

Berat Yücel¹

Kıdemli Politika Analisti

Sercan Sevgili²

Politika Analisti

DEĞERLENDİRME NOTU

TÜRKİYE'NİN KARBON YOĞUNLUĞU ATLASI: YEŞİL DÖNÜŞÜMDE BÖLGESEL KIRILGANLIKLAR

Dünya ekonomisi son 30 yılda sanayi üretiminde hızlı bir genişleme sürecinden geçti. Bu dönemde küresel değer zincirlerinin derinleşmesi, sanayi sektörünü birçok gelişmekte olan ülkenin büyümesinin merkezine yerleştirdi. 2024 itibarıyla küresel sanayi katma değerinin dünya gayrisafi yurt içi hasılası (GSYH) içindeki payı %26 düzeyindeyken bu oran düşük gelirli ülkeler grubunda %27, orta-düşük gelirli ülkelerde %32, orta-yüksek gelirli ülkelerde %34 ve yüksek gelirli ülkelerde ise %22 seviyesindedir.³ Aynı zamanda sanayi üretimi, ülkelerin istihdamında da önemli bir pay oluşturmaktadır. Dünya Çalışma Örgütü'nün (ILO) verilerine göre, 2023 yılında sanayi sektörünün toplam istihdamın içinde payı, düşük gelirli ülkelerde %11, düşük-orta gelirli ve yüksek gelirli ülkelerde %23 ve yüksek-orta gelirli ülkelerde %28, Türkiye'de ise %27,6 seviyesindedir⁴. Bu veriler, Türkiye'nin de dâhil olduğu yüksek-orta gelir grubundaki ekonomilerde sanayinin hem katma değer yaratma hem de istihdam sağlama açısından, diğer gelir gruplarına kıyasla daha merkezi bir konumda yer aldığını ortaya koymaktadır.

Sanayi, ekonomik yapı içindeki merkezi konumu, artan enerji talebi ve karbon emisyonları nedeniyle küresel iklim politikalarının ana odak alanlarından biri haline gelmiştir. IPCC'nin⁵ (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2019 raporuna göre, küresel sera gazı salımlarının %34'ü enerji, %24'ü sanayi ve %22'si tarım sektörlerinden kaynaklanmaktadır. Salınan toplam sera gazları ülkelere göre incelendiğinde de ülkelerin sanayi yoğunluklarına benzer bir tabloyla karşılaşılmaktadır. Buna göre, dünyadaki toplam sera

¹<https://www.tepav.org.tr/tr/ekibimiz/s/1433/Berat+Yücel>²<https://www.tepav.org.tr/tr/ekibimiz/s/1461/Sercan+Sevgili>³<https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS?locations=XN>⁴<https://data.worldbank.org/indicator/SL.IND.EMPL.ZS?locations=XN-XD-XM-XT>⁵<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/technical-summary/>

Çalışmaya katkılarından ötürü Orta Doğu Teknik Üniversitesi Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi 3.sınıf öğrencisi M. Can Torun ve Bilkent İktisat 3.sınıf öğrencisi Ece Yaşar'a teşekkür ederiz.

Bu çalışmada ifade edilen bulgular, yorumlar, sonuçlar, öneriler ve görüşler tamamen yazarına aittir. TEPAV'ın resmi görüşü değildir. © TEPAV, aksi belirtilmedikçe her hakkı saklıdır.

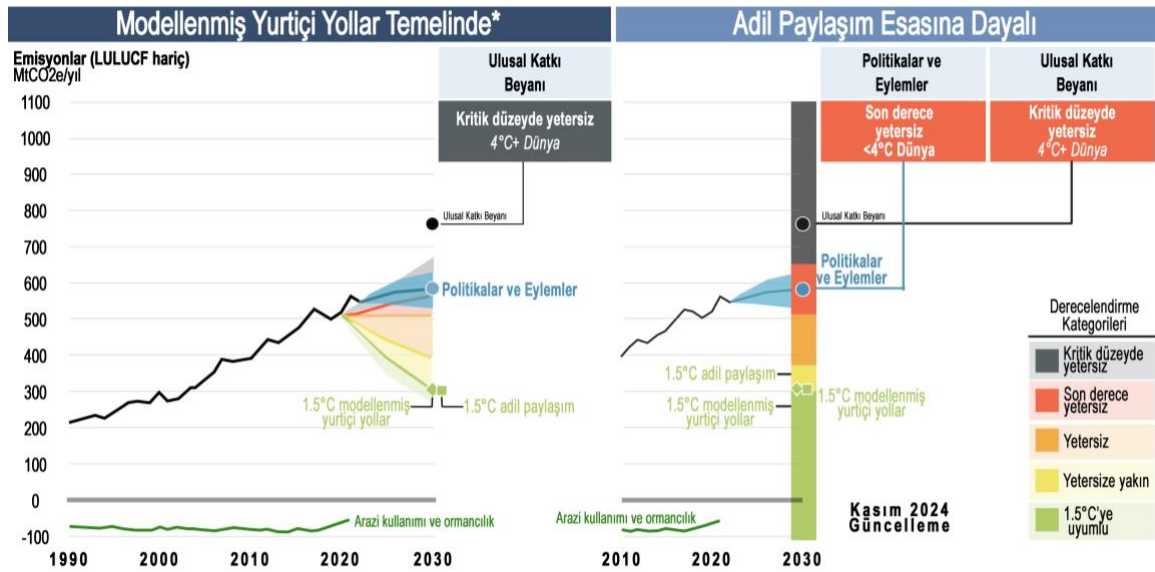
gazı emisyonları içinde düşük gelirli ülkelerin payı %1,75 (898 milyon ton CO₂e⁶) düşük-orta gelirli ülkelerin payı %15,5 (7.928 milyon ton CO₂e), yüksek gelirli ülkelerin payı %34,2 (17.509 milyon ton CO₂e) ve yüksek-orta gelirli ülkelerin payı %48,4 (24.735 milyon ton CO₂e) seviyesindedir.⁷

Türkiye’de Sanayi ve Yeşil Dönüşümün Mevcut Durumu

Türkiye, hızla gelişen sanayisiyle hem bölgesinde hem de diğer yüksek-orta gelirli ülkeler arasında öne çıkan bir sanayi ülkesi haline geldi. 2000’li yılların başında imalat sanayinin GSYH içindeki payı ortalama %15 civarındayken 2021–2023 döneminde bu oran %21’e yükselmiş; yaklaşık 20 yıl içinde altı puanlık bir artış kaydedilmiştir. Ancak sanayideki bu büyüme, Türkiye’nin sera gazı salımlarındaki artışla birlikte ilerlemekte ve dolayısıyla çevre üzerindeki baskıyı artırmaktadır.

