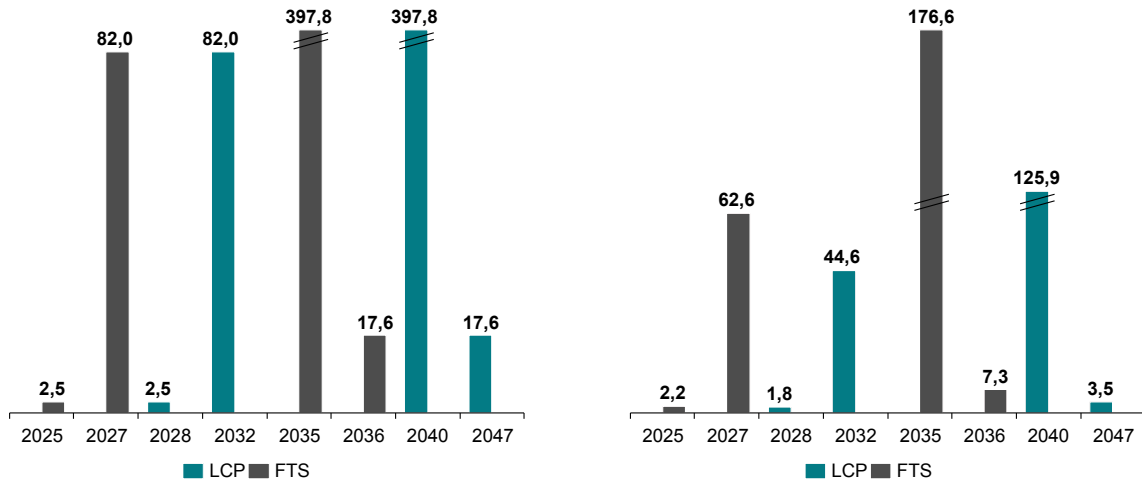
#### Birincil Alüminyum Yatırım Maliyeti

Birincil alüminyum üretiminde farklı azaltım senaryolarında farklı teknoloji kombinasyonları kullanılmıştır. Girdi ve teknoloji tabanlı veri setlerini kullanan optimizasyon modelinin amacı, çeşitli senaryolar kapsamında maliyeti en aza indirmektir. Böylece, farklı azaltım senaryoları için farklı maliyet ve yatırım ihtiyaçları ortaya çıkmaktadır.

Yatırım gereksinimleri teknolojik dönüşümle doğrudan ilgilidir. Senaryo bazlı maliyetler, teknolojilerin devreye girmesi ve teknoloji bazlı CAPEX ve OPEX değerlerinden oluşmaktadır. Bu nedenle teknolojik dönüşümün öngörülmediği WoM veya SPS senaryolarının yatırım maliyetleri hesaplanmamıştır.

Azaltım senaryolarında ise yatırım ihtiyacı teknolojilerin devreye girdiği yıllar bazında oluşmaktadır. Her iki azaltım senaryosu da aynı teknolojik dönüşümü öngörmekle birlikte, önceki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklandığı şekilde daha agresif FTS'de yatırımlar daha erken devreye girmektedir. Aşağıdaki grafikte görüldüğü gibi, azaltım senaryoları için gereken toplam nominal yatırım maliyeti ~500 milyon dolardır. LCP senaryosunda ilk teknoloji yatırımının 2028'de yapılması beklenirken, FTS senaryosunda ilk yatırımın bu tarihten üç yıl önce, yani 2025 yılında yapılması öngörülmektedir. En yüksek yatırım maliyeti gerektiren teknoloji inert anot olup, bu teknoloji LCP ve FTS'de sırasıyla 2035 ve 2040 yıllarında devreye alınmakta ve ~400 milyon dolarlık bir yatırıma ihtiyaç duyulmaktadır.

Şekil 59. Senaryo Bazında Yatırım Maliyeti & NBD (Milyon Dolar)



%7'lik bir iskonto oranı kullanılarak hesaplanan toplam yatırımın net bugünkü değerine göre, 2023-2053 döneminde, LCP senaryosunda toplam yatırım maliyeti 176 milyon dolar iken, bu rakam FTS senaryosunda 249 milyon dolara çıkmaktadır.

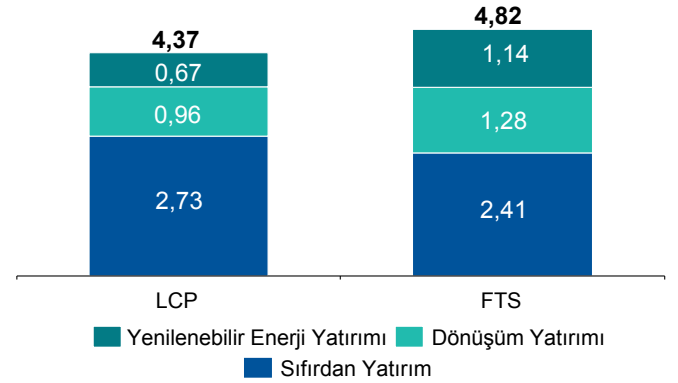
### Alüminyum İşleme Yatırım Maliyeti

Alüminyum işleme üretimi için belirlenen karbon azaltıcı teknolojiler farklı senaryoları dahilinde, fırın dağılımlarına, CCS teknolojisinin devreye giriş yıllarına ve yenilenebilir enerji yatırım oranlarına göre farklılık göstermektedir. Optimizasyon modelinin amacı, girdi ve teknoloji tabanlı veri setlerini kullanarak emisyon hedefleriyle uyumlu olarak maliyetleri azaltmaktır. Sonuç olarak, çeşitli azaltım senaryolarına ilişkin gerekli yatırımların maliyetleri tahmin edilmiştir. Senaryo bazlı maliyetler, teknolojilerin devreye girmesi ve teknoloji bazlı CAPEX ve OPEX değerlerinden oluşmaktadır. LCP ve FTS senaryolarında yatırım maliyeti kapasite artışı ve teknolojik dönüşüm sebebiyle gereklidir.

