

Enerji Dönüşümünün Dinamikleri: Yenilik, Geçiş Ekonomisi, Yol Bağımlılığı, ve Karar Verme

Michael Grubb, Alexandra Poncia ve
Roberto Pasqualino*

Soyut

Bu makale, tarihsel olarak düşük inovasyon oranlarıyla işaretlenen enerjideki inovasyon etrafındaki son gelişmeleri, kanıtları ve teorileri ve düşük karbonlu sistemlere doğru devam eden daha geniş bir geçişin ekonomik boyutlarını inceliyor. Enerji tedariki ekonomik kalkınmanın merkezinde yer alır, ancak büyüyen iklim değişikliği krizinin kalbinde yer alır. İnovasyon aynı zamanda ekonomik ilerlemenin de ayrılmaz bir parçasıdır. Enerjiyle ilgili inovasyon, araştırma ve geliştirmenin (AR-GE) ötesinde birçok şeyi içeren, karbonsuzlaştırmayı hedefleyen çok çeşitli politikalar nedeniyle hız kazanmıştır. Orta gelirli ülkeler küresel emisyon beklentilerine giderek daha fazla hakim oluyor ve düşük karbonlu enerji sistemlerinin nihayetinde fosil yakıt tabanlı sistemlerden daha pahalı olması gerektiğine dair ikna edici bir kanıt yok. Ancak, geçiş, özellikle birçok gelişmekte olan ülkede, politik ve kurumsal engellerin yanı sıra kritik bir faktör olarak sermaye maliyetiyle birlikte çok sayıda engelle karşı karşıyadır.

Geçiş, fırsatlar ve riskler getirir. Uzun sermaye ömürleri ve enerji sistemleri ve kurumlarının yol bağımlılığı, büyüyen iklim etkileri küresel karbonsuzlaşmayı hızlandırdıkça varlık kaybı risklerini artırır. Fırsatlar, daha erken eylemden, en belirgin şekilde enerji ithalatçıları için, ancak ülkeler dahil olan yeni tedarik zincirlerinden pay aldıkça daha geniş bir şekilde ortaya çıkabilir. Orta gelirli ülkelerin, hızlandırılmış geçişle ilişkili küresel faydalardan pay almak için aktif politikalara ihtiyaçları vardır.

Anahtar kelimeler: Enerji dönüşümü; enerji inovasyonu; iklim değişikliği; enerji maliyetleri; kalkınma yolları

* Michael Grubb, University College London'da Enerji ve İklim Değişikliği Profesörü ve Bölüm 1-Azaltma'nın Toplantı Lideri Yazarıdır. *Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin Altıncı Değerlendirme Raporu*(IPCC).e-posta:m.grubb@ucl.ac.uk Alexandra Poncia, Arup Engineering, Ltd. şirketinde Kıdemli Danışmandır. e-posta:alexandraponcia@gmail.com . Roberto Pasqualino, Cambridge Üniversitesi Arazi Ekonomisi Bölümü Kıdemli Araştırmacısıdır. e-posta Kıdemli Araştırmacı, Cambridge Üniversitesi Arazi Ekonomisi Bölümü, r.pasqualino@outlook.com . Bu makale, *Dünya Kalkınma Raporu 2024: Orta Gelir Tuzağı*. Bu makalede ifade edilen bulgular, yorumlar ve sonuçlar tamamen yazarlara aittir. Bunlar, Uluslararası İmar ve Kalkınma Bankası/Dünya Bankası ve bağlı kuruluşlarının veya Dünya Bankası İcra Direktörlerinin veya temsil ettikleri hükümetlerin görüşlerini temsil etmemektedir. Yazarlar, Enerji İnovasyonu ve Sistem Geçiş Ekonomisi programından gelen önemli araştırma katkısını kabul etmektedir (www.eeist.co.uk), İngiltere Enerji Güvenliği ve Net Sıfır Bakanlığı'nın Prof. Grubb ve Roberto Pasqualino'nun araştırmalarına sağladığı mali desteği de kapsıyordu.

İçindekiler

Özet.....	3
1. Giriş: amaç ve bağlam.....	5
2. Yenilik ve teknoloji geçişi.....	6
2.1. Enerji inovasyonu Ar-Ge'sinde yapısal yetersiz yatırım ve yükümlülük.....	6
2.2. Yenilik: Ar-Ge ve “teknoloji nötr” pazar çekiminin ötesinde	8
2.3. Yenilik ve uygulama arasındaki ilişki	10
2.4. Yenilikten geçiş: S-eğrisi dinamikleri, engeller ve mevcut durum.....	15
3. Geçiş maliyetleri, senaryolar, tutarsızlıklar ve riskler	18
3.1. Enerji fiyatlarının enerji talebi, maliyetleri ve yapısal değişim üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkileri.....	18
3.2. Geçiş maliyetleri: modelleme kanıtı.....	21
3.3. Zaman ufukları, yol bağımlılığı ve karbon kilitlenmesi.....	24
3.4. Küresel senaryolar ve varlık tutarsızlığı riskleri.....	25
4. Yanıt seçenekleri.....	30
4.1. Genel Bakış	30
4.2. Politika yapımına ve politika paketlerine yaklaşımlar.....	35
4.3. Uluslararası boyutlar ve finans	38
5. Sonuç.....	41
Notlar	...
 Ek A. Vaka çalışması – Enerji geçişiyle ilgili İngiltere deneyimi	55
Bağlam: çok aşamalı bir geçiş	55
2000'den bu yana eğilimler ve politikalar	56
Karbon fiyatlandırması—AB ETS ve ötesi.....	57
Yenilenebilir yatırım.....	57
Enerji verimliliği	58
Notlar	60
Referanslar	61

Rakamlar

Şekil 1. IPCC 20 bölge sınıflandırması için İnsani Gelişme Endeksi'ne göre çizilen kişi başına emisyonlar (2020)	5
Şekil 2. 2018 yılında OECD ülkelerinde sektöre göre Ar-Ge yoğunluğu.....	7
Şekil 3. Maliyet azaltma potansiyelini etkileyen teknoloji özellikleri	13
Şekil 4. Yeniliklerin Yayılması Modeli.....	16
Şekil 5. S-eğrisi büyümesinin ve teknoloji yer değiştirmesinin stilize edilmiş aşamaları.....	17
Şekil 6. OECD ülkeleri arasında paylaşılan ulusal enerji maliyeti (enerji son kullanıcı fiyatlarındaki büyük farklılıklara rağmen)	19
Şekil 7. İki dünya - alternatif model varsayımları altında enerji geçişi sonuçları (Keynesçi ve genel denge)	22
Şekil 8. Her yıl dünya genelinde eklenen güneş enerjisi kapasitesi, 2002–23	26
Şekil 9. Yıllık temiz enerji yatırımı, 2015–2023e	27
Şekil 10. Elektrikli yolcu hafif hizmet aracı pazarlarındaki küresel eğilimler, 2013–2023.....	27
Şekil B6.1. Her senaryoda fosil yakıt (FF) ve yenilenebilir (REN) enerji arzı	29
Şekil 11. OECD/OECD dışı coğrafya ve başlıca kurumsal kategorilere göre elden çıkarılmış varlıkların mülkiyet zinciri.....	30
Şekil 12. 143 ülkede düşük karbon geçişinin etkilerine karşı dayanıklılık ve kırılganlık eksikliğine dair göstergeler	32
Şekil 13. Açık bir karbon fiyatlandırma mekanizması tarafından kapsanan sera gazı emisyonları ile fiyat seviyesi arasındaki fark... ..	
Şekil 15. Bölgeye göre düşük karbonlu yatırım, 2030'a kadar yakın ve tahmini ortalama yıllık ihtiyaçlar. 40 Şekil A.1 Birleşik Krallık GSYİH'sinin, toplam bölgesel CO2'nin karşılaştırılması emisyonlar ve nihai enerji talebi, 1990–2022	55
Şekil A.2. Elektrik üretim profili ve CO2 emisyonlar, 1996–2022	56

Tablolar

Tablo 1. Teknolojiye göre gösterge öğrenme oranı aralıkları	12
Tablo B8.1. Marjinal ve marjinal olmayan değişim bağlamında metodolojik yaklaşımlar.....	36

Kutular

Kutu 1. Enerji ve karbon fiyatlandırmasının inovasyon üzerindeki etkisi—karma mesajlar	9
Kutu 2. Tetiklenen inovasyonun biçimleri ve modellerdeki temsil.....	11
Kutu 3. Son düşük karbonlu teknoloji dönüşümlerine ilişkin üç vaka çalışması	14
Kutu 4. Enerji fiyatlarının enerji talebi ve maliyetleri üzerindeki etkisi	19
Kutu 5. Entegre değerlendirme modellerinde mahsur kalmış sermaye ve yol bağımlılığına yönelik modelleme yaklaşımları.....	24
Kutu 6. Gözlemlenen dinamiklerin ve öngörülen enerji ve emisyonlar için son eğilimlerin etkileri	28
Kutu 7. Politika paketlerine yönelik genişletilmiş bir ekonomik yaklaşım	32
Kutu 8. Karar değerlendirme yaklaşımları	35

Yönetici Özeti

- Ekonomilerimiz, evrimleşen fiziksel, teknolojik ve sosyal sistemlere dayanmaktadır. Birçok "klasik" ekonomik bakış açısı, mevcut sistemlerdeki kaynakların optimum kullanımına (genellikle denge kavramlarına dayalı) ve kaynak girdileri ve fiyatlarındaki marjinal değişikliklerin maliyetine odaklanır. Bu bakış açıları, iklim değişikliği ve derin karbonsuzlaştırma ihtiyacı ile ilişkili büyük ölçekli değişikliklere, potansiyel istikrarsızlıklara ve sistem geçişlerine daha az uygundur.
- Enerji sistemleri güçlü bir yol bağımlılığına sahiptir. Olumlu, kendini güçlendiren dinamikler arasında teknoloji maliyetlerinin dağıtım ölçeğiyle birlikte azalma eğiliminde olması gerçeği yer alır. Ancak enerji sistemleri genel olarak önemli bir ataletle sahiptir ve karmaşık fiziksel, kurumsal ve finansal ağlar içerir, böylece hızlı ve büyük ölçekli değişiklikler maliyetli ve yıkıcı olabilir. Çoğu gelişmiş ülke, uzun yıllar süren mücadeleden sonra artık önemli bir karbonsuzlaştırma yolunda ilerlerken, çoğu orta gelirli ülke, kişi başına düşen emisyonların düşmesiyle başlayarak, bu on yılda enerji sektörlerinin yönüyle ilgili önemli seçimlerle karşı karşıyadır ve bunun kalıcı sonuçları vardır.
- Enerji ve büyük enerji kullanan sektörler, geleneksel olarak diğer birçok ekonomik sektöre kıyasla düşük araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) yoğunluğuna sahip olmuştur; bu durum, enerji teknolojileri ve sistemlerinde (santraller, yanmalı motorlar, yüksek fırınlar vb.) neredeyse bir asırlık nispeten kademeli iyileştirmelere yansımıştır. Ancak, elektrik üretim ve kullanım teknolojilerinde (depolama dahil) hızlı bir teknolojik değişim yaşanmaktadır ve artık ulaşım ve endüstriyel sistemlere kadar uzanmaktadır (enerji teknolojileri ve sistemleri hakkındaki eşlik eden makaleye bakınız (Melekh, Grubb ve Dixon 2024).
- Bu yeniliklerin çoğu esasen geniş bir karbon giderme politikaları kümesi tarafından yönlendirildi ve yeni değer zincirleriyle yeni olasılıklar yarattı. Yenilik, nispeten küçük birim ölçeği ve tekrarlanabilirliğe sahip teknolojilerde (güneş ve rüzgar üretimi ve elektrikli araçlar gibi) en hızlıdır. Bunlar fosil yakıtlarla maliyet açısından giderek daha rekabetçi hale geliyor, ancak bu aynı zamanda sermaye maliyetine, politika ortamına (sübvansiyon ve vergi yapıları dahil) ve katkı arttıkça destekleyici altyapının (elektrik şebekeleri gibi) yeterliliğine ve daha geniş iş ortamına da büyük ölçüde bağlıdır.
- Düşük karbonlu enerji sistemlerinin nihayetinde fosil yakıt tabanlı sistemlerden daha pahalı olması gerektiğine dair ikna edici bir kanıt yoktur. Ampirik ve teorik kanıtlar, uzun vadede enerji sistemlerinin (birim maliyetleri telafi eden daha yüksek kaynak verimliliği dahil) büyük bir uyum sağlama ve evrimleşme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, geçiş kolay değildir ve mevcut çıkarlar da dahil olmak üzere birçok engelle karşı karşıyadır. Genel olarak, derin karbonsuzlaştırmanın uzun vadeli ekonomik etkileri, fosil yakıtın düşük karbonlu enerji sistemlerine kıyasla gelecekteki maliyetleri, fosil yakıt veya karbon vergilendirmesinden elde edilen gelirlerin üretken kullanımı ve fosil yakıtların ve yenilenebilir enerjilerin üretim ve ithalat ile ihracat pozisyonlarının göreceli konumu (ve ayrıca iklim değişikliği etkilerinin kendi başlarına şiddeti) dahil olmak üzere çok sayıda varsayıma bağlıdır.
- Birçok faktör (kurumsal ve işgücü yetenekleri dahil) orta gelirli ülkelerin inovasyon kapasitesini artırması için zorlu koşullar yaratır ve daha yüksek sermaye maliyeti, düşük karbonlu teknolojilerin maliyetini gelişmiş ekonomilere kıyasla artırır. Ancak, özellikle daha hızlı öğrenme potansiyeli ve daha düşük maliyet engelleri olan "kısa döngülü" teknolojiler için daha iyi konumlandırılabilirler bazı yollar vardır.
- Geçiş ve uyum maliyetlerinin boyutları (ve potansiyel faydalar), *bir kenara* Azaltılmış iklim hasarları ve "ortak faydalar" şunları içerir:
 - Kaynak/yatırım yer değiştirme etkileri (bazen kalabalıklaşma olarak da adlandırılır) karbonsuzlaştırmanın insan veya yatırım kaynaklarını diğer daha üretken kullanımlardan uzaklaştırdığı ölçüde GSYİH'yi azaltılabilir. Bu genellikle genel denge modelleri (ki bu

genellikle küresel bir karbon fiyatı ile optimum kaynak tahsisinin bir taban çizgisini varsayarlar. Bu tür modellerde, 100\$/tCO₂'yu aşan küresel bir karbon fiyatı genellikle 2030 yılına kadar derin bir karbonsuzlaşmaya yol açması ve geçiş döneminde GSYİH büyüme oranlarını yılda yaklaşık %0,1 ila %0,2 oranında düşürmesi bekleniyor.

- O Ancak bunun tersine, ekonomiler genellikle gelişmiş enerji verimliliği, ucuz düşük karbonlu enerji ve ilgili yenilikleri içerebilen üretken yatırımlara yetersiz yatırım yaparlar. Optimum bir temel varsayımı içermeyen ekonometrik ve post-Keynesçi ekonomik modeller, en azından fosil yakıt ithal eden ülkeler için enerji geçişinin potansiyel olumlu ekonomik etkilerini giderek daha fazla öne sürmektedir; ancak bu, diğer şeylerin yanı sıra, finans koşullarına da bağlıdır.
 - O Ek olarak, *adım* Geleceğin ve araçların seçiminin, ayarlama maliyetlerini belirleyeceği düşünülmektedir. Enerji fiyatlarındaki büyük ve ani artışların (karbon fiyatlandırması dahil) daha hedefli yatırım araçlarından daha olumsuz etkileri olması muhtemeldir. Birkaç "temsilci tabanlı" model ayrıca, büyük olasılıkla gecikmiş eylemin bir sonucu olarak zorunlu hale gelecek ve ardından iklim "dönüm noktası" istikrarsızlığıyla sonuçlanacak ani bir geçiş durumunda finansal sistem aracılığıyla iletilen makroekonomik istikrarsızlık potansiyelini de göstermektedir.
- Enerjideki derin yol bağımlılıkları, sermaye stoğu ve altyapı dahil, erken eylemin faydasını artırır ve erteleme ekonomik maliyetlerini yükseltir. Ancak ekonomik ve finansal sistemler kısa zaman ufuklarına sahip olma eğilimindedir ve şu anda, fosil yakıt enerji varlıklarının ve sermayesinin değerlendirilmesi, iklim değişikliğiyle mücadele için kararlaştırılmış hedeflere ulaşma ile açıkça tutarsızdır - ve aslında, halihazırda devam eden gözlemlenen geçiş hızıyla tutarsızdır - temiz enerji kaynakları ve endüstrileri ise büyük ölçüde düşük değeri görmektedir.
 - Hem teori hem de kanıtlar, enerji dönüşümünü hızlandırmak için bir dizi politika aracına ihtiyaç duyulduğunu açıkça göstermektedir. Fosil yakıtlardan kaynaklanan hasar çoğu ekonomide yeterince fiyatlandırılmamıştır, bu da ekonomik bir çarpıtmadır; ancak, fosil yakıt sübvansiyonlarının kaldırılması ve karbon fiyatlandırmasının getirilmesiyle ilgili fiyat değişiklikleri, mali faydaları olmasına rağmen, zorlu dağıtım etkileri içerebilir ve ani büyük ölçekli fiyat değişiklikleri orantısız bir şekilde yıkıcıdır. Piyasalar ve fiyatlar önemlidir, ancak diğer araçlarla birlikte geliştirilmeleri gerekir. Enerji verimliliğini artırmaya ve yeni düşük karbonlu endüstriler ve tedarik zincirleri oluşturmaya yardımcı olmaya yönelik politikalar, uygun enerji piyasalarının ve fiyatlandırma yapılarının evriminin temel bir tamamlayıcısıdır.
 - Birleşik Krallık'ın nispeten hızlı ve yaygın geçişinin örneği, tamamlayıcı politikaların rolünü vurgular. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli politikalar, enerji (ve elektrik) talebinin azalmasına katkıda bulunarak genel enerji maliyetlerini düşürdü; yenilenebilir enerjiye yapılan önemli miktardaki ön yatırım, teknoloji maliyetlerinin keskin bir şekilde düşmesine yol açtı; karbon fiyatlandırması ise kömürü Birleşik Krallık sisteminden çıkardı. Birleşik Krallık geçişine ilişkin karşılaştırmalı ex ante modelleme çalışmaları, ekonomik modellerin, modele ve yapılan varsayımlara bağlı olarak azaltma politikalarının olumsuz veya olumlu GSYİH etkileri üretebileceğini doğruladı. Birleşik Krallık geçişine ilişkin kapsamlı bir ex post makroekonomik analiz yoktur, ancak birkaç kanıt dizisi, yakın tarihli enerji krizinde enerji verimliliği ve yenilenebilir enerjinin katkılarının güçlü bir şekilde olumlu olduğunu ve daha önceki bir program sürdürülseydi hane başına en az 1000 £ daha tasarruf edilebileceğini göstermektedir.
 - Düşük karbonlu teknolojiler şu anda gelişmiş ekonomilerde ve Çin'de en hızlı şekilde yayılıyor. Sermaye maliyetini düşürmek için risk üstlenme dahil olmak üzere yerel politikalar ve uluslararası önlemlerin kombinasyonları, net ekonomik faydalarla küresel geçişi hızla hızlandırma potansiyeline sahiptir.

1. Giriş: amaç ve bağlam

".. Geniş bir karakter kadrosu sorumluluğu paylaşıyor... [benim gibi] ekonomistler ve sizin gibi insanlar da dahil. Biraz korkutucu bir şekilde, her birimiz karşılaştığımız teşvikler göz önüne alındığında mantıklı olanı yaptık. İşlerin ters gittiğine dair artan kanıtlara rağmen, hepimiz işlerin iyi gideceği umuduna tutunduk, çünkü çıkarlarımız bu sonuçtaydı. Ancak toplu olarak, eylemlerimiz dünya ekonomisini felaketin eşiğine getirdi ve bunu tekrar yapabilirler."

– Rajan Raghuram, Hindistan Merkez Bankası Valisi ve eski Başkan
Uluslararası Para Fonu ekonomisti, mali kriz hakkında (Raghuram 2010, 4)

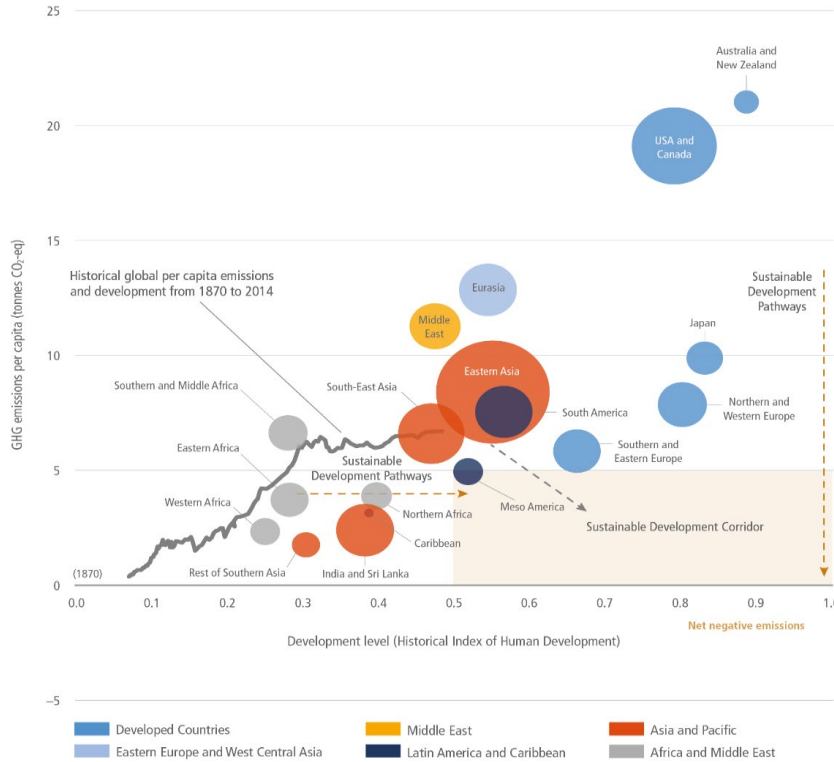
"Çukurdayken kazmayı bırak."

— Geleneksel bir söz

Bu inceleme makalesi, enerji geçişinin dinamik ve yenilikçilik özellikleriyle ilgili araştırmaları değerlendiriyor ve orta gelirli ülkelerde yenilikçiliği ve büyümeyi teşvik etmenin önemini vurguluyor. Enerji teknolojileri ve sistemleriyle ilgili eşlik eden bir makaleyle (Melekh, Grubb ve Dixon 2024) birlikte, karbon kilitlenmesinin riskleri ve enerji geçişinin fırsatları ve zorlukları dahil olmak üzere yenilikçilik, atalet ve yol bağımlılıklarının ekonomik anlayışından yararlanarak küresel enerji geçişi içinde karar alma için teorik ve ampirik temeller sunuyor.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Azaltma Raporu (IPCC 2022c), Şekil 1'de gösterildiği gibi uluslararası bağlam için yararlı bir çerçeve sunmaktadır.

Şekil 1. IPCC'nin yirmi bölge sınıflandırması için İnsani Gelişme Endeksi'ne göre çizilen kişi başına emisyonlar (2020)



Kaynak: IPCC 2022c, bölüm 1, şekil 1.5.

Şekil 1, IPCC Altıncı Değerlendirmesinde kullanılan yirmi bölge sınıflandırması için, göreceli İnsani Gelişme Endeksi (tarihsel bir HDI karşılaştırma endeksi dahil) tarafından temsil edildiği gibi, sera gazı emisyonlarının kişi başına düşen emisyonlarının gelişme aşamasıyla nasıl ilişkili olduğunu göstermektedir. Ana gelişmiş ülke bölgeleri sağda yer almaktadır; çoğu 5 ton CO₂'nin çok üzerinde olan çok geniş bir kişi başına düşen emisyon aralığı göstermektedir. Kişi başına düşen (tCO₂)_e/cap), ancak birkaç Avrupa ülkesi yakın zamanda CO₂ emisyonlarını azalttı. Emisyonlar bu seviyenin altındadır. En az gelişmiş ekonomiler solda yer alır ve kişi başına emisyonlar çoğunlukla tCO₂'nin altındadır. Orta gelirli bölgeler de benzer kalkınma seviyelerinde kişi başına düşen emisyonlarda çok geniş bir yelpaze sergiliyor.

Tüm ülkelerin diyagramın sağ alt kısmına doğru gelişmenin yollarını bulması gerekiyor; bölgeler arasındaki büyük eşitsizliği azaltarak, ancak düşük emisyonlarla, atmosferin dengelenmesi için net sıfıra doğru ilerleyerek. Dairelerin boyutlarının da gösterdiği gibi, orta gelirli ülkeler artık küresel emisyonların yarısından fazlasını (ve hızla büyüyen bir oranı) oluşturuyor.

Bazı ilerlemeler kaydedildi. Yirmiden fazla gelişmiş ülke en az on yıldır sera gazı (GHG) emisyonlarını sürdürüyor, bazıları çok daha uzun süredir (Lamb vd. 2021); ve hemen hemen hepsinin, 2030 yılına kadar önemli azalmalar için Ulusal Olarak Beyan Edilen Katkılarla yüzyılın ortasına kadar net sıfıra ulaşma hedefleri var.

Bu nedenle zorluk, küresel çevreyi daha fazla bozmadan refahı artıran ileriye dönük yollar çizmektir. Paris Anlaşması'nın hedeflerine, en yüksek gelirli ülkelerde hızlandırılmış emisyon azaltımları ve birçok orta gelirli ülkede hızlı bir rota değişikliği olmadan ulaşamaz. Bu inceleme, en geniş anlamıyla inovasyon kapsamının kabul edilmesi ve anlaşılmasıyla başlayan bu sürecin ekonomisine ilişkin modern anlayışın ana hatlarını çizmektedir.

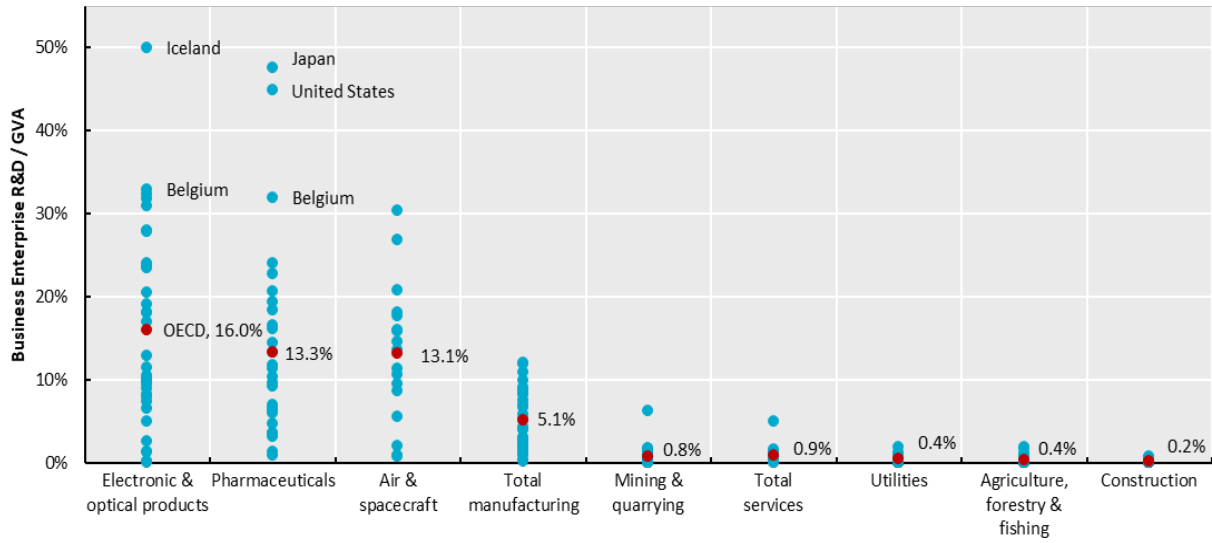
2. Yenilik ve teknoloji geçişi

Bu bölümde enerji sektöründeki inovasyon süreçleri ve geçiş dinamikleri ana hatlarıyla açıklanmakta ve bunların politika ve yatırım kararlarında dikkate alınmasının orta gelirli ülkelerde enerji geçişini hızlandırmak açısından ne kadar önemli olduğu vurgulanmaktadır.

2.1. Enerji inovasyonu Ar-Ge'sinde yapısal yetersiz yatırım ve yükümlülük

Enerji, özel Ar-Ge harcamaları açısından geleneksel olarak en az yenilikçi ekonomik sektörlerden biri olmuştur. Ar-Ge, Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) üye ülkeleri tarafından domine edilme eğiliminde olmuştur ve OECD genelindeki şirketler, Şekil 2'de gösterildiği gibi, genellikle enerjiyle ilgili Ar-Ge'ye %1'den az harcama yapmaktadır. Ortalama olarak, kamu hizmetleri sektöründeki firmalar, OECD'de Ar-Ge'ye brüt katma değer (GSKD) %0,4'ünü harcarken, elektronik ve ilaç gibi oldukça yenilikçi sektörlerde bu oran %13 ila %16'dır (ve bazı önde gelen ülkelerde %30'dan fazla) (OECD 2021).

Şekil 2. 2018 yılında OECD ülkelerinde sektöre göre Ar-Ge yoğunluğu



Kaynak: OECD 2021.

Not: Bu şekil, hava ve uzay araçları için verisi bulunan 17 ülkeye ve diğer tüm endüstriler için 31-34 ülkeye dayalı olarak, işletme harcamalarının gayri safi katma değer (GSKD) (2018 veya en yakın yıl) payı olarak ifade edilen araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) yoğunluğunun ortalama, ağırlıklandırılmamış ortalamalarını gösterir. Endüstriler, "Kamu Hizmetleri"nin elektrik, gaz ve su temini; kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetlerini ifade ettiği Uluslararası Standart Endüstriyel Sınıflandırma (ISIC) kodlarına uygun olarak tanımlanır. OECD ortalamaları kırmızıyla gösterilmiştir.

Enerji sektörünün belirli sistemik özellikleri, inovasyona yönelik bu yapısal yetersiz yatırımı açıklamaya yardımcı olur. Geniş bir literatür, enerji sektöründeki "teknoloji ölüm vadisi"ni ele alır ve yeni inovasyonların icat aşamasından geliştirme, gösterim, ticarileştirme, dağıtım ve nihayetinde yayılma aşamalarına kadar olan yolculuğu başarıyla tamamlama yeteneğini sınırlandıran inovasyon zincirinde gözlemlenen bir kopukluğa atıfta bulunur (örneğin bkz. Ellwood, Williams ve Egan 2022; Nemet, Zipperer ve Kraus 2018; Weyant 2011). Bu farklılığın nedenleri, yenilikçiler ile tüketici pazarları arasındaki farklı derecelerdeki bağlantılardan ve inovasyonun "itme" ve "çekme" kuvvetlerinin gücü arasındaki içsel farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Enerji sektöründeki doğası gereği zayıf inovasyon kuvvetleri, aşağıdakiler de dahil olmak üzere bir dizi temel özelliğe atfedilebilir:

- *Ürün farklılaştırmasının eksikliği.* Enerji teknolojilerindeki yenilikler, tüketicilere maddi olarak farklı veya yeni ürünler sunamaz, çünkü nihayetinde elektronları veya sınırlı bir hidrokarbon molekülleri aralığını çalıştırmak için voltaj sağlarlar. Bu, yeni yeniliklerin genellikle mevcut teknolojilere karşı maliyet marjları konusunda rekabet ettiği anlamına gelir. Bu nedenle enerji yenilikçilerinin, bilgi teknolojisi (BT) veya ilaç gibi son derece yenilikçi endüstrilerin aksine, farklı tüketici ürünleri sunmaktan radikal kar elde etme potansiyeli çok azdır.
- *Uzun geliştirme döngüleri.* Enerji tedarik teknolojilerindeki geliştirme döngüleri, genellikle büyük, karmaşık ve pahalı teknoloji ve ilişkili altyapı yapısı nedeniyle uzun olma eğilimindedir; örneğin, karbon yakalama ve depolama (CCS) çeyrek asırdan uzun bir süredir geliştirme ve ilk dağıtım aşamasındadır. Bu, örneğin nispeten ucuz ve hızlı olabilen BT'deki yeniliklerle çalışmaktadır.
- *Giriş engelleri.* Enerji sektörlerinde, onlarca yıllık deneyim, öğrenme, önceden var olan altyapı ve lobi gücünden faydalanan az sayıda yerleşik şirket hakim olma eğilimindedir; yeni girenler, nihai tüketicilere esasen aynı ürünü sunarken yerleşik şirketlerle rekabet etmek zorundadır.

Yenilik genellikle ekonomik kalkınma için olumlu olduğundan, bu bir fırsat olduğunu göstermektedir. Artık çok sayıda kanıt, politikaların ve piyasa sinyallerinin enerji sektöründeki bu yapısal zorlukların üstesinden gelerek yeniliği artırabileceğini ve son on yılın yenilenebilir enerji maliyet devrimini önemli ölçüde teşvik ettiğini göstermektedir (tetiklenen yenilik üzerine 228 araştırma makalesinin sistematik bir incelemesi için Grubb ve diğerleri 2021'e bakın).

Daha önceki literatürün çoğu, "azaltma maliyeti eğrileri" ile temsil edilen "azaltma maliyetine" odaklanırken, Acemoglu ve diğerleri (2012, 2016) bu yaklaşımın yanlış temsil edilme riski taşıdığını vurguladı ve ana akım ekonomi literatürüne tanıttı: gerçeklik, mevcut yüksek karbonlu sistemler (bir asırlık geliştirme ve iyileştirmeden, koruyucu kurumlar ve finansman kapasitesiyle birlikte faydalanan) ve düşük karbonlu sistemler arasındaki rekabeti içerir. Bu nedenle azaltma mutlaka bir maliyeti temsil etmek zorunda değildir. IPCC Azaltma Raporu (IPCC 2022b, Politika Yapıcılar İçin Özet, SPM), temel düşük karbonlu teknolojilerin artık fosil yakıtlarla ne ölçüde rekabet edebildiğini gösteren veriler sunar (enerji teknolojileri ve sistemleri hakkındaki eşlik eden makalemize de bakın, Melekh, Grubb ve Dixon 2024).