Türkiye’nin güncellenmiş ara hedefi, 2030 yılında net 695 milyon ton toplam CO₂e salımıdır.⁸ (LULUCF dahil⁹). Benzer biçimde NDC 3.O kapsamında Türkiye, geçtiğimiz ay 2035 ara hedefini ilan ederek 2035’te emisyonlardan 466 Mt CO₂e indirim yapmayı ve emisyon toplamını 643 Mt CO₂e indirmeyi hedeflemektedir. Hem 2030 hem de 2035 ara hedefleri, 2053 için ilan edilen “**net sıfır**” taahhüdüne rağmen, önümüzdeki yaklaşık beş yılda karbon salımlarında anlamlı bir azalma sürecine girilmeyeceğini göstermektedir. Bununla birlikte iklim politikalarını bağımsız olarak izleyen ve ülkelerin Paris Anlaşması hedefleriyle uyumunu değerlendiren bir platform olan Climate Action Tracker, Türkiye’nin güncel politika ve eylemlerini ‘**yüksek derecede yetersiz**’ olarak değerlendirmektedir.

Şekil 1: Türkiye’nin net sıfır patikası¹⁰



Kaynak: Climate Action Tracker, TEPAV görselleştirmeleri

Türkiye’de salınan sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümü, belirli sanayi kümelerinde yoğunlaşmakta; bu durum hem iklim politikalarının etkinliğini hem de bölgesel kalkınma

⁶ Farklı sera gazlarının, 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) katsayıları dikkate alınarak karbondioksit eşdeğeri cinsinden ifade edilmesidir.

⁷ Dünya Bankası, Total greenhouse gas emissions excluding LULUCF (Mt CO₂e)

⁸ Republic of Türkiye Updated First Nationally Determined Contribution

⁹ Land Use, Land-Use Change and Forestry

¹⁰ Modellenmiş ulusal yollar, küresel düzeyde en düşük maliyetli senaryolardan elde edilen farklı sıcaklık aralıklarına ilişkin patikaları kapsamakta ve bunları küresel ekonomik verimlilik perspektifinden yansıtmaktadır.

dengeğini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, sanayi ve enerji politikalarının birlikte ele alınarak bölgesel karbon yoğunluklarının analiz edilmesi, Türkiye’nin 2053 net sıfır hedefine ulaşmasında yol gösterici bir temel sunmaktadır. Bu gereklilik, çalışmanın aşağıda ayrıntıları verilen amaç ve kapsamını da tanımlamaktadır.

Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye’nin ekonomik büyüme ve sera gazı emisyonlarının ayrışma performansını diğer ülkelerle karşılaştırarak değerlendirmek ve Türkiye’de il bazındaki toplam GSYH içinde dolar¹¹ başına düşen sera gazı salım (CO₂e/USD) oranlarını hesaplayarak emisyon yoğunluğundaki bölgesel farklılıkları ortaya koymaktır. Söz konusu oran, bir ülkenin veya ilin toplam sera gazı salımlarının karbondioksit eşdeğerine (CO₂e) çevrilerek GSYH’sine bölünmesiyle hesaplanır.

Bu bağlamda ekonomik büyümenin ülkeler açısından vazgeçilmez bir hedef olması, iklim politikalarının değerlendirilmesinde yalnızca toplam sera gazı emisyonlarının değil, bu büyümenin hangi düzeyde emisyon yaratarak gerçekleştiğinin de dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Ulusal düzeyde yapılan “decoupling” (karbon ayrışması/bağımsızlaşma¹²) analizleri, Türkiye’nin diğer ülkelerle karşılaştırıldığında henüz mutlak bir ayrışma sürecine giremediğini göstermektedir. Genel bir çerçeve çizen ve ulusal düzeyde durumu inceleyen karbon ayrıştırması çalışmaları, genel olarak ülke içindeki yapısal heterojenliği göz ardı etmektedir. Bu da incelenen ülke konusunda hazırlanacak yol haritasının tek merkezden, bölgesel farklılıkları ve kırılkanlıkları yadsıyan sonuçlara ya da çıkarımlara neden olmaktadır. Bu çerçevede Türkiye’ye mercek tutulduğunda bölgeler, üretim yapıları, enerji yoğunlukları ve teknolojik kapasiteleri bakımından önemli ölçüde farklılık göstermektedirler. Bu çalışmada yapılan il düzeyindeki hesaplamalar, yeşil dönüşüm politikalarının bölgesel ihtiyaçlara göre tasarlanmasına katkı sunmayı ve Türkiye’nin 2053 net sıfır hedefine ulaşma yolunda hangi illerin daha kırılkan, hangilerinin ise görece avantajlı konumda olduğunu ortaya koymayı amaçlamaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, uluslararası karşılaştırmalar üzerinden yürütülen karbon ayrışması tartışmasını ülke içi mekânsal boyuta taşıyarak hem küresel eğilimleri hem de bölgesel farklılıkları birlikte değerlendiren bütüncül bir çerçeve sunmaktadır.

Climate Trace, 2020 yılında çeşitli sivil toplum örgütleri, teknoloji şirketleri ve araştırma kurumlarının ortak girişimi olarak kurulmuş küresel bir koalisyonudur. Amacı, ülkelerin resmi raporlamalarına ya da gecikmeli istatistiklere bağımlı kalmadan, uydu tabanlı gözlemler, yapay zekâ destekli hesaplama yöntemleri ve büyük veri analizi aracılığıyla dünya genelinde sera gazı emisyonlarını şeffaf ve erişilebilir biçimde izlemektir. Bu sayede Climate Trace, ürettiği yüksek çözünürlüklü emisyon verileri sayesinde sera gazı emisyonlarının yalnızca ulusal ölçekte değil, ülke içindeki alt bölgelere kadar ayrıştırılarak izlenmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada kullanılan emisyon verileri, farklı sera gazlarının küresel ısınma potansiyeli katsayıları¹³ dikkate alınarak karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) cinsine dönüştürülmüş biçimde Climate Trace tarafından sunulmaktadır. İllerin ekonomik faaliyetlerini temsil eden GSYH verileri Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan cari fiyatlarla GSYH serilerinden alınmıştır. Uluslararası karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla bu değerler, Dünya Bankası’nın sunduğu satın alma gücü paritesi¹⁴ (SAGP) dönüştürme katsayıları kullanılarak uluslararası dolar cinsine çevrilmiştir. Her ilin toplam sera gazı emisyonu, SAGP cinsinden

¹¹ USD, Satın Alma Gücü Paritesi (SAGP), cari uluslararası \$

¹² Ekonomik büyüme ile çevresel baskıların ayrışması

¹³ Global Warming Potential, GWP

¹⁴ Purchasing Power Parity, PPP

GSYH değerine bölünerek CO₂e/USD oranı hesaplanmıştır. Elde edilen oranlar, iller arasındaki karbon yoğunluğu farklılıklarını nicel olarak karşılaştırmaya yalnızca imkân tanımakla kalmamakta; aynı zamanda Türkiye'nin bölgesel ölçekte yeşil dönüşüm çerçevesi açısından hangi illerin daha kırılgan konumda olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, iklim politikalarının önceliklendirileceği bölgelerin belirlenmesine yardımcı olurken yapılacak yatırımlarının yönlendirilmesi için de sağlam bir analitik temel sağlamaktadır.