Yıllar içinde hem mevcut kapasitenin yüksek teknolojiye fırınlara dönüşmesi, hem de yeni kapasitenin yüksek teknolojiye fırınlar olarak kurulması öngörülmüştür. LCP senaryosunda, halihazırda kullanılan fırınların teknolojik dönüşümü dolayısıyla 0,96 milyar dolarlık bir fırın kapatma maliyeti de söz konusudur. Yeni fırınların inşası için ise ek olarak 2,73 milyar dolar tutarında bir kurulum maliyeti ortaya çıkmaktadır. Ek olarak, enerji tüketiminde yenilenebilir enerji payının 2053'e kadar %50'ye ulaşması öngörüldüğünden, 0,67 milyar dolarlık bir yenilenebilir enerji yatırımı da gerekmektedir. Dolayısıyla LCP senaryosundaki toplam yatırım maliyeti 4,37 milyar dolara ulaşmaktadır.

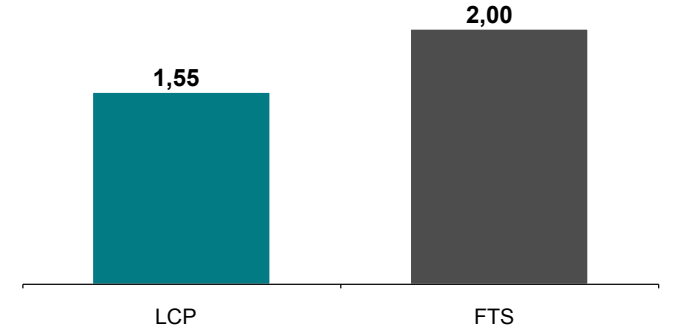
Daha agresif bir teknolojik dönüşüm öngören FTS senaryosunda ise toplam yatırım maliyeti 4,82 milyar dolardır. Bu yatırım maliyetinin 1,28 milyar doları kapanan fırınlardan, 2,41 milyar doları yeni açılan fırınlardan kaynaklanmaktadır. FTS senaryosu için enerjide yenilenebilir enerji oranının 2053'te %75'e ulaşması öngörülmüştür, bu da 1,14 milyar dolarlık bir yatırım maliyeti oluşturmaktadır.

**Şekil 60. 2023-2053 Arasında Gerekli Toplam Yatırım (Milyar Dolar)**



%7'lik bir iskonto oranı kullanılarak hesaplanan toplam yatırımın net bugünkü değerine (NBD) göre, 2023-2053 döneminde, LCP senaryosunda toplam yatırım maliyeti 1,55 milyar dolar iken bu rakam FTS senaryosunda 2 milyar dolara ulaşmaktadır.

**Şekil 61. 2023-2053 Arasında Gerekli Yatırımın NBD'si (Milyar Dolar)**





3

**Türkiye Alüminyum  
Sektörü için  
Karbonsuzlaşma Yol  
Haritası**

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

Karbonsuzlaşma yol haritasını oluşturan politika önerileri, proje boyunca yürütülen masa başı araştırmaları, çalıştaylar ve toplantılar aracılığıyla elde edilen çıktılar/görüşler, proje uzmanlarının sektörel bilgi birikimi ve özellikle modelleme çıktılarından yararlanılarak geliştirilmiştir. Politika önerileri, Girdi ve Teknoloji ile Politika ve Pazar olmak üzere iki üst düzey politika teması altında gruplandırılmış ve bu iki politika teması altında 12 ana politika alanı oluşturulmuştur. Politika yol haritasının genel bir değerlendirmesini takiben söz konusu politika alanlarının yol haritasına dahil edilmesinin kapsamı ve gerekçesi detaylandırılmaktadır. Her bir politika alt başlığı altında, Türkiye'nin mevcut durumu ve açıklanmış stratejileri de ele alınmaktadır.

#### A) Girdi ve Teknoloji

1. Ana Girdi Optimizasyonu
2. Direkt Karbon Çıktısını Azaltan Teknolojiler
3. Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS) Teknolojileri
4. Yeşil Enerji
5. Süreç İyileştirilmesi
6. Kapsayıcı İstihdam ve Beceriler

#### B) Politika ve Pazar

1. ETS
2. Ticaret Modeli
3. Ulusal Politika Belgeleri
4. Yeşil Dönüşüm Finansmanı
5. İş Birlikleri
6. Döngüsel Ekonomi

#### 3.1. Girdi ve Teknoloji

Girdi ve teknoloji ile ilgili karbonsuzlaşma politika alanları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Model tarafından öncelik verilen spesifik teknolojiler **yeşil renk** ile vurgulanmıştır.<sup>54</sup> Aşağıda belirtilen bazı teknolojiler model sonuçları tarafından önceliklendirilmemiş olmasına rağmen halen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) geliştirdiği Teknoloji Yol Haritası çalışmasında dikkate alındığından yol haritasında yer almaktadır. Technological Research Council of Türkiye (TUBITAK).