Önemli faktörler (kurumsal yapı ve kapasite, işgücü yetenekleri ve daha yüksek sermaye maliyeti gibi) orta gelirli ülkelerin inovasyon kapasitesini geliştirmeleri ve uluslararası pazarlara girmeleri için zorlu koşullar yaratır (Cimoli, Dosi ve Stiglitz 2009; Doner ve Schneider 2016; Paus 2014). Yine de, özellikle daha hızlı öğrenme potansiyeli ve daha düşük maliyet engellerine sahip "kısa döngülü" teknolojiler için gelişmekte olan ekonomilerin daha iyi konumlandırılabilmesi bazı yollar vardır (aşağıdaki tartışmaya ve Lee 2013'e bakın).

2.2. Yenilik: Ar-Ge ve "teknoloji nötr" pazar çekiminin ötesinde

Yeniliğin ekonomik kalkınmaya katkıda bulunduğu ve daha ucuz enerjinin de katkıda bulunduğu kabul edildiğinden, hangi politikaların ve piyasa koşullarının enerji yeniliğini hangi mekanizmalarla desteklediğinin daha derin bir şekilde anlaşılması, orta gelirli ülkelerin yeniliği nasıl teşvik edebileceğini ve yerel düşük karbonlu enerji sistemlerini nasıl geliştirebileceğini anlamak açısından önemlidir.

Bireysel politikaların ve bunların birleşimlerinin teknolojik inovasyon üzerindeki etkisi, ekonomi ve inovasyon literatüründe çokça tartışılan bir konu olmuştur. Ekonomi söylemi uzun zamandır kamu Ar-Ge fonlaması gibi "teknoloji itme" müdahalelerine, patentlerle birlikte, teknoloji taşınması piyasa başarısızlıklarını aşma ve inovasyonu geliştirme mekanizmaları olarak odaklanmıştır. Sosyoteknik geçişler ve inovasyon teorisi literatürleri, özellikle piyasaları şekillendirerek ve başarıları için elverişli koşullar yaratarak inovasyonu teşvik eden politika paketleri olan "talep çekme" güçlerine daha fazla dikkat etmiştir (Gallagher vd. 2012; Geels vd. 2017).

Dağıtım için, ekonomi söylemi genellikle "kazananları seçmekten" kaçınan "teknoloji tarafsız" politikaları desteklemiştir, böylece piyasa, rekabetçi piyasa güçleri aracılığıyla sera gazı emisyonlarını azaltmak için en uygun maliyetli yaklaşımları kendi kendine seçer (Powell 2011; Gawel, Korte ve Lehman 2018). Ancak, gerçek teknoloji tarafsızlığını pratikte uygulamak zordur ve statükoyu koruyan belirli teknolojileri dolaylı olarak destekleme eğilimindedir (Greenberg 2016; ayrıca karbon kilitlenmesiyle ilgili 3.3. bölüme bakın).

Enerji ve karbon fiyatlandırması gibi politikalar, kısa vadeli emisyon azaltımı için en düşük maliyetli fırsatların değerlendirilmesini teşvik etme ve nispeten olgun temiz teknolojilerin konuşlandırılmasını ve kademeli olarak geliştirilmesini teşvik etme eğilimindedir; ancak baskın enerji endüstrilerinin yerleşik bir karşılaştırmalı üstünlüğe sahip olmadığı durumlarda daha radikal değişiklikleri teşvik etmeyebilir (bkz. Kutu 1).

Enerji sistemlerine (özellikle elektrik ve gaz piyasalarına) daha fazla rekabet getirmek kesinlikle bir çare olmasa da Songwe, Stern ve Bhattacharya (2022), OECD'de "yeşil dönüşüm yatırımlarının" %81'inin özel sektör tarafından finanse edildiğini, gelişmekte olan ülkelerde ise bu rakamın yalnızca %14 olduğunu tespit ediyor. Bu, gelişmekte olan dünyadaki birçok elektrik sisteminin devlet işletmeleri olması ve yeni katılımcılardan rekabet ve inovasyon için daha sınırlı bir kapsam olması gerçeğiyle örtüşüyor.

Kutu 1. Enerji ve karbon fiyatlandırmasının inovasyon üzerindeki etkisi - karışık mesajlar

Tetiklenen inovasyona ilişkin sistematik bir inceleme (Grubb vd. 2021), enerji ve karbon fiyatlandırmasının temel sektörlerde inovasyonu (esas olarak patentler kullanılarak gösterilmiştir) nasıl etkilediğini belirlemektedir.

Taşımacılık. Benzin fiyatlarının alternatif yakıtlı araçlardaki inovasyon üzerindeki etkisi güçlü ve izlenecek yola bağlı görünüyor; daha önce temiz inovasyonla uğraşmış firmaların fiyat uyarılarına yanıt verme olasılığı çok daha yüksek olmuştur (örneğin bkz. Aghion vd. 2016; Barbieri 2015, 2016; Fredriksson ve Sauquet 2017). Çalışmalar genel olarak petrol fiyatının biyoyakıt patentlemesi üzerindeki etkisini olumlu bulmaktadır, ancak etki çalışmalar arasında büyüklük açısından önemli ölçüde değişmektedir (bkz. Guillouze-Le Corff 2018; Jang ve Du 2013; Kessler ve Sperling 2016; Kruse ve Wetzel 2016). Knittel (2011), benzin fiyatlarının 1990 ve 2006 yılları arasında ABD otomobil ve kamyon yakıt verimliliğinde %60'lık bir iyileşmenin ana itici gücü olduğunu bulmuştur. Daha büyük petrol bağımlı ülkelere, verimli veya alternatif araç teknolojileri üzerinde nispeten daha az patent faaliyeti üretmiştir (Kim 2014).

Elektrik üretimi. Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi'nin (AB ETS) (ve diğer karbon fiyatlandırma biçimlerinin) inovasyon etkisine ilişkin çalışmalar çoğunlukla düzenlenen firmalarda araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerini hızlandırdığını, ancak esas olarak enerji verimliliğindeki kademeli iyileştirmelerle ilgili olduğunu, radikal inovasyon ve yenilenebilir enerji kullanımı üzerinde sınırlı veya hiç etkisi olmadığını bulmuştur (Hoffmann 2007, 20; Rogge ve Hoffmann 2010; Gulbrandsen ve Stenqvist 2013; Borghesi ve diğerleri 2015). Kim, Heo ve Kim (2017) karbon vergilerinin rüzgar ve güneş fotovoltaikleri (PV) için patent başvuruları üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğunu bulmuştur. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) için petrol fiyatlarının yenilenebilir enerji patentlemesi üzerindeki etkisini inceleyen Cheon ve Urpelainen (2012), marjinal etkinin elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların mevcut payıyla arttığını ve bilgi stoğu ve yol bağımlılığı için önemli bir rol olduğunu ileri sürmüştür.

Sanayi. Enerji fiyatlarının genel olarak endüstriyel inovasyon üzerinde olumlu bir etkisi olduğu bulunmuştur (Ley, Stucki ve Woerter 2016; Lin vd. 2018; Ye, Dai ve Zeng 2018), enerji yoğun, güçlü mevcut yönetim ve teknolojik kapasiteye sahip ve daha geniş bilgi ağlarıyla etkileşimde bulunan firmalar üzerinde çok daha güçlü bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Triguero, Moreno-Mondéjar ve Davia 2014; Garrone, Grilli ve Mrkajic 2017). Karbon vergileri üzerine yapılan çalışmalar, elektrik üretimine benzer sonuçlar bulmuş ve ortaya çıkan inovasyonun radikal inovasyondan ziyade artımlı inovasyonu teşvik ettiği bulunmuştur.

Binalar ve cihazlar. Enerji ve karbon fiyatlandırmasının inovasyon üzerindeki kanıtı çok daha sınırlıdır ve karışık ve kesin olmayan görünmektedir. Noailly (2012), "taşınabilir" ev teknolojilerinin (örneğin, sakinler tarafından değiştirilebilenler) son kullanıcı enerji fiyatlarına güçlü bir şekilde yanıt verdiğini, ancak bu tür fiyatların daha az kolay değiştirilebilen teknolojiler (ısı dağıtımı, yapı malzemeleri) üzerinde hiçbir etkisi olmadığını, yazarların bunun müdür-temsilci sorunlarından kaynaklanabileceğini öne sürdükleri bulgusuna ulaşmıştır. Costantini, Crespi ve Palma (2017), enerji verimliliği teknolojisi patentlerinin vergilendirmeyle güçlü bir şekilde bağlantılı olduğunu bulurken, Girod, Stucki ve Woerter (2017) ihmal edilebilir etkiler bulmuştur.

Kurumsal bağlam. Alta yatan kurumsal bağlamın fiyat değişikliklerine verilen inovasyon tepkisini etkilediği bulunmuştur. Net kalite standartlarının eksikliği (Taylor 2008), zayıf uyumluluğa sahip belirsiz düzenleyici rejimler (Kivimaa, Kangas ve Lazarevic 2017) ve zayıf yenilikçi ağlar (Sköld, Fornstedt ve Lindahl 2018) fiyatlandırmaya verilen inovasyon tepkisini zayıflatır. Buna karşılık, Christiansen (2001) bir karbon vergisine verilen inovasyon tepkisini artırmak için inovasyonu kolaylaştıracak bir aracı kuruluşun varlığını bulmuştur.

Kaynak: Grubb ve ark. 2021.

Enerji ve karbon fiyatlandırmasının enerji verimliliği iyileştirmelerini ve düşük karbonlu teknolojilerin benimsenmesini yönlendirmede açıkça önemli bir rol oynamasına rağmen, kanıtlar şunu gösteriyor: *hedeflenen* yenilenebilir enerji maliyet devriminden büyük ölçüde sorumlu olan politikalar ve politika paketleri, özellikle erken aşamada dağıtım ve pazar büyümesini teşvik etmek için tasarlanan teşvikler ve düzenlemelerdir (Peñasco, Anadón ve Verdolini 2021) (bkz. bölümler 2.2 ve 4.2).

Örneğin, güneş fotovoltaikleri alanındaki maliyet devrimi, ülkelerin aktif olarak güneş fotovoltaiklerini "seçtiği" bir dizi politika ve dağıtım programı getirmesinden kaynaklandı. Bunlar arasında ABD'de Ar-Ge ve tedarik, Japonya'da niş bir pazar yaratmak için konut dağıtım sübvansiyonları, Almanya'da besleme tarifeleri (FiT'ler) ve Çin'de ölçek büyütme sübvansiyonları yer aldı. Bunların birleşimi, altmış yılda maliyetleri 10.000 katına çıkardı (Nemet 2019). Kara ve deniz rüzgarı, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ve elektrikli araçlar (EV'ler) için lityum iyon piller dahil olmak üzere diğer önemli teknolojilerdeki hızlı teknolojik ilerleme, genel Ar-Ge yatırımları ve karbon fiyatlandırması yerine, dağıtım ve maliyet azaltımını kolaylaştıran kasıtlı teknoloji seçimlerini içeren inovasyon politikası paketleri (büyük ölçüde talep çekme politikaları) tarafından da yönlendirildi (IPCC 2022c).

FiT'ler, özellikle güneş PV'de ve özellikle daha geniş bir çevre politikası çerçevesiyle (enerji ve karbon fiyatlandırması dahil) birleştirildiğinde, inovasyonun güçlü bir itici gücü olmuştur. Yenilenebilir Portföy Standartları ve yatırım destekleri, "piyasaya yeni giren" teknolojiler için daha az önemli bir rol oynar, ancak bu daha geniş araçlar, bu desteği en azından maliyetle yakalamaya daha uygun olan daha olgun, ortaya çıkan teknolojilerde inovasyonu yönlendirir. Genel olarak, literatür, Johnstone, Haščić ve Popp'un (2010) besleme tarifeleri gibi hedeflenen sübvansiyonların yeni teknolojilerde inovasyon yaratmada daha etkili olduğu, buna karşın alınıp satılabilir sertifikalarla kota yükümlülükleri gibi piyasa çapında veya genel politikaların, yaparak öğrenme maliyet düşüşlerinden zaten faydalanmış olgun teknolojilerde inovasyonu daha iyi teşvik ettiği sonuçlarını desteklemektedir.

Zaman içinde inovasyonun en güçlü şekilde sürdürülebilmesi, politika koordinasyonu ve tutarlı politika yönlendirmesiyle kolaylaştırılan "teknoloji itme" ve "talep çekme" politikaları arasında uyum olduğunda mümkün olacaktır.

2.3. Yenilik ve uygulama arasındaki ilişki

Son yıllarda temel düşük karbonlu enerji teknolojilerinde elde edilen muazzam maliyet düşüşleri ekonomistleri şaşırtmaya devam ediyor (Meng vd. 2021) ve kümülatif dağıtım ile teknoloji maliyetinin azaltılması arasındaki ilişki olan "deneyim eğrilerinin" daha iyi anlaşılmasına yönelik ilgiyi artırdı.¹

Kanıtlar, geniş bir düşük karbonlu teknoloji yelpazesinde, dağıtımın genişletilmesinin maliyet düşüşleriyle pozitif olarak ilişkili olduğunu açıkça göstermektedir. Her ne kadar az sayıda çalışma nedenselliğin yönünü açıkça test etmeye çalışsa da, bunu yapanlar dağıtım kaynaklı öğrenme ve ölçek ekonomileri için güçlü bir rol bulmaktadır. Örneğin, Isoard ve Soria (2001) bir Granger nedensellik testi gerçekleştirerek kümülatif kurulu kapasitenin güneş PV ve kara rüzgarında sermaye maliyeti değişikliklerine yol açtığını bulmuştur.

Çok faktörlü öğrenme eğrileri üreten bazı çalışmalar (bkz. kutu 2) zaman içinde faktörlerin maliyet azaltımlarına göreceli katkılarında önemli bir değişim bulmuştur. Kavlak vd. (2018), 1980 ile 2000 yılları arasında kamu Ar-Ge ve taşmaların PV'deki maliyet azaltımlarının neredeyse %50'sini oluşturduğunu, ancak 2000'den sonra bu örüntünün tersine döndüğünü, kamu Ar-Ge ve taşmaların ölçek ekonomileri ve yaparak öğrenme ile karşılaştırıldığında maliyet azaltımına katkının sadece dörtte birini oluşturduğunu bulmuştur. Kruse ve Wetzel (2016) benzer sonuçlar bulmuştur.

Tablo 1, temel teknolojilerde gözlemlenen gösterge niteliğindeki öğrenme oranı aralıklarını sunar. Tablo, genişlemenin neredeyse her zaman maliyet düşüşüyle birlikte olduğunu ancak "öğrenme oranının" teknolojiler arasında önemli ölçüde değiştiğini gösterir.

Kutu 2. Tetiklenen inovasyonun biçimleri ve modellerdeki temsil

Gillingham, Newell ve Pizer (2008) üç türde indüklenen yenilik süreci ve modelleme yaklaşımını ayırt eder:

- "Doğrudan fiyat kaynaklı" yaklaşımda, görece fiyatlardaki değişiklikler inovasyonu tetikleyebilir ve pahalı girdilere olan talebi azaltabilir (Hicks 1932; Popp 2002).
- Ar-Ge kaynaklı yaklaşımda, araştırma ve geliştirmeye (Ar-Ge) yapılan yatırımlar teknolojik değişimin yönünü şekillendirir (Aghion ve Howitt 1998; Acemoglu 2002; Nordhaus 2002; Popp 2004) ve
- Öğrenmeye dayalı yaklaşımda, bir teknolojinin birim maliyeti, o teknolojiyle bağlantılı sermaye birikimine bağlı olarak ve dolayısıyla olgunlaştıkça deneyimle birlikte azalır (bkz. Wright 1936; Arrow 1962; Grubler 1998).

Ayrıca, bir bilgi stoğunda Ar-Ge yatırımlarının birikimini (Buonanno, Carraro ve Galeotti 2003; Smulders ve de Nooij 2003), karbon yoğunluğunun azaltılmasını (Nordhaus 2002) veya teknolojinin azaltma maliyetlerini (Goulder ve Mathai 2000) içeren modeller arasında da ayırım yaparlar. Bu çalışmalarda taşıma etkilerinin genel anlamı, daha yüksek bir yenilik yayılma oranı ve karbonsuzlaştırma için olumlu sonuçlardır.

Yeniliğin daha basit ve daha teknoloji odaklı tedavileri, bir veya daha fazla faktöre sahip öğrenme eğrilerini kullanır:

- *Tek faktörlü öğrenme eğrisi (maliyetleri yalnızca dağıtım ölçeğine bağlar).*İlgili literatürün çoğu, nedensellik veya yönsellik, dağıtım ve yayılma arasındaki ayırım veya maliyet azaltımından sorumlu olabilecek çeşitli faktörler (ölçek ekonomileri, Ar-Ge harcamaları, girdi kaynak maliyetlerindeki değişiklikler, çeşitli öğrenme süreçleri, taşmalar vb.) üzerinde fazla durmadan, kümülatif dağıtım ve maliyet azaltımı arasındaki ilişkiyi inceleyerek "tek faktörlü" öğrenme eğrileri oluşturur. Bu basitlik aynı zamanda sınırlamaları da ima eder (Söderholm ve Sundqvist 2007; Nordhaus 2014).
- *Çok faktörlü öğrenme eğrisi,*Ar-Ge ile yayılma ve ölçek yoluyla deneyim arasında ayırım yapmak (örneğin bkz. Miketa ve Schrattenholzer 2004; Yu ve diğerleri 2017; Zhou ve Gu 2019). Klaassen ve diğerleri (2005) ile Söderholm ve Klaassen (2007), teknoloji maliyetindeki azalmanın başlangıçta Ar-Ge yatırımı ve teknoloji yayılımı sırasında yaparak öğrenme ile nasıl baskın hale geldiğini açıklamak için iki faktörlü öğrenme eğrilerini kullanırlar. Olasılıksal tahminler, belirsiz aralıklar içinde gelecekteki maliyetlerin daha sağlam tahmin edilmesine olanak tanır (Anadón, Baker ve Bosetti 2017; Way ve diğerleri 2022).

Yakın tarihli bir inceleme (Pasqualino ve diğerleri, 2024), düşük karbon geçişini değerlendirmeye ilgili modellerde indüklenen yeniliği dahil etmek için altı farklı modelleme yaklaşımını kategorize ediyor. Bu yaklaşımlar, özellikle geçmiş verilerden doğrudan çıkarım yapma veya daha sonra verilerle doldurulan teorik temellerle başlama derecesine göre farklılık gösterir.

Tablo 1. Teknolojiye göre gösterge öğrenme oranı aralıkları

Teknoloji	Göstergesel öğrenme oranı gözlemlenen aralıklar edebiyatta ^a	Notlar
Güneş fotovoltaik	%20 (±6%)	Coğrafyada gözlemlenen farklılıklara rağmen, öğrenme oranlarının zamanla azaldığına dair çok az kanıt bulunmaktadır.
Kara rüzgarı	%5–%15	Çalışmaların çoğu Avrupa'ya odaklanıyor.
Açık deniz rüzgarı	%5	Sınırlı veriye sahip ve istatistiksel uyumu zayıf olan tek bir çalışmaya dayanmaktadır.
Nükleer	yok	Bazı çalışmalar 1960'lardan beri negatif öğrenme oranlarına işaret ediyor; diğerleri ise ihmal edilebilir veya hafif pozitif oranlara işaret ediyor. Genel olarak, öğrenme sınırlıdır ve oldukça bağlama özgüdür.
Biyoyakıtlar	Geniş yelpazede negatif (maliyet artışlar) + %40'a kadar	Çalışmalar ve dönemler arasında aşırı derecede farklı sonuçlar. Brezilya etanolü için uzun vadeli bir ortalama alan çalışmalar %16-%20'ye doğru yöneldi, ancak bu büyük ölçüde dışsal teknoloji taşmalarından kaynaklanıyor olabilir.
Ev ve tüketim malları	%18 (±%7)	Weiss ve diğerleri (2010) tarafından bulunan 15 (çoğunlukla bina ve cihazla ilgili) teknoloji için ortalama, çapraz teknoloji öğrenme oranı. Tüketici elektroniği ve bileşenleri, ısı pompaları ve kompakt floresan ışık (CFL) teknolojileri için daha yüksek oranlar (%20-%30) bulundu.
Hibrit araçlar	<%10	Genellikle %10'un çok altında, muhtemelen kısmen Çünkü başlangıçtaki dağıtım, büyük küresel otomobil şirketlerinin satışlarının çok küçük ve zararına yol açan bir kısmını temsil ediyordu.
BEV'ler	%9–%16	Hem tam bataryalı elektrikli araçlar hem de bunların bileşenleri, özellikle lityum iyon bataryalar üzerine yapılan araştırmalar, hibrit araçlara kıyasla sürekli olarak daha yüksek öğrenme oranları buluyor.
Enerji depolama	%15-%25	Sabit pil teknolojilerinin (kurşun-asit dahil) öğrenme oranları, mobil muadillerine göre benzer, ancak belki biraz daha düşük öğrenme oranlarına sahip olma eğilimindedir.

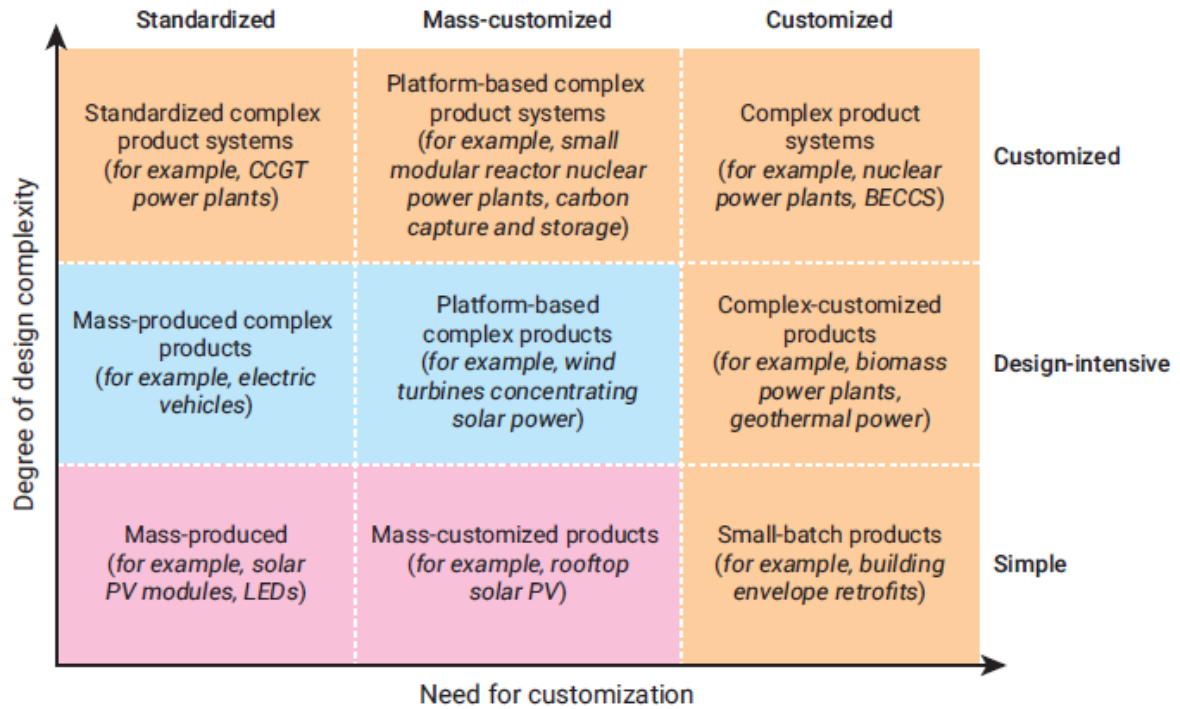
^aKaynak: Grubb ve ark.'nın 2021'deki çalışmasından özetlenmiştir.

Not: Referanslar burada listelenemeyecek kadar çoktur; Grubb ve ark.'nın (2021) 87 öğrenme eğrisi makalesini kapsayan 6. bölümüne bakın. Öğrenme oranı, kurulu kapasitenin veya üretimin iki katına çıkmasıyla ilişkili maliyet düşüşüdür.

a. Grubb ve diğerleri (2021) tarafından incelendiği gibi.

Son on yıllardaki enerji teknolojisi inovasyon kalıplarından iki gözlem daha çıkarılabilir. Birincisi, farklı teknoloji türleri arasındaki öğrenme oranlarının belirleyicilerinin daha iyi anlaşılmasıdır. Malhotra ve Schmidt (2020) tarafından analiz edildiği ve Şekil 3'te özetlendiği gibi, daha büyük, daha karmaşık teknolojiler (birden fazla şekilde etkileşime giren birçok büyük ölçekli tasarım bileşenine sahip olanlar gibi) daha yavaş öğrenme eğilimindedir ve maliyet aşımına daha fazla eğilim gösterir. Aynısı, "tak ve çalıştır" teknolojilerine kıyasla yerel ortamlara göre daha yüksek düzeyde özelleştirme gerektiren teknolojiler için de geçerlidir (örneğin, düzenleyici içerik veya kullanıcı tercihleri nedeniyle). Buna karşılık, küçük "granüler" teknolojiler çok daha hızlı bir şekilde yenilik yapabilir ve yayılabilir; Wilson ve diğerleri (2020), bunların hızlı karbonsuzlaştırmadaki rolünü vurgulamaktadır.

Şekil 3. Maliyet azaltma potansiyelini etkileyen teknoloji özellikleri



Kaynak: Malhotra ve Schmidt 2020.

Not: Teknolojiler tip 1 (kahverengi), tip 2 (mavi) ve tip 3 (pembe) olarak sınıflandırılır. Orta gelirli ülkeler, küresel tedarik zincirlerinde tip 1 ve tip 2 teknolojilerinin tedarikçisi olmaya en uygun olanlardır. Güneş fotovoltaik (PV) modülleri ve verimli ışık yayan diyot (LED) aydınlatma gibi tip 1 teknolojilerinin montajı ve ölçeklenebilir dağıtımı kolaydır (her ne kadar bireysel bileşenler karmaşıklık gösterebilse de) ve hızlı öğrenme oranlarına ve ölçek ekonomilerine sahiptir. Rüzgar türbinleri ve elektrikli araçlar gibi tip 2 teknolojiler, nispeten daha karmaşık tasarımlar içerir ve standartlaştırılmış bileşenler içermelerine rağmen ölçeklenebilirliğe doğru daha yavaş bir şekilde evrilir ve ölçek ekonomileri ve artan çoğaltma ve birkaç yıllık öğrenme döngüleri potansiyeline sahiptir. Nükleer enerji gibi tip 3 teknolojiler, kapsamlı özelleştirme gerektirir ve yüksek derecede karmaşıklık içerir. Maliyet aşımına karşı hassastırlar ve yaparak hızlı öğrenme için sınırlı kapsamı vardır. BECCS = karbon yakalama ve depolama ile biyoenerji; CCGT = kombine çevrim gaz türbini; PV = fotovoltaik.

Bu geniş tipoloji, farklı teknoloji yatırımları ve orta gelirli ülkeler için küresel pazarla rekabet etme yeteneğiyle ilişkili farklı riskler ve fırsatlar anlamına gelir. Örneğin, rüzgar endüstrisini erken geliştirmeye yatırım yapan birkaç ülke, en karmaşık, yüksek değerli bileşenler için küresel pazara hakim olabilir, ancak teknoloji nispeten hızlı bir şekilde yayıldı ve birçok ülke daha az karmaşık, düşük değerli bileşenler üretmek için değer zincirine katıldı.

İkinci olarak, son on yıllardaki enerji alanında yaşanan ve büyük maliyet düşüşleri sağlayan, ortaya çıkan dönüşümlere yol açan atılımlar, 3. kutuda özetlenenler de dahil olmak üzere vaka çalışmalarından elde edilen daha geniş yelpazede politika açısından önemli içgörüler sunmaktadır.

Kutu 3. Son düşük karbonlu teknoloji dönüşümlerine ilişkin üç vaka çalışması

Uluslararası Enerji İnovasyonu ve Sistem Geçişi Ekonomisi konsorsiyumu (EEIST) tarafından yapılan bir çalışma, rüzgar enerjisi, güneş fotovoltaikleri (PV) ve verimli aydınlatmadaki radikal teknoloji değişimine ilişkin üç vaka çalışması sunmaktadır (EEIST 2021).^aBrezilya, Çin ve Hindistan'daki ortak araştırma kurumlarıyla yürütülen bu vaka çalışmaları, elde edilen önemli maliyet düşüşlerinin yönlendirilmesinde yardımcı olan temel kararlara, stratejilere ve bunların etkileşimlerine odaklanıyor.

- **Avrupa, Brezilya ve Birleşik Krallık'ta rüzgar enerjisi.**Erken rüzgar enerjisi pazarları, Brezilya'daki ölçeklendirme yoluyla Kaliforniya ve Avrupa'da yaratıldı ve geliştirildi ve Birleşik Krallık'ta açık deniz rüzgarında inovasyona yol açtı. Vurgulanan temel politikalar ve stratejik kararlar arasında Kaliforniya'daki erken pazar oluşturma mevzuatı, özellikle Almanya ve Danimarka'daki Avrupa'daki araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) çabaları; Brezilya PROINFA teşvik programı; müteakip politika desteği ve Brezilya Ulusal Kalkınma Bankası (BNDES) finansmanı; ve Birleşik Krallık'ta Yenilenebilir Yükümlülük ve ardından sözleşmeler-forfifark (Cfd) yer alıyor. Daha büyük kara rüzgar türbinleriyle ilişkili büyük teknolojik ve endüstriyel gelişmeler, petrol endüstrisinden açık deniz mühendislik uzmanlığı ve destekleyici politikalarla birleşince ekonomik olarak uygulanabilir açık deniz rüzgar enerjisinin ortaya çıkmasını sağladı.^b
- **Almanya ve Çin'de güneş fotovoltaikleri.**1970'lerdeki petrol şoklarının ardından çok sayıda hükümette yoğun ve sonrasında azaltılmış güneş enerjisi Ar-Ge çalışmalarının ardından, Almanya'nın Yenilenebilir Enerji Yasası, teknolojiye özgü besleme tarifeleri (FIT'ler) ve nihayetinde *Enerji Dönüşümü* 2000'li yıllarda güneş fotovoltaiklerinin geliştirilmesi ve kapasite kurulumlarının çoğunu yönlendirdi, ancak başlangıçta beklenenden düşük maliyet düşüşleriyle. Çin'in güneş fotovoltaiklerine yaptığı yatırım, ilk başta yabancı ihracat için fotovoltaik üretim endüstrisinin geliştirilmesi (Almanya'nın artan talebiyle teşvik edildi) ve daha sonra yerel dağıtım programları aracılığıyla büyük ölçüde hızlı maliyet düşüşlerini tetikledi. Güneş fotovoltaiklerindeki erken keşif çabalarından yararlanarak, Alman ve Çin gelişmeleri, tüm ülkelere fayda sağlayacak şekilde güneş teknolojisi ve dağıtımında radikal bir dönüşüm yaratmak için iç içe geçti. Almanya, Çin'de üretimi teşvik eden bir pazar ve güven yarattı, bu da maliyetleri düşürdü ve yatırımcı güvenini oluşturdu, Çin'de ve giderek dünya çapında büyük ölçekli yerel dağıtımın önünü açtı.^c
- **Hindistan'da enerji tasarruflu aydınlatma.**Önce kompakt floresan lambalarda (CFL'ler) ve ardından ışık yayan diyotlarda (LED'ler) birincil teknoloji gelişmelerinden yararlanan Hindistan, yüksek verimli aydınlatmanın hızla dağıtımı ve maliyetinin düşürülmesinde dünya liderlerinden biri haline geldi. 2008/09'dan itibaren Bachat Lamp Yojana (Enerji Tasarruflu Aydınlatma Planı), uluslararası yatırımcıları içeren bir emisyon kredi sistemi aracılığıyla hanelerdeki verimsiz akkor ampulleri CFL'lerle değiştirmeyi amaçlayan gönüllü bir plandı. Bu, kamu sektörü ortak girişimi aracılığıyla toplu kamu alımlarını içeren UJALA (Unnat Jyoti by Affordable LEDs for All) programının temelini oluşturdu. 2015'te tanıtılan yerel bileşen gereksinimleri, yerel LED üretim endüstrisinin hızla gelişmesine katkıda bulundu. Politika kararları, hızla genişleyen elektrifikasyon ışığında enerji uygunluğunu ve arzını sürdürme stratejik hedefleriyle yönlendirilen hükümet departmanları, yatırımcılar, aydınlatma şirketleri ve tüketicilerle yapılan kapsamlı istişarelerin bir sonucu olarak ortaya çıktı. Toplu tedarikten elde edilen ölçek ve güven sayesinde, enerji tasarruflu aydınlatma (LED'ler) maliyeti dört yıl içinde yüzde 85 oranında düştü ve hızlı bir şekilde benimsenerek Hindistan'daki elektrikli evlerin yüzde 90'ında LED'lerin kullanılmasına yol açtı.^d

Her bir vaka çalışmasıyla ilgili ayrı ekler <https://eeist.co.uk/eeist-reports/the-neweconomics-of-innovation-and-transition-evaluating-opportunities-and-risks/> adresinde mevcuttur; program ve ülke çalışmalarının (EEIST 2024) genel bir sentezi ise şu adreste mevcuttur: <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>.

*Kaynaklar:*EEIST (2021): vaka çalışmaları.

a. Sonraki bir raporda (EEIST 2023) yer alan ek ulusal teknoloji vaka çalışmaları arasında Uganda'daki küçük hidroelektrik santralleri (vaka 3), Çin'deki EV'ler (vaka 5) ve Brezilya'daki PV (vaka 6) yer almaktadır. Hepsini eeist.co.uk/eeist-reports adresinden edinebilirsiniz.

b. Rüzgar vaka çalışması: Paul Drummond (UCL, Birleşik Krallık), João Carlos Ferraz (Rio de Janeiro Federal Üniversitesi, Brezilya) ve Luma Ramos (Boston Üniversitesi, Amerika Birleşik Devletleri) tarafından sentez.

c. PV vaka çalışması: Alex Clark (Oxford Üniversitesi, Birleşik Krallık) ve Zhu Songli (Enerji Araştırma Enstitüsü, Pekin) tarafından sentez.

d. LED vaka çalışması: Kamna Waghray (Enerji ve Kaynaklar Enstitüsü, Delhi).