Ekonomik Büyüme ve Karbon Ayrışması: Kavramsal Çerçeve ve Ülke Deneyimleri

Ekonomik büyüme ile çevresel baskılar arasındaki ilişki, literatürde genellikle karbon ayrışması kavramı ile açıklanmaktadır. Bu kavram, gayrisafi yurt içi hasıla (GSYH) artışı ile çevresel göstergeler (örneğin karbon emisyonları, enerji tüketimi, doğal kaynak kullanımı) arasındaki bağıın zayıflaması ya da kopması anlamına gelir. Bu kavram ikiye ayrılır:

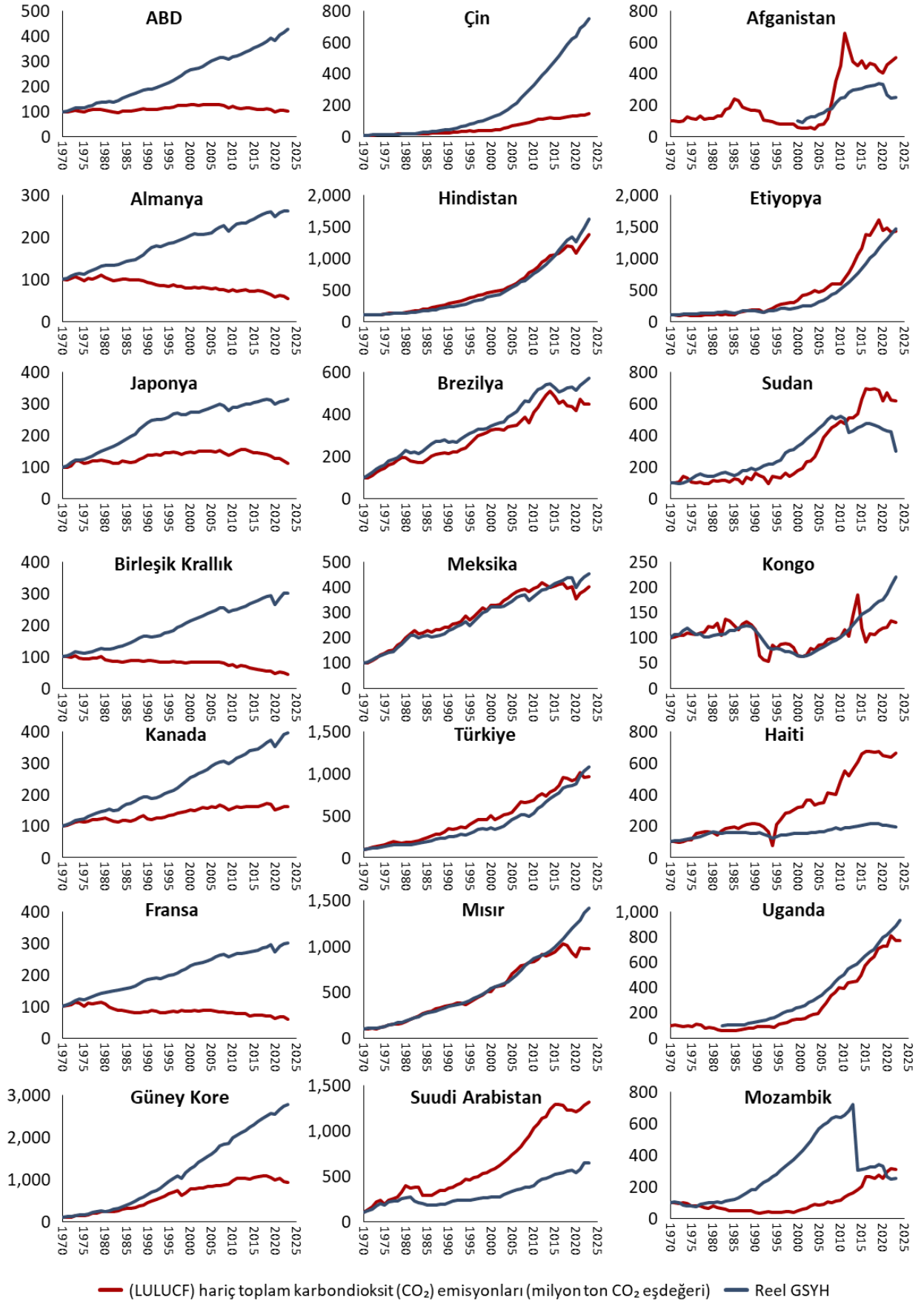
- **Görelî karbon ayrışması:** Ekonomik büyüme sürerken emisyonlar da artar; ancak emisyonlardaki artış, GSYH büyüme hızının gerisinde kalır. Bu durumda çevresel baskı azalmamış, yalnızca görece yavaşlamıştır.
- **Mutlak karbon ayrışması:** GSYH artmaya devam ederken toplam emisyonların mutlak düzeyde azalmasıdır. Bu durumda ekonomik büyüme ile çevresel baskılar arasında yapısal bir ayrışma gerçekleşmiştir.

Şekil 2'de görüldüğü üzere, gelişmiş ekonomilerde büyüme giderek sera gazı emisyonlarından ayrışmaya başlamıştır. Örneğin Amerika Birleşik Devletleri, 1970'ten bu yana gayrisafi yurt içi hasılasını yaklaşık dört kat artırmış; buna karşılık, emisyon düzeyini büyük ölçüde 1970 seviyelerinde sabit tutabilmiştir. Benzer şekilde Almanya, Fransa ve Birleşik Krallık gibi Avrupa ülkelerin ekonomileri, 1970'e kıyasla yaklaşık üç kat büyümüş; ancak aynı dönemde toplam CO₂ emisyonları gerilemiştir. Bu ülkeler, böylece mutlak karbon ayrışması patikasına girmiştir. Japonya ve Güney Kore ise 2010 sonrası dönemde görelî ayrışmadan mutlak ayrışmaya geçen yüksek gelirli ülkeler arasında yer almaktadır.

Buna karşılık, orta gelirli ülkelerde GSYH ve CO₂ emisyonları hâlâ birlikte artmaya devam etmekte; ancak bu artışların hızları ülkeden ülkeye farklılaşmaktadır. Bu grup içinde Çin, görelî karbon ayrışmasının en belirgin örneğidir: 1970'ten bu yana ekonomik büyüklüğü yaklaşık 80 kat artarken emisyonları yalnızca 20 kat yükselmiştir. Ancak bu "yalnızca" ifadesi mutlak düzeyde ciddi bir artışa işaret eder; bugün Çin, küresel toplam emisyonların yaklaşık %30'unu tek başına üretmektedir (IEA, 2023). Hindistan'da ise özellikle 2016 sonrasında benzer bir görelî ayrışma eğilimi gözlemlenmektedir; buna rağmen, ülke hâlen en büyük üçüncü salıcı konumundadır.