● **Faz 1** (2023-2025)

● **Faz 2** (2026-2038)

● **Faz 3** (2039-2053)

|                                                                                                                                                                                                                                                  | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                  | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| <b>A.1) Ana Girdi Optimizasyonu</b>                                                                                                                                                                                                              |                           |                      |                      |
| Birincil alüminyum üretimine kıyasla önemli ölçüde daha düşük emisyonu sahip olan ikincil alüminyum üretiminde geri dönüştürülmüş hurda kullanımını artırmak için gerekli adımların atılması.                                                    | ●                         | ●                    |                      |
| Boksit dışı kaynaklardan (alümit, kil gibi) metalürjik kalitede alümina üretimi ve mevcut boksit cevherinin zenginleştirilerek kullanılması için teknolojiler geliştirilmesi.                                                                    | ●                         | ●                    |                      |
| Türkiye'nin alüminyum hurdası ithalatının izlenmesi ve hurda alüminyum teminini destekleyecek, uluslararası kararlarla uyumlu stratejiler geliştirilmesi.                                                                                        | ●                         | ●                    |                      |
| İkincil alüminyum üretiminde ithal edilen ingota gömülü emisyonları kontrol etmek ve azaltmak için, ingotun düşük emisyonlu ülkelerden ve tedarikçilerden ithal edilmesi, tedarikçilerin emisyonlarını raporlamaya ve azaltmaya teşvik edilmesi. | ●                         | ●                    | ●                    |

|                                                                                                                                                                                                                                                          | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                          | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3 (2039-2053) |
| <b>A.2) Direkt Karbon Çıktısını Azaltan Teknolojiler</b>                                                                                                                                                                                                 |                           |                      |                   |
| Alümina rafinasyonu sürecindeki yakma işlemlerinde kullanılan boilerların daha az salım yapan boiler tipleriyle (örn. elektrik ve CST ile çalışan boilerlar) değiştirilmesi ve bunların kullanımına yönelik fizibilite ve yatırım planları yapılması.    |                           | ●                    | ●                 |
| Alümina kalsinasyon sürecini tamamen dekarbonize etmek için tek seçenek olan fosil yakıtlardan elektriğe veya yeşil H <sub>2</sub> 'ye geçişin sağlanması.                                                                                               | ●                         | ●                    |                   |
| En erken 2030'larda ticarileştirilmesi beklenen inert anot hücre teknolojisindeki gelişmelerin takip edilmesi ve gerekli fizibilite çalışmalarının yapılması.                                                                                            |                           |                      | ●                 |
| Uçtan uca alüminyum üretim sürecinde oluşan atık ısının alternatif kullanımı için ısı geri kazanım sistemlerinin geliştirilmesi ve entegre edilmesi.                                                                                                     | ●                         | ●                    |                   |
| İkincil alüminyum üretiminde daha düşük emisyonlu fırınların kullanımına öncelik verilmesi ve şirketle-rin, yüksek enerji ve metal verimliliğine sahip rever-ber fırınlara ve elektrik kullanan indüksiyon fırınla-rına yatırım yapmaya teşvik edilmesi. | ●                         | ●                    |                   |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| A.3) Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS) Teknolojileri                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| Türkiye'nin Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS) kabiliyetini artırmak için; finansal (ör. yeşil yatırım araçlarının kullanımı), yasal (ör. net bir taksonomi kullanan düzenleyici çerçeve) ve teknik altyapının (ör. Ar-Ge çalışmalarını ve ilgili girişimcilik faaliyetlerini yürütmek için fiziksel ve beşerî sermaye) güçlendirilmesi. | ●                         | ●                    | ●                    |
| CCS teknolojisinin elektroliz hücrelerine entegrasyonu yoluyla emisyonlardan tasarruf senaryosunun değerlendirilmesi.                                                                                                                                                                                                                              |                           |                      | ●                    |