Bu vaka çalışmalarına katılan konsorsiyum, tüm vaka çalışmalarında ortak özelliklere ilişkin beş ana gözlem yaptı:

1. *Birikimli ilerleme.*Alınan kararlar daha önce yaşanan gelişmelere doğrudan dayanıyordu; ilerleme sağlandı*kümülatif,veyol bağımlı.*
2. *Pazar tabanlı inovasyon*Son yıllarda görülen ilerlemenin çoğunda, özellikle dağıtım aşamasıyla ilgili olarak, piyasa temelli inovasyon etkili olmuştur.
3. *Dağıtım için sürdürülebilir ve hedefli destek.*Teknoloji tanıtımı ve dağıtım aşamalarındaki her geçişte, zaman içinde sürdürülen hedefli kamu politikası, çoğu durumda ilk Ar-Ge döneminden sonraki bir ila yirmi yıl boyunca, karbon fiyatlandırması gibi "piyasayı düzelter" araçların sınırlı (veya hiç) bir rol oynamasıyla birlikte, kritik bir bileşendi.
4. *Derin belirsizlikler*İlk aşamalar, en azından kritik eşikler geçilene kadar gelecekteki maliyetler, faydalar ve etkiler konusunda derin belirsizliklerle karakterize edildi.
5. *Güçlü uluslararası boyutlar.*Uluslararasılaşma çoğu zaman teknolojilerin gelişimini desteklemiş ve kritik eşikleri aşmalarına yardımcı olmuştur.

2.4. Yenilikten geçiş: S-eğrisi dinamikleri, engeller ve mevcut durum

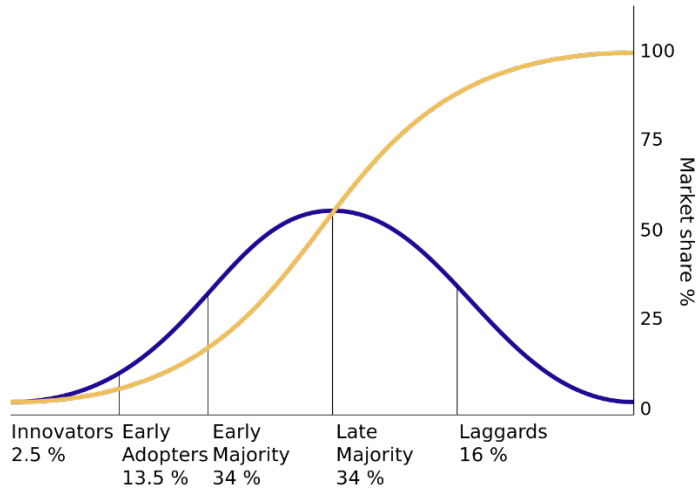
Geçtiğimiz on yılın teknoloji maliyeti atılımlarını takiben, IPCC Azaltma Raporu (IPCC 2022c), ortalama bir "mühendislik maliyeti" temelinde, çeşitli teknolojilerin, düzleştirilmiş enerji maliyeti (LCOE) temelinde, yani fosil yakıtlara kıyasla net ömür boyu tasarruflarla, "negatif maliyetlerle" emisyonları azaltmak için zaten büyük bir potansiyel sunduğunu değerlendirdi. Belirlenen bu tür en büyük potansiyeller, elektrik üretiminde rüzgar ve PV, binalarda enerji verimliliği ve önlenebilir talepler ve ulaşım da birçok seçenektir (IPCC 2002b, şekil SPM.7, burada tüm mavi çubuklar "referans durumundan daha düşük maliyetlerle" emisyonları azaltma potansiyelini gösterir).²

Geleneksel bir "denge" ekonomisi ortamında, bu şekilde maliyet etkin olan bir teknolojinin hemen baskın hale gelmesi beklenir. Bunun gerçekleşmemesinin çeşitli nedenleri vardır:

- *Benimsenmenin önünde çok sayıda maliyet dışı engel var.*Bunlar, bu makalede daha sonra ele alınacak olan yapısal engeller ve yeni teknolojiye direnen mevcut çıkarlar da dahil olmak üzere, büyük ölçekte benimsenme hızını engelleyebilir (tamamen engellemese bile).
- *Gizli maliyetler.*Örnekler arasında, genellikle enerji verimliliği seçenekleri bağlamında belirtilen bilgi, arama maliyetleri ve işlem maliyetleri yer alır (ancak birçok "gizli maliyet" geçişseldir). Bunlara, arama maliyetleri gibi teknolojiye özgü ayarlama maliyetleri de dahil olabilir.
- *Ortalama/toplama.*IPCC sayıları genellikle küresel ortalama koşulların en iyi tahminleridir. Kaynak değişimlerinin yanı sıra, birçok model ve ekstrapolasyon sabit bir sermaye maliyeti/iskonto oranı varsayar. Uygulamada, çoğu gelişmekte olan ülke çok daha yüksek bir sermaye maliyetiyle karşı karşıyadır ve bu da sermaye yoğun yatırımların (çoğunlukla sermaye yoğun ve çalıştırma maliyeti çok düşük olan yenilenebilir enerji kaynakları gibi) gerçekleşen maliyetini yönlendirir. Bu tür teknolojilerin pratikte ne ölçüde maliyet etkin olduğu, bu nedenle, yurtiçinde ve uluslararası alanda sermayeye erişimin ölçeğine ve koşullarına ve ayrıca kaynak ve diğer ülkeye özgü koşullara bağlıdır. Enerji teknolojileri ve sistemleri hakkındaki eşlik eden makalemiz (Melekh, Grubb ve Dixon 2024), birçok gelişmekte olan ülkedeki yüksek sermaye maliyetinin yenilenebilir enerji maliyetlerini yüzde 50 veya daha fazla artırabileceğini göstermektedir (ancak en azından subtropikal gelişmekte olan ülkelerdeki PV için bu, daha güçlü ve daha düzenli güneş kaynağı tarafından telafi edilebilir).

Bunlar, hızlı geçiş potansiyelini ve ilişkili maliyetleri etkileyen çok daha geniş bir sorun kümesine işaret ediyor ve bunlar, zaman, eylemsizlik ve yol bağımlılıklarını analizin ayrılmaz bir parçası olan temel kavramlar ve süreçler olarak ele alan yenilik sistemleri ve geçiş literatürlerinde daha geniş bir şekilde incelendi. Bu literatürde, lojistik veya "S-eğrisi" dinamikleri uzun zamandır yeni teknolojilerin (ve diğeri yeniliklerin) bir sosyal sistem boyunca tipik yayılımını tanımladığı kabul edilmektedir. şekil 4, yenilikilerden ve erken benimseyenlerden geride kalanlara doğru zaman içinde benimseme kalıplarının an eğrisi dağılımı tarafından yönlendirilen açıklayıcı bir S-eğrisi sunmaktadır (Rogers 2003).

şekil 4. Yeniliklerin yayılması modeli

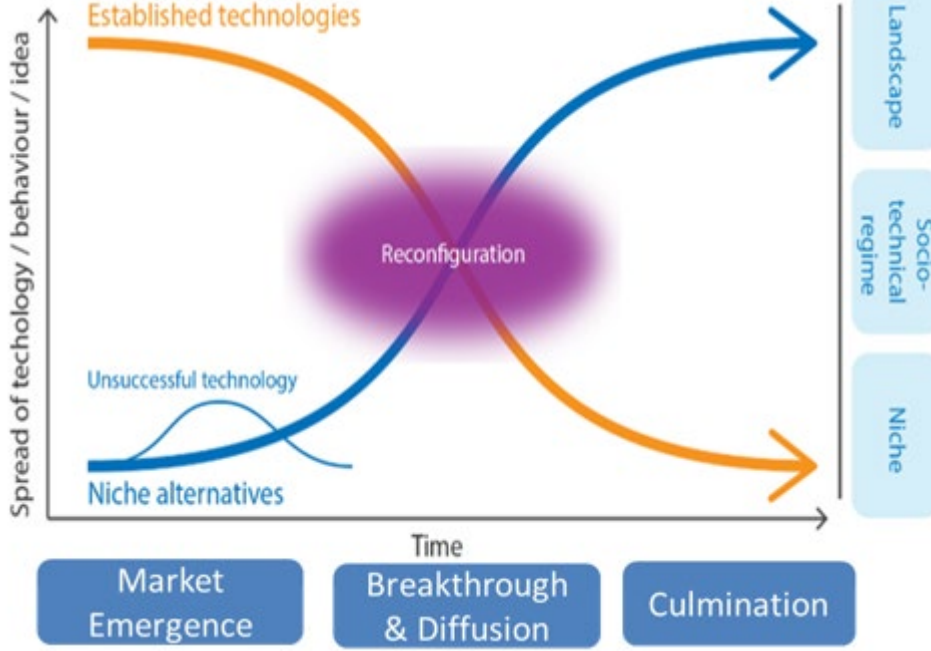


Kaynak: Rogers 2003'e dayanmaktadır.

Yerleşik kültürel, kurumsal ve altyapısal "sosyo-teknik rejimler" (Geels 2014) içindeki atalet nedeniyle teknoloji benimsemedeki zaman gecikmeleri, ekonomistlerin rekabetçi ancak yeterince kullanılmayan teknolojilerin "gizli maliyet" teşhisine (bkz. Falk ve Kosfeld 2006) alternatif bir açıklama sağlar. Örneğin, uzun varlık yaşam döngüleri ve sınırlı politika erişimi, bina sektöründe yeni teknolojilerin benimsenmesinde uzun gecikmelere yol açar ve güneş PV enerjisinden elde edilen elektriğin artık dünyanın büyük kesimlerinde fosil yakıttan daha ucuza mal olması, tedarik sistemlerinin bir gecede değişmesine neden olmayacaktır.

Yayılmının içsel dinamikleri, çeşitli ayarlama maliyetleri kaynakları ve ilgili sistemleri yöneten mevcut "sosyo-teknik rejimdeki" daha geniş kurumsal ataletle birleşince, ani bir benimsemeyi engeller (Geels 2014; Newell ve Paterson 1998). Özellikle yeni teknolojilerin hızlı erken büyümesinin yerleşikler üzerinde sınırlı bir etkisi olabileceğini, ancak doğrudan rekabet ederlerse, yayılma hızlandıkça ve rejimler yeni ve daha iyi teknolojilere uyum sağladıkça bu etkinin hızla artabileceğini unutmayın. Bu, yerleşik teknolojiler üzerindeki etkiyle birlikte şekil 5'te şematik olarak gösterilmiştir. Bazı st düzey politika çıkarımları 4. bölümde tartişılmaktadır.

Şekil 5. S-eğrisi büyümesinin ve teknoloji yer değiştirmesinin stilize edilmiş aşamaları



Kaynak: IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu–Azaltma (IPCC 2022c: bölüm 1/Teknik Özet).

Daha geniş bir literatür, tarihsel geçişlerin hızını araştırır ve geniş varyasyonlar bulur (Grubler 1996; Grubler, Wilson ve Nemet 2016). Tüm sistemlerin (örneğin, kömürden petrole veya motorlu araçların yükselişine) büyük küresel geçişleri onlarca yıl sürmüştür. Ancak, yerel ve ulusal geçişler daha hızlı veya daha tüketici odaklı teknolojiler için, özellikle bunlar mevcut altyapıyı kullanabildiğinde, gerçekleşebilir. Örneğin, başlangıçta arabalar ABD kasabalarında hızla atların yerini aldı, ancak tüm yol ve yakıt ikmal altyapıları gerektiğinde büyüme yavaşladı (Nakicenovic (1986). Bu örnek, yenilenebilir enerjinin mevcut elektrik sistemleri bağlamında termik santrallerin yerini hızla alabileceğini, daha büyük sistem ve altyapı ayarlamaları gerektiren sınırlara (örneğin, değişkenlikten) ulaşana kadar sürebileceğini göstermektedir (Gils, Gardian ve Schmugge 2021; Lam ve Mercure 2021).

Son olarak, teknik ve ekonomi literatüründe sıklıkla göz ardı edilen bir faktör politik direnişle ilgilidir. Bu, yeni katılımcıları engelleyen ve reformların ve iklim politikasının hırsını engelleyen mevcut çıkarların lobiciliği ve güç dinamiklerini, mevcut sosyo-teknik rejimdeki daha geniş kurumsal ataletle birleştirir (Newell ve Paterson 1998; Jones ve Levy 2009; Geels 2014; Breetz, Mildenerberger ve Stokes 2018). Mevcut endüstriler genellikle iklim politikasından faydalananlardan daha yoğunlaşmıştır ve kazanç sağlayacak olanlardan daha etkili bir şekilde kayıpları önlemek için lobi yaparlar (Meng ve Rode 2019). Daha geniş ağlara dayanarak (Brulle 2014), ABD ve Avustralya'da petrol ve kömür şirketlerinin iklim eylemlerine karşı kampanyaları belki de bunların arasında en iyi bilinen ve büyük ölçüde başarılı olanlarıdır (Pearse 2017; Brulle, Aronczyk ve Carmichael 2020; Mildenerberger 2020; Stokes 2020) ancak benzer dinamikler örneğin Brezilya ve Güney Afrika'da (Hochstetler 2020), Kanada'da (Harrison 2018), Norveç'te ve Almanya'da (Fitzgerald, Braunger ve Brauers 2019) gösterilmiştir. Diğer bağlamlarda, mevcut şirketlerin direnci daha inceliklidir, ancak yine de emisyon ticareti sistemlerine ilişkin politika tasarımı zayıflatmış (Rosembloom ve Markard 2020) ve alternatif yakıtlı otomobillerin gelişimini sınırlamıştır (Levy ve Egan 2003; Wells ve Nieuwenhuis 2012).³

Ancak direnç yalnızca mevcut endüstrilerden gelmez; genellikle tüketicilerden gelir, özellikle de benimsenen araç fosil yakıt sübvansiyonlarının kaldırılması veya karbon vergilendirmesi gibi genel bir fiyat aracıysa. Kahn ve Lall (2022), orta gelirli ülkelerde, "Ortaya çıkan orta

sınıf, araçlardan klimalara ve bilgisayarlara kadar uzanan enerji yoğun dayanıklı mallar satın alıyor ve işletiyor. Bu dayanıklı malların sahipleri, karbon fiyatlandırmasına karşı çıkma konusunda çıkarı olan bir çıkar grubunu temsil ediyor....", ve makul politika ile oldukça alakalı ilişkili özellikler sergiliyor (bölüm 4).

3. Geçiş maliyetleri, senaryolar, tutarsızlıklar ve riskler

3.1. Enerji fiyatlarının enerji talebi, maliyetleri ve yapısal değişim üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkileri

Enerji esneklikleri hakkında çok büyük bir literatür var. Enerji talebi tarihsel olarak neredeyse her zaman gelirle birlikte artmıştır (en azından ekonomik kalkınmanın nispeten ileri bir aşamasına kadar). Bu nedenle, enerjinin pozitif bir talep esnekliği vardır. Enerji talebinin gelir esnekliği tipik olarak 1'den azdır, bu nedenle enerji yoğunluğu (birim GSYİH başına enerji) genellikle azalır - en azından temel sanayileşme aşamasını geçtikten sonra (Csereklyei, Rubio-Varas ve Stern 2016; Saunders ve diğerleri 2021), ancak genel talep yine de kalkınmayla birlikte artar.

Coğrafyalar, zaman ölçekleri ve ekonomik ölçekler genelinde talep-fiyat esneklikleri olağanüstü bir sonuç aralığı sergiler. Labandeir, Labeaga ve López-Otero (2017), farklı ürünler, sektörler ve ülkeler için yaklaşık 1000 enerji fiyat esnekliği tahmininin meta-analizini gerçekleştirerek, (toplam) enerji talebinin ortalama fiyat esnekliklerinin kısa vadede -0,22 ve uzun vadede -0,60 ila -0,66 olduğunu ve nispeten geniş aralıklara sahip olduğunu buldu. Bu sonuçlar, genel olarak enerji talebinin nispeten fiyat esnek olmadığını ve tahminlerin kapsam ve analitik zaman ölçeğine göre büyük ölçüde değiştiğini vurgulamaktadır.

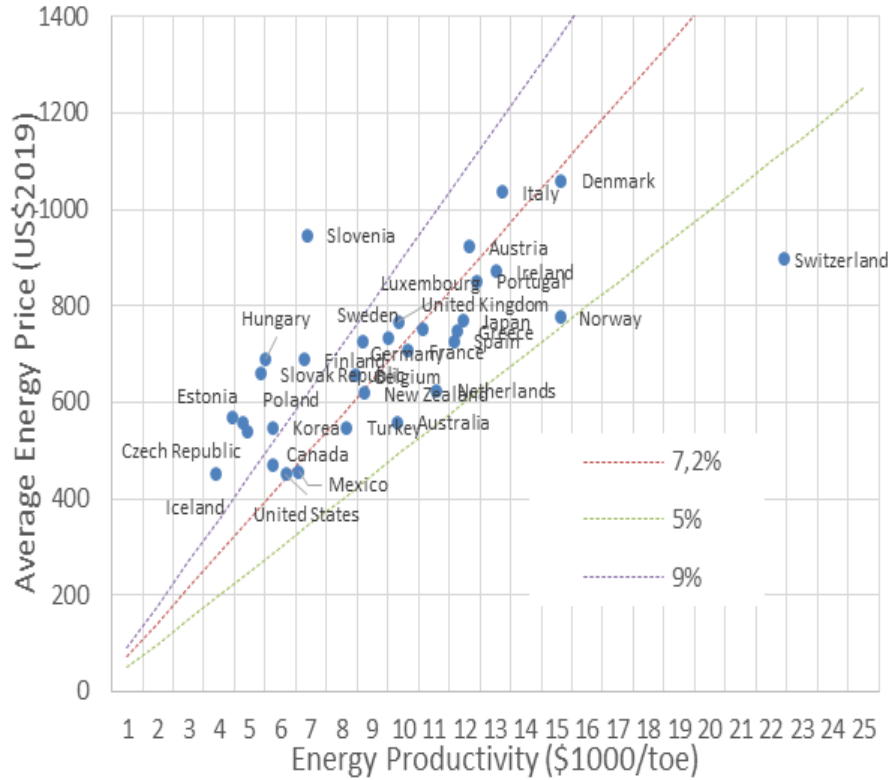
Genellikle ölçüldüğü gibi, nispeten yüksek gelir esneklikleri ile mütevazı fiyat esnekliklerinin birleşimi, küresel enerji talebinin (özellikle de orta gelirli ülkelerin talebinin) enerji verimliliğini artırma çabalarına rağmen büyümeye devam edeceğini güçlü bir şekilde göstermektedir.

Ancak bu tahminin bazı çekinceleri var. İlk olarak, CO2'nin "Çevresel Kuznets Eğrisi" (EKC) hakkındaki literatürden türetilen tartışmalar devam ediyor. Emisyonlar en azından (enerji talebinin kendisi değilse bile) belirli bir gelir seviyesinin üzerinde zirve yapma eğilimindedir. Literatür artık kapsamlıdır ve 1600'den fazla makaleyi kapsayan yakın tarihli bir sistematik inceleme ve "Çalışmaların çoğunluğu hem panel hem de zaman serisi çalışmaları için ters U şeklinde bir EKC'yi doğruladı... Kuznets eğrisinin ortalama dönüm noktası 9.260 ABD dolarıdır" (Naveed vd. 2022) bulgusuna sahiptir. Ancak bu bulgu, örneğin ticaret etkilerini ne ölçüde hesaba kattıkları da dahil olmak üzere ülkeler, çalışmalar, zaman dilimleri ve metodolojiler arasındaki geniş farklılıkları maskeleymektedir. Enerji ve çevre politikalarının güçlendirilmesi, emisyonların azalan bir seyir izlemesinde önemli bir rol oynamıştır.

Ayrıca, ekonomilerin zaman içinde fiyat şoklarına ne ölçüde uyum sağladığına ilişkin kanıtlar da önemlidir ve hala tartışmalıdır. Yakın tarihli bir çalışma (Bashmakov vd. 2024), yapısal olarak daha yüksek enerji fiyatlarına sahip ülkelerin GSYİH'nın bir yüzdesi olarak enerjileri için daha fazla ödeme yapmadıkları ulusal "enerji maliyeti sabitliği" önermesini desteklemek için hem kanıt hem de bazı temel teoriler sunmaktadır. — daha yüksek enerji fiyatlarının, nihayetinde, daha yüksek enerji verimliliğiyle tam olarak telafi edildiği (Şekil 6 ve Kutu 4).

Şekil 6. OECD ülkeleri arasında paylaşılan ulusal enerji maliyeti (enerji son kullanıcı fiyatlarındaki büyük farklılıklara rağmen)

Enerji fiyatları ve enerji verimliliği (1970–2019 yılları arasındaki ortalama değerler)*



Kaynak: Bashmakov ve ark. 2024.

Not: OECD = Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü. TEP = ton eşdeğer petrol

Genişletilmiş ve güncellenmiş bir analiz, ilk petrol şoklarından bu yana geçen on yıllar boyunca çoğu gelişmiş ülkenin GSYİH'nın yaklaşık %7'sini enerjiye (son kullanım fiyatları) harcadığını öne sürüyor. Bu, enerji fiyatları iki kat daha yüksek olan ülkelerin enerji kullanımında yaklaşık iki kat daha üretken olarak ortaya çıktığı gerçeğini yansıtırken, en yüksek enerji maliyetleri, tarihsel olarak çok düşük enerji fiyatlarına sahip olan ve bu ülkeleri son derece enerji açısından verimsiz bir altyapı ve piyasa fiyatlarına doğru hareket ederken ciddi bir uyum zorluğuyla baş başa bırakan Doğu Avrupa ülkelerinde meydana gelmiştir. Yazarlar, "eksi 1" fiyat esnekliklerinin görünürdeki başlık imasından daha incelikli bir yorum önermektedir (bkz. kutu 4).

Kutu 4. Enerji fiyatlarının enerji talebi ve maliyetleri üzerindeki etkisi

Bashmakov'un (2007) öncü katkısı ve sonraki literatür (Bashmakov 2017 gibi), uzun vadeli enerji maliyeti-gelir oranlarının sınırlı bir aralıkta düştüğünü, "enerji maliyeti sabitliği" [veya sabit "enerji maliyeti gelir payı (ECS)"] olarak adlandırılan bir hipotez olduğunu savunmuştur. Bashmakov ve diğerleri (2024), belirli bir değer yerine sürdürülebilir bir enerji maliyeti aralığına atıfta bulunarak uygulanabilirliği ve itici güçleri daha kapsamlı bir şekilde araştırmaktadır. Sınırlı kapsamda (zaman, ülke veya sektör) enerji talebi fiyat esnekliklerini tahmin etmek yerine, uzun vadeli ve ülkeler arası bir bakış açısı benimsemişlerdir; enerji talebinden ziyade enerji yoğunluğuna (üretkenlik) ve marjinal fiyat değişikliklerine yanıt olarak esnekliklerin tahmin edilmesinden ziyade büyük ölçekli enerji fiyat şoklarına yapılan ayarlamalara odaklanılmışlardır. Özellikle ulusal düzeyde, servetin bir oranı olarak, büyük ölçekli enerji fiyat değişimlerinin genel enerji faturaları üzerindeki kalıcı etkisini (on yıllar veya daha uzun zaman ölçeklerinde) araştırmayı amaçlamaktadırlar.

32 üye ülkeyi kapsayan ulusal ECS'nin yeni oluşturulmuş bir veri kümesini kullanarak

Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD), ABD için daha uzun vadeli (72 yıllık) verilerle desteklendiğinde, Bashmakov vd. (2024), coğrafyalar arasında enerji maliyeti-gelir oranlarının brüt çıktıya göre $4,2 \pm 0,8$ ve GSYİH'ye göre $7,2 \pm 1,5$ aralığında olduğunu bulmuştur. OECD ülkeleri genelindeki panel verilerden elde edilen bu bulgu, uzun vadeli zaman dinamiklerini çıkarmak için kullanılırsa, ECS sabitliği mantıksal olarak -1'lik çok uzun vadeli bir fiyat-enerji-yoğunluğu esnekliğine eşdeğer olacaktır. Bu, fiyat değişiklikleri kısa vadeli maliyetlere yol açsa da, uzun vadede enerji sistemleri uyum sağladıkça enerji fiyatı artışlarıyla ilişkili ihmal edilebilir devam eden maliyetlerin belirli bir aralıkta olabileceği anlamına gelir. Bununla birlikte, Bashmakov vd. (2024), esnekliklerin ekonomik uygulamalarda sıklıkla varsayıldığı gibi sabit olmadığını, ancak sistematik bir şekilde değiştiğini savunmaktadır. ECS sürdürülebilir aralığın altında olduğunda, esneklik düşüktür -sıfıra yakındır- çünkü birçok tüketici enerji kullanımını tamamen ihmal eder. ECS üst eşiği aştığında, esneklik ve duyarlılık, yıllar ve on yıllar boyunca biriken yenilik, yapısal değişiklikler ve sermaye yatırımları yoluyla hızla yükselir.

Yazarlar, enerji sistemlerinin nihayetinde oldukça uyarlanabilir olduğu ve bu uyarlanabilir süreçlerin temel bir yönünün, fiyatlar yüksek olduğunda enerji sistemlerinin genel enerji maliyetlerini sürdürülebilir ECS aralığına geri döndürmek için hareket ederken, düşük fiyatların dikkatsizliğe ve artan israfa neden olması olduğu sonucuna varmışlardır. Bu asimetrik uyarlanabilir kapasitenin, sermayede somutlaşan indüklenen yeniliğin dinamik fenomenlerinin bir sonucu olduğunu öne sürmektedirler. Davranışsal, iyileştirme ve stratejik yatırım ekonomisinin Üç Alan çerçevesinden (Grubb, Hourcade ve Neuhoﬀ 2014; Grubb vd. 2023) ve çok aşamalı enerji sistemleri için mantıksal olarak aynı sonuca işaret eden enerji bilimi çalışmalarından yararlanan teorik açıklamalar sunmaktadırlar. Sonuç olarak, politik olarak savunulabilir enerji/karbon fiyatlandırma düzeylerinin, enerji/karbon yoğunluğunu iyileştirmek için zamanında tamamlayıcı önlemlerle birlikte olması gerektiğini, böylece fiyatlar ve sistemik verimliliğin (dağıtım endişeleri dahil) birlikte gelişmesi gerektiğini öne sürmektedirler.

*Kaynak:*Bashmakov ve ark. 2024.

Diğer çalışmalar enerji fiyat değişikliklerinin firma, sektör veya ekonomi düzeyinde istihdam veya üretkenlik gibi diğer sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirir. André ve diğerleri (2023), 1995 ile 2020 yılları arasında 21 ülkede enerji fiyat değişikliklerinin firmaların üretkenliği ve ilişkili dinamikler üzerindeki kısa ve orta ila uzun vadeli etkilerini araştırır. Enerji fiyatlarında %5'lik bir artışın bir yıl sonra üretkenliği %0,4 oranında azalttığını bulurlar; ancak daha uzun vadeli bir bakış açısıyla, %10'luk enerji fiyat artışına karşılık gelen bir şokun %0,9'luk bir üretkenlikle ilişkili olduğunu bulurlar *büyümedört* yıl sonra. Verimlilik artışlarının daha az enerji yoğun sektörlerde daha belirgin olduğunu görüyorlar.

Dechezleprêtre, Nachtigall ve Stadler (2020), 2000 ile 2014 yılları arasında OECD ülkelerinde enerji fiyatlarının hem sektör hem de firma düzeyinde üretim istihdamı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Sektör düzeyinde, fiyatlar ve istihdam arasında küçük, negatif bir ilişki (istihdamın fiyat esnekliği = -0,07) bulunmaktadır ve enerji yoğun sektörler en çok etkilenmektedir. Firma düzeyinde ise tam tersi sonuçlar bulunmaktadır; küçük, pozitif bir ilişki; bunu, hayatta kalan firmaların genişlemesine ve firma düzeyinde istihdamı artırmasına olanak tanıyan artan bir firma çıkış düzeyiyle açıklamaktadırlar.

D'Arcangelo, Pavan ve Calligaris (2022), özellikle toplam faktör verimliliğini (TFP) kullanarak, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi'nin (AB ETS) İtalyan imalat firmalarının ürettiği toplam çıktı ve girdi kullanımı üzerindeki nedensel etkisini araştırıyor ve AB ETS'nin yalnızca firmaların maliyetlerini mi artırdığını yoksa üretimde verimliliği mi artırdığını belirliyor. Yazarlar, AB ETS'nin TFP üzerinde küçük bir olumsuz etkisi olduğunu buluyor, ancak etki sektörler arasında heterojen. Yazarlar, etkilenen firmaların yapısal üretim değişikliklerini teşvik etmek için yeterli teşvikle karşılaşmadıkları ve bunun yerine ağırlıklı olarak yakıt değiştirme yoluyla marjinal ayarlamalarla yanıt verdikleri sonucuna varıyor.

En geniş kapsamlı çıkarım, zamanın ve uyum süreçlerinin önemli olduğudur (elbette enerji fiyat artışlarının dışsal olup olmadığı, doğrudan ticaret dengelerini etkileyip etkilemediği veya iç kaynaklardan kaynaklanıp kaynaklanmadığı da önemlidir).

(vergileendirme). Kısa vadede, fiyat artışları sorunlu olabilir, ancak kanıtlar, potansiyel olarak faydalarla birlikte, zaman içinde büyük bir ayarlama kapasitesi olduğunu göstermektedir.

3.2. Geçiş maliyetleri: modelleme kanıtı

Modelleme literatürleri, özellikle karbon vergisi şoklarından kaynaklanan geçiş maliyetleriyle ilgili olarak zıt sonuçlar vermiştir ve bu sonuçlar çoğunlukla kullanılan model türüne bağlıdır. Politika için büyük farklılıklar, modellerin genel denge ve optimizasyon varsayımına mı (genel denge modelleri) dayandığına yoksa ekonominin denge dışı koşullarda işlediğini mi varsaydığına (Keynes sonrası ekonometri ve ajan tabanlı modeller) bağlı olarak bulunabilir.

IPCC küresel değerlendirmesinde kullanılan "entegre değerlendirme modelleri"nin (IAM'ler) çoğunluğu, bir biçimde veya başka bir biçimde, sınırlı dinamiklere sahip çok dönemli denge veya ilgili temsillere dayanmaktadır. IPCC modelleme veritabanında 2021'e kadar kabul edilen modelleme çalışmalarına göre, ortalama, 2030'a kadar olan on yıl boyunca Paris hedefleriyle tutarlı dik küresel emisyon azaltımlarının küresel GSYİH büyüme oranlarını yılda yaklaşık %0,1 ile yılda %0,2 oranında azaltılabileceğini (GSYİH'nin 2030'a kadar referans projeksiyonundan yaklaşık %1 ile %2 daha düşük olmasına yol açacağını) ve çoğunlukla 80\$/tCO₂ aralığında bir küresel karbon fiyatıyla ilişkilendirilebileceğini göstermektedir.^{2-200\$/tCO₂(IPCC 2022b)⁴}

Elbette ulusal etkiler birçok faktöre bağlı olacaktır ve değerlendirme aynı zamanda bu bölümde kısaca ele alınan kullanılan model türüne de bağlıdır.

Genel denge modelleri

Tedarik odaklı kullanımıÇevresel Stokastik Genel Denge(E-DSGE) modeli, bir tedarik zincirinde farklı seviyelerde ani karbon vergisi şoklarının uygulanmasının döngülere ve sonuçlarda genel uzun vadeli istikrara yol açabileceğini ileri sürmektedir. Politika açısından çıkarım, verginin sistemde nerede daha fazla istikrarsızlık yarattığını ve nihayetinde ekonomi üzerinde nerede olumsuz etkiler yaratacağını öğrenerek optimum bir karbon vergisi bulunabileceğidir. Chan ve Zhao (2023), karbon vergisini yüzde 5'ten yüzde 10'a değiştirmeyi test ederken, karbon emisyonlarını azaltmanın en etkili yolunun, aşağı akış endüstrilerinin çıktının en büyük payını oluşturması nedeniyle aşağı akış karbon vergisi oranını artırmak olduğunu bulmuştur. Fiyat artışları, tüketimi, hanehalkı refahını, ücret oranlarını ve üretken sektörün çıktısını azaltır. Bu varsayımlara dayanarak, bir karbon vergisi her zaman ekonominin verimli işleyişini kısıtlayacaktır.

NiGEM (Ulusal Enstitü Küresel Ekonometrik Modeli)girdi çıktı verilerine bağlı ekonometrik ilişkileri genel denge varsayımıyla bütünleştiren ve çeşitli ülkeler için politikaların uzun vadeli etkilerini tahmin eden küresel arz odaklı genel denge modelidir (Hurst, Liadze ve Lisenkova 2014). Kredi yaratımı ve faiz oranlarından oluşan tam işlevli bir finans sektörü içerir. Brand ve diğerleri (2023), Holland ve diğerleri (2021) ve Liadze ve diğerleri (2023), AB ülkeleri, Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Hindistan, Japonya ve Rusya Federasyonu dahil olmak üzere çeşitli ülkeler için karbon vergisi şoklarını karşılaştırmak için küresel NiGEM modelini kullanır. Örneğin, Liadze ve diğerleri (2023), ton CO başına 130 ila 800 dolar arasında karbon fiyatlarında artışa yol açan ani bir karbon vergisi artışını test eder² 2028'e kadar. Simülasyonun ilk iki yılında, analiz edilen tüm ülkeler için karbon vergilerinin bozucu etkileri bulundu. Bunlar arasında enerji tüketiminde olumsuz etkiler (gaz için <%5, petrol için %20 ve kömür için %70'ten fazla azalmalar, yenilenebilir enerjide 2028'e kadar temel çalışmayla karşılaştırıldığında neredeyse %20'lik bir artış); ülkeler genelinde yatırımlar için olumsuz etkiler (ortalama olarak %-6'dan %-3'e); daha düşük GSYİH büyüme oranı (ortalama olarak %-3'ten %-0,5'e); enflasyonda genel bir artış (yüzde 0,5'ten %3'e); gelir vergisinde düşüş

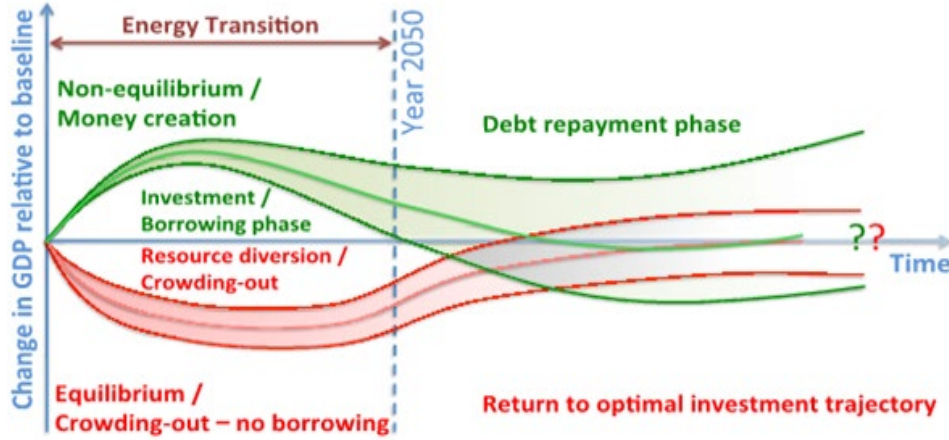
Karbon vergisinden elde edilen gelirden kaynaklanan faiz oranı (-%4'e kadar); varlık fiyatlarında düşüş (yüzde 3'e kadar); ve reel faiz oranlarında artış (yüzde 0,6'dan yüzde 0,8'e).