Bu tablo, görelî ayrışmanın (ekonomik büyümeden daha yavaş artan emisyonlar) tek başına yeterli olmadığını, mutlak ayrışmanın (emisyonların mutlak olarak azalması) iklim hedefleri açısından çok daha kritik olduğunu göstermektedir. Brezilya, Meksika, Endonezya ve Mısır gibi diğer orta gelirli ülkeler bu sürece daha geç dahil olmuş; 2010 sonrası dönemde ekonomik büyümenin emisyonlar üzerindeki duyarlılığı azalmaya başlamıştır. Türkiye ise bu bağlamda, yükselen ekonomilerin tipik dinamiklerini yansıtmaktadır: GSYH hızla artarken sera gazı emisyonları da paralel şekilde yükselmeye devam etmektedir. Bu nedenle, Türkiye için henüz herhangi bir karbon ayrışmasından söz etmek mümkün değildir. Düşük gelirli ülkelerde ise belirgin bir ayrışma deseni gözlemlenmek zordur. Bu nedenle klasik karbon ayrışması yaklaşımını bu bağlamda uygulamak güçleşmektedir.

Şekil 2: Ülkelerin Karbon Ayrışması Performansları, (1970 = 100) 1970-2024



Kaynak: World Bank, TEPAV Hesaplamaları

Karbon ayrışması ölçümünde en yaygın yöntemlerden biri, GSYH ve emisyonlardaki büyüme oranlarının karşılaştırılmasına dayanan **elastisite (esneklik)** hesaplamalarıdır. Buna göre,

$$\varepsilon = \frac{\% \Delta C}{\% \Delta GSYH}$$

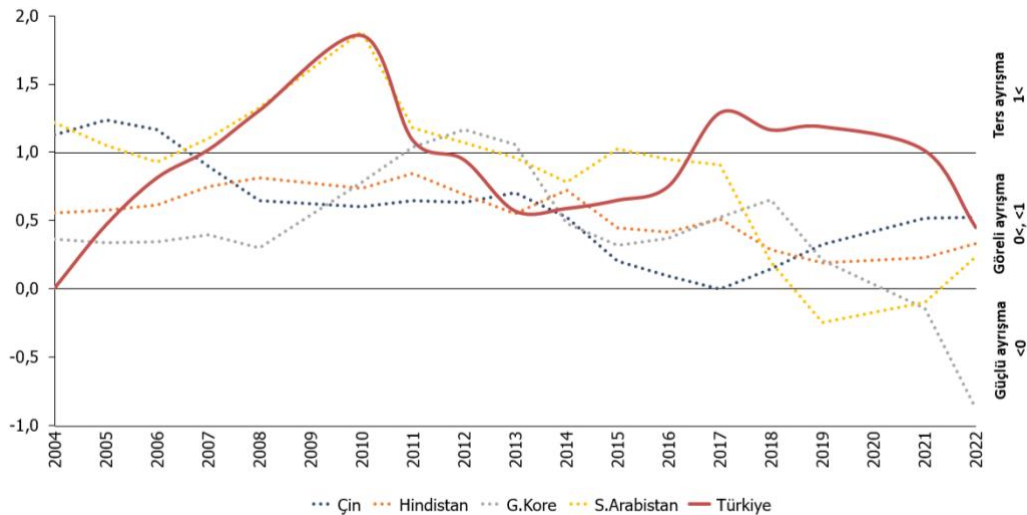
şeklinde tanımlanan endeks, ekonomik büyüme ile emisyon artışlarının hızını karşılaştırmaktadır. Denklemdaki ε karbon ayrışma elastisitesini, $\% \Delta C$ sera gazı emisyonlarındaki yüzde değişimi, $\% \Delta GSYH$ ise gayrisafi yurt içi hasıladaki yüzde değişimi ifade etmektedir.

Tapio (2005), tarafından geliştirilen karbon ayrışması yaklaşımına göre bu katsayı büyüme ile karbon salımları arasındaki ilişkinin niteliğini ortaya koymaktadır:

- **Katsayının 1'in üzerinde olması**, emisyon artışlarının ekonomik büyümeden daha yüksek olduğunu ve **ters ayrışmayı** gösterir.
- **Katsayının 0 ile 1 arasında olması**, büyümenin emisyonlardan daha hızlı gerçekleştiğini ve **görelî ayrışmayı** ifade eder.
- **Katsayının 0'ın altında olması**, büyüme sürerken emisyonların azalması anlamına gelir ve **mutlak (güçlü) ayrışmayı** işaret eder.

Şekil 3'te ülkelerin karbon ayrışması elastisiteleri gösterilmektedir. Çin, 2010 sonrasında elastisite değerini belirgin biçimde 1'in altına düşürmüştü ve yaklaşık 0,5 seviyelerinde seyretmiştir. Bu durum, yüksek büyümesine rağmen emisyon artış hızını görece sınırlayabilen bir ekonomi örneği sunmaktadır. Hindistan da benzer şekilde 0,5–1 aralığında kalarak görelî ayrışma sürecini istikrarlı biçimde sürdürmüştür. Güney Kore ise 2010'ların ortalarından itibaren elastisite değerinin sıfırın altına inmesiyle güçlü ayrışma örneği sergilemiştir. Suudi Arabistan uzun süre boyunca elastisitesini 1'in üzerinde tutarak emisyon artışlarının ekonomik büyümeden daha hızlı gerçekleştiğini göstermiştir. Ancak son dönemde değerin sıfıra yakın seyretmesi, sınırlı da olsa görelî ayrışmaya işaret etmektedir. **Türkiye ise incelenen dönemin büyük bölümünde elastisite değerinin 1'in üzerinde seyretmesiyle ters ayrışma eğilimi göstermiştir. 2010'lu yıllarda zaman zaman 1'in altına düşerek görelî ayrışma evresine girse de toplam sera gazı emisyonlarının azaldığı mutlak ayrışma durumuna henüz geçememiştir.**

Şekil 3: Seçili ülkelerin CO2 salım elastisitesi, 4 yıllık hareketli ortalama, 2004-2022