|                                                                                                                                                                                                                                           | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| A.4) Yeşil Enerji                                                                                                                                                                                                                         | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| Alüminyum üretiminde ihtiyaç duyulan yenilenebilir enerjinin sağlanması amacıyla ulusal şebeke altyapısı güçlendirilmesi ve fosil yakıttan yeşil H <sub>2</sub> 'ye geçiş için özel sektöre teşvik sağlanması.                            | ●                         | ●                    |                      |
| Alüminyum sektörü için yeşil H <sub>2</sub> 'yi ticari olarak kullanılabilir ve uygun maliyetli hale getirmek amacıyla mevcut ve uygun teknolojilerin tespit edilmesi ve ulusal düzeyde orta-uzun vadeli tedarik planlamasının yapılması. | ●                         | ●                    | ●                    |
| Birincil üretim ve ikincil ergitme süreçlerinde düşük emisyonlu küçük modüler nükleer reaktörlerin (SMR) kullanımının değerlendirilmesi.                                                                                                  | ●                         | ●                    | ●                    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| A.5) Süreç İyileştirilmesi                                                                                                                                                                                                                                                                  | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| Enerji verimliliğinin artırılması, üretimin en üst düzeye çıkarılması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması için alüminyum tesislerinde enerji yönetim sistemleriyle entegre dijital izleme sistemlerinin kurulması ve bu doğrultuda modern, yenilikçi bakım yaklaşımlarının uygulanması. | ●                         |                      |                      |
| Parametrelerin anlık izlenmesi için elektroliz hücrelerinde ve ergitme ünitelerinde gelişmiş otomasyon kullanılması.                                                                                                                                                                        | ●                         | ●                    |                      |
| Hurdanın toplanmasından ergitme dahil ayrıştırılmasına kadar ikincil alüminyum üretiminde enerji verimliliğini artıracak süreç ve yöntemlerin geliştirilmesi.                                                                                                                               | ●                         | ●                    | ●                    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                          | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| A.6) Kapsayıcı İstihdam ve Beceriler                                                                                                                                                                                                                                     | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| Alüminyum sektörünün yeşil dönüşümünü teşvik etmek için gerekli olan yeni niteliklerin, becerilerin ve eğitimlerin- alt sektör ve bölge düzeyinde ayrıştırılarak- tespit edilmesi ve bunlara yatırım yapılması.                                                          | ●                         | ●                    | ●                    |
| Alüminyum sektörü istihdamında herkes için fırsat eşitliğinin sağlanması.                                                                                                                                                                                                | ●                         | ●                    | ●                    |
| Eğitim müfredatının ve yükseköğretim programlarının belirlenen yeni beceri çerçevesine uyumlaştırılmasına yönelik çalışmaların yapılarak yeşil dönüşüm süreciyle ortaya çıkacak işgücü ihtiyacını karşılamaya yönelik eğitim programlarının hazırlanması ve uygulanması. | ●                         | ●                    | ●                    |

### 3.2. Politika ve Pazar

Politika ve pazar ile ilgili dekarbonizasyon politika alanları aşağıda detaylandırılmıştır.

|                                                                                                                                                                                                                                                                           | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| B.1) Emisyon Ticaret Sistemi                                                                                                                                                                                                                                              | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| Türkiye’de AB mevzuatına uygun bir ETS oluşturulması ve stratejik sektörlerde faaliyet gösterenler için yeşil dönüşümü teşvik edecek uygun mekanizmaların kurulması.                                                                                                      | ●                         | ●                    |                      |
| Özellikle karbon kaçağı riski yüksek olan emisyon yoğun sektörler için sektör ortalamasının altında emisyon yapan tesislere ücretsiz tahsisat verilmesi.                                                                                                                  | ●                         | ●                    |                      |
| Azaltım hedeflerine ulaşmanın ekonomik maliyetini anlamak ve emisyon limitlerini belirlemek için (ETS / karbon fiyatlandırması kapsamında) alüminyum sektöründeki düşük karbonlu teknolojiler ve uygulamalar için marjinal azaltım maliyetleri (MAC) çalışması yapılması. | ●                         |                      |                      |

|                                                                                                                                                                                                                 | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| B.2) Trade Models                                                                                                                                                                                               | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| AB SKDM kapsamındaki emisyon ölçümü ve raporlama ilkeleri doğrultusunda, Türkiye’deki uygulamaların AB tarafında gerekli nitelikleri karşılaması ve tanınmasının sağlanmasına ilişkin çalışmaların yürütülmesi. | ●                         |                      |                      |
| AB SKDM sonrası beklenen / yaşanan pazar değişimlerinin analiz edilmesi ve Türkiye’nin rekabet gücünü korumak için önlemler alınması.                                                                           | ●                         | ●                    | ●                    |
| Türkiye’nin AB ülkelerine ihracatının devamını teminen, AB SKDM uygulaması ile ilişkili ticaret politikası adımlarının tespit edilmesi.                                                                         | ●                         |                      |                      |

|                                                                                                                                                                                   | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
|                                                                                                                                                                                   | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| <b>B.3) Ulusal Politika Belgeleri</b>                                                                                                                                             |                           |                      |                      |
| Ulusal düzeyde ve bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmesi gereken Ar-Ge ve inovasyon konuları için fizibilite çalışmaları yürütülmesi ve öncelikli alanların belirlenmesi.  | ●                         | ●                    | ●                    |
| Ulusal mevzuatta AB mevzuatına göre farklılık gösteren hususların belirlenmesi ve malların serbest dolaşımı hakkını koruyan tam uyumun sağlanması için koordinasyonun sağlanması. | ●                         | ●                    |                      |
| Alüminyum endüstrisinde sürdürülebilir enerji dönüşümünü sağlamak için, ulusal enerji ve iklim stratejilerine uyumlu, net ve uzun vadeli bir plan geliştirilmesi.                 | ●                         |                      |                      |