Denge dışı modeller

Post-Keynesyen makroekonometri

Genel denge modellerinin aksine, finansal sektörler ve arz yanlı etkiler içeren Post-Keynesçi talep yanlı makroekonomik modeller (Mercure vd. 2019'da E3ME-FTT'ye bakın; Mercure vd. 2018) kalıcı bir denge dışılığa işleyen bir ekonominin araştırılmasına olanak tanır. Bu modeller, özellikle birden fazla politikanın olduğu ortamlarda, bazı dönemlerde aşırı tasarruflara ve diğerlerinde aşırı yatırımlara yol açabilecek kısa ila orta vadeli ekonomik kesintiler nedeniyle ekonomideki kalıcı yol bağımlılığını araştırmak için uygundur. Mercure vd. (2018), karbon vergisinin karbonsuzlaştırmanın çoğunu teşvik ediyor gibi görünse de, bunun yalnızca enerji sektörü emisyonlarının baskınlığının bir yansıması olduğunu göstermektedir. Diğer politikaların yokluğu, diğer sektörlerdeki teknoloji bileşimlerinin önemli ölçüde değişmeyeceği anlamına gelir. En önemlisi, yenilenebilir enerji sektöründe besleme tarifeleri veya kamu alımları gibi diğer politikaların birleşik uygulaması, yenilenebilir enerji teknolojilerinin güç sektöründe geliştirilmesini teşvik edebilir, yeniliği destekleyebilir ve maliyetleri düşürebilir, yenilenmiş bir GSYİH büyüme teşvikinin faydasıyla. Bu sonuçlar, "yeşil teşvik" paketlerinin (Balint ve diğerleri 2017; Mercure ve diğerleri 2019) amaçladığı gibi, yatırım teşvikine yanıt olarak standart arz odaklı denge modellerinin tersini temsil eder (Şekil 7'deki yeşil gölgeli kısım).

Şekil 7. İki dünya - alternatif model varsayımları altında enerji geçişi sonuçları (Keynesçi ve genel denge)



Kaynak: Mercure ve diğerleri, 2019, IPCC 2022c, bölüm 15, kutu 15.6'da yeniden üretilmiştir.

Ajan tabanlı modelleme

Modellerin heterojen yapıları üzerindeki daha geniş varsayımlar nedeniyle, ortaya çıkan ajan tabanlı modelleme (ABM) alanı, bir karbon vergisi şokunun, şokun gücüne bağlı olarak, finansal istikrarsızlık ve ekonomik kriz yaratma dahil olmak üzere geçiş üzerinde çok yönlü etkilere sahip olabileceğini öne sürmektedir (Lamperti vd. 2020; Lamperti ve Roventini 2022). Berthold vd. (2023), ekonomik krizlerden kaçınırken politika yapıcılar tarafından belirlenen karbon vergilerinin duyarlılığını keşfetmek için AB ülkelerine ABM uygular. Bu mantık, Lamichhane (2023) tarafından Uluslararası Para Fonu (IMF) için yapılan çalışmada da izlenmektedir. ABD'de özel sektör üzerindeki karbon vergilendirmenin geçiş etkilerini incelemek için bir ABM uygulayan. Bu ABM modelleri, dayandıkları mikro düzeydeki temellerden veri almadaki zorlukları nedeniyle sıklıkla "teorik" modeller olarak anılır, ancak DSGE'lere kıyasla daha gerçekçi varsayımlara dayanan davranış yeniden üretilebilirlik testlerinin model sonuçlarını doğrulamak için güçlü kanıtlar sağladığını iddia eder.

Model seçimi ve son teknoloji sonuçları

Modeller veri analizi ve literatür taramasıyla bilgilendirilebilirken, modellerin altta yatan yapısıyla ilgili kararlar daha önemli olabilir. Denge varsayımlarının hakim olduğu modeller, karbon fiyatlandırmasının emisyonları azaltmak için sistematik olarak en etkili araç olduğu sonucuna varma eğiliminde olacaktır, ancak ekonomi üzerinde kısa vadede (en azından) olumsuz bir etkiye sahip olacaktır. Denge dışı ekonometrik modeller çok çeşitli sonuçlar üretebilir, ancak uzun vadeli etkiler taban tabana zıt olabilir, çünkü yeşil teşvik aynı zamanda herhangi bir karbon vergisinin olumsuz etkilerini telafi eden bir ekonomi genişlemesi de yaratabilir - tartışma daha sonra en uygun araçların veya araç karışımının ne olacağına kayar. Önerilen denge dışı ajan tabanlı modeller bunun ötesine geçerek, daha güçlü karbon vergilerinin yalnızca nihai sonuçları değil, aynı zamanda ekonominin belirli bir duruma doğru istikrarsızlığını nasıl etkileyebileceğini araştırabilir. EEIST programı, politika deneyiminden elde edilen içgörülerini farklı modellerden alınan çeşitli sonuçlarla bir araya getiren ve dinamik geçiş analizine uygun model türlerinin bir sınıflandırmasını sunan bir Sentez Raporu (EEIST 2024) ile sonuçlandı.

Teknoloji harikası

Geçiş maliyetlerinin makroekonomik boyutları ve daha geniş iklim politikası tartışmasındaki konumları, özellikle Pisani-Ferry'nin (2021) finans/borç ve makroekonomik şok riski dahil olmak üzere geçiş dinamiklerinin birden fazla boyutunu vurgulayan bir özetinin ardından gecikmeli olarak daha yaygın bir ilgi gördü. Bu önemli çalışma, nihayetinde *Fransa Stratejisi* (Pisani-Ferry ve Mahfouz'un (2023) Fransa Başbakanı'na yazdığı ve 2023 yılı sonlarında İngilizce olarak yayınlanan kitap, makroekonominin analizine önemli bir katkı sunmaktadır.

Rapor, iklimle mücadelenin "endüstriyel devrimle karşılaştırılabilir ölçekte bir dönüşüm" içereceğini kabul etti. Ancak geçmiş endüstriyel devrimlerden farklı olarak, bu dönüşüm küresel olacak, daha hızlı olacak ve öncelikli olarak kamu politikaları tarafından yönlendirilecek..." Avrupa'daki bu geçişin ekonomisiyle ilgili olarak şu sonuca varıyor:

- "Büyüme ve iklim arasında kalıcı bir takas yoktur. Uzun vadede, teknolojik ilerlemenin yeniden yönlendirilmesi, papazın potansiyel geleceğinden daha yüksek yeşil büyüme oranlarına bile yol açabilir - fosil yakıt merkezli büyüme oranları.
- ...[ancak AB'nin] 2030 yılına kadar emisyon azaltma hedefleri... 30 yılda zar zor ulaşılan hedefe 10 yılda ulaşılması gerekiyor. Bu ani hızlanma, tüm sektörlerin katkıda bulunması gerekeceği anlamına geliyor.
- . . . Önümüzdeki yıllarda, emisyon azaltımları esas olarak fosil yakıtların yerine sermaye ikamesine dayanacaktır. [AB] karbonsuzlaştırma, önümüzdeki on yılda önemli ek yatırım gerektirecektir (2030'da GSYİH'nın yüzde 2'sinden fazla veya 70 milyar avro)... Son dönemdeki ilerlemelere rağmen, henüz iklim nötrlüğüne giden yolda değiliz.
- Bu yatırımların finansmanı, büyüme potansiyelini artırmadıkları için, şimdi ile 2030 arasında muhtemelen ekonomik ve sosyal bir maliyet gerektirecektir. Elbette, ekstra yatırım talebi teşvik ederek büyüme üzerinde olumlu bir etkiye sahip olacaktır. Ancak fosil yakıtlardan uzaklaşma geçişi, yılda çeyrek yüzde puanı olarak tahmin edilen geçici bir üretkenlik yavaşlamasına neden olacaktır...
- Geçiş, GSYİH gibi geleneksel göstergelerle yeterince ölçülemeyen şekillerde refahı etkileyecektir... İklim eyleminin tüm bu boyutlardaki ekonomik etkilerini değerlendirmek için kullanılan araçların daha fazla iyileştirilmesi gerekmektedir.
- Siyasi ve sosyal olarak kabul görmek için, iklim geçişinin ekonomik maliyetinin adil bir şekilde dağıtılması gerekiyor... Hane halkları ve işletmeler kamu kesesinden önemli miktarda desteğe ihtiyaç duyacak."

Ortaya çıkan sorunların bir kısmı, riskler ve fırsatlar, borç ve finans konuları da dahil olmak üzere, bu makalenin geri kalanında tartışılmaktadır.

3.3. Zaman ufukları, yol bağımlılığı ve karbon kilitlenmesi

Altyapı, teknolojiler, kurumlar, endüstriler ve sosyal normların birlikte evrimi güçlü bir şekilde yol bağımlıdır, bu sayede bir ekonominin belirli bir durumuna yol açan kararlar ve olaylar daha fazla değişim için fırsat yelpazesini şekillendirir. Bu nedenle olası gelecek senaryoları, belirli bir yörüngedeki küçük farklılıklar biriktikçe birbirinden ayrılır (Lyapunov 1992). İklim değişikliği bağlamında, iç içe geçmiş altyapısal ve teknolojik değişimin yol bağımlılığı karbon kilitlenmesini (Unruh 2000) ve buna karşılık gelen yenilenebilir enerji kilitlenmesini (Lehmann vd. 2012) yönlendirebilir.

Yol bağımlılığı, birkaç önemli dinamik özelliğin doğal sonucudur. Eylemsizlik, on yıllarca veya daha uzun süre dayanacak şekilde inşa edilen elektrik santralleri, yollar, binalar ve diğer kentsel formlar gibi sermaye stokunun ömründen kaynaklanır. Sermaye stokunu değiştirmeye ilişkili ortaya çıkan zorluk ve maliyet (sabit varlık etkileri dahil), fosil yakıta bağımlı her yeni yatırımla ayarlama maliyetleri arttıkça yol bağımlılığına katkıda bulunur.

Yenilik süreçleri ayrıca daha fazla yenilik için giderek daha elverişli koşullar yaratarak enerji sistemlerindeki yol bağımlılığına katkıda bulunur. ABD otomotiv endüstrisine bakan Aghion ve diğerleri (2016), temiz teknolojilerdeki yenilik faaliyetinin, hem taşmalar hem de kendi geçmiş yenilik faaliyetleri açısından firmaların geçmişte yeniliğe maruz kalmaları tarafından teşvik edildiğini bulmuştur (ayrıca bkz. Barbieri 2015, 2016; Fredriksson ve Sauquet 2017).

Geniş bir yelpazede ek, birbiriyle ilişkili faktörler yol bağımlılığına ve bunun sonucunda ortaya çıkan karbon kilitlenmesine katkıda bulunur; daha ayrıntılı bir inceleme için Seto ve ark. (2016) tarafından yapılan sistematik incelemeye bakın; burada karbon kilitlenmesine 12 katkı ortaya konmuştur (bunlara yol bağımlılığının "özel bir durumu" olarak atıfta bulunurlar).

Güçlü yol bağımlılığının (ve ilişkili dinamik özelliklerin) sonucu, geçmiş olayların toplam etkisini (atalet) aşmak için önemli bir ön çaba gerektiren, ancak inovasyonun kümülatif etkileri yoluyla giderek daha düşük maliyetli hale gelmesi muhtemel bir tekno-kurumsal sistemdir. Geleneksel ekonomik emsallerine göre modellendiğinde, bu, stilize modeldeki bazı gelişmelerin gösterdiği gibi, önemli ölçüde daha yüksek olabilecek optimum ön yatırım gibi çarpıcı biçimde farklı politika çıkarımlarına yol açar (bkz. kutu 5).

Kutu 5. Entegre değerlendirme modellerinde mahsur kalmış sermaye ve yol bağımlılığına yönelik modelleme yaklaşımları

Çoğu stilize ekonomik "maliyet-fayda" entegre değerlendirme modelinde (IAM'ler) (örneğin DICE ve ilgili modeller) kullanılan genel azaltma maliyet eğrisi yaklaşımı, belirli bir zaman noktasında emisyonları azaltma maliyetlerinin önceki zaman dilimlerindeki emisyon seviyelerinden bağımsız olduğunu varsayar. Prensip olarak, bu, tarihsel eylem veya sistem ataletinden bağımsız olarak herhangi bir zaman noktasında önemli azalmaların meydana gelebileceği anlamına gelir; daha düzgün bir yörünge üreten şey, atalet değil, öncelikle net-şimdiki-değer iskontolamadır.

Tetiklenen inovasyon ve yol bağımlılığının ampirik ve teorik temeli iyi bir şekilde haritalanmıştır. En ayrıntılı "süreç tabanlı" IAM'lerin çoğu artık sermaye stokunun bir temsiline sahiptir (inceleme için IPCC 2022c'ye bakın) ve çoğu yeni teknolojilerin büyüme hızına varsayılan kısıtlamalar getirir. Diğerleri büyüme hızını kısıtlar ve maliyetleri genişleme hızına bağlayan birkaçı (Bauer ve diğerleri 2016) yenilenebilir büyümenin hızlanma oranıyla yenilenebilir dağıtımın maliyetlerinin karesel olarak arttığını varsayar.

Bu modeller arasında, IMACLIM-R hibrit genel denge modeli teknik değişim ve atalet arasındaki uzun mesafeli yarışa odaklanır (Waisman ve diğerleri, 2012). Politika için iki önemli çıkarım bulur: yüksek

Kısa vadeli karbon fiyatları yüksek geçici kayıplara (özellikle gelişmekte olan ülkelerde) yol açabilir ve bazı sektörlerde tamamen fiyat bazlı yanıt, özellikle enerji fiyatlarının diğer belirleyiciler (örneğin gayrimenkul piyasaları, altyapı politikalarının ardındaki politik pazarlıklar ve sektördeki tam zamanında süreçler) tarafından bastırıldığı ulaşım sektörünün çok özel dinamikleri nedeniyle uzun vadeli kayıpları sınırlamak için yetersiz olabilir. Geçiş sorununun büyük kısmının, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, yüksek karbon fiyatlarının hane halkı enerji faturaları üzerindeki etkisinden kaçınmayı hedefleyen diğer politikalar (mali politikalar, farklılaştırılmış tarifeler, konut sektöründe enerji verimliliği için sübvansiyonlar, vb.) yoluyla ele alınması gerektiğini bulurlar.

Azaltma maliyetlerinin teknolojik değişim parametrelerine olan duyarlılığı (örneğin, Golosov vd. 2014 ve çeşitli IAM karşılaştırma çalışmalarına bakınız), düşük karbonlu teknolojilere verilen desteğin, düşük karbonlu teknolojilere erken yatırımları ve bu teknolojilerin içsel iyileştirmelerini teşvik etmek (Kverndokk ve Rosendahl 2007) ve yüksek karbon fiyatlarına olan ihtiyacı azaltmak (Bosetti vd. 2009) için uygun önlemler olduğunu göstermektedir.

Bazı daha stilize modeller ataleti (örneğin bkz. Pottier vd. 2015; Vogt-Schilb, Meunier ve Hallegatte 2018) ve indüklenmiş yeniliği (en önemlisi Acemoglu vd. 2012) getirmiş olsa da, çok azı (varsa) bunları sermaye stoğu ataleti ve yeniliğin ötesinde daha geniş kurumsal, sosyal ve politik faktörlerden kaynaklanabilecek daha geniş yol bağımlılığıyla açıkça birleştirir. Oldukça stilize bir yaklaşım (Grubb vd. 2024), küresel enerji sistemi için karakteristik bir ayarlama süresi boyunca sistem düzeyindeki ayarlama maliyetlerini temsil eder ve ataletin, indüklenmiş yeniliğin ve yol bağımlılığının ima edilen kombinasyonunun, küresel olarak enerji sektörü gelişmelerinin seyrini değiştirmek için daha güçlü (ve dolayısıyla çeşitli) erken eylemlerin faydalarını daha da artırdığını bulur.

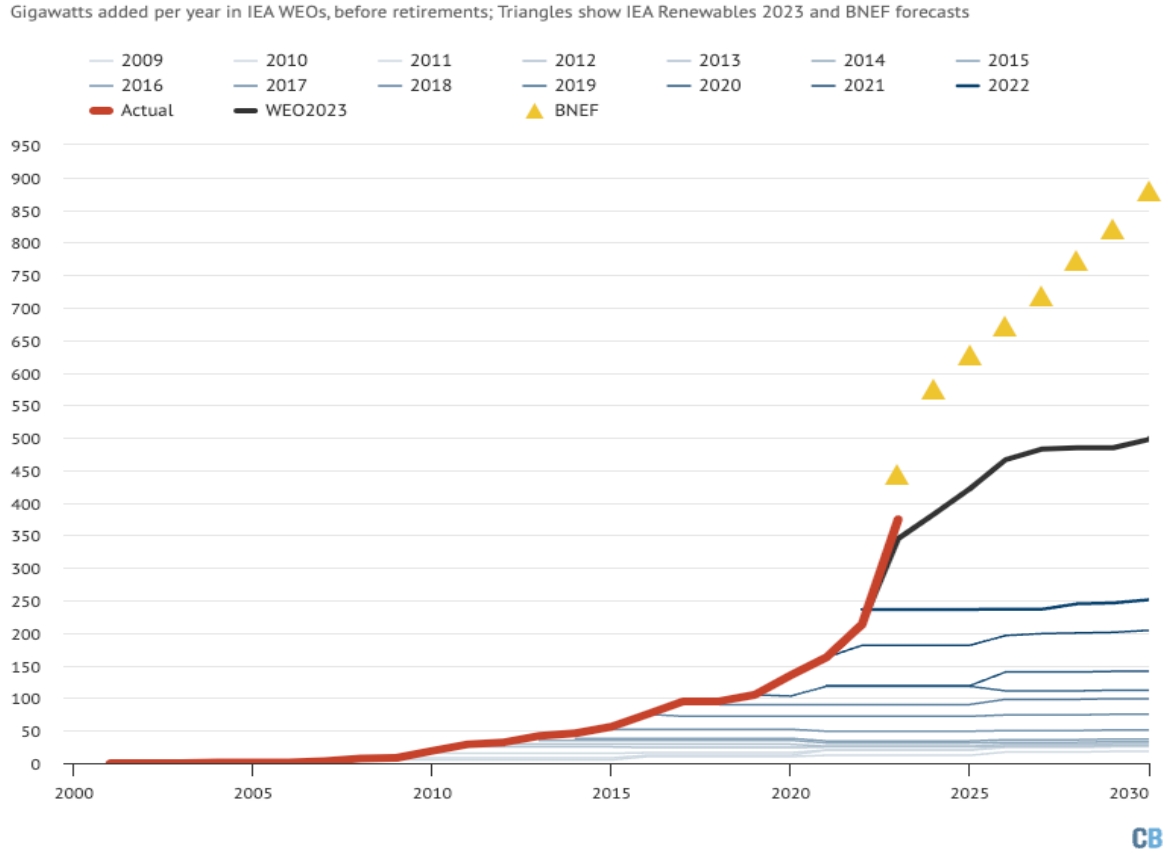
Çoğu gelişmiş ülke, uzun yıllar süren mücadeleden sonra artık önemli ölçüde karbonsuzlaştırma yolunda ilerlerken, kişi başına düşen emisyonların daha düşük olmasından başlayarak çoğu orta gelirli ülke, bu on yılda enerji sektörlerinin yönü hakkında kalıcı sonuçları olacak önemli seçimlerle karşı karşıyadır. Sermaye stoğu ve altyapı dahil olmak üzere bu derin yol bağımlılıkları, erken eylemin faydasını artırır ve ertelemelemin ekonomik maliyetlerini yükseltir (örneğin, bunu Mısır Arap Cumhuriyeti'ndeki enerji geçişi bağlamında gösteren ElSayed, Aghahosseini ve Breyer'e (2023) bakın).

3.4. Küresel senaryolar ve varlık tutarsızlığı riskleri

Küresel enerji dönüşümüne ilişkin bu daha dinamik perspektifler, enerji teknolojileri ve sistemlerine ilişkin eşlik eden makalemizde (Melekh, Grubb ve Dixon 2024) enerji teknolojilerinin özel değerlendirmesiyle bir araya geldiğinde birçok sonuca ulaşılmaktadır.

Küresel enerji sisteminin gelişimi için artık sayısız senaryo var. Örneğin, IPCC azaltma raporunda değerlendirilen senaryoların çoğuyla ilgili olarak sınırlayıcı bir faktör, yayılma dinamiklerini ve gözlemlenen maliyet düşüşlerini tahmin etme yeteneği sınırlı olan, ileriye dönük, "küresel optimizasyon" modelleri kullanma eğilimidir. Bu modellerin çoğundaki "referans vaka" hızla güncelliğini yitirebilirken, "optimum politika senaryoları" genellikle iklim hedeflerine ulaşmak için kesintili küresel politika değişikliğini ima eder. Tarih, bunların hiçbirinin gerçek değişim dinamiklerinin özellikle iyi bir temsili olmadığını göstermektedir. Ancak, yakın tarihli eğilimlerin bile "doğrusal" projeksiyonu, insanların fosil yakıtların sürekli büyümesini, düşük karbon teknolojilerindeki üstel büyümenin etkilerini tamamen göz ardı eden şekillerde ekstrapole etmesine yol açabilir. Örneğin, Şekil 8, Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) güneş kapasitesi kurumlarına ilişkin projeksiyonlarının ardışık revizyonlarını göstererek, tahmin analizlerinden bu teknoloji dinamiklerinin yetersiz anlaşılmasının etkisini göstermektedir.

Şekil 8. Her yıl dünya genelinde eklenen güneş enerjisi kapasitesi, 2002-23



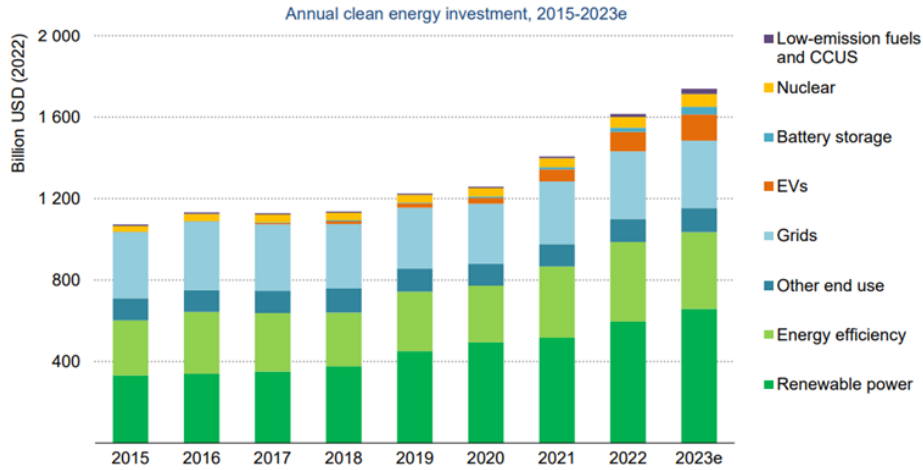
Kaynaklar:Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Dünya Enerji Görünümü (WEO) raporları (2009–22) ve Bloomberg New Energy Finance (BNEF) tahminlerinin Carbon Brief analizi, kişisel iletişim yoluyla son rakamlarla güncellendi.**Not:**Veriler brüt gigavat cinsindendir. Kırmızı çizgi, yıllık PV kurulumunun tarihsel eğilimlerini ve 2009 ile 2022 arasında yayınlanan ardışık IEA Dünya Enerji Görünümü'nden gelen projeksiyonları gösterir. Turuncu üçgenler, ilki 2023'te gerçekte kurulan kapasiteyi gösteren BNEF verilerini ve on yılın geri kalanı için BNEF projeksiyonlarını gösterir.

IEA büyüme hızını sürekli olarak küçümsedi ve tahminlerini revize etti. Haziran 2023 Yenilenebilir Enerji Piyasası Güncellemesi (IEA 2023c), 2023 için yaklaşık 300 GW–320 GW PV kurulumu tahmin etti; Bloomberg ve diğer kaynaklar, 2023'teki gerçek kurulumların toplam 400 GW'tan fazla yeni PV kapasitesine sahip olduğunu gösteriyor (Şekil 8). Bloomberg New Energy Finance (BNEF) tahminlerine göre 2030'a kadar toplam öngörülen kapasite, fosil yakıt planlarının işletimi üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olacaktır.

Üstel büyüme yalnızca fotovoltaikle sınırlı değil; 2021'den bu yana elektrikli araçlara (EV) yapılan yatırım iki kattan fazla arttı: küresel ısı pompası satışları da yıllık çift haneli büyüme kaydetti.

IEA enerji yatırım verileri (IEA 2023a), fosil yakıtlara harcanan her ABD doları için temiz enerjiye 1,7 ABD doları harcadığını gösteriyor. Bu oran, sadece beş yıl önce 1,1:1'den önemli ölçüde yükseldi. 2023'te düşük emisyonlu gücün, elektrik üretimine yapılan toplam yatırımın yaklaşık %90'ını oluşturması bekleniyor. Şekil 9 ve 10, düşük karbonlu güç üretimi ve EV yatırımı ve EV küresel filosundaki karşılık gelen değişiklikler hakkında bazı temel verileri sunuyor.

Şekil 9. Yıllık temiz enerji yatırımı, 2015-2023e

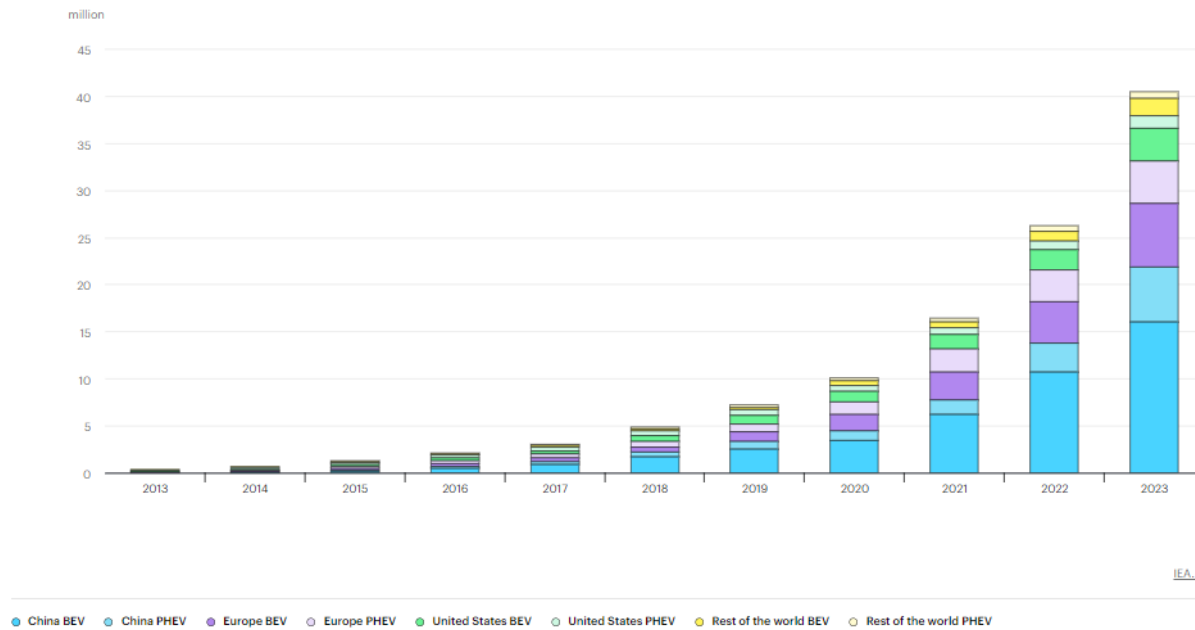


Kaynak: IEA 2023a.

Not: CCUS = karbon yakalama, kullanımı ve depolama; EVs = elektrikli araçlar; 2023e = 2023 yılı için tahmini değerler.

Şekil 10. Elektrikli yolcu hafif hizmet aracı pazarlarındaki küresel eğilimler, 2013-2023

Global electric car stock, 2013-2023



Kaynak: Küresel EV Görünümü (IEA 2024).

Not: EV, bataryalı elektrikli araçları ve şarj edilebilir hibrit binek araçlarını kapsar.

Düşük karbonlu teknolojilere yönelik bu hızla artan yatırım, S-eğrisi teknolojisinin yaygınlaşması (bkz. bölüm 2.4) beklentileriyle örtüşüyor ve fosil yakıt yatırımlarının geleneksel model teknoloji tahminlerine göre tahmin edilenden daha hızlı bir oranda yenilenebilir enerjiye pazar payı kaybetme olasılığının yüksek olduğunu gösteriyor.

Bununla birlikte, şimdiye kadar temiz enerji yatırımının arkasındaki ivme ülkeler (veya sektörler) arasında eşit olarak dağılmamıştır; temiz enerji yatırımındaki artışın yüzde 90'ından fazlası

2021'den beri gelişmiş ekonomiler ve Çin tarafından yönlendiriliyor. Bu, daha az gelişmiş ülkeler için fosil yakıt yatırımlarında daha yüksek kısa vadeli getiriler ve artan borçlanma maliyetleri ve borç yükleri (IEA 2023b) gibi birden fazla engeli yansıtıyor, bölüm 4.3'te daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Değersiz varlıklar için çıkarımlar

Bu dinamik sorunların en karmaşık akademik senaryo analizlerinden biri, mevcut eğilimlerin ve alternatif yolların etkilerini daha gerçekçi bir şekilde keşfetmek için bir makroekonomik modeli bir dizi dinamik sektör-teknoloji modeliyle birleştirir (Mercure, Salas, vd. 2021). Merkezi bulgu, mevcut dinamiklere dayanarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının (özellikle PV) hakim olduğu elektrik sistemlerinin, değişim hızı, maliyet düşüşlerinin ölçeği ve yaygın küresel kaynaklar göz önüne alındığında artık neredeyse kaçınılmaz görüldüğüdür. Tarihsel eğilimleri daha doğrusal olarak ekstrapole eden ve güçlü bir statüko önyargısı sergileyen geleneksel tahminlere dayalı yatırım riski değerlemelerinin aksine, bu dinamik olarak hassas yaklaşım, daha fazla iklim politikası olmadan bile birçok yeni fosil yakıt varlığının mahsur kalma olasılığının yüksek olduğu anlamına gelir (bkz. kutu 6).

Kutu 6. Gözlemlenen dinamiklerin ve öngörülen enerji ve emisyonlar için son eğilimlerin etkileri

E3ME-FTT-GENIE entegre çerçevesini (E3ME—enerji-ekonomi-çevre makro ekonometrisi; FTT—geleceğin teknoloji dönüşümü; GENIE—şebeke destekli entegre Dünya) kullanarak Mercure, Salas ve diğerleri (2021), gelecekteki enerji üretimi, kullanımı, ticareti ve geliri için dört senaryo oluşturdular, çıktı, yatırım ve istihdamdaki ilişkili değişiklikleri tahmin ettiler ve her biri için olası jeopolitik teşvikleri ortaya koydular.

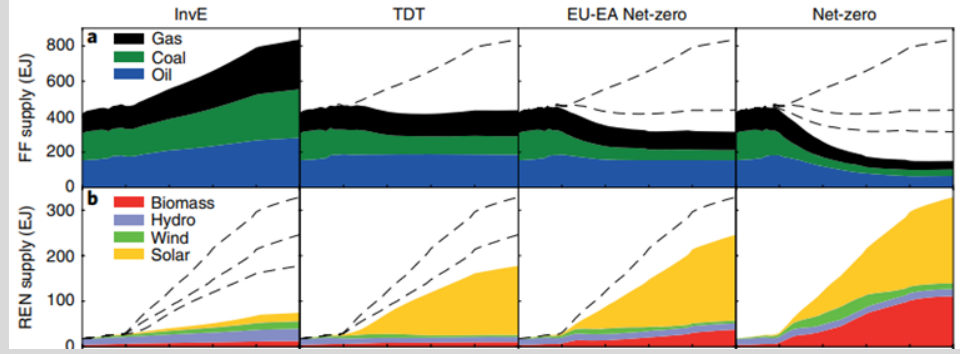
Merkezi "teknoloji yayılma yörüngesi" (TDT), yeni iklim politikalarından bağımsız olarak teknolojik ve ekonomik evrimin mevcut yolunu simüle etmek için teknoloji, enerji piyasaları ve makroekonomideki gözlemlenen eğilimlerden yararlanır. Yeni politikalar içermeyen bu "dinamikler ekstrapole edilmiş" senaryo, küresel ısınmayı 2,6°C'de tutar ve:

- Pazar payının güneş fotovoltaikleri (PV) tarafından yerinden edilmesiyle kömür kullanımı 2030'a kadar hızla düşecek, ardından sabitlenecek.
- Diğer fosil yakıtlar ve nükleer 2030'da zirve yapacak.
- Elektrikli araçların (EA) hızla yaygınlaşmasıyla petrolün fiyatı 2060'lara doğru kademeli olarak düşüşe geçecek.

Bu TDT senaryosunda, talep projeksiyonlarının temel dinamik hususları (endojen petrol ve gaz fiyatı, uyarılmış inovasyon ve S-eğrisi dinamikleri gibi) içerdiği fosil yakıt ve yenilenebilir teknoloji yatırımlarının dengesi, IEA Dünya Enerji Görünümü (WEO) 2019 "mevcut politika senaryosu"ndan (IEA 2019, 810) alınan "yatırım beklentileri" (InvE) senaryosuyla keskin bir tezat oluşturuyor. Bu dünya görüşü, tartışmasız bir şekilde günümüzün devam eden yatırımlarından bazılarını bilgilendirmeye yardımcı olmuştur. Bu senaryoda, kömür ve doğal gaz elektrik üretiminde baskın olmaya devam ediyor ve ulaşımda benzin ve dizel kullanımının devam etmesi petrol talebini artırıyor; güneş, rüzgar, elektrikli araçlar ve ısı pompalarında öngörülen yakın vadeli büyüme, halihazırda gözlemlenenden çok daha yavaş (geniş bir farkla). Bu nihayetinde 3,5°C'lik bir ısınmaya yol açıyor, ancak yazarlar, daha fazla politika olmayan bir senaryoda bile bunun pratikte gerçekleşmesinin olası olmadığını gözlemliyorlar.