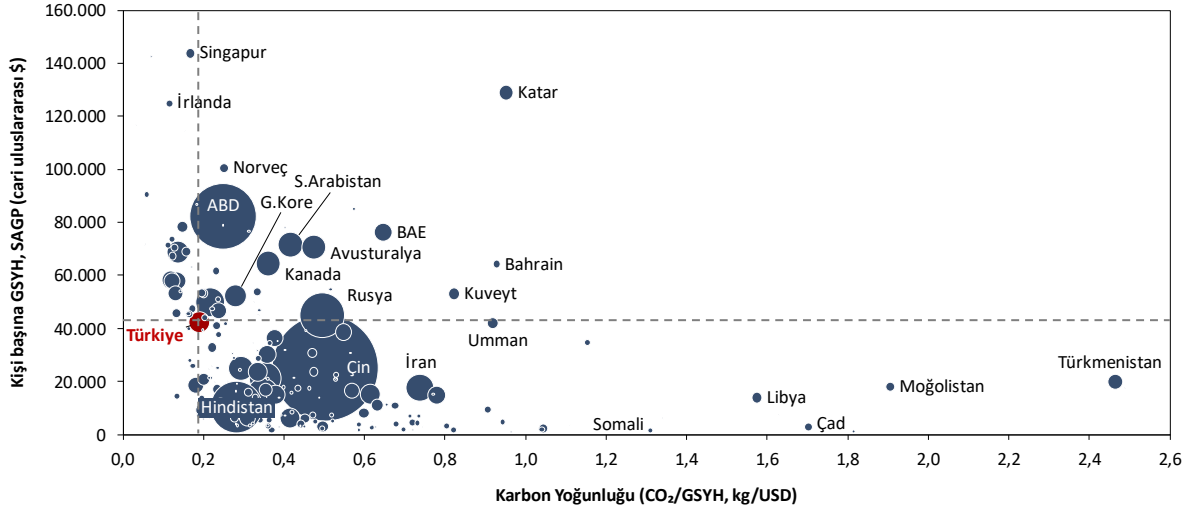


Kaynak: Dünya Bankası, TEPAV hesaplamaları

Şekil 4, ülkelerin kişi başı gelirleri ile sera gazı emisyon yoğunlukları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Genel eğilim, kişi başına geliri yüksek olan ülkelerin daha düşük karbon yoğunluğuna sahip olduğunu; gelir düzeyi düşük ülkelerde ise ekonomik faaliyetlerin birim gelir başına daha yüksek emisyon ürettiğini ortaya koymaktadır. Bu ilişki, kalkınma sürecinde enerji verimliliği ve temiz üretim teknolojilerine erişimin belirleyici rolünü doğrulamaktadır. Türkiye, grafikte yaklaşık **0,2 kg CO₂/USD** düzeyindeki karbon yoğunluğuyla **küresel ortalamanın altında** bir konumda yer almaktadır. Ancak ulusal ortalamanın görece düşük olması, iller arasındaki farkların büyüklüğünü gizlemektedir. Aynı hesaplama yöntemiyle iller küresel sıralamaya dâhil edildiğinde, **Zonguldak'ın 1,5 kg CO₂/USD** değeriyle **dünyada 6. sıraya**, **Karabük'ün 1,3**, **Çanakkale'nin 1,2**, **Kütahya'nın 1,0** seviyeleriyle ilk 15'e yerleştiği görülmektedir. Buna karşın, **İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa** gibi büyükşehirlerin karbon yoğunluğu **0,1 kg CO₂/USD'nin altında** kalarak **Avrupa ortalamasına yakın** değerler sergilediği dikkat çekmektedir.

Bu tablo, Türkiye'nin genel karbon yoğunluğu düşük görünse de, ülke içinde “**karbon coğrafyasının**” son derece parçalı olduğunu göstermektedir. Sanayi ve enerji üretiminin yoğunlaştığı illerin ekonomileri karbona bağımlıken; hizmet ağırlıklı ekonomiye sahip metropoller görece karbona daha az bağımlıdır. Dolayısıyla, Türkiye'nin karbon profili **ulusal düzeyde dengeli değil, bölgesel olarak kutuplaşmış** bir yapıdadır. Bu da yeşil dönüşüm politikalarının yalnızca ulusal ortalamalar üzerinden değil, illerin üretim yapısı, enerji profili ve sektörel yoğunlukları dikkate alınarak tasarlanması gerektiğini göstermektedir. Bir sonraki bölümde, bu mekânsal farklılaşmalar ayrıntılı biçimde ele alınacak ve **karbon yoğunluğu yüksek illerin yapısal özellikleri** analiz edilecektir.

Şekil 4: Ülkelerin sera gazı emisyon yoğunlukları ve kişi başına GSYH, 2023¹⁵



Kaynak: Climate Trace, TEPAV Hesaplamaları

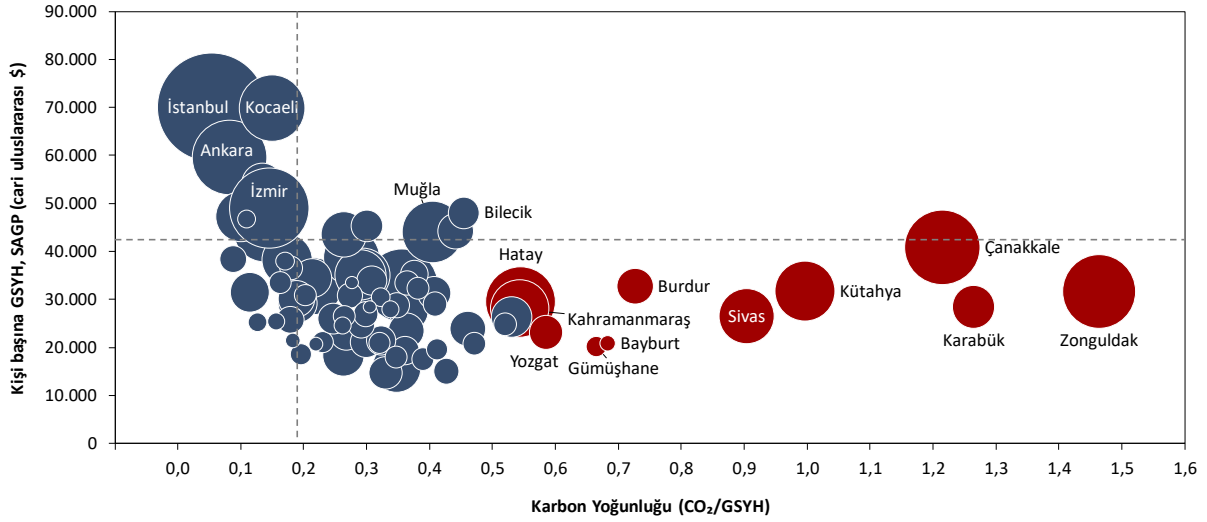
Türkiye'de İl Düzeyinde Karbon Yoğunluğu ve Mekânsal Bulgular

Şekil 5, 2023 yılı itibarıyla Türkiye'de illerin kişi başına GSYH düzeyleri ile üretim bazlı karbon yoğunlukları arasındaki farklılıkları ortaya koymaktadır. Yatay eksen kişi başına GSYH'yi, dikey eksen ise illerin sera gazı emisyon yoğunluğunu göstermektedir. Dairelerin büyüklüğü toplam emisyon düzeylerini ifade etmektedir. Görselleştirme, Zonguldak (1,46), Karabük (1,26),

¹⁵ Balon büyüklükleri toplam sera gazı emisyonunu göstermektedir, milyon ton CO₂e

Çanakkale (1,21) ve Kütahya (0,99) gibi illerde görece düşük kişi başına gelir düzeylerine rağmen yüksek karbon yoğunluğunun dikkat çektiğini göstermektedir. Buna karşılık İstanbul (0,05), Ankara (0,08), İzmir (0,14) ve Kocaeli (0,14), yüksek gelir düzeyleriyle birlikte daha düşük karbon yoğunluklarıyla öne çıkmaktadır. **İller arasındaki bu farklılıklar, Türkiye'nin yeşil dönüşüm politikalarında bölgesel önceliklerin belirlenmesine ışık tutmakta; Zonguldak, Karabük, Kütahya ve Çanakkale gibi ağır sanayi ve fosil yakıta dayalı iller, sürecin en kırılgan bölgeleri arasında yer almaktadır.**