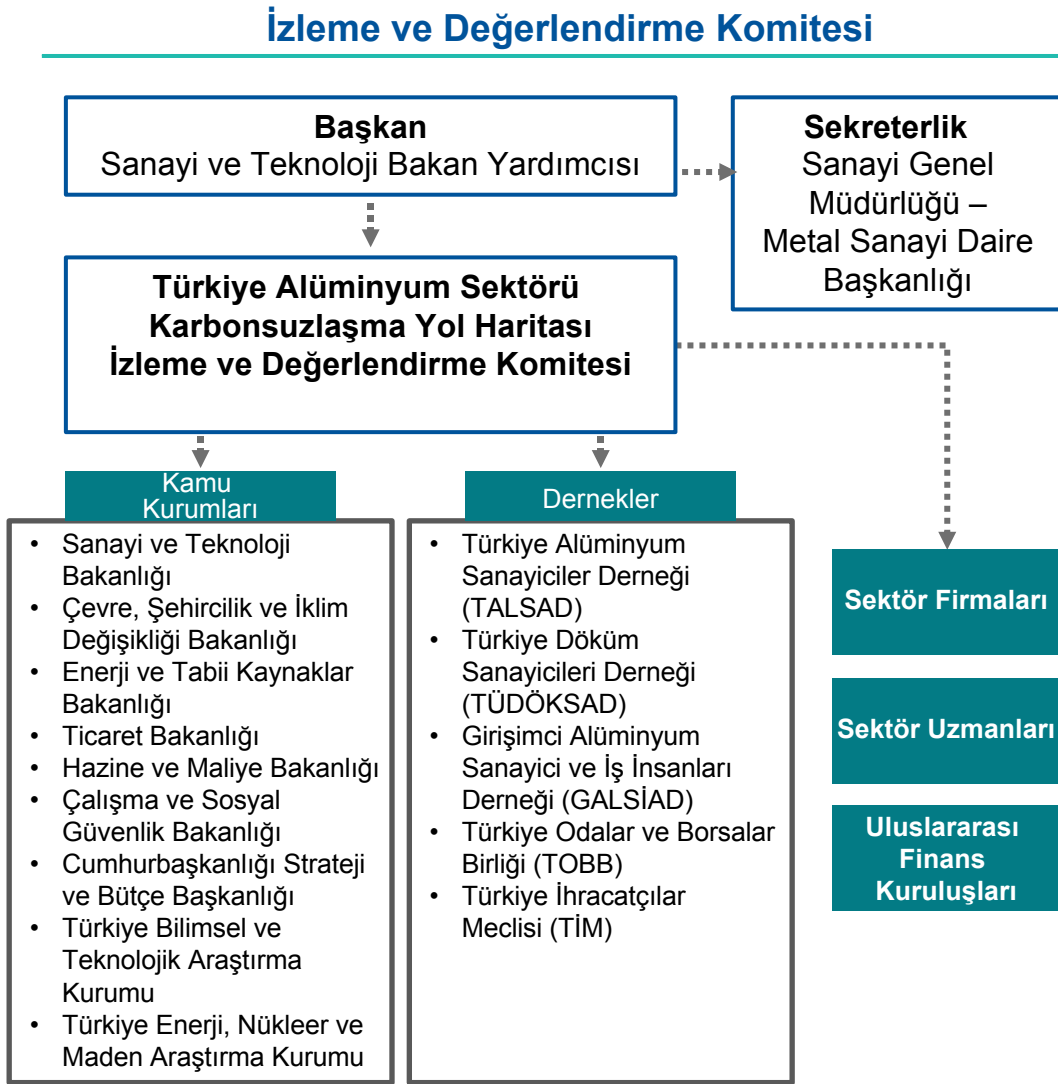
|                                                                                                                                                                  | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
|                                                                                                                                                                  | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| <b>B.4) Yeşil Dönüşüm Finansmanı</b>                                                                                                                             |                           |                      |                      |
| Alüminyum üretim tesislerinde enerji verimliliğini artırmak için halihazırda sağlanan kamu teşviklerinin artırılması ve kapsamının genişletilmesi.               | ●                         |                      |                      |
| Düşük emisyonlu teknolojilerin yaygınlaştırılması için halihazırda sağlanan kamu teşviği ve destek mekanizmalarının artırılması ve kapsamlarının genişletilmesi. | ●                         | ●                    | ●                    |
| Düşük emisyonlu teknolojilerin yayılımı için özel sermayenin harekete geçirilmesi.                                                                               |                           | ●                    |                      |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| B.5) İş Birlikleri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| Enerji ve malzeme verimliliğine ilişkin projelerin yürütülmesi için fon fırsatları yaratılması ve tüm süreçlerde enerji ve malzeme verimliliğinin artırılmasına yönelik optimizasyon çalışmalarının sonuçlarının yaygınlaştırılması için düzenlemeler yapılması.                                                                                      | ●                         | ●                    | ●                    |
| Şirketlerin gönüllü olarak başvuracakları, uluslararası kabul görmüş standartların uygulanmasına yönelik iş birliği ve etkileşimlerin artırılması, şirketlerin uluslararası sektör kuruluşlarına (örneğin: International Aluminium Institute, European Aluminium Association, Aluminium Stewardship Initiative vb.) dahiliyetlerinin teşvik edilmesi. | ●                         | ●                    | ●                    |
| Özel sektör paydaşlarının ulusal emisyon azaltma politikalarının tasarımına aktif olarak katılmasının ve geri bildirim vermesinin sağlanması.                                                                                                                                                                                                         | ●                         |                      |                      |
| Bakanlıklar, ticaret odaları, mühendislik odaları, üniversiteler ve STK'lar gibi ekosistem paydaşlarının katılımıyla alüminyum endüstrisinin düşük karbon yolundaki ilerlemesini takip için bir veri tabanı oluşturulması.                                                                                                                            | ●                         | ●                    | ●                    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Uygulama Süresi / Aralığı |                      |                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| B.6) Döngüsel Ekonomi                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Faz 1<br>(2023-2025)      | Faz 2<br>(2026-2038) | Faz 3<br>(2039-2053) |
| Cüruftan metal geri kazanımı ve kalan atığın değerlendirilmesine yönelik yeşil teknolojilerin kullanılması.                                                                                                                                                                                                                | ●                         | ●                    |                      |
| Alumina üretiminde ortaya çıkan kırmızı çamurun içerisindeki değerli metal içeriklerinin geri dönüşümüne yönelik çalışmalar yapılması.                                                                                                                                                                                     | ●                         | ●                    |                      |
| Alüminyum girdileri kullanan son kullanıcı sektörlerinin karbonsuzlaştırılmasına katkıda bulunmak için yüksek kaliteli, katma değerli, uzun ömürlü ve geri dönüştürülebilir alüminyum ürünleri geliştirme projelerinin desteklenmesi ve son kullanıcı sektörlerden alüminyum hurda kazanımına yönelik çalışmalar yapılması |                           | ●                    | ●                    |
| Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi.                                                                                                                                                                                                       | ●                         | ●                    | ●                    |