İki senaryo daha geliştirildi: "Net sıfır CO₂küresel olarak 2050'de" ("Net sıfır", 1,5°C ısınmayla tutarlı); ve "Avrupa ve Doğu Asya'da Net sıfır" ("AB-EA Net sıfır", 2°C ısınmayla tutarlı). (Giderek daha fazla yasa koyucu) uluslararası iklim hedeflerine ulaşılacaksa, yatırımın açıkça yenilenebilir enerjiye doğru ve fosil yakıtlardan uzaklaşması ve başka politika senaryolarında belirtilenden çok daha fazla sapması gerekir; bu da IEA WEO'nun mevcut politika senaryosundan önemli bir sapmayı temsil eder (Şekil B6.1). Yaparak öğrenme ve yayılma geri bildirimi sonucunda, güneş PV, InvE hariç tüm senaryolarda 2025-30'a kadar en ucuz enerji üretim biçimi haline gelir.

Şekil B6.1. Her senaryoda fosil yakıt (FF) ve yenilenebilir (REN) enerji arzı



Kaynak: Mercure, Salas ve ark. 2021'den uyarlanmıştır.

Not: Noktalı çizgiler sırasıyla solda (fosil yakıtlar) ve sağda (yenilenebilirler) belirtilen diğer senaryoların toplamalarını yansıtır. Talebi karşılamak için gereken genel küresel enerji üretiminin (gösterilmemiştir) yüksek yenilenebilir senaryolarında, yenilenebilirlerin fosil yakıt yakmada yaşanan kayıplara kıyasla içsel olarak daha yüksek dönüşüm verimlilikleri nedeniyle önemli ölçüde daha düşük olduğunu unutmayın. AB-EA Net sıfır = Avrupa ve Doğu Asya'da Net sıfır; InvE = yatırım beklentileri senaryosu; Net sıfır = Net sıfır CO₂2050 yılına kadar; TDT = teknoloji yayılma yörüngesi senaryosu.

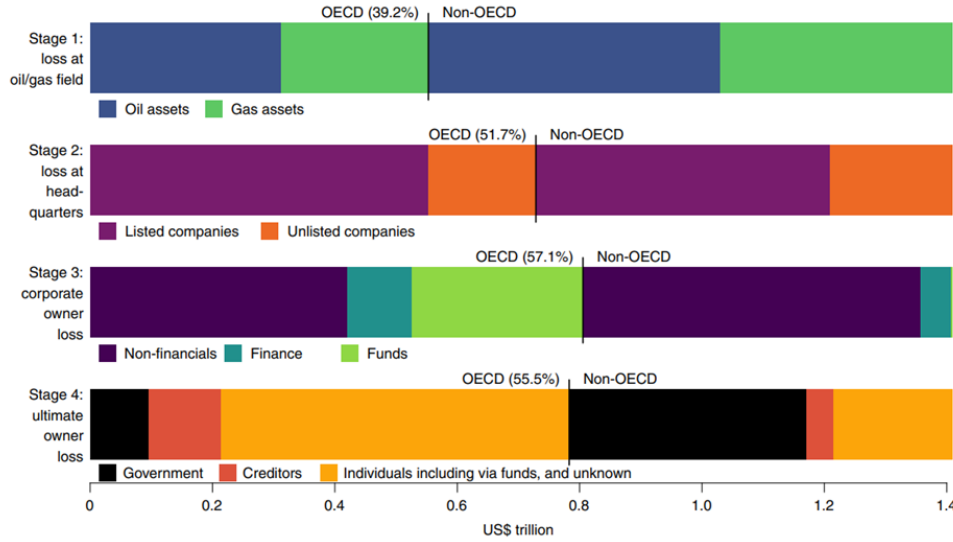
Mevcut eğilimlerin dinamik ekstrapolasyonunun halihazırda dünya çapında yaklaşık 2,6°C'ye doğru giden bir sıcaklık artışına işaret ettiği sonucu, IEA'nın son çalışmasıyla (IEA 2023a) da karşılaştırılabilir. Bu çalışmada, düşük karbonlu kaynakların üstel genişlemesi nedeniyle bu on yılda tüm fosil yakıtlara yönelik küresel talebin zirve yapmasıyla birlikte, halihazırda 2,4°C kadar düşük bir sıcaklık artışına doğru gidiyor olabileceğimiz sonucuna varılıyor. Bu, daha önceki projeksiyonlardan radikal bir değişiklik.

Bu tür analizler, varlık mahsur kalma ve dolayısıyla yeni fosil yakıt yatırımının gerçek değeri için önemli çıkarımlara sahiptir. Kömür santrallerinin sürekli kurulumu ve fosil yakıt varlıkları ve yatırımlarının mevcut değerlemesi, bu WEO 2019/Yatırımcı Beklentileri senaryosunun birçok fosil yakıt yatırımcısının (ve/veya hükümetlerinin) hala inandığı bir dünya olduğunu yansıtıyor gibi görünüyor. Ancak, bu tür değerlemeler—sadece Paris Anlaşması taahhütlerini ihmal etmekle kalmayıp, geçiş dinamiklerini ihmal eden geleneksel modellere de dayanmaktadır—küresel enerji sistemlerinin gelişme biçimiyle tutarsız olma olasılığı yüksektir ve dolayısıyla mahsur kalan varlıkları hafife alır ve yeni fosil yakıt yatırımını aşırı değerlendirir.

Bu, "yatırımcı beklentileri" ile "teknoloji yayılma yörüngesi" senaryolarının karşılaştırılmasından bile açıkça anlaşılıyor. Bu senaryolar yeni politikalar varsaymıyor (bkz. kutu 6). Ayrıklık, AB ve Doğu Asya'nın Net Sıfır taahhütlerini yerine getirmenin dünyayı yaklaşık 2°C'ye getirmeye yeterli olduğu senaryo için önemli ölçüde daha da büyüktür; yazarlar, AB-EA Net Sıfır senaryosunun, InvE senaryosuna karşı 7 trilyon ila 11 trilyon dolar arasında terk edilmiş fosil yakıt varlıklarını temsil edeceğini buluyorlar; bu bulgu, daha önceki jeopolitik senaryo analizleriyle büyük ölçüde doğrulandı (örneğin, bkz. Bazilian vd. 2020).

Bu analize dayanarak, Semieniuk ve diğerleri (2022), terk edilmiş fosil yakıt varlıklarıyla ilişkili geçiş riskinin mülkiyet dağılımını araştırıyor, çıkarma sahalarından şirket merkezlerine ve bunların doğrudan hissedarlarına ve dünya çapındaki petrol ve gaz çıkarma şirketleri için nihai sahiplere (hükümetler ve bireysel hissedarlar) kadar potansiyel kayıpları izliyor. Şekil 11, doğrudan çıkarma kayıplarından nihai sahiplere kadar mülkiyet zinciri boyunca tahmini 1,4 trilyon dolarlık iskontolu kar kaybının OECD ve OECD dışı ülke grupları ile büyük kurumsal kategoriler arasında nasıl dağıldığını göstermektedir.

Şekil 4. OECD/OECD dışı ülkeler ve başlıca kurumsal kategorilere göre elden çıkarılmış varlıkların mülkiyet zinciri



Kaynak: Semieniuk ve ark. 2022.

Not: Her çubuk 1,4 trilyon dolarlık kaybı temsil ediyor. OECD = Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü.

Bulgular, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, düşük maliyetli gibi görünse de iyi yakalanmamış artan iş riskleriyle karşı karşıya olan kömür inşaatları için, atıl varlıkların artan riskleri konusunda uyarıda bulunan ve 2°C'ye kadar ısınmayla ilişkili atıl varlıkların küresel değerinin 1 trilyon ila 4 trilyon dolar aralığında olabileceğini, en acil riskin 2030'dan önce atıl kalma riskiyle karşı karşıya olan kömür varlıkları olduğunu tespit eden IPCC Azaltma Raporu (IPCC 2022c) ile tamamen tutarlıdır.⁶

Kısacası, küresel enerji dönüşümü elektrikte iyi bir şekilde ilerliyor ve ulaşımda hızla ortaya çıkıyor. Bu ve iklim değişikliğinin kendisi, bir sonraki bölümde tartışıldığı gibi, orta gelirli ülkelerin karşı karşıya olduğu seçimler için derin etkilere sahip.

4. Yanıt seçenekleri

4.1. Genel Bakış

Orta gelirli ülkeler çok çeşitli durumlara yayılmıştır. Fosil yakıtların net ihracatçısı olanlar için bu, büyük bir gelir ve döviz kaynağı olabilir (kaynak laneti vakalarına rağmen) - enerji kriziyle büyük ölçüde güçlendirilmiştir. Fosil yakıt kaynaklarına sahip olan diğer bazıları, devam eden kalkınmayı finanse etmeye yardımcı olmak için bu tür faydalar elde etmeyi ummaktadır. Diğerleri ise enerji ithalat maliyetlerinin yükünden muzdariptir. Çoğunun önemli yenilenebilir enerji kaynakları vardır ve bazıları yenilenebilir enerji ihracatçısı olma potansiyeline sahiptir. Neredeyse hepsi iklim değişikliği etkilerinin hızlanması riskiyle karşı karşıyadır.

Hepimizin, geçen yüzyılın enerji sistemlerindeki iki sismik değişim ışığında seçeneklerini değerlendirmeleri gerekiyor: yenilenebilir enerji ve elektrikleendirme alanındaki teknik devrimler ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ve Paris Anlaşması hedeflerine ulaşmak için iklim değişikliğini azaltma konusunda artan aciliyet.

UNCTAD'ın Emtia Bağımlılığı Durumu (UNCTAD 2023b) raporu, bir ülkenin mal ihracat değerinin yüzde 60'ından fazlasının emtialardan gelmesi durumunda emtia bağımlısı olduğunu tanımlıyor ve bunun emtia kaynaklı şoklara karşı içsel bir kırılganlık getirdiğini ve

oyunaklık. Enerji krizinden önce bile, petrol ihracatı küresel emtia ticaretinin değer olarak %30'unu oluşturuyordu, gaz ve kömür ise sırasıyla %5,3 ve %2,2'ydi. Enerji ihracatı özellikle Afrika, Orta Doğu ve Orta Asya'daki birçok ülke ve Rusya için yoğunlaşmış ve önemlidir. Karbonsuzlaştırma, önceki bölümde de gösterildiği gibi, bu tür ihracatçı bölgeler için açıkça önemli zorluklar içermektedir.

Fosil yakıt ihracatı, bir ülkenin kendisi ne yaparsa yapsın etkilenecektir; etkiler ayrıca ülkenin daha geniş dayanıklılığına ve iç tepkisine de bağlı olacaktır. Dünya Bankası'nın daha önceki çalışmasına dayanarak, *Karbonsuzlaşan Bir Dünyada Çeşitlendirme ve İşbirliği* (Peszeko ve ark. (2020), Şekil 12, hem maruz kalma hem de kırılganlık endekslerine göre ülkelerin potansiyel hazırlık durumlarına ilişkin güncellenmiş bir gösterge sunmaktadır.

Bu göz önüne alındığında, yanıtlar, mümkün olduğunca enerji verimliliğini artırmaya çalışırken, yerel kaynaklar ve mevcut ve potansiyel iş büyüme alanları açısından hızla gelişen küresel teknoloji ve politika manzarasında ulusal seçeneklerin ayık bir değerlendirmesini içermelidir. Ülkeler, küresel enerji geçişinin hızlanmasına katkıda bulunabilir veya buna direnmeye çalışabilir. Ancak büyümenin sürdürülebilir ve sürdürülebilir olması için, tüm bu ülkelerin ekonomik ve kalkınma özelemlerini düşük karbonlu büyümeyle uyumlu hale getirmenin yollarını bulmaları gerekir.

İklim değışikliğı gibi bir "dışsalılık" sorunuyla karşı karşıya kalındığında, geleneksel ekonomik reçete, karbon fiyatıyla (bazı piyasa başarısızlıklarını "düzeltmenin" yanı sıra) "dışsalılığı içselleştirmek"tir; ve küresel bir sorun olduğu için, küresel zararların maliyetini yansıtan küresel olarak uyumlu bir karbon fiyatına sahiptir. Bu reçete aslında ekonomik teoride yetersizdir ve kutu 7'de gözlemlendiğı gibi sosyal ve politik bilimle tutarsızdır.

Şekil 5. 143 ülkede düşük karbonlu geçişin etkilerine karşı dayanıklılık ve kırılganlık eksikliğine dair göstergeler



Kaynak:Angelova, Sciarra ve Ameli 2024, Peszko ve ark. 2020'den uyarlanmış ve güncellenmiştir.

Kutu 7. Politika paketlerine yönelik genişletilmiş bir ekonomik yaklaşım

Bir karbon fiyatı -ve tercihen küresel olarak uyumlu bir karbon fiyatı- uzun yıllardır ekonomide iklim değişikliğine en iyi yanıt olarak destekleniyor, ancak sorunlar aslında çok daha karmaşık. Teorik sınırlamalar arasında, gelişmekte olan ülkelerin daha karbon yoğun faaliyetlere sıklıkla daha fazla bağımlı olması göz önüne alındığında, bir karbon fiyatının kendi başına hem yurtiçinde hem de potansiyel olarak uluslararası alanda daha da gerileyen bir eğilime sahip olması yer alıyor. Sonuç olarak, yaklaşık 30 yıldır, tek bir küresel karbon fiyatının teoride yalnızca önemli uluslararası telafi edici transferler varsa (Chichilnisky ve Heal 1994) refahı en üst düzeye çıkaracağı gözlemlenmiştir; bu transferler açıkça ima edilen ölçekte gerçekleşmemektedir.

Ayrıca, karbon fiyatlandırmasının varsayımı, enDağıtım sorunlarından bağımsız olarak toplam GSYİH'yi en üst düzeye çıkarmak gibi basit terimlerle bile verimli bir araç, ekonomilerin ve karar alma süreçlerinin optimallliği ve diğer politikaların "piyasa başarısızlıklarını düzeltme" yeteneği hakkında çok güçlü varsayımlara dayanmaktadır. *Oxford Ekonomi Çalışmaları İncelemesi* (Grubb ve diğerleri (2023), Grubb, Hourcade ve Neuhooff'un (2014) daha önceki bir kitabından yararlanarak bu çekinceleri ve karmaşıklıkları sosyoekonomik karar alma sürecinin üç farklı "alanı" açısından dile getirir.

Davranışsal ekonomi, on yıllardır insan karar alma sürecinde sistematik önyargıları belgelemiştir. Bunlara "tesadüfi" maliyetlere karşı sürekli dikkatsizlik, alışkanlık ve değişime karşı isteksizlik de dahildir. Enerjide, bu önyargılar örneğin, gelişmiş enerji verimliliği yerine büyük ölçekli tedarik teknolojileri ve sistemleri lehine sürekli yapısal önyargıyı açıklamaya yardımcı olur.

Yenilikle ilişkili belirli piyasa başarısızlıkları ekonomide uzun zamandır kabul edilmektedir (örneğin, araştırma ve geliştirmeye ve patent korumasına yönelik kamu harcamalarını haklı çıkarmaktadır) ve ayrıca

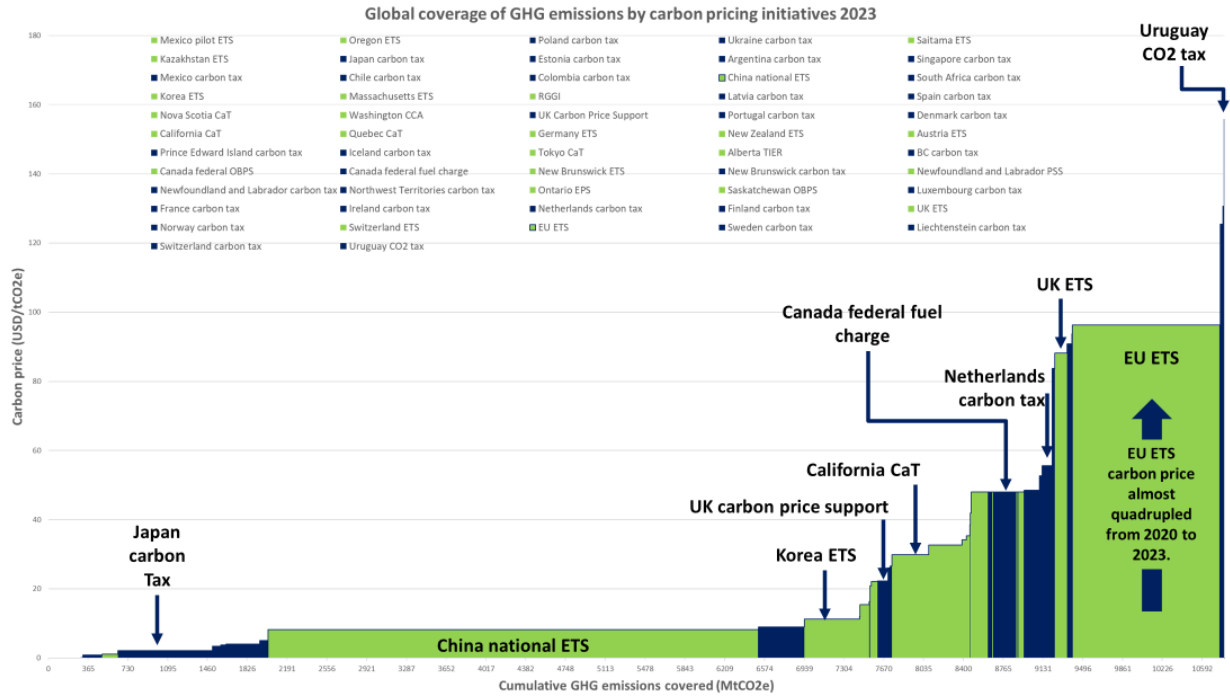
Altyapı gibi kamu mallarının kamu tarafından sağlanması. Yol bağımlılığı olgusu da uzun yıllardır ekonomik araştırmaların konusu olmuştur. Yenilik çalışmaları ve evrimsel ekonomi teorilerinden (aynı zamanda benimseme ve küresel yayılma süreçleriyle ilgili kanıtları da kapsar) elde edilen kanıtlar, karbon fiyatlandırması ve araştırma ve geliştirmenin (Ar-Ge) tek başına iklim değişikliği gibi bir soruna yanıt olarak uygun bir yenilik derecesi veya yayılma hızı sağlamasının beklenemeyeceğini daha da vurgulamaktadır.

The *Oxford İncelemes* Makale, yaklaşımın neoklasik ekonomi teorilerinin uygun sınırlarının uzun süredir tanınmasına nasıl dayandığını açıklıyor ve enerji sistemlerini dönüştürmenin ve iklim değişikliğiyle mücadele etmenin *gerektirir* çok daha geniş bir ekonomik perspektifler kümesi. Bunun nedeni, hem sosyal özellikler (bireysel enerji tüketicilerinden geniş, karmaşık ve uluslararası teknolojik tedarik zincirlerine) hem de zamansal özellikler (kısa vadeli tüketici kararlarından onlarca yılı kapsayan altyapılara ve etkilere) açısından sorunun benzeri görülmemiş kapsamıdır.

Bunların hiçbirisi enerji ve karbon fiyatlarının politika yanıtlarının önemli bir parçası olarak önemini ortadan kaldırmıyor: Bir ekonomideki fiyatlar, dışsallıkların fiyatlandırılması da dahil olmak üzere stratejik kamu hedefleriyle uyumuyorsa, o zaman diğer her şeyin daha da zorlaşması muhtemeldir.

Bu sınırlamalar ve küresel karbon fiyatlandırmasının "klasik" ekonomik reçetesine yönelik politik engeller, bugüne kadarki sınırlı ilerlemeye yansıyor. Üç on yıllık ekonomik savunuculuğun ardından, karbon fiyatlandırmasının kullanımı, Şekil 13'te gösterildiği gibi, hem kapsam hem de fiyat seviyeleri açısından oldukça kısıtlı kalmaya devam ediyor. 2021'de Çin emisyon ticareti sisteminin gelişile birlikte, küresel kapsam fosil yakıt CO'nun yaklaşık %31'ine yükseldi emisyonları (küresel GHG emisyonlarının yaklaşık dörtte biri). Avrupa karbon fiyatı (AB ETS) fiyatı da reformların ardından son yıllarda keskin bir şekilde arttı (enerji krizindeki yüksek gaz fiyatlarıyla daha da arttı). Yine de, çoğu sistemdeki karbon fiyatı ve küresel ortalama, 100 t/CO'nun çok üzerinde olan "karbonun sosyal maliyeti"nin son tahminlerinin çok altında kalmaya devam ediyor²(Rennert vd. 2022) veya karbon fiyatlandırmasının küresel karbonsuzlaşmanın önemli bir itici gücü olması için makul olarak gerekli olan seviyeler (Karbon Fiyatları Yüksek Düzeyli Komisyonu 2017; IPCC 2022c, bölüm 3).

Şekil 6. Açık bir karbon fiyatlandırma mekanizmasının kapsadığı sera gazı emisyonlarının fiyat düzeyine göre dağılımı



Kaynaklar:Dünya Bankası Karbon Fiyatlandırma Panosu ve Kapsam Verileri 2023'ten alınan veriler https://karbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data Grubb ve diğerleri tarafından sunulduğu gibi 2023.

Not:Yatay eksen farklı karbon fiyatlandırma sistemlerinin emisyon kapsamını gösterir. Dikey eksen bu sistemlerin 2022/23'teki fiyatını gösterir (ABD doları/tCO_{2e}). BC = Britanya Kolombiyası; CCA = (BK) İklim Değişikliği Anlaşması; CaT = sınır ve ticaret; ETS = emisyon ticaret sistemi; EU = Avrupa Birliği; GHG = sera gazı; OBPS = Çıktı Tabanlı Fiyatlandırma Sistemi; PSS = Performans Standartları Sistemi; RGGI = Bölgesel Sera Gazı Girişimi (Amerika Birleşik Devletleri); TIER = Teknoloji İnovasyonu ve Emisyon Azaltımı.

Sonuç olarak, uygulamada çok daha karmaşık bir politika manzarası olduğunu gösteren birkaç faktör bulunmaktadır; bunlardan üçünü vurguluyoruz:

- Büyümede inovasyonun rolü ve "Schumpeterci yaratıcı yıkım" ekonomisi (Akcigit ve Howitt 2014; Akcigit ve Van Reenen 2023) de dahil olmak üzere ekonomik dinamiklerin genişletilmiş ekonomik anlayışının yanı sıra davranış ve evrimsel ekonomi (bkz. kutu 7) ile piyasa fiyatları, hem Ar-Ge hem de doğrudan sübvansiyonların dağıtımı ve dağıtım ve yayılma arasındaki karmaşık etkileşimler için çıkarımlar (ayrıca bkz. bölüm 3);
- Gelişmiş ülkelerle kıyaslandığında daha az finansal kaynağa ve daha az gelişmiş bir altyapıya, daha yüksek sermaye maliyetine ve daha derin dağıtım kaygılarına sahip olabilen orta gelirli ülkelerin özel durumu;
- Karbon fiyatı odaklı çözümlerin kısa vadeli dağıtımsal ve makroekonomik etkileri, önemli bir katkı sağlamasına rağmen, birçok gelişmekte olan ülkede uygulanmasının daha da zor olabileceği düşünülmektedir.

IPCC Azaltma Raporu'nda şu ifadeler yer verildi: *Teknolojik değişime ilişkin sistemsel bir bakış açısı, politika yapıcılara etkili inovasyon politikası araçlarının seçimini destekleyen içgörüler sağlayabilir* ve iklim değişikliği ve daha geniş sürdürülebilir kalkınma yanıtlarında sinerji potansiyelini vurgular. Özellikle, *Ölçeklendirilmiş inovasyon yatırımlarının talep çekme müdahaleleriyle birleştirilmesi, her iki yaklaşımın tek başına uygulanmasından daha hızlı teknoloji birim maliyeti düşüşleri ve daha hızlı ölçeklendirme sağlayabilir* (Tüm alıntılar IPCC 2022c, Teknik Özet'ten alınmıştır (Yenilik bölümü 16'ya dayanmaktadır).

Bu geniş arka plan karşısında, aşağıdaki tartışma, öncelikle ulusal düzeyde, ardından uluslararası alanda bazı gözlemlerle politika için bazı temel ilkeler ve seçenekler önermektedir.

4.2. Politika yapımına ve politika paketlerine yaklaşımlar

İklim değişikliğine yönelik politika yanıtlarının yetersiz hızı ve ölçeğinin kısmen uygunsuz karar alma süreçlerini yansıttığı yönünde artan bir endişe bulunmaktadır (Farmer vd. 2015; Mercure vd. 2016; Mercure, Salas, vd. 2021). Geleneksel ekonomik tavsiyeler, politika seçeneklerinin maliyet-fayda analizinin rolünü vurgular ve bu genellikle iskonto net bugünkü değer (ulusal düzeyde oldukça yüksek iskonto oranlarında olabilir) açısından seçeneklerin niceliksel olarak karşılaştırılması anlamına gelir.

Maliyet-fayda analizine ve kısmi/genel ekonomik denge analizine odaklanan geleneksel değerlendirme yöntemleri, geleneksel refah ekonomisinden yararlanır ve ekonomik manzarayı önemli ölçüde değiştirmeyen müdahaleler söz konusu olduğunda en uygun olanıdır; paydaş çıkarlarının nispeten homojen olduğu veya dağıtımsal etkilerin toplu verimlilik hedefi lehine büyük ölçüde ihmal edilebildiği; ve sonuçların maliyet ve faydalarının makul bir güven veya ölçülebilir belirsizlikle bilindiği, böylece hesaplamaların "rasyonel beklentilere" dayandırıldığı durumlarda. Stern, Stiglitz ve Taylor (2021), bu yaklaşıma yönelik en keskin eleştiriyi yapmaktadır.

Gerçekte, yüksek karbonlu enerji sistemlerinden düşük karbonlu enerji sistemlerine geçiş, marjinal olmayan unsurlar (Fouquet 2016; IPCC 2018), son derece heterojen çıkarlar (Geels, Berkhout ve van Vuuren 2016) ve politikaların sonuçlarında maliyetler, faydalar ve yol bağımlılığına ilişkin derin belirsizlik (örneğin bkz. Hughes, Strachan ve Gross 2013) dahil olmak üzere yaygın ve dönüştürücü bir değişimi içerir. Şimdiye kadar enerji dönüşümü için önemli olduğu kanıtlanmış kararlar büyük ölçüde stratejik tercihler ve politik faktörler tarafından yönlendirilmiştir; çoğu zaman baskın ekonomik analiz ve tavsiyeler sayesinde değil, bunlara rağmen. Bu nedenle, hükümetlerin kutu 8'de kısaca belirtildiği gibi, bu koşullara daha uygun ve daha geniş karar alma araçlarını dikkate almaları gerekebilir.

Kutu 8. Karar değerlendirme yaklaşımları

İklim değişikliği ve enerji geçişinin derin karmaşıklıkları göz önüne alındığında, araştırmacılar marjinal olmayan değişim, çok heterojen aktörler ve çıkarlar ve derin belirsizlik koşulları altında karar almayı desteklemek için metodolojileri ve yaklaşımları araştırdılar. Örnekler arasında, AR6 Çalışma Grubu II raporunda (IPCC 2022a, bölüm 17, Bölümler Arası Kutu DEEP) diğer yaklaşımlarla birlikte özetlenen Sağlam Karar Alma (RDM) yaklaşımı (Marchau vd. 2019) yer almaktadır.

Mercure ve diğerleri (2021) bu yaklaşımlardan yararlanarak bir "Risk-Fırsat Analizi" (ROA) yaklaşımı geliştirmiştir. Ancak diğer çerçevelerin aksine, ROA özünde maliyet-fayda analizine (CBA) dayanır ve dönüşümsel değişim sorunlarına uygulandığında en önemli kusurlarından kaçınırken metodolojisinin genelleştirilmesini sunar. CBA yaklaşımından temel metodolojik sapmalar şunlardır:

- Maliyet ve faydaların haritalanması, riskleri ve fırsatları da kapsayacak şekilde genişletiliyor; bu da, kesin olarak niceliksel olarak belirlenemese bile, çok daha geniş bir yelpazede potansiyel politika etkilerinin yakalanması anlamına geliyor.
- Ekonomik değişimin dinamik süreçleri, yalnızca belirli bir anlık görüntüde beklenen sonuçları dikkate almak yerine analize dahil edilir. Bu, geri bildirim süreçlerinin sorgulanmasını ve politika sonuçlarını iyileştirmek için nasıl azaltılabileceğini veya geliştirilebileceğini ve ayrıca küçük eylemlerin büyük etkileri tetikleyebileceği "hassas müdahale noktalarının" belirlenmesini içerir.
- Tüm sonuçları tek bir parasal metriğe dönüştürmek yerine, farklı sonuçlar kendi başlarına değerlendirilir. Bu, çeşitli çıkarları tartmanın şeffaflığını ve kasıtlılığını artırır ve maskeli değer yargılarıyla ilişkili sorunlardan kaçınarak karar almanın hesap verebilirliğini artırır.

Daha kapsamlı metodolojik ayrıntılar ve teorik temeller Mercure, Salas ve diğerlerinde (2021) bulunabilir ve Enerji İnovasyonu ve Sistem Geçişi Ekonomisi (EEIST) konsorsiyumu (EEIST 2021) tarafından yapılan araştırmada özetlenebilir ve elektrikli araçlar ve düşük karbonlu çelik ile ilgili ileriye dönük uygulama örnekleriyle birlikte sunulmuştur. Tablo B8.1, marjinal veya marjinal olmayan değişimin hedef veya beklenti olduğu durumlarda politika eyleminin amacı ve gerekçesi arasındaki temel farklılıkları, uygun değerlendirme çerçevesini, teorik temellerini ve analitik modellerini özetlemektedir.

Tablo B8.1. Marjinal ve marjinal olmayan değişim bağlamında metodolojik yaklaşımlar

	Where the aim or expectation is marginal change	Where the aim or expectation is non-marginal change	Reason for difference (in non-marginal case)
Purpose of the policy intervention	Allocative / static efficiency	Dynamic effectiveness	Primary concern is not how efficiently resources are allocated (optimisation), but how effectively economic structures are changed or created (steering)
Rationale for policy	Market failure	Market shaping	Over periods or scales of concern, existing markets are changing, or new ones emerge, so that optimal states cannot be reliably identified
Appropriate analysis	CBA	ROA	Fundamental uncertainty makes precise expected future costs and benefits unknowable
Appropriate models	Equilibrium / optimising	Disequilibrium / simulating	Need to assess effect of policy on processes of change, not just on destination
Theoretical basis	Equilibrium / welfare economics	Complexity economics	Need theory that can explain non-marginal, irreversible and transformational change where relevant

Kaynaklar: Mercure, Salas ve diğerlerine dayalı EEIST 2021. *Not:* CBA = maliyet-fayda analizi; ROA = risk-fırsat analizi.

Orta gelirli ülkeler için, ulusal stratejinin anahtarı, yeni teknolojilerin çeşitli karmaşıklıklarda çok sayıda bileşene sahip yeni tedarik zincirlerini içerdiğini kabul etmektir. Birkaç temel, oldukça gelişmiş teknoloji için, çoğu orta gelirli ülkenin ABD, Avrupa ve (giderek artan bir şekilde) Çin'deki büyük küresel inovasyon merkezlerinin hakimiyetine meydan okuması zor olabilir. Ancak tedarik zincirleri, hepsi yüksek teknoloji olmayan çok daha geniş bir yelpazede bileşen faaliyeti ve yeteneği içerecektir. Dahası, enerji teknolojileri ve sistemleri hakkındaki eşlik eden makalemizde ana hatlarıyla belirtildiği gibi, ortaya çıkan depolama ihtiyaçlarının çeşitliliği için çok çeşitli depolama teknolojisi seçeneklerinden bazıları gibi sınırlı "yüksek teknoloji" yetenekleri içerebilecek ortaya çıkan teknoloji alanları vardır (Melekh, Grubb ve Dixon 2024).

UNCTAD raporu *Yeşil Pencere Açılsın* (UNCTAD 2023a) 17 "yeşil sınır teknolojisini" inceliyor, bunların hızlı büyümelerine dikkat çekiyor ve piyasa değerlerinin 2020'de 1,5 trilyon dolardan 2030'da 9,5 trilyon dolara çıkabileceğini öngörüyor. "Gelişmekte olan ülkeler ve belirli yenilenebilir enerji ürünleri için hızla değişen teknolojik sahanın yeşil fırsat pencereleri sunduğunu" öne sürüyorlar. Bu, "daha karmaşık, daha fazla katma değere sahip ve daha düşük karbon ayak izlerine sahip ürünlere geçişi..." içerecek ve kısmen "yeşil endüstriyel politika" anlamına gelecek. Bu, bir dereceye kadar, yeniliği teşvik etmek için "yatay" politikaları destekleyen ancak daha hedefli, sektöre özgü politikalara karşı temkinli olan geleneksel ekonomik tavsiyelerle çelişiyor. Ancak, gelişmekte olan ülkelerin teknoloji sınırının gerisinde kalma ve sonuç olarak da yeniliğin tüm faydalarını elde etmekte zorlanma eğilimiyle ilgili daha geniş bir endişeyi yansıtıyor; Dünya Bankası tarafından belirtilen "yenilik paradoksu", çünkü prensipte bu ülkelerin kazanacak daha çok şeyi var (Cirera ve Maloney 2017).