Şekil 5: İllerin sera gazı emisyon yoğunlukları ve kişi başına GSYH, 2023¹⁶

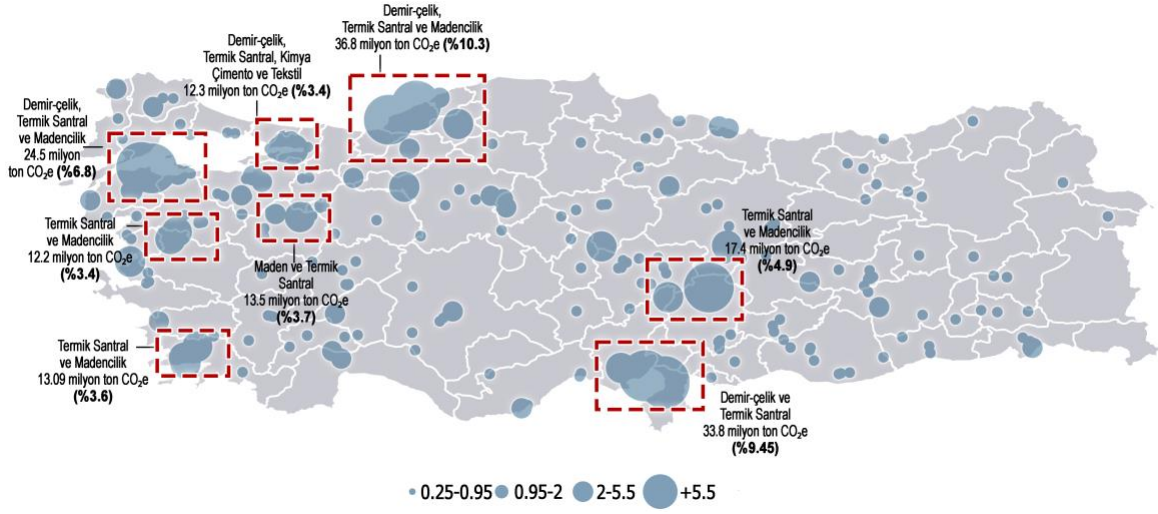


Kaynak: Climate Trace, TÜİK, TEPAV hesaplamaları

Şekil 6, Türkiye'de enerji ve imalat sektörlerinde en yoğun sera gazı salımlarının gerçekleştiği bölgeleri ortaya koymaktadır. Uydu tabanlı gözlemlerden elde edilen bu veriler, imalat ve enerji üretim tesislerinin toplam emisyonlarını mekânsal ölçekte görünür kılmakta ve özellikle demir-çelik, termik santral, madencilik, kimya ve çimento gibi karbon yoğun sektörlerin coğrafi dağılımını yansıtmaktadır. Zonguldak-Karabük-Bartın 36,8 milyon ton CO₂e (toplam imalat ve enerji karbon salımının %10,3'ü), İskenderun-Yumurtalık 33,8 milyon ton (toplam imalat ve enerji karbon salımının %9,45'i), Çanakkale 24,5 milyon ton (toplam imalat ve enerji karbon salımının %6,8'i), ve Afşin-Elbistan 17,4 milyon ton değerleri ile (toplam imalat ve enerji karbon salımının %4,9'u) öne çıkmaktadır. Bu tablo, Türkiye'de emisyonların belirli sanayi merkezlerinde yoğunlaştığını ve bölgesel dönüşüm politikalarının özellikle bu alanlara odaklanması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca söz konusu bölgelerin kırılganlığı, enerji arz güvenliği ve istihdam gibi unsurlarla da doğrudan bağlantılıdır.

¹⁶ Balon büyüklükleri toplam sera gazı emisyonunu (milyon ton CO₂e), kesikli çizgiler Türkiye ortalamasını göstermektedir,

Şekil 6: İmalat ve Enerji üretim tesislerinin karbon salımları haritası, milyon ton CO₂e eşdeğeri, 2024¹⁷



Kaynak: Climate Trace, TEPAV görselleştirmeleri

Şekil 7, Türkiye’de enerji ve imalat sektörlerinde en yüksek karbon salımlarını yapan ilçelerde istihdamın sektörel dağılımını göstermektedir. Zonguldak (%20,7), Soma (%44,4), Afşin (%40), Yatağan (%34,6), Çanakkale-Biga (%25,7), İskenderun (%17,8) ve Adana-Yumurtalık (%35,1) gibi lokasyonlarda öne çıkan sektörler, doğrudan yüksek emisyon üreten faaliyetlerle örtüşmektedir. Örneğin, Zonguldak ve Soma’da istihdamın önemli bir bölümü kömür ve linyit çıkarılmasına dayanırken; Zonguldak-Ereğli (%26,3) İskenderun (%17,8) ve Çanakkale’de (%17,7) ana metal ve demir-çelik sanayi öne çıkmaktadır. Afşin (%24,9) ve Yumurtalık’ta (%29,1) ise enerji üretimi (özellikle termik santraller) istihdamın merkezinde yer almaktadır.

¹⁷ *Uydu tarafından tespit edilen lokasyon bazlı veriler kullanılmıştır. Balon büyüklükleri CO₂e milyon ton eşdeğerini göstermektedir

Şekil 7: En çok sera gazı emisyonuna sahip ilçelerin istihdam dağılımı, 2019



Kaynak: SGK, TEPAV hesaplamaları

Sonuç

Bu çalışma, Türkiye'de illerin ekonomik faaliyetlerinin karbon yoğunluğunu ölçerek yeşil dönüşüm sürecinde mekânsal kırılگانlıkların nerelerde yoğunlaşmakta olduğunu ortaya koymaktadır. Bulgular üç temel noktaya işaret etmektedir:

- İlk dikkat çeken nokta, Türkiye'nin genel karbon bağıllığı uluslararası karşılaştırmada düşük görünse de ülke içinde bir heterojenlik söz konusudur. İller arasında ekonominin karbon bağıllığı açısından belirgin farklılıklar göze çarpmaktadır. Zonguldak, Karabük, Çanakkale ve Kütahya gibi iller, görece düşük kişi başına gelir düzeylerine rağmen kömür, demir-çelik ve diğer enerji-yoğun sanayi kollarına dayalı üretim yapıları nedeniyle yüksek emisyon yoğunluklarıyla öne çıkmaktadır. Buna karşılık İstanbul, Ankara, İzmir, Kocaeli ve Antalya gibi iller, yüksek kişi başına GSYH seviyelerine rağmen görece düşük karbon yoğunluklarıyla dikkat çekmekte; bu durum gelir düzeyi ile sera gazı salımları arasındaki ilişkinin iller bazında farklılaştığını ortaya koymaktadır.
- Bir diğer önemli bulgu, mekânsal analizlerin Türkiye'de bazı bölgelerde karbon yoğun sektörlerin belirgin biçimde kümелendiğini ortaya koymasındır. Zonguldak, Karabük, Afşin-Elbistan, İskenderun ve Çanakkale gibi iller, özellikle madencilik, demir-çelik ve termik santrallerin yoğun olduğu merkezlerdir. Bu iller Türkiye'nin toplam sanayi üretiminde en önde gelen merkezler olmasalar da faaliyetlerinin karbona yüksek bağımlılığı nedeniyle 2053 net sıfır hedefi açısından en kırılğan bölgeler olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, İstanbul gibi hizmetler sektörü öne çıkan iller, toplamda daha fazla karbon salımına sebep olsa da, ekonomik yapıları bu kadar karbon bağıllı olmadığı için aynı ölçüde kırılğan değildir.
- Son olarak, istihdam verileri incelendiğinde bu kırılğanlık daha da derinleştirmektedir. Zonguldak, Soma, Karabük, İskenderun, Çanakkale-Biga, Afşin-Elbistan ve Adana-Yumurtalık gibi ilçelerde istihdamın büyük bölümü kömür madenciliği, ana metal sanayi ve termik enerji üretimi gibi karbon yoğun sektörlerde toplanmaktadır. Bu tablo, karbon yoğun sektörlerdeki istihdamın yerel ekonomilerdeki belirleyici rolünü ortaya koymakta ve adil geçiş tartışmaları açısından kritik bir risk alanına işaret etmektedir.