## İzleme ve Değerlendirme Komitesi

Türkiye Alüminyum Sektörü Karbonsuzlaşma Yol Haritası kapsamındaki politika önerilerinin uygulanma sürecini ve sonuçlarını düzenli olarak izleyen ve değerlendiren bir **Komite kurulması önem taşımaktadır.**



# 4

Sonuç

## 4. Sonuç

Alüminyum sadece Türkiye için değil küresel anlamda da stratejik bir üretim sektörü olarak gerek üretimde gerekse hizmetlerde birçok sektöre dokunan bir yapıya sahiptir. Türkiye alüminyum sektörü (Çin ve Rusya gibi sektör liderlerinin bazılarındaki daha büyük paya sahip birincil alüminyum üretim payının tersine) büyük ölçüde alüminyum üretim süreçlerine ve alüminyum işleme sürecine bağlı olsa da sektör yine de önemli ölçüde CO<sub>2</sub> emisyonuna yol açmaktadır.

Alüminyum sektörü otomotivden beyaz eşyaya, savunmadan inşaatla çok sayıda alana girdi sağladığı için Türkiye'deki stratejik sektörlerinden biridir. AB açık ara sektörün en büyük ihracat ortağı olduğu için karbonsuzlaşma çalışmalarını sağlayacak gerekli tedbir ve aksiyonlar alınmadıkça AB SKDM Türkiye'deki alüminyum üreticilerinin rekabet gücüne önemli ölçüde etki edecektir. Ayrıca Paris Anlaşması kapsamındaki Ulusal Katkı Beyanları da sektörde karbonsuzlaşma tedbirleri alınmasını öngörmektedir. Bu kapsamda söz konusu bu proje, ülkenin uluslararası taahhütleri ve karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda Türkiye'deki alüminyum sektörüne ilişkin Düşük Karbonlu Yol Haritasını oluşturmayı amaçlamaktadır.

Bu kapsamlı çalışma iki temel çıktıdan oluşmaktadır: - 1) Modelleme & Senaryo Analizi ve 2) Politika Yol Haritası. 2023-2053 yılları arasında Modelleme ve senaryo analiz çalışması Türkiye alüminyum sektörünün karbonsuzlaşma sürecine ilişkin en uygun yolun belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma yapılırken, söz konusu ayrı süreçlerdeki farklılıkların doğru şekilde yansıtılması için birincil alüminyum ve alüminyum işleme yol haritaları modellenmiştir. Kapsam 1, 2 ve 3 emisyonları dört senaryo çerçevesinde (WoM, SPS, LCP ve FTS) modellenmiştir. Optimum senaryo (LCP) gelecek dönemde yapılacak yatırım miktarına ve politika aksiyonlarına ışık tutmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın sonraki adımları ise, düşük karbonlu yol haritası için gerekli ana müdahale alanları ve spesifik tedbirleri belirten Politika Yol Haritasını oluşturmaktadır.

Genel olarak, bu projenin sonuçları alüminyum işlemeden kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonu ve ithal ham maddede gömülü emisyonların birincil alüminyum üretimine kıyasla Türkiye için daha büyük bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye alüminyum sektörünün düşük karbon yolunda birincil üretimdeki emisyon azaltımı inert anot ve süreç iyileştirmeleri gibi radikal teknolojik yeniliklere bağlıyken alüminyum işlemedeki emisyon azaltım çabaları ise girdi kullanımı, enerji ve materyal verimliliğindeki optimizasyon çabaları ile devam ettirilecektir. Alüminyum işlemede fırınlardaki yeni teknolojilerin kullanılması ve bunun için gerekli yatırımlar oldukça önemli arz etmektedir. Külçe alüminyum ithalatı yapılan ülkelerin yakından izlenmesi bu ürünlerdeki gömülü emisyonların kontrol edilebilmesi için kilit bir aksiyon alanıdır. Ayrıca hem ülke içi hem ülke dışı hurda kaynaklarının bulunması ve ikincil alüminyum üretim kapasitesinin artırılması hayati önem taşımaktadır.