Ekonomik meselelerin daha ayrıntılı anlaşılmasıyla karşı karşıya kalan Enerji İnovasyonu ve Sistem Geçişi Ekonomisi (EEIST) araştırma konsorsiyumu tarafından hazırlanan bir rapor, enerji geçişinde politika tasarımı için beş ilke öneriyor (EEIST 2022):⁷

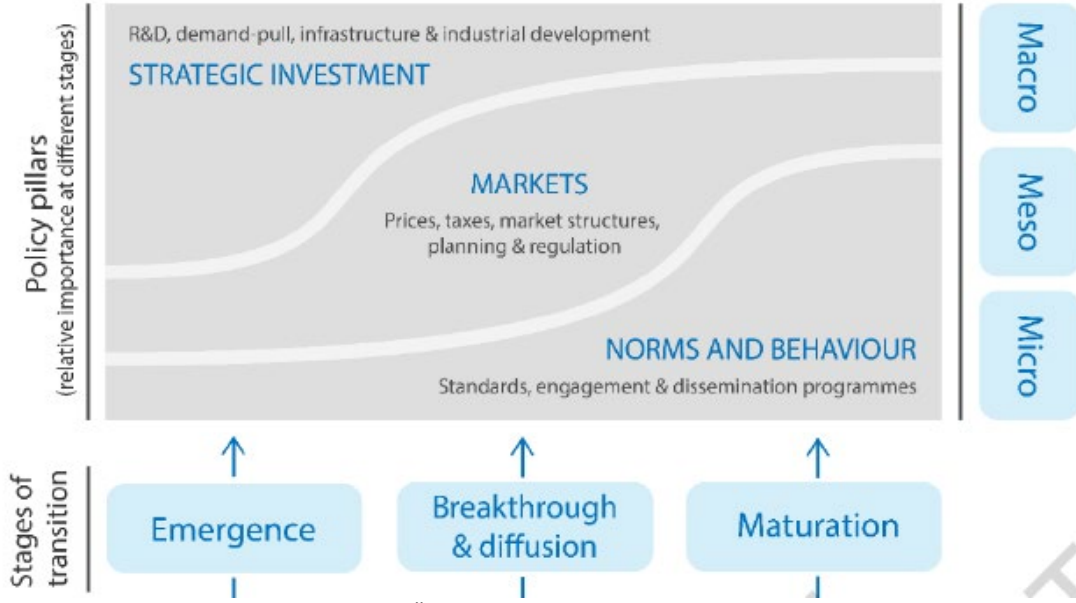
- *Teknolojik tercihlerin yapılması gerekiyor.*Yenilik ve yapısal değişim bağlamında, politikalar neredeyse her zaman bazı teknolojilere diğerlerinden daha fazla avantaj sağlayacaktır. Düşük karbonlu yönlerde yeniliği destekleyerek, kazara değil, kasıtlı olarak seçmek daha iyidir. Tarafsız olması amaçlanan bazı politikalar, yerleşiklere ve kademeli değişime karşı bir önyargıya sahip olabilir.
- *Maliyetleri düşürmek için yatırım yapın ve düzenleyin.*İyi tasarlanmış yatırım ve düzenleme politikaları, araştırma, geliştirme ve gösterinin "arz itişini" tamamlayan inovasyon için bir "talep çekişi" yaratarak temiz teknolojilerin maliyetini düşürebilir ve teknoloji geliştirme, dağıtım ve yayılımında yaparak öğrenme geri bildirim döngülerini güçlendirebilir.
- *Yatırımda kalabalığın risklerini aktif olarak yönetin.* Düşük-karbon geçişleri birçok belirsizlik kaynağı içerir. Kamu finansmanının lider yatırımcı olarak hareket etmesi de dahil olmak üzere temiz teknolojilere özel yatırım risklerini azaltma çabaları, teknoloji riskini ve finansman maliyetlerini azaltabilir ve yatırım ve dağıtım oranlarını büyük ölçüde artırabilir.
- *Hedeflenen dönüm noktaları.*İyi hedeflenmiş müdahaleler, teknoloji rekabetinde, tüketici tercihinde, yatırımcı güveninde veya küçük bir girdinin büyük bir değişime yol açtığı geçişlere yönelik sosyal destekte dönüm noktalarını harekete geçirebilir. Bu, sübvansiyonların ve vergilerin hedeflenmesi ve düzeyini ve düzenlemelerin sıklığını bilgilendirebilir.
- *Daha iyi sonuçlar için politikaları birleştirin.*Her düşük karbonlu geçişi yönlendirmek için bir politika kombinasyonuna ihtiyaç duyulacaktır. Her politikanın etkisi diğerleriyle etkileşimlerine bağlı olduğundan, politikaları tek tek değerlendirmek yanıltıcı olabilir. Politikaları bir paket olarak değerlendirmek, birbirini güçlendirenleri belirleyebilir ve "parçaların toplamından daha büyük" sonuçlar üretebilir.

Özellikle bu ilkelerin sonuncusuyla ilgili olarak, ekonominin çoğunda "politika paketleri" fikri, özellikle tanımlanmış piyasa başarısızlıklarını düzeltmeyi hedefleyen politikalar hariç, tekrarlama ve örtüşme riski taşıdığı için ihtiyatla karşılanır. Bu görüş, *misyon odaklı* yenilik ve *pazar şekillendirm*e politikalar (Mazzucato 2015, 2016).

Farklı politikaların potansiyel tamamlayıcılığını anlama ve düzenlemenin bir yolu, farklı karar alma alanlarının ekonomik çerçevelenmesinden kaynaklanır. Kitap *Gezegensel Ekonomi* (Grubb, Hourcade ve Neuhoﬀ 2014) teknoloji sınırının evrimine ilişkin farklı ufuklara, karar alma süreçlerine ve pozisyonlara sahip aktörleri hedefleyen politikaların içsel bir tamamlayıcısını ifade eder. Bu görüş, Şekil 14'te gösterildiği gibi, yenilik ve geçiş için politika yapımında "üç sütun" yaklaşımına yol açar:

- *Ortaya çıkış.*"Ortaya çıkma" aşamasında, belirli bir bağlamda mevcut en iyi uygulama sınırının ötesinde bir pazar kurmak ve aktörler tarafından benimsenmeyi sağlamak için bazı stratejik yatırım unsurlarına ihtiyaç vardır, belki de başlangıçta niş uygulamalar için. Bu yatırımlar, teknoloji maliyetlerini düşürmeye ve çeşitli türlerdeki ilişkili altyapılara zamanında yatırım yapmaya yardımcı olmak için çeşitli öğrenme biçimlerini ve başlangıçta ölçek ekonomilerini teşvik ederek daha fazla sonraki yayılmayı mümkün kılar.
- *Atılım ve yayılma.*Yenilikler ortaya çıkış aşamasını geçip atılım ve yayılma aşamalarına ulaştığında, piyasalar, ekonomik teşvikleri yeni teknoloji lehine çeviren fiyatlandırma araçları da dahil olmak üzere, benimsenmeyi etkilemede kritik bir rol oynar, dağıtım ve yayılma oranını ve ilişkili maliyet düşüşlerini hızlandırır.
- *Olgunlaşma.*Ancak, benimsenmeye yönelik çeşitli engeller (davranışsal ve yapısal) yaygın benimsenmeyi engelleyebilir. Bu engeller, açık ekonomik teşviklerden çok normlar ve davranışsal süreçlerden etkilenebilir. Engelleri ortadan kaldırmak için, teknoloji ve ilişkili pazarların olgunlaşması için standartlar ve katılım politikaları önemli olabilir.

Şekil 7. Geçiş sürecinde tamamlayıcı politikaların evrimi



Kaynak: IPCC 2022c, Bölüm 1 ve Teknik Özet'te sunulduğu gibi.

Bu çalışmanın son gelişimi (Grubb vd. 2023), bu yaklaşımın anlamlı bir şekilde basit bir "piyasa başarısızlıkları" kümesine indirgenemeyeceğini savunuyor ve bir sütundaki politikaların diğer sütunların gelişimini nasıl destekleyebileceğini daha eksiksiz bir şekilde açıklıyor. Rekabetçi pazarlar yeni girişi ve inovasyonu kolaylaştırabilir ve enerji/karbon fiyatlandırmasının "kolayca elde edilebilecek meyvelerin" benimsenmesini ve geliştirilmesini teşvik etmede açık bir rolü vardır; ancak net sıfıra doğru geçiş politikasının benimsenmeyi aktif olarak artırması (özellikle son kullanım verimliliği için) ve hızlandırması, "diğer dallarda yeni meyvelerin büyümesini" teşvik ederken "sonunda ağaçtaki tüm elmaları toplamamız" gerektiğini kabul etmesi gerekir (Patt ve Lilliestam 2018).

Dünyanın farklı bölgelerindeki enerji sübvansiyon reformu ve karbon fiyatlandırma sistemlerinin geçmişinin de gösterdiği gibi, piyasalar ve uygun fiyatlandırma kaçınılmaz olarak kendiliğinden evrimleşecektir. Enerji verimliliğini artırma ve karbon yoğunluğunu düşürme, temiz teknolojileri ve ilişkili endüstrileri genişletme politikaları da bu tür piyasa evriminin politik alanını ve etkisini artıracak ve karbon kilitlenmesi ve atıl varlıkların maliyetlerinden ve risklerinden kaçınmaya yardımcı olacaktır.

4.3. Uluslararası boyutlar ve finans

İklim değişikliğinin, geniş çaplı ticaret ve çokuluslu şirketlerin olduğu bir dünyada, çok çeşitli ekonomik kalkınma düzeyleri bağlamında ele alınması gereken küresel bir sorun olduğu göz önüne alındığında, etkili yanıtlar elde etmek için uluslararası iş birliği şarttır. Belirtilindiği üzere, küresel karbon fiyatının geleneksel ekonomik reçetesi gerçekte uygunsuz ve uygulanamazdır ve teknolojiye gelişmelerin veya davranış ve inovasyonun daha geniş ekonomik bilimlerinin sunduğu fırsatları yeterli ölçüde hesaba katmaz.

Tamamen ekonomik açıdan bakıldığında, Acemoglu, Aghion ve Hémous (2014), yönlendirilmiş teknik değişimi hesaba katarak uluslararası işbirliğinin yararlı bir arketipi sunar ve Kuzey-Güney modelinde uluslararası ticaretin iki ucu keskin doğasını belirtir. Bu, "Kuzey" tarafından yönetilen yeniliğin, düşük karbonlu yenilikler küresel olarak "taklit edilirse" küresel çözümler üretebileceğini, ancak "Güney" mevcut ve karbon yoğun teknolojilerde uzmanlaşırsa ticaretin bunu baltalayabileceğini, bunların ticaretinin yapıldığını ve daha temiz teknolojilerin altını oyduğunu bulur.

Bu son derece stilize yaklaşım finansal boyutları ve birçok nüansı ihmal ediyor. IPCC'nin uluslararası işbirliği hakkındaki bölümü (IPCC 2022c, bölüm 14), uluslararası müzakere süreçleri bağlamında literatüre dair geniş bir genel bakış sunuyor. Ancak henüz, eşitsiz bir dünyada enerji sistemlerindeki indüklenen inovasyonu ve yol bağımlılığını hesaba katan uzaktan kapsamlı bir uluslararası işbirliği teorisi yok. Bu sonuç bölümü, bu daha karmaşık bağlamda ticaret, finans ve uluslararası işbirliğinin doğasıyla ilgili yalnızca üç geniş gözlem sunuyor.

Ticaret

Ticaret, uluslararası ekonomik kalkınma için hayati öneme sahiptir. Tetiklenen inovasyon ve ekonomik dönüşümde yer alan daha geniş "üçüncü alan" ekonomik süreçleri, Acemoglu, Aghion ve Hémous (2014) çalışmasında belirtildiği gibi, bazı potansiyel gerginlik alanlarını ima eder. Ortaya çıkan düşük karbonlu endüstrileri desteklemek için kamu finansmanının önemli bir rolü vardır, ancak ölçek ekonomilerini, tedarik zinciri uzmanlaşmasını ve hızlandırılmış yayılımı geliştirmek için küreselleşmiş piyasalardan da açık bir fayda vardır. Bu, düşük karbon desteği ve belki de "küresel kamu malları"nın daha geniş yönleri açısından Dünya Ticaret Örgütü (DTÖ) Sübvansiyonlar ve Karşı Tedbirler Anlaşması'nın gözden geçirilmesi için bir durum anlamına gelebilir (Jain vd. 2024).

Buna karşılık, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde siyasi çekiciliğine rağmen, düşük karbonlu teknolojilerin maliyetlerini artıran ve yenilenebilir enerji devriminde önemli bir rol oynayan üretim zincirlerinin küreselleşmesini engelleyen yerel içerik gerekliliklerini haklı çıkarmak daha zor olabilir (örneğin bkz. Bazilian, Cumming ve Kenyon 2020).

Uluslararası ticaretin olduğu bir dünyada, ayrıca, tüketime dayalı politikalara daha fazla dikkat gösterilebilir. Bunlar, ürünlerdeki "somut karbon" (Gerres vd. 2021) standartları, örneğin yapı malzemelerinde; veya tüketime dayalı karbon fiyatlandırması şeklinde olabilir. Saf bir biçimde, her ikisi de tedarik zinciri boyunca emisyonların izlenmesini içerir.

Kapsamlı bir şekilde tartışılan karbon sınır ayarlamaları (örneğin bkz. Böhringer vd. 2022; Durán 2023; Mehling vd. 2019), tüketime dayalı bir fiyatlandırma biçimi sunar. Ayrımcı olmayan bir şekilde uygulandığında, bu yaklaşım, karbon fiyatları olan ülkelerdeki tüketicilerin, bunların meydana geldiği her yerde somut emisyonlar için ödeme yapması gerektiği ilkesini yansıtır; bu, aynı zamanda "eşit koşullar" sağlamanın, karbon sızıntısını önlemenin ve başka yerlerde daha düşük karbonlu üretimi ödüllendirmenin bir yoludur. Kaçınılmaz olarak, böyle tüketici tabanlı fiyatlandırmanın yine de farklı etkileri olacaktır ve üretim karbon yoğunluğunu yansıtacaktır (ki bu, ilişkili çevresel hasarlar göz önüne alındığında, gerçekten de gerekçenin bir parçasıdır). Das vd. (2019) yasal sorunların ayrıntılı bir analizini sunar; Grubb vd. (2022) tarafından, soruna yönelik yeni politika yaklaşımları da dahil olmak üzere seçeneklerin daha geniş bir incelemesi incelenmiştir.

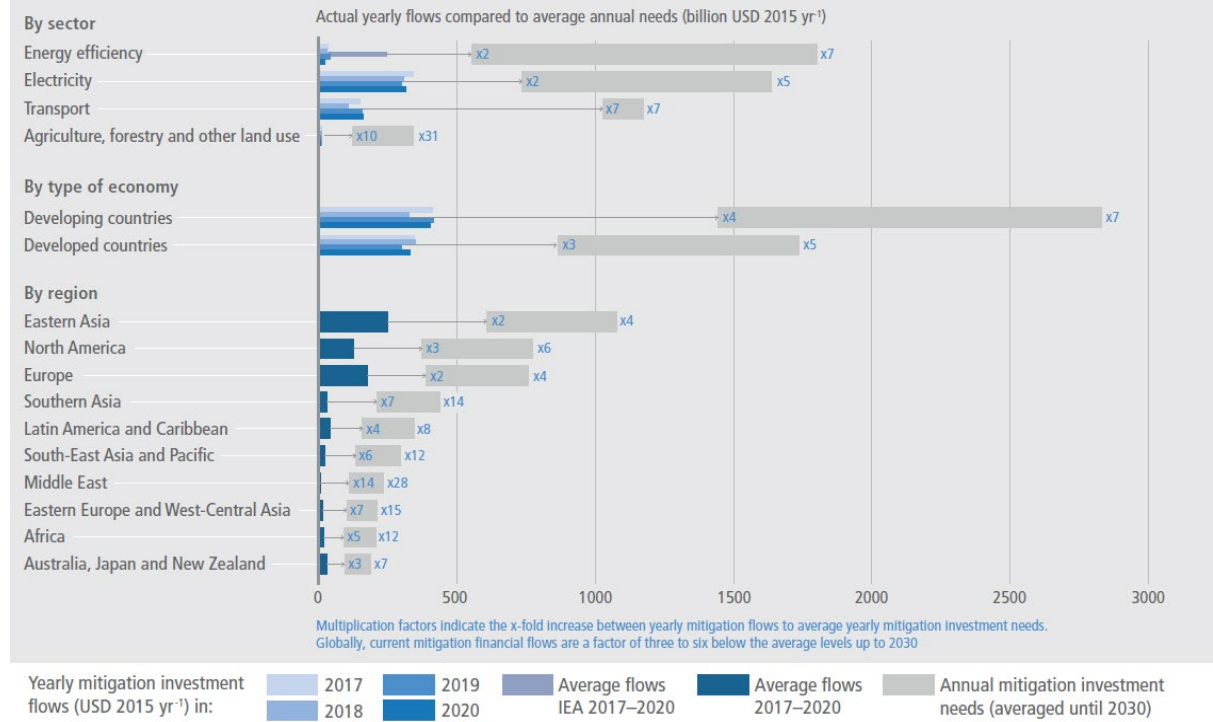
Finans

Paris hedeflerine ulaşmak, hem uyum hem de emisyon azaltımı için çok daha büyük finansal akışlar gerektirecektir. Uzun süredir devam eden tartışma ve sürtüşme kaynaklarından biri, Kuzey-Güney finansmanı için "100 milyar dolarlık" hedefle ilgilidir; tanımsal tartışmalara rağmen, açıkça 2020 hedef tarihine kadar bu hedefe ulaşılamamıştır.

Paris Anlaşması ayrıca üç temel hedefinden biri olarak "Finans akışlarını düşük sera gazı emisyonlarına ve iklime dayanıklı kalkınmaya doğru bir yolla tutarlı hale getirmek ..." şeklinde bir düzenleme yapmıştır ki bu daha da büyük bir gündemdir. Şekil 15, IPCC'nin bu on yılda sermaye yatırımı olarak yılda 2,5 trilyon ila 5 trilyon dolar (OECD dışındaki ülkelerde 1,5 trilyon ila 3 trilyon dolar - mevcut oranın 3 ila 6 katı) aralığında bir aralıkla azaltma yatırımı ihtiyaçları tahminlerini göstermektedir. The Independent

İklim Finansmanı Yüksek Düzeyli Uzman Grubu, Çin dışındaki gelişmekte olan ülkelerin yıllık ihtiyacının 2 trilyon ila 2,8 trilyon dolar arasında olduğunu, bunun en az 1 trilyon dolarının uluslararası yatırımdan gelmesi gerektiğini belirtiyor.

Şekil 8. Bölgeye göre düşük karbonlu yatırım, yakın tarihli ve 2030'a kadar öngörülen ortalama yıllık ihtiyaçlar



Kaynak: IPCC 2022c, Teknik Özet ve bölüm 15. **Not:** IEA = Uluslararası Enerji Ajansı.

Özel yatırım bu hedef için olmazsa olmazdır, ancak belirtildiği gibi, birçok düşük-orta gelirli ülkede bu, potansiyel yatırımcıların algıladığı riskler (ve diğer potansiyel engeller) tarafından engellenmektedir. Enerji teknolojileri ve sistemleri hakkındaki eşlik eden makalemizde belirtildiği gibi (Melekh, Grubb ve Dixon 2024), algılanan riskler ve ödüller arasındaki iyi bilinen denge, maliyetleri sermayede yoğunlaşmış ve çok düşük işletme maliyetlerine sahip düşük karbonlu varlıklara yatırım için çok daha yüksek bir sermaye maliyetiyle sonuçlanmaktadır. Bu, yenilenebilir enerji yatırımlarının maliyetini iki katına kadar çıkarabilir.

Sonuç olarak, analistler, düşük karbonlu yatırım risklerini karşılamak için kamu parasının kullanılması durumunda elde edilebilecek muazzam kaldıraçtan giderek daha fazla bahsediyorlar; bu, IPCC finans bölümünde (IPCC 2022c, bölüm 15) belirtilen bir fırsattır. Hourcade, Dasgupta ve Gherzi (2021), böyle bir teminat miktarının, düşük karbonlu varlıklara 8 ila 16 kat daha fazla özel yatırımı kaldıraçlayabileceğini tahmin ediyor.

Dahil olan risklerin türü hakkında önemli tartışmalar var. Prof. Avinash Persaud'nun (2023) yakın tarihli etkili bir makalesi, çoğu yenilenebilir enerjinin yerel arz için yerel para biriminde üretim yapması ve petrolün uluslararası piyasalar için büyük ölçüde dolar cinsinden satılabilmesi göz önüne alındığında, risklerin döviz kuru riskleri tarafından domine edildiğini savunuyor. Uluslararası yatırımcılar ayrıca döviz kurlarını daha geniş makroekonomik riskler için bir vekil olarak kullanabilirler.

Ancak, algılanan riskin birçok başka kaynağı ve finansal sistemlerin kendisinde yol bağımlılığına dair güçlü kanıtlar vardır. Büyük yatırımcıların fosil yakıt piyasalarıyla kapsamlı yerleşik ağ ilişkileri vardır ve yeni teknolojilere ve yeni türdeki yerinde veya

Daha küçük ölçekli yatırımlar. Mantıksal olarak açıklanması zor görünen finans alanındaki 'kusurlar', davranışsal finansın birçok düzeyde olduğu finans literatüründe uzun yıllardır iyi bir şekilde izlenmektedir.⁸

Dünyada küresel geçişi finanse etmek için yeterli özel sermayenin olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir ve özetlenen faktörler, küresel enerji geçişini büyük ölçüde genişletmek ve hızlandırmak için finansman sağlamanın önünde aşılmaz engeller olmaması gerektiğini göstermektedir. Düşük karbon yatırımının kamu tarafından güvence altına alınması, hem özel hem de devlete ait işletmelerde fosil yakıt yatırımının statükosuna yönelik içsel önyargıyı telafi etmeye kısmen yardımcı olabilir.

Gelişmiş ve birçok gelişmekte olan ülke arasındaki farklı koşullar, IPCC'nin Azaltma Değerlendirmesi'nde (2022c) maliyetlerin yukarıdan aşağıya küresel modellemesi ile 'aşağıdan yukarıya' sektörel/teknoloji analizi arasındaki belirgin kopukluğu açıklamaya kısmen yardımcı oluyor. İkincisi, "şu anda tüm sektörlerde mevcut olan birçok seçeneğin, 2030 yılına kadar net emisyonları azaltmak için önemli bir potansiyel sunacağı tahmin ediliyor" ve "20 ABD doları/tCO'dan daha düşük maliyetlerle büyük katkılar² güneş ve rüzgar enerjisinden, enerji verimliliği iyileştirmelerinden, doğal ekosistemlerin dönüşümünün azaltılmasından ve CH'den gelir⁴ emisyon azaltımları (kömür madenciliği, petrol ve gaz, atık)." Eşlik eden şekil (IPCC 2022b, şekil SPM.7) 10GtCO'dan fazlasını öneriyor² emisyon azaltımlarında, referans fosil yakıt odaklı yörüngeye kıyasla net maliyet tasarrufları ile.

Bu fark, gelişmekte olan ülkelerdeki daha yüksek sermaye maliyetini yansıttığı ölçüde, bir "iklim yatırım tuzağı"na (Ameli vd. 2021) denk gelmektedir. Bu, temiz teknoloji dağıtımının küresel ölçekte risklerini ve maliyetlerini azaltmak için yerel ve uluslararası politikaların bir kombinasyonunun, yalnızca uluslararası eşitlik konusundaki endişeleri gidermekle kalmayıp, aynı zamanda küresel karbon fiyatlandırmasına öncelikli olarak güvenmekten çok daha verimli bir şekilde küresel geçişi hızlandırabileceğini göstermektedir.

Son dönemde döviz riskine odaklanmanın yanı sıra, düşük karbonlu yatırımlar için risk teminatı konusundaki daha geniş tartışmaya katkı sağlayanlar arasında Uluslararası Güneş Enerjisi İttifakı'nın (ISA) Ortak Risk Azaltma Mekanizması (CEEW vd. 2017) ve Küresel Kredi Garanti Tesisi (Gautam, Purkayastha ve Widge 2023) önerileri yer almaktadır.

Ancak mevcut sektörlerin direncini kırmak, gerçek ve algılanan riskleri ele almak ve fırsatları gerçeğe dönüştürmek için yurtiçinde ve yurtdışında gerekli finansal ve politik yapıları oluşturmak için siyasi iradeye ihtiyaç duyulacaktır.

5. Sonuç

Yapısal verimsizlikleri ve inovasyonu azaltmanın ekonomik büyümenin önemli bileşenleri olduğu iyi bilinmektedir. Ucuz birincil enerjiye erişim de öyle. Yenilenebilir enerji ve pil teknolojilerindeki devrim (ve dolayısıyla elektrikli ulaşım), düşük karbonun tarihteki en ucuz enerji ve ulaşımın temeli olma potansiyelini sunmaktadır; eğer sermaye düşük faiz oranlarında mevcutsa ve düşük karbonlu enerjiye hızlandırılmış yatırım, hızlandırılmış erişim de dahil olmak üzere daha geniş elektrifikasyon sürecinde uygun yedek ve/veya yeterli şebekelerle birlikte giderse.

Bu makale, bu teknoloji devriminin neden özel yatırımla birlikte hareket eden güçlü hükümet eylemlerini içerdiğini, kısmen yaparak öğrenmeyi kolaylaştıracak pazarlar oluşturma, ölçek ekonomisi ve tedarik zinciri geliştirme ile ilişkili olduğunu açıklamıştır. Ayrıca, geçişi hızlandırmanın ve küreselleştirmenin önündeki çeşitli engelleri de izlemiştir; bu engellerin, yeteneklerine ve kaynak bağışlarına bağlı olarak farklı orta gelirli ülkeler için gerçekten de farklı etkileri vardır.

Güçlü yol bağımlılıkları ve enerji sistemlerindeki mevcut çıkarlar geçişi karmaşık hale getirir ve karbon yoğun yatırımların devam etmesi, Paris Anlaşması'nın hedeflerine ulaşmayı imkansız hale getirecek veya karbon yoğun varlıkların büyük ölçekte mahsur kalmasına/değer düşüklüğüne yol açacak "karbon kilitlenmesi" riskleri yaratır. Ancak, birçok düşük-orta gelirli ülkedeki çok daha yüksek sermaye maliyetiyle birleştiğinde, bu faktörler şu anda bunun "en az dirençli yol" haline gelme riski taşımaktadır.

Tüm bu engellerin üstesinden gelinebilir. Bu, orta gelirli ülkelerin geçişte fırsat alanlarını belirlemelerini ve küresel geçişin sağladığı tedarik zincirlerine ve fırsatlara daha erken ve daha güçlü bir şekilde dahil olarak fosil yakıtlara olan sürekli bağımlılıktan uzaklaşmalarına yardımcı olacak politika paketleri benimsemelerini gerektirecektir. Ayrıca, uluslararası yatırımda hızlı bir artışı desteklemek için uluslararası iş birliği de gerekecektir.

Bunu başaramamanın riski yalnızca daha yüksek oranlarda ve derecelerde iklim değişikliği, Paris Hedefleri'nin ihlali ve daha büyük ölçekli iklimsel istikrarsızlıklar riski değildir. Ayrıca yatırımcıların karşı karşıya olduğu belirsizlikleri ve riskleri ve hem sermaye varlıklarının hem de enerji kaynaklarının değerlemesini artıracak ve muhtemelen enerji oynaklığını artıracaktır. Daha güçlü eylemin ödülleri yalnızca çevresel olmakla kalmaz, aynı zamanda kelimelerin en gerçek anlamıyla daha istikrarlı ve sürdürülebilir ekonomik kalkınma olasılığı sunar.

Notlar

¹Bu makale, öğrenmenin yanı sıra, örneğin ölçek ekonomileri ve tedarik zinciri geliştirme konularını da içerdiğinden "deneyim eğrileri" terimini kullanır. Ancak, literatürle ortak olarak, bu tartışma ilişkili sayısal parametreyi tanımlamak için "öğrenme oranları" terimini korur. Sistematik inceleme (Grubb vd. 2021), "dağıtım" terimlerini - teknoloji maliyetlerinin hala mevcut olanlardan önemli ölçüde yüksek olduğu (bu nedenle artan dağıtımaya yönelik tamamen piyasa odaklı geri bildirim zayıftır) daha erken ve daha politika odaklı aşama - ve bir teknoloji büyük ölçüde maliyet açısından rekabetçi hale geldiğinde, kendi kendini sürdüren piyasa güçleri aracılığıyla genişlediğinde gerçekleşen "yayıma" terimleri arasında ayrım yapar.

²Sektörler genelinde, "referans durumundan daha düşük maliyetlerle" emisyonları azaltma potansiyelinin tahmini toplamı yaklaşık 10GtCO₂/yıl 2030'a kadar küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %10'u. Bu tür tahminler tartışmalı olmaya devam ediyor, çünkü kısmen elbette "referans vaka" tanımına ve bunun en azından bazı bölgelerde rekabetçi hale gelen teknolojilerin benimsenmesinin dinamiklerini nasıl temsil ettiğine bağlı.

³IPCC Azaltma Raporu'nda (IPCC 2022c) da belirtildiği gibi.

⁴Senaryolar C1-C3, genel olarak 1,5°C ile < 2°C ısınma Paris aralığıyla tutarlı küresel senaryolar olarak yorumlanabilir. Bunlar, küresel sera gazı emisyonlarının 2030 yılına kadar 2019 seviyelerinin yaklaşık %30 ila %50 altına düşürülmesini içerir (IPCC 2022b, SPMFigure 4). Bu modellerin çoğu, küresel marjinal maliyete eşit olduğu varsayılan küresel bir karbon fiyatına göre endekslenmiştir: karşılık gelen karbon fiyatları IPCC (2022c), bölüm 3, şekil 3.22a ve 3.23a'da verilmiştir; şekil 3.34 (panel B), karşılık gelen GSYİH etkilerini göstermektedir.

⁵Veri kaynakları arasındaki küçük bir fark, BNEF verilerinin panellerin çıkış kapasitesini (Doğru Akım) ölçmesi, IEA'nın ise (en azından 2023'e kadar) Alternatif Akım üretimi için invertörlerin kapasitesini (bazen daha az) bildirmesidir. 2023 yılı sonuna kadar kümülatif PV kurulu kapasitesi 600 GW'ın çok üzerindeydi. Toplam küresel kurulu elektrik üretim kapasitesi yaklaşık 12.000 GW idi. BNEF projeksiyonları, 2030 yılına kadar kurulu PV toplamının yaklaşık 7000 GW'a yükseleceğini gösteriyor (yazarın BNEF verilerinden yaptığı hesaplamalar). Bunun fosil yakıtlardan (veya rüzgardan) önemli ölçüde daha düşük bir ortalama kapasite faktörüne sahip olacağını, ancak yine de fosil yakıt güç stokunun işletimi üzerinde büyük bir etki yaratacağını unutmayın.

⁶IPCC (2022b) Politika Yapıcılar İçin Özet ve IPCC (2022c), 6. bölüm. IPCC Raporu ayrıca, "Erken emeklilikler veya kullanımda azalmalar olmadan, mevcut fosil altyapı, ısınmayı 1,5 °C ile sınırlamakla uyumlu olandan daha fazla sera gazı yayacaktır {2.7}. Planlanan yatırımların boru hattını dahil etmek, bu gelecekteki emisyonları 2 °C karbon bütçelerinin belirsizlik aralığına itecektir {2.7}. Yeni kömürle çalışan elektrik santralleri ve diğer fosil altyapıların inşasına devam etmek, gelecekteki geçiş maliyetlerini artıracak ve ısınmayı 2 °C (> %67) veya hiç veya sınırlı bir aşım 1,5 °C ile sınırlama çabalarını tehlikeye atabilir. Bir çalışma, 2 °C'lik bir dünya için 2050 yılına kadar 11,8 trilyon dolarlık cari varlığın elden çıkarılması gerekeceğini tahmin etmiştir; bu da 10

yıllara gelindiğinde 2050 yılına kadar 7,7 trilyon ABD doları tutarında ek bir değersiz varlık ortaya çıkacaktır. {15.5.2} Geçmişteki mahsur kalma deneyimleri, özel sektör paydaşlarının değersizleşme maliyetlerinin kamu sektörü tarafından tazmin edilmesinin yaygın olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla fosil teknolojilerine yeni yatırımları sınırlamak uzun vadede kamu finansmanı risklerini de azaltır. {15.6.3}” (IPCC 2022c; Teknik Özet, Kutu TS.8 Mahsur Kalan Varlıklar).

7Raporda ayrıca politika değerlendirmesi için beş ilke daha yer alıyor. Ayrıca bkz. Peñasco, Anadón ve Verdolini (2021).

8[Vikipedi](#) davranışsal finansın, bir asırdan uzun bir süre öncesine dayanan köklerinden davranışsal ekonominin son katkılarına ve Nobel Ödüllü Robert Schiller'in de aralarında bulunduğu finans üzerine özel katkılarına kadar yararlı bir genel bakış sunar. İyi bilinen riskten kaçınmaya ek olarak, (uzun) özellikler listesi aşinalık, şimdiki/ yakınlık önyargısı, sürü davranışı ve statüko önyargısı rolünü içerir.