Sonuç olarak, il düzeyinde karbon yoğunluğu yalnızca çevresel bir gösterge değil; aynı zamanda Türkiye'nin ekonomik rekabet gücünü, sosyal adalet dengesini ve uluslararası ticaretteki konumunu doğrudan şekillendiren stratejik bir politika aracıdır. Bu göstergenin politika yapım süreçlerine sistematik biçimde entegre edilmesi, Türkiye'nin yeşil dönüşümde gecikmeden ilerlemesi ve bölgesel eşitsizlikleri azaltması ve küresel rekabetçiliğini sürdürülebilir biçimde koruması açısından hayati önem taşımaktadır.

Politika Değerlendirmesi: Yeşil Dönüşüm ve Teknolojik Yeniden Yapılanma

Türkiye'nin karbon yoğunluğu analizleri, ekonomik yapının yalnızca çevresel değil, aynı zamanda teknolojik sınırlarla da tanımlandığını göstermektedir. Her ne kadar karbon bağıllığı Türkiye'nin hizmetler sektörünün büyüklüğünden ötürü az görünse de, imalat sektörü ihracatının en fazla olduğu AB pazarında Türkiye için bir kırılğanlık söz konusudur. Avrupa Birliği'nin **Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM)** artık teknik bir hazırlık değil, somut bir uygulama alanıdır. Bu düzenleme ile birlikte, Türkiye'nin ana ihracat pazarı olan Avrupa'da ürünlerin sadece fiyat veya kaliteye göre değil, **karbon ayak izi ve üretim teknolojisine göre** rekabet ettiği yeni bir dönem başlamıştır. Dolayısıyla, mevcut üretim yapısının sürdürülmesi artık ekonomik olarak sürdürülebilir değildir.

Bugün Türkiye'nin temel açmazı, karbon yoğun sektörlerle dayalı üretim yapısının giderek **teknolojik olarak eskimesi** ve düşük verimlilik tuzağına sıkışmasıdır. Yüksek karbon salımı yapan

sektörlerin büyük bölümü, aynı zamanda düşük dijitalleşme düzeyine ve düşük Ar-Ge yoğunluğuna sahip sektörlerdir. Bu nedenle, yeşil dönüşümün başarısı yalnızca emisyon azaltımıyla değil, **teknolojik dönüşüm kapasitesinin güçlendirilmesiyle** doğrudan bağlantılıdır. Teknoloji burada üç açıdan belirleyicidir:¹⁸

1. **Verimlilik:** Yeni üretim teknolojileri, enerji tüketimini ve kaynak israfını azaltarak karbon yoğunluğunu düşürür.
2. **Rekabetçilik:** Düşük emisyonlu üretim artık AB pazarında temel bir rekabet koşuludur; teknolojik dönüşüm olmadan Türkiye sanayisinin ihracat kapasitesi aşınacaktır.
3. **Yeni değer zincirleri:** Temiz enerji, batarya teknolojileri, yeşil hidrojen, dijital ikizler ve çevrimsel ekonomi gibi alanlar, Türkiye'nin sanayide yeni yatırım çekme ve istihdam yaratma potansiyelini belirleyecektir.

Bu nedenle Türkiye'nin, **yeşil dönüşümle uyumlu, kapsamlı bir teknolojik yeniden yapılanma stratejisi** oluşturması artık bir tercih değil, zorunluluktur. Bu stratejinin temel bileşenleri şunları içermelidir:

- **Enerji-yoğun sektörlerde teknoloji yenileme programı:** Demir-çelik, çimento, kimya ve enerji gibi karbon yoğun sektörlerde düşük emisyonlu üretim teknolojilerinin (örneğin karbon yakalama, yeşil hidrojen, elektrikli ergitme) yaygınlaştırılması. Türkiye'nin güncellenecek NDC'si uyarınca özellikle emisyon oranlarının artışında hayati önemde olan, bu çalışmada da görüldüğü üzere ciddi bir karbon salımına neden olan kömürden çıkış için hızla bir tarihin belirlenmesi, çalışmada işaret edilen kırılğan bölge, il ve grupların geleceğine dönük kapsamlı bir adil geçiş politikasını oluşturulması.
- İklim Kanunu sonrasında geliştirilen ETS, Adil Geçiş ve yerel yönetim mevzuatlarının, bölgesel ve iller düzeyindeki farklılıklar gözetilerek tasarlanması.
- **Dijitalleşme ve veri temelli sanayi:** Üretim süreçlerinin dijital ikizler, yapay zekâ ve sensör teknolojileriyle izlenebilir hale getirilmesi, hem karbon ayak izinin hem de verimlilik performansının anlık ölçülmesi.
- **Bölgesel akıllı uzmanlaşma:** Karbon yoğun illerde teknoloji odaklı dönüşümün bölgesel kalkınma politikalarıyla entegre edilmesi; yeni iş alanlarının yaratılması ve mevcut işgücünün yeniden beceri kazanması.
- **Kamu-özel finansman araçları:** Yeşil dönüşüm yatırımlarının uzun vadeli finansmanla desteklenmesi; kamu bankalarının, kalkınma ajanslarının ve özel fonların bu dönüşüme yönlendirilmesi.

Sonuç olarak, **CBAM Türkiye'ye dışsal bir baskıdan çok içsel bir yönelim fırsatı sunmaktadır.** Bu yeni sanayi paradigmasında teknoloji, yalnızca üretimin bir girdisi değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğin ve ekonomik rekabetçiliğin anahtarıdır. Türkiye'nin net sıfır hedeflerine ulaşması, yeşil dönüşümün sosyal politika ve bölgesel kalkınma araçlarıyla desteklenmesinin yanı sıra, **ekonominin tüm katmanlarında teknoloji tabanlı bir yeniden yapılanmanın** kararlılıkla yürütülmesine bağlıdır.