Çalışma, yatırımların toplam NBD maliyetinin yaklaşık 1,7-2,2 milyar dolar arasında olacağını öngörürken, önerilen politika tedbirleri ise uygun finansman mekanizması ve planlarının geliştirilmesi ihtiyacını vurgulamaktadır. Türkiye alüminyum sektörünün orta-uzun vadede gerekli teknolojik dönüşümü gerçekleştirebilmesi için kısa vadede ek fonların harekete geçirilmesine yönelik tedbirlere öncelik verilmelidir. Karbonsuzlaşma yatırımları için ölçeklendirilmiş sermaye akışına erişimin Türkiye alüminyum sektörü açısından sağlanması, politika yapıcılarının ve finans kurumlarının işbirliği halinde yeni ve yenilikçi finansman mekanizmaları geliştirmesi ile mümkün olacaktır.

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

# 5

## Annex

---

## 5. Ekler

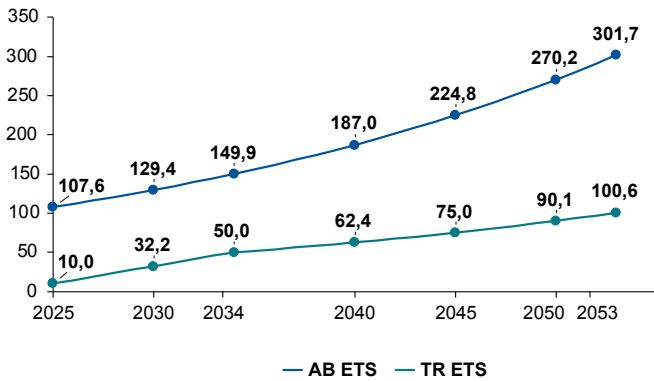
### Ek 1: Projeksiyonlarda ETS ve CBAM Etkisi

#### Türk vs. AB ETS ve Alüminyum Sektörüne Potansiyel Etkileri

Üç farklı senaryo, Sınırdaki Karbon Düzenlemesi Mekanizması (SKDM) projeksiyonları ve planlanmış yurt içi Emisyon Ticareti Sistemi'nin (ETS) projeksiyonlara dahil edilmesiyle geliştirilmiştir.

İlk senaryoda alüminyum sektörü projeksiyonları, herhangi bir emisyon ticaret sistemi ve SKDM dikkate alınmadan yapılmaktadır. Bu senaryoda ekstrasından bir karbon mekanizması veya fiyatlandırması tanımlanmadığından ihracatların herhangi bir şekilde etkili olması beklenmemektedir.

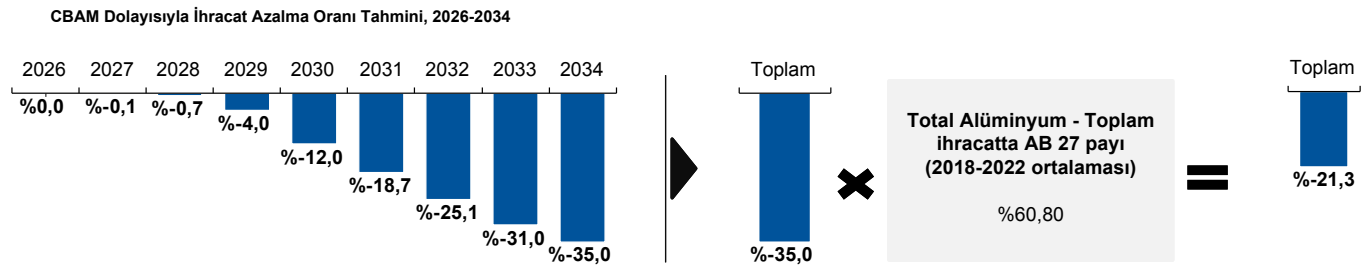
#### Şekil 62. AB ETS vs TR ETS (Euro) Karşılaştırması



Diğer senaryolar için yurt içi ETS'nin 2025'te çalışır olacağı varsayılır ve AB karbon fiyatlarının 2023'te ortalama 100 euro olacağı ve 2034'te 150 euro'ya çıkacağı ve SKDM'in tamamen çalışır durumda olacağı 2053'e kadar da bu rakamın yaklaşık 300 Euro seviyesine çıkacağı varsayılmaktadır. İkinci senaryoda (TR ETS < AB ETS) Türkiye'deki karbon fiyatlarının 2025'te 10 dolardan başlaması ve 2034'te 50 dolara ulaşması ve sonrasında da AB karbon fiyatlarıyla aynı hızda artması beklenmektedir. Üçüncü senaryoda ise (TR ETS = AB ETS), Türkiye'nin karbon fiyatlarının 2025'ten itibaren AB karbon fiyatlarıyla tamamen aynı olacağı varsayılmaktadır.

TR ETS < AB ETS senaryosunda, EBRD çalışmasına dayanarak alüminyum sektör ihracatının 2034'te %35 oranında olumsuz etkileneceği varsayılmaktadır.<sup>55</sup> Önceki yıllar için bu oran, sektörün ihracatlarının ücretsiz ödeneklerin kademeli olarak kaldırılmasıyla olumsuz etkileneceği be Türkiye karbon fiyatının Avrupa karbon fiyatına yakınsanmasıyla da olumlu etkileneceği varsayımı üzerinden hesaplanmaktadır. Alüminyum sektöründeki ihracatların etkileneceği oran, AB'ye yönelik ihracat payına dayalı olarak hesaplanmaktadır. Üçüncü senaryoda ihracatların fiyatlar eşit olacağı için etkileneceği varsayılır ancak bu senaryo daha yüksek ETS fiyatı dolayısıyla yurt içi üretimde maliyetleri artıracaktır.