Referanslar

- Acemoglu, Daron. 2002. "Yönlendirilmiş Teknik Değişim." *Ekonomi Çalışmaları İncelemesi* 69 (4): 781–809.
- Acemoglu, Daron, Philippe Aghion, Leonardo Bursztyn ve David Hemous. 2012. "Çevre ve Yönlendirilmiş Teknik Değişim." *Amerikan Ekonomi İncelemesi* 102 (1): 131–66.
- Acemoglu, Daron, Philippe Aghion ve David Hémous. 2014. "Çevre ve Yönlendirilmiş Kuzey-Güney Modelinde Teknik Değişim." *Oxford Ekonomi Politikası İncelemesi* 30 (3): 513–30.
- Acemoglu, Daron, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley ve William Kerr. 2016. "Temizliğe Geçiş Teknoloji." *Siyasi Ekonomi Dergisi* 24 (1).
- Aghion, Philippe, Antoine Dechezleprêtre, David Hémous, Ralf Martin ve John Van Reenen. 2016. "Karbon Vergileri, Yol Bağımlılığı ve Yönlendirilmiş Teknik Değişim: Otomotiv Endüstrisinden Kanıtlar." *Siyasi Ekonomi Dergisi* 24 (1): 1–51.
- Aghion, Philippe ve Peter Howitt. 1998. *İşsel Büyüme Teorisi*. Cambridge, MA: MIT Basmak.
- Akcigit, Ufuk ve Peter Howitt. 2014 "Schumpeterci Büyüme Teorisinden Ne Öğreniyoruz?" *Ekonomik Büyüme El Kitabı*, cilt 2, 515–63. Elsevier.
- Akcigit, Ufuk ve John Van Reenen, eds. 2023. *Yaratıcı Yıkımın Ekonomisi: Yeni Araştırma Aghion ve Howitt'ten Temalar Üzerine*. Cambridge, MA: Harvard Üniversitesi Yayınları.
- Ameli, Nadia, Oliver Dessens, Matthew Winning, Jennifer Cronin, Hugues Chenet, Paul Drummond, Alvaro Calzadilla, Gabriel Anandarajah ve Michael Grubb. 2021. "Daha Yüksek Finansman Maliyeti, Gelişmekte Olan Ekonomilerde İklim Yatırım Tuzağını Daha da Kötüleştiriyor." *Doğa İletişimleri* 12 (1): 4046.
- Anadón, Laura Diaz, Erin Baker ve Valentina Bosetti. 2017. "Belirsizliği Kamuoyuna Entegre Etmek Enerji Araştırma ve Geliştirme Kararları." *Doğa Enerjisi* 2 (5): 17071.
- André, Christophe, Helia Costa, Lilas Demmou ve Fuido Franco. 2023. "Artan Enerji Fiyatları ve Üretkenlik: Kısa Vadeli Acı, Uzun Vadeli Kazanç?" OECD Ekonomi Departmanı Çalışma Belgesi No. 1755, OECD Yayınları, Paris.
- Angelova, Denitsa, Carla Sciarra ve Nadia Ameli. 2024. "Geçiş Riskini Ölçme ve Tahmin Etme ve Ülkelerin Düşük Karbon Geçişine Hazırlığı." UCL çalışma belgesi, University College London.
- Arrow, Kenneth J. 1962. "Yaparak Öğrenmenin Ekonomik Etkileri." *Ekonomik İnceleme Çalışmaları* 29 (3): 155–73.
- Balint, Tomas, Francesco Lamperti, Antoine Mandel, Mauro Napoletano, Andrea Roventini ve Alessandro Sapio. 2017. "Karmaşıklık ve İklim Değişikliğinin Ekonomisi: Bir Araştırma ve Geleceğe Bakış." *Ekolojik Ekonomi* 138: 252–265.
- Barbieri, Nicolo. 2015. "Teknolojik Konum ve Avrupa'nın Etkilerinin Araştırılması Yeşil Otomotiv Patent Faaliyetine İlişkin Çevresel Düzenleme." *Ekolojik Ekonomi* 117 (Eylül): 140–52.
- Barbieri, Nicolo. 2016. "Yakıt Fiyatları ve İcatların Kalabalıklaştırma Etkisi: Otomotiv Sanayinin Fosil Yakıtlara Bağımlılığından Kurtulması." *Teknolojik Tahmin ve Sosyal Değişim* 111 (C): 222–34.
- Bashmakov, Igor. 2007. "Enerji Geçişlerinin Üç Yasası." *Enerji Politikası* 35 (7): 3583–94.
- Bashmakov, Igor. 2017. "Enerji Geçişlerinin ve Karbon Fiyatlandırmasının Birinci Yasası." *Uluslararası Enerji, Çevre ve Ekonomi Dergisi* 25 (1): 1–38.
- Bashmakov, Igor, Michael Grubb, Paul Drummond, Robert Lowe, Anna Myshak ve Ben Hinder. 2024. "'Eksi 1' ve Enerji Maliyeti Sabitleri: Ampirik Kanıtlar, Teori ve Politika Sonuçları." *Yapısal Değişim ve Ekonomik Dinamikler* [Ön baskı], (4401851). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4401851>.

- Bauer, Nico, Ioanna Mouratiadou, Gunnar Luderer, Lavinia Baumstark, RJ Brecha, Ottmar Edenhofer ve Elmar Kriegler. 2016. "Küresel Fosil Enerji Piyasaları ve İklim Değişikliğinin Azaltılması - REMIND ile Bir Analiz." *İklim Değişikliği* 36 (1): 69–82.
- Bazilian, Morgan, Michael Bradshaw, Johannes Gabriel, Andreas Goldthau ve Kirsten Westphal. 2020. "Enerji Dönüşümünün Dört Senaryosu: Jeopolitik İçin Sürücüler, Sonuçlar ve Sonuçlar." *İklim Değişikliği* 11 (2): e625.
- Bazilian, Morgan, Victoria Cuming ve Thomas Kenyon. 2020. "Yenilenebilir Enerji Kaynakları için Yerel İçerik Kuralları "Projeler Her Zaman İşe Yaramaz." *Enerji Stratejisi İncelemeleri* 32 (Kasım): 100569.
- Berthold, Brendan, Ambrogio Cesa-Bianchi, Federico Di Pace ve Alex Haberis. 2023. "Karbon Fiyatlandırmasının Heterojen Etkileri: Makro ve Mikro Kanıtlar." Tartışma Belgesi 2319, Makroekonomi Merkezi (CFM).
- Böhringer, Christoph, Carolyn Fischer, Knut Einar Rosendahl ve Thomas Fox Rutherford. 2022. "Sınır Karbon Ayarlamalarının Potansiyel Etkileri ve Zorlukları." *Doğa İklim Değişikliği* 12 (1): 22–29.
- Borghesi, Simone, Francesco Crespi, Alessio D'Amato, Massimiliano Mazzanti ve Francesco Silvestri. 2015. "Karbon Azaltımı, Sektör Heterojenliği ve Politika Tepkileri: AB'de Tetiklenen Eko Yeniliklere İlişkin Kanıtlar." *Çevre Bilimi ve Politikası* 54 (Aralık): 377–88. Bosetti, Valentina, Carlo Carraro, Emanuele Massetti, Alessandra Sgobbi ve Massimo Tavoni. 2009. "Atmosferik Sera Gazı Konsantrasyonlarını Sabitlemek İçin Optimum Enerji Yatırımı ve Ar-Ge Stratejileri." *Kaynak ve Enerji Ekonomisi* 31 (2): 123–37.
- Brand, Claus, Gunter Coenen, John Hutchinson ve Arthur Saint Guilhem. 2023. "The Düşük Karbon Ekonomisine Geçişin Makroekonomik Etkileri." *ECB Ekonomik Bülteni*, Sayı 5/2023.
- Breetz, Hanna, Matto Mildenerberger ve Leah Stokes. 2018. "Temiz Enerjinin Politik Mantiği Geçişler." *İş ve Politika* 20 (4): 492–522. <https://doi.org/10.1017/bap.2018.14>.
- Brulle, Robert J. 2014. "Gecikmeyi Kurumsallaştırmak: Vakıf Fonlaması ve ABD İkliminin Yaratılması Karşı Hareket Örgütlerini Değiştirin." *İklim Değişikliği* 122 (4): 681–94.
- Brulle, Robert J., Melissa Aronczyk ve Jason Carmichael. 2020. "Kurumsal Tanıtım ve İklim Değişim: Büyük Petrol Şirketlerinin Reklam Harcamalarını Etkileyen Temel Değişkenlerin Analizi, 1986–2015." *İklim Değişikliği* 159 (1): 87–101.
- Buonanno, Paolo, Carlo Carraro ve Marzio Galeotti. 2003. "İçsel Kaynaklı Teknik Değişim ve Kyoto'nun Maliyetleri." *Kaynak ve Enerji Ekonomisi* 25 (1): 11–34.
- Carbon Tracker. 2023. "S-Curve ile İngiltere'deki Otomobil Satışlarının Üçte Biri 2023 Sonuna Kadar Tamamen Elektrikli Olabilir" "Pazarı Dönüştürür." *Karbon Takip Girişimi*, 5 Ocak 2023.
- Karbon Vakfı. 2005. *İngiltere İklim Değişikliği Programı: İşletmeler ve İş Dünyası için Potansiyel Evrim Kamu Sektörü*. Karbon Güveni.
- CEEW, CII, TCX ve TWI (Enerji, Çevre ve Su Konseyi, Hint Konfederasyonu) Sanayi, Döviz Kuru Fonu ve Terrawatt Girişimi). 2017. *C Ortak Risk Azaltma Mekanizması-Uygulanabilirlik Çalışması*. Delhi, Hindistan: CEEW.
- Chan, Ying Tung ve Hong Zhao. 2023. "Dinamik Stokastik Genel Bir Piyasada Optimum Karbon Vergisi Oranları "Tedarik Zinciri ile Denge Modeli." *Ekonomik Modelleme* 119 (Şubat): 106109.
- Cheon, Andrew ve Johannes Urpelainen. 2012. "Petrol Fiyatları ve Enerji Teknolojisi İnovasyonu: Bir Ampirik Analiz." *Küresel Çevresel Değişim* 22 (2): 407–17.
- Chichilnisky, Graciela ve Geoffrey Heal. 1994. "Karbon Emisyonlarını Kim Azaltmalı? Uluslararası Bakış Açısı." *Ekonomi Mektupları* 44 (4): 443–49.
- Christiansen, Atle Christer. 2001. "İklim Politikası ve Dinamik Verimlilik Kazanımları Bir Vaka Çalışması Norveç CO₂-Petrol Sektöründe Vergiler ve Teknolojik Yenilikler." *İklim Politikası* 1 (4): 499–515.
- Cimoli, Mario, Giovanni Dosi ve Joseph Stiglitz, der. 2009. *Endüstriyel Politika ve Kalkınma: Yetenek Birikiminin Politik Ekonomisi*. Oxford Üniversitesi Yayınları.

- Cirera, Xavier ve William F. Maloney. 2017. *Yenilik Paradoksu: Gelişmekte Olan Ülke Yetenekler ve Teknolojik Yakalamanın Gerçekleşmemiş Vaadi*. Washington, DC: Dünya Bankası.
- Costantini, Valeria, Francesco Crespi ve Alessandro Palma. 2017. "Politika Karışımını Karakterize Etmek ve Eko-İnovasyon Üzerindeki Etkisi: Enerji Verimli Teknolojilerin Patent Analizi." *Araştırma Politikası* 46 (4): 799–819.
- Csereklyei, Zsuzsanna, Md Rubio-Varas ve David I. Stern. 2016. "Enerji ve Ekonomik Büyüme: "Stilize Edilmiş Gerçekler." *Enerji Dergisi* 37 (2): 223–55.
- D'Arcangelo, Filippo M., Giulia Pavan ve Sara Calligaris. 2022. "Avrupa Karbonunun Etkisi "Firma Üretkenliği Üzerine Piyasa: İtalyan Üretim Firmalarından Kanıtlar." FEEM Çalışma Belgesi 24, Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Milano.
- Das, Kasturi, Harro van Asselt, Susanne Droege ve Michael Mehling. 2019. "Yapmak Uluslararası Ticaret Sisteminin Paris Anlaşması İçin Çalışmaları: Seçeneklerin Değerlendirilmesi." *Çevre Hukuku Muhabiri* 49 (6): 10553–80.
- Dechezleprêtre, Antoine, Daniel Nachtigall ve Balazs Stadler. 2020. "Enerji Fiyatlarının Etkisi ve OECD Ülkelerinde Üretim İstihdamında Çevre Politikası Sıklığı: Sektör ve Şirket Düzeyinde Kanıtlar." OECD Ekonomi Departmanı Çalışma Belgeleri No. 1625, OECD Yayınları, Paris.
- Doner, Richard F. ve Ben Ross Schneider. 2016. "Orta Gelir Tuzağı: Daha Fazla Politika Ekonomi." *Dünya Politikası* 68 (4): 608–44.
- Durán, Gracia Marin. 2023. "Karbon Sınır Ayarlamalarının Uyumluluğunun Güvence Altına Alınması Çok Taraflı İklim ve Ticaret Rejimleri." *Uluslararası ve Karşılaştırmalı Hukuk Dergisi* 72 (1): 73–103.
- EEIST (Enerji İnovasyonu ve Sistem Geçiş Ekonomisi). 2021. *Yeni Ekonomi Yenilik ve Geçiş: Fırsatları ve Riskleri Değerlendirme*. EEIST, Exeter Üniversitesi.
- EEIST (Enerji İnovasyonu ve Sistem Geçiş Ekonomisi). 2022. *Politika İçin On İlke Enerji Dönüşümünde Üretim: Deneyimlerden Dersler* Enerji Yeniliği ve Sistem Geçişinin Ekonomisi (EEIST), Exeter Üniversitesi.
- EEIST (Enerji İnovasyonu ve Sistem Geçiş Ekonomisi): Grubb, Michael, Simon Sharpe, Varun Agarwal, Laura Diaz Anadon, Peter Barbook-Johnson, Saswata Chaudhury, Doyne Farmer, Zhangang Han, Aled Jones, Vidhu Kapur, Ulka Kelkar, Francesco Lamperti, Timothy M. Lenton, Yaroslav Melekh, Jean-Francois Mercure, Femke Nijse, Roberto Pasqualino, Cristina Peñasco, Marcelo Pereira, Andrea Roventini, Yuyan Weng, Carlos Eduardo Frickmann Young, Hongyu Zhang, Xiliang Zhang ve Songli Zhu. 2024. *T Enerji İnovasyonu ve Sistem Geçişinin Ekonomisi: Sentez Raporu*. EEIST, Exeter Üniversitesi.
- Ellwood, Paul, Ceri Williams ve John Egan. 2022. "Ölüm Vadisi'ni Geçmek: Beş Temel "Yenilik Süreçleri." *Teknolojik yenilik* 109 (Ocak): 102162.
- ElSayed, Mai, Arman Aghahosseini ve Christian Breyer. 2023. "Yavaş Enerji Geçişlerinin Yüksek Maliyeti Gelişmekte Olan Ülkeler İçin: Mısır'ın Yol Seçenekleri Örneği Üzerine." *Yenilenebilir Enerji* 210 (Temmuz): 107–26.
- Falk, Armin ve Michael Kosfeld. 2006. "Kontrolün Gizli Maliyetleri." *Amerikan Ekonomi İncelemesi* 96 (5): 1611–30.
- Farmer, J. Doyne, Cameron Hepburn, Penny Mealy ve Alexander Teytelboym. 2015. "Üçüncü Dalga "İklim Değişikliğinin Ekonomisi" *Çevre ve Kaynak Ekonomisi* 62 (2): 329– 57.
- Fitzgerald, Louise Michelle, Isabell Braunger ve Hanna Brauers. 2019. "Destabilizasyon Sürdürülebilir Enerji Dönüşümleri: Almanya Örneğinde Doğal Gaz Kilitlenmesinin Analizi." STEPS Çalışma Belgesi 106, ESCR STEPS Merkezi (Sürdürülebilirliğe Giden Sosyal, Teknolojik ve Çevresel Yollar), Sussex Üniversitesi.
- Fouquet, Roger. 2016. "Tarihsel Enerji Geçişleri: Hız, Fiyatlar ve Sistem Dönüşümü." *Enerji Araştırmaları ve Sosyal Bilimler* 22 (Aralık): 7–12.

- Fredriksson, Per G. ve Alexandre Sauquet. 2017. "Yönlendirilmiş Teknik Hukuk İçin Hukuk Sistemi Önemli mi?" Değişim mi? Otomotiv Endüstrisinden Kanıtlar." *Uygulamalı Ekonomi Mektupları*24 (15): 1080–83.
- Gallagher, Kelly Sims, Arnulf Grübler, Laura Kuhl, Gregory Nemet ve Charlie Wilson. 2012. "Enerji Teknolojileri İnovasyon Sistemi." *Çevre ve Kaynakların Yıllık İncelemesi*37 (Kasım): 137–62.
- Garrone, Paola, Luca Grilli ve Boris Mrkajic. 2017. "AB'nin Enerji Verimli Dönüşümü İşletmeler: Politikaların Bağlamsal Faktörlere Uyarlanması." *Enerji Politikası*109 (Ekim): 49–58.
- Gautam, Kushagra, Dhruva Purkayastha ve Vikram Widge. 2023. "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sermaye Maliyeti Gelişmekte Olan Ekonomilerde Enerji Yatırımları." Tartışma Belgesi, İklim Politikası Girişimi.
- Gawel, Erik, Klaas Korte ve Paul Lehman. 2018. *Teknoloji Tarafsızlığı: Kritik Bir Değerlendirme. Taşımacılık Bağlamında Teknoloji Tarafsızlığı*. Berlin: Agora Verkehrswende. Geels, Frank W. 2014. "Düşük Karbon Geçişlerine Karşı Rejim Direnci: Politika ve Çok Seviyeli Perspektifte Güç." *Teori, Kültür ve Toplum*31 (5): 21–40.
- Geels, Frank W., Frans Berkhout ve Detlef P. van Vuuren. 2016. "Analitik Yaklaşımlar Arasında Köprü Kurmak" Düşük Karbon Geçişleri." *Doğa İklim Değişikliği*6: 576–83.
- Geels, Frank W., Benjamin K. Sovacool, Tim Schwanen ve Steve Sorrell. 2017. "Sosyoteknik Derin Karbonsuzlaştırmaya Geçişler." *Bilim*357 (6357): 1242–44.
- Gerres, Timo, Manuel Haussner, Karsten Neuhoﬀ ve Alice Pirlot. 2021. "Yasaklamak ya da Yasaklamamak Karbon Yoğunluklu Malzemeler: Ürün Karbon Gereksinimlerinin Yasal ve İdari Değerlendirmesi." *Avrupa, Karşılaştırmalı ve Uluslararası Çevre Hukuku İncelemesi*30 (2): 249–62.
- Gillingham, Kenneth, Richard Newell ve William A. Pizer. 2008. "Endojen Modelleme İklim Politikası Analizi için Teknolojik Değişim." *Enerji Ekonomisi*30 (6): 2734–53. Gils, Hans Christian, Hedda Gardian ve J. Schmugge. 2021. "Hidrojen Altyapılarının Etkileşimi Almanya'da Sıfır Emisyonlu Enerji Sistemine Doğru Diğer Sektör Bağlantı Seçenekleriyle Birlikte." *Yenilenebilir Enerji*180 (Aralık): 140–156.
- Girod, Bastien, Tobias Stucki ve Martin Woerter. 2017. "Verimli Enerji Kullanımına Yönelik Politikalar Nasıl Hanehalkı Sektörü Enerji Verimliliği Yeniliğini Tetikliyor mu? Avrupa Ülkelerinin Değerlendirilmesi." *Enerji Politikası*103: 223–37.
- Golosov, Mikhail, John Hassler, Per Krusell ve Aleh Tsyvinski. 2014. "Fosil Yakıtlara İlişkin Optimum Vergiler Genel Denge." *Ekonometrika*82 (1): 41–88.
- Goulder, Lawrence H. ve Koshy Mathai. 2000. "Optimal CO₂ Tetiklenen Etkilerin Varlığında Azalma Teknolojik Değişim." *Çevre Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi*39 (1): 1–38. Greenberg, Brad A. 2016. "Teknoloji Tarafsızlığını Yeniden Düşünmek." *Minnesota Hukuk İncelemesi*207. Grubb, Michael, Paul Drummond, Alexandra Poncia, Will McDowall, David Popp, Sascha Samadi, Cristina Penasco, Kenneth T. Gillingham, Sjak Smulders, Matthieu Glachant, Gavin Hassall, Emi Mizuno, Edward S. Rubin, Antoine Dechezleprêtre ve Giulia Pavan. 2021. "Enerji Teknolojileri ve Sistemlerinde Tetiklenen Yenilik: CO₂ İçin Kanıtların ve Potansiyel Sonuçların İncelenmesi" Azaltma." *Çevresel Araştırma Mektupları*16 (4): 043007. Grubb, Michael, Jean Hourcade ve Karsten Neuhoﬀ. 2014. *Gezegen Ekonomisi: Enerji, İklim Değişim ve Sürdürülebilir Kalkınmanın Üç Alanı*. Routledge.
- Grubb, Michael, Nino David Jordan, Edgar Hertwich, Karsten Neuhoﬀ, Kasturi Das, Kaushik Ranjan Bandyopadhyay, Harro van Asselt, Misato Sato, Ranran Wang, William A. Pizer ve Hyungna Oh. 2022. "Karbon Sızıntısı, Tüketim ve Ticaret." *Çevre ve Kaynakların Yıllık İncelemesi*47 (1): 753–795. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120820-053625>. Grubb, Michael, Alexandra Poncia, Paul Drummond, Karsten Neuhoﬀ ve Jean-Charles Hourcade. 2023. "Politika Tamamlayıcılığı ve Karbon Fiyatlandırmasının Paradoksu" *Oxford Ekonomi Politikası İncelemesi*39 (4, Kış): 711–730.
- Grubb, Michael, Rutger-Jan Lange, Nicolas Cerkez, Ida Sognaes, Claudia Wieners ve Pablo Salas. 2024. "Optimum Küresel İklim Politikasının Dinamik Belirleyicileri." Gözden geçirilmiş sunum

- kabul edildi *Yapısal Değişim ve Ekonomik Dinamikler* Çalışma raporuna https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4645782 adresinden ulaşılabilir.
- Grübler, Arnulf. 1996. "Değişim Zamanı: Yeniliğin Yayılma Modelleri Üzerine." *Daidalos* Yaz, Cilt 125, No. 3, Çevrenin Kurtuluşu, 19–42
- Grübler, Arnulf. 1998. *Teknoloji ve Küresel Değişim*. Cambridge, Birleşik Krallık: Cambridge Üniversite Yayınları.
- Grübler, Arnulf, Charlie Wilson ve Gregory Nemet. 2016. "Elmalar, Portakallar ve Tutarlı Enerji Geçişlerinin Zamansal Dinamiklerinin Karşılaştırılması." *Enerji Araştırmaları ve Sosyal Bilimler* 22 (Aralık): 18–25.
- Guillouzoic-Le Corff, Arthur. 2018. "Petrol Fiyatları Biyoyakıtlarda Bir Yenilik Patlamasını Tetikledi mi?" *Enerji Ekonomisi* 75 (Eylül): 547–59.
- Gulbrandsen, Lars H. ve Christian Stenqvist. 2013. "AB Emisyon Ticareti'nin Sınırlı Etkisi Kurumsal İklim Stratejileri: İsveç ve Norveç Kağıt Hamuru ve Kağıt Şirketlerinin Karşılaştırılması." *Enerji Politikası* 56 (Mayıs): 516–25.
- Harmsen, Mathijs, Elmar Kriegler, Detlef P van Vuuren, Kaj-Ivar van der Wijst, Gunnar Luderer, Ryna Cui, Olivier Dessens, Laurent Drouet, Johannes Emmerling, Jennifer Faye Morris, Florian Fosse, Dimitris Fragkiadakis, Kostas Fragkiadakis, Panagiotis Fragkos, Oliver Fricko, Shinichiro Fujimori, David Gernaat, Céline Guivarch, Gokul Iyer, Panagiotis Karkatsoulis, Ilkka Keppo, Kimon Keramidis, Alexandre Köberle, Peter Kolp, Volker Krey, Christoph Krüger, Florian Leblanc, Shivika Mittal, Sergey Paltsev, Pedro Rochedo, Bas J. van Ruijven, Ronald D Sands, Fuminori Sano, Jessica Streffer, Eveline Vasquez Arroyo, Kenichi Wada ve Behnam Zakeri. 2021. "Entegre Değerlendirme Modeli Teşhisleri: Temel Göstergeler ve Model Gelişimi." *Çevresel Araştırma Mektupları* 16 (5): 054046.
- Harrison, Kathryn. 2018. "Liberal Piyasa Ekonomilerinde Geçişin Zorluğu: Birleşik Eyaletler ve Kanada." *Düşük Karbon Emisyonlu Ekonomilere Ulusal Yollar*. Routledge.
- Hicks, John R. 1932. *Ücret Teorisi*. Londra: Palgrave Macmillan.
- Karbon Fiyatları Yüksek Düzeyli Komisyonu. 2017. *Karbon Yüksek Düzeyli Komisyonu Raporu Fiyatlar*. Washington, DC: Dünya Bankası.
- Hochstetler, Kathryn. 2020. *Enerji Dönüşümünün Politik Ekonomileri*. Cambridge, Birleşik Krallık: Cambridge Üniversitesi Yayınları.
- Hoffmann, Volker H. 2007. "AB ETS ve Yatırım Kararları: Alman Elektrik Enerjisi Örneği "Sanayi." *Avrupa Yönetim Dergisi* 25 (6): 464–74.
- Holland, Dawn, Ian Hurst, Amit Kara ve Iana Liadze. 2021. "Karbon Vergileri ve Büyük Bir Makroekonometrik Modelde Ticaret Şartları." *Ulusal Enstitü Ekonomik İncelemesi* 258 (Sonbahar): 47–65.
- Hourcade, Jean Charles, Dipak Dasgupta ve Frederic Gherzi. 2021. "Hızı ve "Pandemi Sonrası Bağlamda İklim Finansmanının Ölçeği." *İklim Politikası* 21 (10): 1–15. Hughes, Nick, Neil Strachan ve Robert Gross. 2013. "Gelecekteki Düşük Fiyatlardaki Belirsizliğin Yapısı Karbon Yolları." *Enerji Politikası* 52 (Ocak): 45–54.
- Hurst, Ian, Iana Liadze ve Katerina Lisenkova. 2014. "NiGEM-S Modeline Genel Bakış: İskoç Ulusal Enstitü Küresel Ekonometri Modeli'nin Versiyonu." Londra: Strathclyde Üniversitesi.
- IEA (Uluslararası Enerji Ajansı). 2019. *Dünya Enerji Görünümü 2019*. Paris: IEA.
- IEA (Uluslararası Enerji Ajansı). 2023a. *Net Sıfır Yol Haritası: 1,5 °C'yi Korumak İçin Küresel Bir Yol Hedefe Ulaşma Analizi*. Paris: Uluslararası Enerji Ajansı.
- IEA (Uluslararası Enerji Ajansı). 2023b. "Genel Bakış ve Temel Bulgular." *Dünya Enerji Yatırımı 2023*. Paris: IEA.
- IEA (Uluslararası Enerji Ajansı). 2023c. *Yenilenebilir Enerji Piyasası Güncellemesi–Haziran 2023*. Paris: IEA.
- IEA (Uluslararası Enerji Ajansı). 2024. *Küresel EV Görünümü 2024*. Paris: IEA.
- IPCC Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli). 2018. *1,5°C Küresel Isınma: IPCC Özel Raporu Sanayi Öncesi Seviyelerin 1,5°C Üzerinde Küresel Isınmanın Etkileri ve İlgili Rapor*

- İklim Değişikliği Tehditine Karşı Küresel Müdahalenin Güçlendirilmesi Bağlamında Küresel Sera Gazı Emisyon Yolları.*Cenevre: IPCC.
- IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli). 2022a.*AR6 İklim Değişikliği 2022: Etkileri, Uyum ve Duyarlılık.*Çalışma Grubu II'nin IPCC Altıncı Değerlendirme Raporuna Katkısı. IPCC.
- IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli). 2022b.*İklim Değişikliği 2022: Azaltılması İklim Değişikliği.* Politika Yapıcılar İçin Özet. IPCC.
- IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli). 2022c.*İklim Değişikliği 2022: Azaltılması İklim Değişikliği.*Çalışma Grubu III IPCC Altıncı Değerlendirme Raporuna Katkı. IPCC.
- Isoard, Stephane ve Antonio Soria. 2001. "Teknik Değişim Dinamikleri: "Ortaya Çıkan Yenilenebilir Enerji Teknolojileri."*Enerji Ekonomisi*23 (6): 619–36.
- Jain, Gautam, Chris Bataille, Noah Kaufman ve Sagatom Saha. 2024. "WTO'yu yeniden canlandırmak Enerji Dönüşümü: Neden, Nasıl ve Kim?" için hazırlanan arka plan belgesi*Dünya Kalkınma Raporu 2024: Orta Gelir Tuzağı*, Dünya Bankası, Washington, DC.
- Jang, Heesun ve Xiaodong Du. 2013. "Fiyat ve Politika Tetikli Yenilikler: ABD Örneği Biyoyakıt." *Tarım ve Kaynak Ekonomisi Dergisi*38 (3): 299–311.
- Johnstone, Nick, Ivan Haščič ve David Popp. 2010. "Yenilenebilir Enerji Politikaları ve Teknolojik Yenilik: Patent Sayılarına Dayalı Kanıtlar." *Çevre ve Kaynak Ekonomisi*45 (1): 133–55.
- Jones, Charles A. ve David L Levy. 2009. "İş Stratejileri ve İklim Değişikliği." Bölüm 11 *Kuzey Amerika Siyasetindeki Değişen İklimler: Kurumlar, Politika Yapımı ve Çok Düzeyli Yönetim*,218–40. Cambridge, MA: MIT Basını.
- Kahn, Matthew E. ve Somik Lall. 2022. "Gelişmekte Olan Dünyanın Büyüyen Orta Sınıfı Destekleyecek mi? Düşük Karbon Politikaları?" NBER Çalışma Belgesi 30238, Ulusal Ekonomik Araştırma Bürosu, Cambridge, MA.
- Kavlak, Goksin, James Mc Nerney ve Jessica E. Trancik. 2018. "Maliyet Nedenlerinin Değerlendirilmesi Fotovoltaik Modüllerde Azalma." *Enerji Politikası*123 (Aralık): 700–10.
- Kessler, Jeff ve Daniel Sperling. 2016. "Patentler Aracılığıyla ABD Biyoyakıt İnovasyonunun Takibi." *Enerji Politika*98 (Kasım): 97–107.
- Kim, Jung Eun. 2014. "Enerji Güvenliği ve İklim Değişikliği: Petrol Bağışının İklim Değişikliğini Nasıl Etkilediği Alternatif Araç İnovasyonu." *Enerji Politikası*66 (Mart): 400–10.
- Kim, Kyunam, Eunnyeong Heo ve Yeonbae Kim. 2017. "Teknolojik Bir Ekonomi Üzerindeki Dinamik Politika Etkileri Yenilenebilir Enerji Sisteminin Değişimi: Ampirik Bir Analiz." *Çevre ve Kaynak Ekonomisi*66: 205–36.
- Kivimaa, Paula, Hanna Lisa Kangas ve David Lazarevic. 2017. "Müşteri Odaklı Değerlendirme Politika Karışımlarında 'Yaratıcı Yıkım': Bina Enerji Verimliliği Geçişine Yönelik Finlandiya Politikaları." *Enerji Araştırmaları ve Sosyal Bilimler*33 (Kasım): 115–27.
- Klaassen, Ger, Asami Miketa, Katarina Larsen ve Thomas Sundqvist. 2005. "Ar-Ge'nin Etkisi "Danimarka, Almanya ve Birleşik Krallık'ta Rüzgar Enerjisi İnovasyonu." *Ekolojik Ekonomi*54 (2): 227–40.
- Knittel, Christopher R. 2011. "Steroidli Otomobiller: Ürün Niteliği Takasları ve "Otomotiv Sektöründe Teknolojik İlerleme." *Amerikan Ekonomi İncelemesi*101 (7): 3368– 99.
- Kruse, Jurgen ve Heike Wetzel. 2016. "Temiz Kömür Teknolojilerinde Yenilik: DeneySEL Kanıtlar Şirket Düzeyindeki Patent Verilerinden." EWI Çalışma Belgesi No. 16/01. Köln Üniversitesi Enerji Ekonomisi Enstitüsü (EWI).
- Kverndokk, Snorre ve Knut Einar Rosendahl. 2007. "İklim Politikaları ve Yaparak Öğrenme: Teknoloji Sübvansiyonlarının Etkileri ve Zamanlaması." *Kaynak ve Enerji Ekonomisi*29 (1): 58–82.
- Labandeira, Xavier, Jose M. Labeaga ve Xiral López-Otero. 2017. "Fiyat Üzerine Bir Meta Analiz Enerji Talebinin Esnekliği." *Enerji Politikası*102 (Mart): 549–68.

- Lam, Aileen ve Jean Francois Mercure. 2021. "Karbon Azaltma İçin Hangi Politika Karışımları En İyisidir? Binek Araçlar? Birleşik Krallık, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Çin ve Hindistan için Vergiler, Sübvansiyonlar ve Düzenlemeler Arasındaki Etkileşimlerin Simülasyonu." *Enerji Araştırmaları ve Sosyal Bilimler* 75 (Mayıs): 101951.
- Lamb, William F., Michael Grubb, Francesca Diluio ve Jan C. Minx. 2021. "Ülkeler Sürdürülebilir Sera Gazı Emisyonlarının Azaltılması: Sektörlere Göre Eğilimlerin ve İlerlemenin Analizi." *İklim Politikası* 22 (1): 1–17.
- Lamichhane, Sujan. 2023. "Karbon Şoklarıyla Temerrüt Riski ve Geçiş Dinamikleri." IMF Çalışması Kağıt 2023/174, Uluslararası Para Fonu, Washington, DC.
- Lamperti, Francesco, Giovanni Dosi, Mauro Napoletano, Andrea Roventini ve Alessandro Sapio. 2020. "Ajan Tabanlı Entegre Değerlendirme Modelinde İklim Değişikliği ve Yeşil Geçişler." *Teknolojik Tahmin ve Sosyal Değişim* 153 (Nisan): 119806.
- Lamperti, Francesco ve Andrea Roventini. 2022. "İklim Ekonomisi Ortodoksluğunun Ötesinde: Etkiler ve Ajan Tabanlı Entegre Değerlendirme DSK Modelindeki Politikalar*." *Avrupa Ekonomi ve Ekonomi Politikaları Dergisi* 19 (3): 357–80.
- Lee, Keun. 2013. *Schumpeterci Ekonomik Yakalama Analizi: Bilgi, Yol Oluşturma ve Orta Gelir Tuzağı*. Cambridge Üniversitesi Yayınları.
- Lehmann, Paul, Felix Creutzig, Melf-Hinrich Ehlers, Nele Friedrichsen, Clemens Heuson, Lion Hirth, ve Robert Pietzcker. 2012. "Karbon Kilitlenmesi: Avrupa'da Yenilenebilir Enerji Politikasının Geliştirilmesi." *Energiler* 5 (2): 323–54.
- Levy, David L. ve Daniel Egan. 2003. "Kurumsal Politik Stratejiye Neo-Gramscian Bir Yaklaşım: İklim Değişikliği Müzakerelerinde Çatışma ve Uzlaşma*." *Yönetim Çalışmaları Dergisi* 40 (4): 803–29.
- Ley, Marius, Tobias Stucki ve Martin Woerter. 2016. "Enerji Fiyatlarının Yeşil Enerji Üzerindeki Etkisi "Yenilik." *Enerji Dergisi* 37 (1): 41–75.
- Liadze, Iana, Patricia Sanchez Juanino, Stephen Millard ve Barry Naisbitt. 2023. *Kısa Vadeli Etki Karbon Vergilerindeki Hızlı Artıştan*. Londra: Ulusal Ekonomi ve Sosyal Araştırma Enstitüsü (NIESR).
- Lin, Shen, Banban Wang, Wei Wu ve Shaozhou Qi. 2018. "Karbon'un Potansiyel Etkisi Çin'de Temiz Teknoloji İnovasyonu Pazarı." *İklim Politikası* 18 (Sup 1): 71–89.
- Lyapunov, Alexandr Mikhailovich. 1992. "Hareket Kararlılığının Genel Sorunu." *Uluslararası Kontrol Dergisi* 55 (3): 531–34.
- Malhotra, Abhishek ve Tobias Schmidt. 2020. "Düşük Karbonlu İnovasyonun Hızlandırılması." *Joule* 4 (11): 2259–67.
- Marchau, Vincent AWJ, Warren E. Walker, Pieter JT M Bloemen ve Steven W. Popper. 2019. *Derin Belirsizlik Altında Karar Alma: Teoriden Pratiğe*. Springer Uluslararası Yayıncılık.
- Mazzucato, Mariana. 2015. *Girişimci Devlet: Kamu ve Özel Sektör Efsanelerinin Çürütülmesi*. Marş Basın.
- Mazzucato, Mariana. 2016. "Piyasa Sabitlemeden Pazar Yaratmaya: Yeni Bir Çerçeve "İnovasyon Politikası." *Sanayi ve İnovasyon* 23 (2): 140–56.
- Mehling, Michael A., Harro Van Asselt, Kasturi Das, Susanne Droege ve Cleo Verkuijl. 2019. "Gelişmiş İklim Eylemi için Sınır Karbon Ayarlamalarının Tasarlanması." *Amerikan Uluslararası Hukuk Dergisi* 113 (3): 433–81.
- Melekh, Yaroslav, Michael Grubb ve James Dixon. 2024. "Düşük Karbonlu Enerji Teknolojileri Orta Gelirli Ülkelerde Kalkınma: Değerlendirme ve Sonuçlar." Orta Gelirli Ülkelerde Kalkınma: Değerlendirme ve Sonuçlar" başlıklı arka plan belgesi için hazırlanmıştır. *Dünya Kalkınma Raporu 2024: Orta Gelir Tuzağı*, Dünya Bankası, Washington, DC.
- Meng, Jing, Rupert Way, Elena Verdolini ve Laura Diaz Anadon. 2021. "Uzman Çıkarımının Karşılaştırılması ve Enerji Dönüşümü için Model Tabanlı Olasılıksal Teknoloji Maliyet Tahminleri." *Ulusal Bilimler Akademisi Bildirileri* 118 (27): 1917165118.