¹⁸ TÜSİAD Rekabetin Yeni Dinamiği: Sanayide Teknolojik Dönüşüm

Kaynakça

Brown, N., Jimenez, D., Rokisky, J., Davitt, A., and Reilly, E. (2024): Agriculture sector- Cattle Emissions from Enteric Fermentation and Manure Left on Pasture. The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (JHU/APL), USA, and WattTime, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Climate TRACE Ownership Information: Source & Company-Level Ownership Methodology. WattTime and RMI, USA, TransitionZero and Hypervine, UK. Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Collins, G., Jain, A., Tulloch, P., Sicurello, P., Kirwan, E., Sridhar, L., Piatko, C., Reilly, E., Hughes, M. (2024). Waste sector: Emissions from Wastewater Treatment Plants. The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (JHU/APL), USA, Imperial College London, UK, Machine Learning and Env., Applied Research Consultant, CAN, and WattTime, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Davitt, A., Lewis, C., Andoe-Leggett, M., Schiller, S. (2024). Agriculture sector- Country- level Enteric fermentation and Manure Management Emissions Estimates from Cattle Operations. WattTime, USA and Carbon Yield, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Davitt, A., Volpato, G., Cheng, X.F., Block, E., Raniga, K., Vandermaal, J., Mendoza, A., McCrary, D., Sutherland, A., Rostami, R., Smith, M., Goodwin, B., Pluard, C., and Schiller, S. (2023). Enteric fermentation and manure management emissions from feedlots and dairies. WattTime, Harvard University, Synthetica, Carbon Yield, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Freeman, J., Rouzbeh Kargar, A., Couture, H., Jeyaratnam, J., Lewis, J., Alvara, M., Koenig, H., Nakano, T., Davitt, A., Lewis, C., and McCormick, G.(2024). Power sector: Emissions from Electricity Generation. WattTime, USA Pixel Scientia Labs, USA and Global Energy Monitor, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Freeman, J., Sridhar, L., and Alvara, M. (2024). Power sector- Emissions from Heat Plants. WattTime, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Hunter, H., Robinette, M., Brown, N., Sridhar, L., Lewis, C., and Reilly, E. (2024). Forestry and Land Use Change sector: Emissions from Reservoirs. The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (JHU/APL), USA, and WattTime, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Jolleys, M., Francis, S., Bahukhandi, V., Sundaram, S., Malik, M., Sharma, P., Hernandez, C., and Duddy, P.(2024). Mineral Extraction sector: Mining and Quarrying Emissions from Copper, Iron, Bauxite, Rock and Sand, Hypervine, UK, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Kott, T., Foster, K., Villafane-Delgado, M., Loschen, W., Sicurello, P., Ghebreselassie, M., Reilly, E., and Hughes, M. (2024). Transportation Sector - Global Road Emissions. The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (JHU/APL), USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Lewis, C., Tate, R.D., and Mei, D.L. (2024). Fuel Operations sector: Coal Mining Emissions Methodology. WattTime and Global Energy Monitor, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Markakis, P., Gowdy, T.M., Sheng, Z., Lancellotti, B., Malof, J.M., and Bradbury, K., Building sector: Estimating Global, High-resolution Onsite Building Emissions. Nicholas Institute for Energy, Environment & Sustainability, Duke University, Dept. of Electrical & Computer Engineering, Duke University; and Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, University of Missouri, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Mayes, B., Powell, M., Knights, D., Schofield, M., and Mackereth, T. (2024). Transportation sector: Domestic and International Shipping Emissions. OceanMind, UK and the University of Minnesota, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

McDonald, G., Kroodsma, D., Carbo-Mestre, P., Powell, M., Wei, Z. (2024), Transportation sector: Emissions From Vessels With Low Information Availability. Global Fishing Watch (GFW) and the Environmental Markets Lab (emLab) at the University of California, Santa Barbara, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Mowat, A., Louis, G., Kapp, S., and Bird, M. (2024). Climate TRACE Ownership Information: Global Energy Monitor Methodology for Ownership Data. Global Energy Monitor, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Peltier, M., Fallurin, J., Wang, J., Conway, TJ, and Gordon, D. (2024). Manufacturing and Industrial Processes sector: Petrochemical Ethylene Steam Cracker Emissions. RMI, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Raniga, K., (2024). Waste Sector: Estimating CH₄ Emissions from Solid Waste Disposal Sites. WattTime, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Rudiyanto and Minasny, B. (2024). Rice Cultivation Emission Estimates using MODIS. Universiti Malaysia Terengganu, Malaysia and the University of Sydney, Australia, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Rudiyanto and Minasny, B. (2024). Rice Cultivation Emissions Estimates using Sentinel- 1A/B and -2A/B. Universiti Malaysia Terengganu, Malaysia and the University of Sydney, Australia, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Saraswat, I. (2024). Transportation sector: Domestic and International Aviation Emissions. WattTime, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Schmeisser, L., Tecza, A., Huffman, M., Bylsma, S., Delang, M., Stanger, J., Conway, TJ, and Gordon, D. (2024). Fossil Fuel Operations Sector: Oil and Gas Production and Transport Emissions. RMI, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Sharma, P. and Basso, B. (2024). Agriculture sector: Estimation of Direct Nitrous Oxide (N₂O) Emissions from Synthetic Fertilizers. Department of Earth and Environmental Sciences, Michigan State University, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Sinha, A. and Crane, V. (2024). Manufacturing and Industrial Processes sector: Iron & Steel Manufacturing Emissions. TransitionZero, UK, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Sinha, A. and Crane, V. (2024). Manufacturing and Industrial Processes sector: Cement Manufacturing Emissions. TransitionZero, UK, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Sinha, A. and Heal, J. (2024). Manufacturing and Industrial Processes sector: Aluminium Production Emissions. TransitionZero, UK, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Sinha, A. and Heal, J. (2024). Manufacturing and Industrial Processes sector: Chemicals, and Pulp and Paper Emissions. TransitionZero, UK, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Thomas, P., Saraswat, I., Raniga, K., Lewis, C., Freeman, J., Davitt, A., Schmeisser, L., Fallurin, J., Sinha, A., Heal, J., Crane, V., Jolleys, M., and McCormick, G., (2024).

Wang, J., Fallurin, J., Peltier, M., Conway, TJ, and Gordon, D. (2024). Fossil Fuel Operations Sector: Refining Emissions, RMI, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

Yang, Y. and Saatchi, S. (2024). Forestry and Land Use Change sector: Net Forest & Mangrove, Net Grassland, and Net Wetland Carbon Stock Change - Living Biomass. CTrees, USA, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org> 16.07.2025 tarihinde erişildi

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134492500343X>

<https://www.climateforesight.eu/seeds/decoupling-emissions-from-economic-growth/>

<https://www.nature.com/articles/s41598-024-71101-2>

<https://www.iea.org/commentaries/the-relationship-between-growth-in-gdp-and-co2-has-loosened-it-needs-to-be-cut-completely>

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. The Quarterly Journal of Economics, 110(2), 353–377. <https://doi.org/10.2307/2118443>

Shafik, N., & Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: Time-series and cross-country evidence (Policy Research Working Paper No. 904). World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/833431468739515725>