#### Şekil 63. İhracat Azalma Oranı Tahmini<sup>56</sup>



---

## Ek 2: Alüminyum İşlemede Kullanılan Fırın Tipleri

**Reverber fırınlar:** Genelde bu tip fırınlar, eritilen külçe (külçe alüminyum) ve hurda alüminyum için kullanılmaktadır. Bu fırın, enerji kaynağı olarak genellikle doğal gaz kullanan sabit bir fırındır. Fırın, fırın duvarlarını alevlerin ısısından koruyacak dayanıklı materyallerle donatılmaktadır. Reverber fırınlar teknoloji seviyeler açısından 4'e ayrılır;

1. **Geleneksel Reverber Fırın:** Bunlar en basit reverber fırınlardır ve sıklıkla düşük sınıf alüminyum hurdaların eritilmesinde kullanılmaktadır. Tek bir yakıcı sistemleri bulunur ve ortam ısısı üzerinde çok az kontrole sahiptirler. Geleneksel reverber fırınlar düşük verimliliğe, yüksek enerji kullanımına ve yüksek emisyonu sahiptir.
2. **Geliştirilmiş Reverber Fırın:** Bu fırınlar, enerji verimliliğini artırmak ve geleneksel modellere kıyasla emisyonları azaltmak üzere tasarlanmıştır. Bunların genelde daha iyi bir ısı kontrolü ve ısı kurtarma sistemine izin veren çoklu yanıcıları ve ileri yanma kontrol sistemleri vardır. Bazı gelişmiş reverber fırınlar ayrıca, yakıt tüketimini azaltacak ön ısıtma bölgeleri içermektedir.
3. **Gelişmiş Reverber Fırınlar:** Enerji verimliliği ve çevresel performansın daha da yüksek olmasıyla bu fırınlar reverber fırın tasarımındaki en yeni gelişmeleri temsil eder. Gelişmiş modeller; otomatik kontroller, atık ısı kurtarma sistemleri ve ileri teknoloji yanma sistemlerine sahip olabilir. Hassas ısı kontrolü ve yüksek verimliliğin çok önemli olduğu özel uygulamalarda kullanılmaktadır.
4. **Çok Gelişmiş Reverber Fırınlar:** Reverber fırınlardaki, en düşük emisyon ve enerji tüketimine sahip mevcut en iyi teknoloji. Bu fırınlar daha yüksek ısı ve daha etkin yanmalarla sonuçlanan, oksijenden zengin havanın yanıcı yakıtı dönüştürülmesiyle emisyonları ve enerji tüketimini azaltmaktadır. Bu yanma yöntemi aynı zamanda, azot oksitler ( $NO_x$ ) ve parçacıklı madde gibi diğer kirleticilerin emisyonlarının azalmasını getirmektedir.
5. **Elektrikli Reverber Fırın:** Elektrikli reverber fırınlar elektriği ana girdi olarak kullanır ve dolayısıyla sadece

kapsam 2 emisyonu yayarlar. Elektrikli reverber fırınlar genelde alüminyum hürdanın eritilmesi ve saflaştırılması için kullanılmaktadır. Fırındaki elektrikli ısı elemanları alüminyum eritmek için gerekli olan ısıyı üretirken, reverber tasarım etkin ısı transferine ve eritilmiş metallerin karıştırılmasına imkan vermektedir.

**Döner fırın:** DBir dizi hürdanın eritilmesine ilişkin kapasiteleri nedeniyle, döner fırınlar "çok amaçlı eritme fırınları" da adlandırılır. Fırın tasarımı yüksek ısı transferine, döner hareket ve akıma imkan verdiğinden cüraf dahil birçok farklı hürdanın eritilmesi için uygun bir fırındır. Fırın, yükün yönünün değiştirilmesiyle, gaz yakıcıyla veya direkt olarak yakıcı sayesinde ısınan refrakter duvarıyla doğrudan temas halinde çalışmaktadır.

**Pota fırın:** Kuyu fırın olarak da bilinen pota fırınlar genelde ufak eritme uygulamalarından kullanılacak şekilde küçük bir kapasiteye sahiptir. Bu fırın; saf hurda, külçe (külçe alüminyum) veya eritilmiş alüminyumla çalıştırılabilir. Alüminyum bir yakıcı sayesinde yanan çember fırında bulunan seramik bir potaya yerleştirilir veya dökülür. Bu enerji, maden eritme kabının ısıtılmasıyla metale dolaylı yoldan uygulanmaktadır. Düşük kurulum maliyetleri ve teknik uzmanlık gerektirmemesi.

**İndüksiyon Fırın:** Bu tip fırınlarda, alüminyum hurdaların eritilmesi için elektromanyetik endüksiyon kullanılmaktadır. Bu fırın, elektrik akımı içinde geçtiğinde bir elektromanyetik alan oluşturan bakır tel bobininden mamuldür. Elektromanyetik alan, hurda alüminyum ısıtarak hürdayı yeniden kullanılmak üzere eritmektedir. Bu fırın tipinin başlıca avantajları arasında alaşımları hızlıca değiştirme olanağı, ısı kontrolü, düşük oksidasyon ve yüksek sıvı kalitesi yer alırken dezavantajları ise ebat sınırlamaları, yüksek yatırım ve işletme maliyetidir.