- Meng, Kyle C. ve Ashwin Rode. 2019. "İklim Politikası Üzerindeki Lobiciliğin Toplumsal Maliyeti." *Doğa İklim Değişikliği* 9 (6): 472–76.
- Mercure, Jean-Francois, Florian Knobloch, Hector Pollitt, Leonidas Paroussos, S. Serban Scrieciu ve Richard Lewney. 2019. "Düşük Karbon Geçişlerinin İnovasyonunun ve Makroekonomisinin Modellenmesi: Teori, Perspektifler ve Pratik Kullanım." *İklim Politikası* 19 (8): 1019–37. Mercure, Jean-Francois, Hector Pollitt, Andrea M. Bassi, Jorge. E Vinuales ve Neil R. Edwards. 2016. "Sürdürülebilirlik Geçiş Politikalarını Daha İyi Tasarlamak İçin Heterojen Etkenlerin Karmaşık Sistemlerinin Modellenmesi." *Küresel Çevresel Değişim* 37 (Mart): 102–15.
- Mercure, Jean-Francois, Hector Pollitt, Neil R. Edwards, Philip B. Holden, Unnada Chewpreecha, Pablo Salas, Aileen Lam, Florian Knobloch, Jorge E. Vinuales. 2018. "E3ME-FTT-GENIE Simülasyon Tabanlı Entegre Değerlendirme Modeli ile İklim Değişikliği Politikası için Çevresel Etki Değerlendirmesi." *Enerji Stratejisi İncelemeleri* 20 (Nisan): 195–208.
- Mercure, Jean-Francois, Pablo Salas, Pim Vercoulen, Gregor Semieniuk, Aileen Lam, Hector Pollitt, Philip B. Holden, N. Vakilifard, Unnada Chewpreecha, Neil R. Edwards ve Jorge E. Vinuales. 2021. "İklim Politikası Eylemi için Teşviklerin Yeniden Çerçevelemesi." *Doğa Enerjisi* 6 (12): 1133–43.
- Miketa, Asami ve Leo Schrattenholzer. 2004. "Rolü Modellemek İçin Bir Metodolojiyle Deneyler Enerji Teknolojileri Öğrenme Süreçlerinde Ar-Ge Harcamalarının Değerlendirilmesi; İlk Sonuçlar." *Enerji Politikası* 32 (15): 1679–92.
- Mildenberger, Matt. 2020. *Yakalanan Karbon: İş Dünyası ve İşgücü İklim Politikalarını Nasıl Kontrol Ediyor?* Cambridge, MA: MIT Yayınları.
- Nakicenovic, Nebojsa. 1986. "Teknolojik Değişime Giden Otomobil Yolu: Teknolojinin Yayılması "Teknolojik İkame Süreci Olarak Otomobil." *Teknolojik Tahmin ve Sosyal Değişim* 29 (4): 309–40.
- Naveed, Amjad, Nisar Ahmad, Reza Fathollahzadeh Aghdam ve Angeliki Menegaki. 2022. "Ne Çevresel Kuznets Eğrisi Hipotezinden Öğrendiklerimiz Var mı? Atıf Tabanlı Sistematiik Literatür İncelemesi ve İçerik Analizi." *Enerji Stratejisi İncelemeleri* 44: 100946. Nemet, Gregory F. 2019. *Güneş Enerjisi Nasıl Ucuz Hale Geldi ve Düşük Karbonlu Yenilik İçin Bir Model Oldu.* Routledge'da.
- Nemet, Gregory F., Vera Zipperer ve Martina Kraus. 2018. "Ölüm Vadisi, Teknoloji Pork Barrel ve Büyük Gösterim Projelerine Kamu Desteği." *Enerji Politikası* 19 (Ağustos): 154–67.
- Newell, Peter ve Matthew Paterson. 1998. "İşletmeler İçin Bir İklim: Küresel Isınma, Devlet ve Başkent." *Uluslararası Politik Ekonomi İncelemesi* 5 (4): 679–703.
- Noailly, Joelle. 2012. "Binaların Enerji Verimliliğini İyileştirme: Çevresel Etkiler Teknolojik Yenilik Politikası." *Enerji Ekonomisi* 34 (3): 795–806. Nordhaus, William D. 2002. "İklim Değişikliği Politikasında Tetiklenen Yeniliğin Modellenmesi." *Teknolojik Değişim ve Çevre.* Routledge.
- Nordhaus, William D. 2014. "Endojen Modelleme İçin Öğrenme Modelinin Tehlikeleri Teknolojik Değişim." *Enerji Dergisi* 35 (1): 1–13.
- OECD (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü). 2021. *Sektörlere Göre Ar-Ge Yoğunluğu: İşletmelerin Ar-Ge Harcamalarının Brüt Katma Değer Payı, 2018 (veya En Yakın Yıl).* Paris: OECD.
- Pasqualino, Roberto, Cristina Peñasco, Peter Barbrook-Johnson, Fernanda Senra De Moura, Sergey Kolesnikov, Sarah Hafner, Femke JMM Nijse, Francesco Lamperti, Ben Hinder, Yaroslav Melekh, Simon Sharpe, Aled W. Jones, Laura Díaz Anadón, Timothy M. Lenton ve Michael Grubb. 2024. "Düşük Karbonlu Enerji Geçişi için Tetiklenen İnovasyonun Modellenmesi: Bir Seçenekler Menüsü." *Çevresel Araştırma Mektupları* (baskıda) <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad4c79> adresinden ulaşılabilir.
- Patt, Anthony ve Johan Lilliestam. 2018. "Karbon Fiyatlarına Karşı Dava." *Joule* 2 (12): 2494–98.
- Paus, Eva. 2014. "Latin Amerika ve Orta Gelir Tuzağı." Kalkınma için Finansman Serisi, No. 250, Birleşmiş Milletler Latin Amerika ve Karayipler Ekonomik Komisyonu (ECLAC).

- Pearse, Rebecca. 2017. *Avustralya'da Karbon Fiyatlandırması: Yarışma, Devlet ve Piyasa Başarısızlığı*. Londra: Routledge.
- Peñasco, Cristina, Laura Díaz Anadón ve Elena Verdolini. 2021. "Sistematik İnceleme "On Tür Karbonsuzlaştırma Politika Aracının Sonuçları ve Karşılıklı Tavizleri." *Doğa İklim Değişikliği* 11 (3): 257–65.
- Persaud, Avinash. 2023. "Gelişmekte Olan Ülkelerde Kısmi Yeşil Dönüşümün Engellerini Kaldırmak Döviz Garantisi." *İklim Politikası Girişimi*.
- Peszko, Grzegorz, Dominique van der Mensbrugghe, Alexander Golub, John Ward, Dimitri Zenghelis, Cor Marijs, Anne Schopp, John A. Rogers ve Amelia Midgley. 2020. *Karbonsuzlaşan Bir Dünyada Çeşitlendirme ve İşbirliği*. Washington, DC: Dünya Bankası.
- Pisani-Ferry, Jean. 2021. "İklim Politikası Makroekonomik Politikadır ve Sonuçları Önemli." Peterson Uluslararası Ekonomi Enstitüsü, Washington, DC.
- Pisani-Ferry, Jean ve Selma Mahfouz. 2023. *İklim Eyleminin Ekonomik Etkileri*. Rapor et Fransa Başbakanı. Fransa Stratejisi.
- Popp, David. 2002. "Tetiklenen Yenilik ve Enerji Fiyatları." *Amerikan Ekonomi İncelemesi* 92 (1): 160–80.
- Popp, David. 2004. "ENTICE: Küresel Büyümenin DICE Modelinde Endojen Teknolojik Değişim Isınma." *Çevre Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi* 48 (1): 742–68.
- Pottier, Antonin, Etienne Espagne, Baptiste Perrissin Fabert ve Patrice Dumas. 2015. "Entegre Değerlendirme Modellerinin Yapılarının Optimal Azaltma Politikaları Üzerindeki Karşılaştırmalı Etkisi." *Çevresel Modelleme ve Değerlendirme* 20: 453–73.
- Powell, Jim. 2011. "Politikacılar Kazananları Seçmeye Çalışırken Neden Bu Kadar Çok Para Kaybediyorlar." *Forbes*, Ekim 24, 2023.
- Raghuram, Rajan G. 2010. *Fay Hatları: Gizli Çatlaklar Dünya Ekonomisini Hala Nasıl Tehdit Ediyor?* Princeton, NJ: Princeton Üniversitesi Yayınları.
- Rennert, Kevin, Frank Errickson, Brian C. Prest, Lisa Rennels, Richard Newell, William Pizer, Cora Kingdon, Jordan Wingenroth, Roger Cooke, Bryan Parthum, David Smith, Kevin Cromar, Delavane Diaz, Frances C. Moore, Ulrich K. Müller, Richard J. Plevin, Adrian E. Raftery, Hana Ševčíková, Hannah Sheets, James H. Stock, Tammy Tan, Mark Watson, Tony E. Wong ve David Anthoff. 2022. "Kapsamlı Kanıtlar CO'nun Daha Yüksek Bir Sosyal Maliyetini İfade Ediyor." *Doğa* 610 (7933): 687–92.
- Rogers, Everett M. 2003. *Yeniliklerin Yayılması*. New York: Simon ve Schuster. Rogge, Karoline S. ve Volker H. Hoffmann. 2010 "AB ETS'nin Sektörel Etkisi Güç Üretim Teknolojileri İçin Yenilik Sistemi – Almanya'ya İlişkin Bulgular." *Enerji Politikası* 38 (12): 7639–52.
- Rosembloom, Daniel ve Jochen Markard. 2020. "İklim İçin COVID-19 Kurtarma." *Bilim* 368 (6490): 2019–20.
- Saunders, Harry D., Joyasgree Roy, Ines M. L Azevedo, Debackuba Chakravaty, Shyamasree Dasgupta, Stephane de la Ruedu Can, Angela Druckman, Roger Fouquet, Michael Grubb, Boqiang Lin, Robert Lowe, Reinhard Madlener, Daire M. McCoy, Luis Mundaca, Tadj Oreszczyn, Steven Sorrell, David Stern, Kanako Tanaka ve Taoyuan Wei. 2021. "Enerji Verimliliği: Son 40 Yılda Neler Sağladı?" (gözden geçirilmiş sunum). *Enerji ve Çevre Yıllık İncelemesi* 46: 135–65.
- Semieniuk, Gregor, Philip B. Holden, Jean-Francois Mercure, Pablo Salas, Hector Pollitt, Katharine Jobson, Pim Vercoulen, Unnada Chewprecha, Neil R. Edwards ve Jorge E. Viñuales. 2022. "Gelişmiş Ekonomilerdeki Yatırımcılar İçin Kayıplara Yol Açan Fosil Yakıt Varlıkları." *Doğa İklim Değişikliği* 12 (6): 532–38.
- Seto, Karen C., Steven J. Davis, Ronald B. Mitchell, Eleanor C. Stokes, Gregory Unruh ve Diana Ürge-Vorsatz. 2016. "Karbon Kilitlenmesi: Türleri, Nedenleri ve Politika Sonuçları." *Çevre ve Kaynakların Yıllık İncelemesi* 41 (1): 425–52.

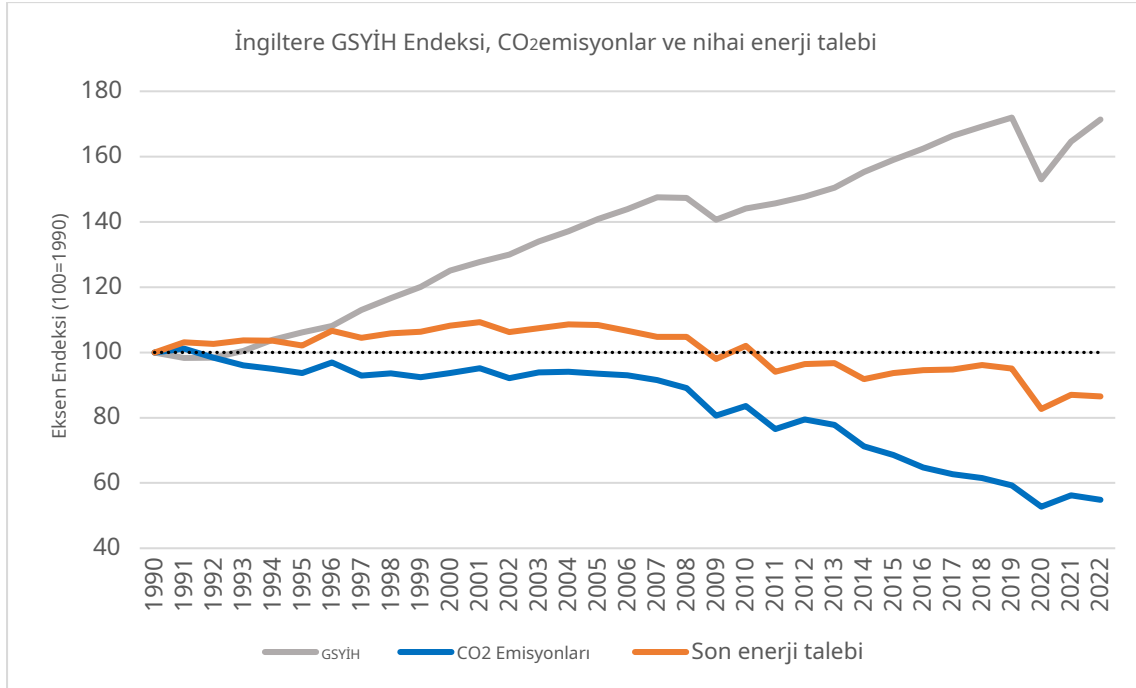
- Sköld, David, Helena Fornstedt ve Marcus Lindahl. 2018. "İnovasyon Faydasının Seyreltilmesi, Güçlendirilmesi Yeniye Karşı İsteksizlik: Parçalanmış Bir Elektrik Endüstrisine Yönelik Yukarı Yönlü Bir Tedarikçi Perspektifi." *Enerji Politikası* 16 (Mayıs): 220–31.
- Smulders, Sjak ve Michiel de Nooij. 2003. "Enerji Tasarrufunun Teknolojiye Etkisi ve Ekonomik Büyüme." *Kaynak ve Enerji Ekonomisi* 25 (1): 59–79.
- Söderholm, Patrik ve Ger Klaassen. 2007. "Avrupa'da Rüzgar Enerjisi: Eş Zamanlı Bir Yenilik–Yayımla Modeli." *Çevre ve Kaynak Ekonomisi* 36 (2): 163–90.
- Söderholm, Patrik ve Thomas Sundqvist. 2007. "Öğrenme Eğrilerinin Kullanımındaki Deneyisel Zorluklar "Yenilenebilir Enerji Teknolojilerinin Ekonomik Beklentilerinin Değerlendirilmesi" *Yenilenebilir Enerji* 32 (15): 2559–78.
- Songwe, Vera, Nicholas Stern ve Amar Bhattacharya. 2022. *İklim Eylemi için Finansman: Ölçeklendirme İklim ve Kalkınma İçin Yatırım*. İklim Finansmanı Konusunda Bağımsız Üst Düzey Uzman Grubu Raporu.
- Stern, Nicholas, Joseph E. Stiglitz ve Charlotte Taylor. 2021. "Muazzam Risk Ekonomisi, Acil Eylem ve Radikal Değişim: İklim Değişikliği Ekonomisine Yeni Yaklaşımlara Doğru." NBER Çalışma Belgesi 28472. Ulusal Ekonomi Araştırmaları Bürosu, Cambridge, MA.
- Stokes, Leah Cardamore. 2020. *Kısa Devre Politikası: Çıkar Grupları ve Temiz Enerji Üzerindeki Mücadele Amerikan Eyaletlerinde Enerji ve İklim Politikası*. Oxford, Birleşik Krallık: Oxford University Press.
- Taylor, Margaret. 2008. "Teknoloji İtme ve Talep Çekme Ötesinde: Kaliforniya'nın Güneş Enerjisinden Dersler Politika." *Enerji Ekonomisi* 30 (6): 2829–54.
- Triguero, Aangela, Lourdes Moreno-Mondéjar ve Maria A. Davia. 2014. "Enerjinin Etkisi Temiz Teknolojilerin ve Geri Dönüşümün Benimsenmesinin Fiyatları: Avrupa KOBİ'lerinden Kanıtlar." *Enerji Ekonomisi* 46 (Kasım): 246–57.
- UNCTAD (Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı). 2023a. *Yeşil Pencere Açılsın: Düşük Karbonlu Bir Dünya İçin Teknolojik Fırsatlar*. Cenevre: UNCTAD.
- UNCTAD (Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı). 2023b. *Emtia Durumu Bağımlılık 2023*. UNCTAD.
- Vogt-Schilb, Adrien, Guy Meunier ve Stephane Hallegatte. 2018. "En İyisiyle Başlarken Pahalı Seçenek Mantıklı: Azaltma Yatırımının En Uygun Zamanlaması, Maliyeti ve Sektörel Dağılımı." *Çevre Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi* 88: 210–33. Waisman, Henri, Celine Guivarch, Fabio Grazi ve Jean Hourcade. 2012. "İmaclim-R Modeli: Altyapılar, Teknik Atalet ve Eksik Öngörü Altında Düşük Karbonlu Geleceklerin Maliyetleri." *İklim Değişikliği* 14 (1): 101–20.
- Way, Rupert, Matthew C. Ives, Penny Mealy ve J. Doyne Farmer. 2022. "Deneyisel Olarak Temellendirilmiş Teknoloji Tahminleri ve Enerji Dönüşümü." *Joule* 6 (9): 2057–82.
- Weiss, Martin, Martin Junginger, Martin K. Patel ve Kornelis Blok. 2010. "Deneyim İncelemesi Enerji Talebi Teknolojileri İçin Eğri Analizleri." *Teknolojik Tahmin ve Sosyal Değişim* 77 (3): 411–28.
- Wells, Peter ve Paul Nieuwenhuis. 2012. "Geçiş Başarısızlığı: Geçiş Sürecinde Sürekliliği Anlamak Otomotiv Sanayi." *Teknolojik Tahmin ve Sosyal Değişim* 79 (9): 1681–92. Weyant, John P. 2011. "Yeni Enerji Teknolojilerinin Gelişimini ve Yaygınlaşmasını Hızlandırmak: "Ölüm Vadisi'nin Ötesinde." *Enerji Ekonomisi* 33 (4): 674–82.
- Wilson, Charlie, Arnulf Grubler, Nuno Bento, Stephen Healey, Simon De Stercke ve Caroline Zimm. 2020. "Karbon Azalmasını Hızlandıracak Granül Teknolojiler." *Bilim* 368 (6486): 36–39.
- Wright, Theodore Paul. 1936. "Uçakların Maliyetlerini Etkileyen Faktörler." *Havacılık Dergisi Bilimler* 3 (4): 122–128.
- Ye, Qin, Shaoqing Dai ve Gang Zeng. 2018. "Komuta ve Kontrol ve Çin'in Enerji Tasarrufu ve Emisyon Azaltma İnovasyonunda Piyasa Odaklı Politika Araçları." *Çin Nüfus Kaynakları ve Çevre Dergisi* 16 (1): 1–11.

- Yu, Yang, Hong Li, Yuyuan Che ve Qiongjie Zheng. 2017. "Rüzgar Türbinlerinin Fiyat Gelişimi Çin: Değiştirilmiş Çok Faktörlü Öğrenme Eğrisi Temelli Bir Çalışma." *Yenilenebilir Enerji* 103 (Nisan): 522–36.
- Zhou, Yi ve Alun Gu. 2019. "Rüzgar Gücü ve Fotovoltaik Teknolojisinin Öğrenme Eğrisi Analizi ABD'de: Maliyet Azaltma ve Araştırma, Geliştirme ve Gösterimin Önemi." *Sürdürülebilirlik* 11 (8): 2310.

Ek A. Vaka çalışması–Enerji geçişinde İngiltere deneyimi

İngiltere'nin enerji dönüşümü bugüne kadar görülen en dramatik dönüşümlerden biri olarak uluslararası ilgi gördü. 1980'lerde bazen "petrol ve gaz denizindeki bir kömür adası" olarak bilinen bir ülke, enerji sisteminden kömürü büyük ölçüde çıkardı. Bölgesel CO₂ emisyonlar 1990 ile 2022 arasında yaklaşık %45 düştü (UK-DESNZ 2023b), G20'deki diğer her yerden daha hızlı bir ortalama karbonsuzlaştırma oranıyla (PwC 2021). Aynı zamanda, enerji tüketimi %13 düşerken GSYİH %71 arttı (pandemi öncesi seviyelere yakın) (Şekil A.1).

Şekil A.1. İngiltere GSYİH'sinin, toplam bölgesel CO ile karşılaştırılması, emisyonlar ve nihai enerji talebi, 1990–2022



Kaynaklar: UK-BEIS 2023; UK-DESNZ 2023a; UK-ONS 2023.

Bu yüzyılın başına kadar yenilenebilir enerji konusunda Avrupa'nın gerisinde kalan Birleşik Krallık, özellikle açık deniz rüzgar enerjisi konusunda dünyanın önde gelen ülkelerinden biri haline geldi ve yenilenebilir kaynakların elektrik üretimine katkısı son 20 yılda yüzde 5'ten yüzde 40'ın üzerine çıktı (UK-DESNZ 2023c).

Orta gelirli ülkeler açıkça birçok farklılık ve çeşitli koşullarla karşı karşıya olsa da, Birleşik Krallık'ın deneyimi karbondan arındırma ve düşük karbonlu teknolojik gelişmenin itici güçleri ve ilişkili ekonomik boyutlar hakkında bazı genel içgörüler sunabilir. Bu vaka çalışması, özellikle elektrik sektöründe bugüne kadar görülen karbondan arındırmayı sağlamada etkili olan politikaları izliyor. Geçişin büyük ölçüde stratejik hedefler ve ilgili kararlar tarafından nasıl yönlendirildiğine ışık tutuyor, çoğunlukla artan verimlilik ve teknolojik ilerlemeyle fazlasıyla telafi edilen ön maliyetlerle.

Bağlam: çok aşamalı bir geçiş

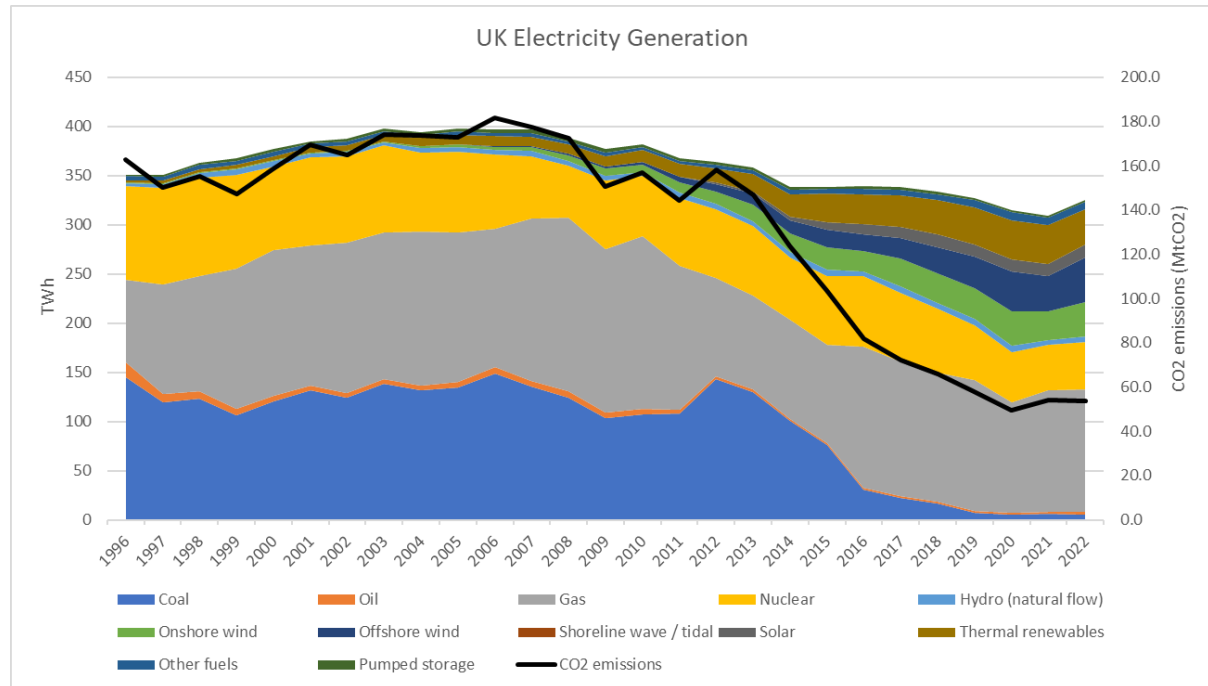
CO'nun yaklaşık üçte ikisi Birleşik Krallık'ta bu dönemdeki azaltımlar, karbonsuzlaştırılmış bir enerji sektörü tarafından sağlandı (UK-BEIS ve ONS 2022). Bu, iki ayrı aşamada gerçekleşti.

İlk büyük adım, 1984'te elektrik kesintilerine yol açan madenci grevleri nedeniyle yaşanan büyük bir siyasi çatışmanın zemininde atıldı. Sonraki yıllarda hükümet, o zamanki Merkezi Elektrik Üretim Kurulu'nun İngiltere kömürünü tedarik ettiği sözleşmelerin hakimiyetini azaltarak sistemi ithalata açtı ve 1990'da hükümet elektrik piyasasını özelleştirdi ve serbestleştirerek çok daha geniş bir rekabete açtı. Sonuç olarak, İngiltere enerji üretimi 1990'lar boyunca kaynaklarını hızla çeşitlendirdi, başlangıçta ithal kömüre ve Kuzey Denizi gaz rezervlerinden yararlanarak gaz üretimine geçti. Bunu hızlı bir "gaza doğru koşu" izledi. Gaz, özel sektör için ekonomik olarak daha çekiciydi, ancak özelleştirmeden önce sistemden büyük ölçüde dışlanmıştı (Winskel 2002). Bu, hizmet sektörleri lehine önemli ölçüde sanayisizleşmeyle birlikte, büyük ölçüde CO2'nin "ayırışma" hızını artırdı GSYİH'ya oranı yaklaşık 2000'e kadar.

2000'den bu yana trendler ve politikalar

1990'ların sonlarına doğru, iklim değişikliğiyle mücadelenin önemi konusunda geniş bir siyasi fikir birliği oluşmuştu. 2000'lerin başından itibaren, başlangıçta Birleşik Krallık'ın Kyoto Protokolü kapsamındaki taahhütlerini ve 2010 ve 2020 için ilgili Avrupa Birliği (AB) hedeflerini karşılamak için, sektörler ve aktörler genelinde hareket eden bir dizi politika, özellikle elektrik sektöründe Şekil A.2'de gösterilen ikinci büyük emisyon azaltım aşamasını üretmek için birlikte çalıştı.¹

Şekil A.2. Elektrik üretim profili ve CO2 emisyonlar, 1996–2022



Kaynaklar: İngiltere Devlet DÜKLER elektrik yakıt kullanmak, nesil Ve tedarik
(<https://www.gov.uk/government/statistics/electricity-chapter-5-digest-of-united-kingdom-energy-statisticsdukes>) ve Geçici Birleşik Krallık sera gazı emisyonları ulusal istatistikleri 2022 (<https://www.gov.uk/government/statistics/provisional-uk-greenhouse-gas-emissions-national-statistics-2022>). MtCO2= megaton karbondioksit; TWh = terawatt saat.

Bu vaka çalışmasının çoğu benimsenen politikalara ve enerji/emisyon etkilerine odaklanıyor. Makroekonomik etkileri, söz konusu dönemde İngiltere ekonomisini etkileyen diğer her şeyden ayırmak zordur; en belirgin olanı, fosil yakıt fiyatlarındaki büyük artış, İngiltere'nin net ihracatçıdan ithalatçıya dönüşmesi ve hepsinden önemlisi 2000'lerin sonlarında küresel mali krizin sonuçlarıdır.

Bazı çalışmalar, taahhütlerin ve önerilen politikaların olası etkilerini, varsayılan "her zamanki gibi iş" senaryosuna karşı yansıtmak için o dönemde yürütülmüştü. Birleşik Krallık hükümetinin Carbon Trust'ı (2005) tarafından ilk Birleşik Krallık İklim Değişikliği Programı İncelemesi'nin bir parçası olarak yapılan büyük bir çalışma, karbon fiyatlandırması, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji politikalarının birleşiminin iş sektörü üzerindeki etkilerine ve rekabet üzerindeki etkilerine odaklanmıştı. Ancak makro görüşler, çalışmada hem genel denge modeli hem de makroekonometrik model kullanıldığı göz önüne alındığında, önemli modelleme farklılıklarını yansıtıyordu. Muhtemel genel emisyon etkileri ve AB ETS de dahil olmak üzere incelenen politika paketlerinin farklı unsurlarının farklı ve genellikle tamamlayıcı katkılar sağlayacağı konusunda oldukça iyi anlaşıldı.

Ancak makroekonomi açısından sonuçlar tam tersiydi; benzer bir sayı (GSYİH'nin yaklaşık %0,3'ü) ancak işaret olarak zıttı. Genel denge modeli, karbon fiyatının ve hedeflerin, temelde genel olarak optimum olduğu varsayılan daha karlı faaliyetlerden kaynakları alacağı varsayımını somutlaştırırken, bazı gözlemlenen tarihsel ilişkileri yansıtan ekonometrik model, karbonsuzlaştırmayla ilişkili daha yüksek enerji verimliliği ve geliştirilmiş yatırımın Birleşik Krallık GSYİH'sini artıracağını öngördü (Carbon Trust 2005, 55).

Sonuç olarak, genel emisyon azaltımları bu çalışmada öngörülen her şeyi aştı. 2000'lerin ortalarında, Birleşik Krallık'taki elektrik üretiminin profilini üç şekilde hızla değiştiren çeşitli politikalar tanıtıldı veya yürürlüğe girmeye başladı: (1) kömür bazlı üretimde dramatik bir düşüş; (2) yenilenebilir üretimde hızlı bir artış; ve (3) toplam elektrik talebinde önemli bir düşüş.

Karbon fiyatlandırması—AB ETS ve ötesi

2005 yılında, AB Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS), AB genelindeki tüm elektrik üretimi ve endüstriyel emisyonlara bir karbon fiyatı getirdi. Dalgalı bir başlangıçtan sonra, 2010'ların sonlarındaki reformlara kadar genel olarak düşük fiyatlardan muzdaripti. Sonuç olarak, Birleşik Krallık'ta ve Avrupa genelinde elektrik üretim karışımı ve sonraki emisyonlar üzerinde sınırlı doğrudan etkisi oldu (Bel ve Joseph 2015), ancak varlığı bile yeni kömür santrallerini caydırmaya hizmet etti - bu tür son teklif 2008'de terk edildi.

Düşük ve belirsiz ETS karbon fiyatına yanıt olarak, 2013 yılında yatırımcı kesinliğini artırmak için Birleşik Krallık, AB ETS'nin yanı sıra elektrik üreticilerine uygulanan bir Karbon Fiyat Tabanı'nı tek taraflı olarak tanıttı. 2010'ların ortalarında görülen kömürün gazla hızla yer değiştirmesi büyük ölçüde karbon fiyatlandırması (AB ETS) ve beraberindeki Birleşik Krallık Karbon Fiyat Desteği tarafından yönlendirildi - başlangıçta bir tabandı, ancak daha sonra Birleşik Krallık üretimine eklenen bir karbon vergisi olarak değiştirildi.²Karbon fiyatlandırması ve daha önceki piyasa serbestleştirilmesi, kömürden gaza geçişi yoğunlaştırmada oldukça etkili olsa da, CO₂ emisyonlarının geri kalan iki itici gücü üzerinde doğrudan çok az etkiye sahip olmuştur.²Gerçekleştirilen azalma—yenilenebilir enerjideki büyüme ve genel talepteki düşüş.

Yenilenebilir enerji yatırımı

Yenilenebilir enerjinin dağıtımına stratejik olarak yatırım yapan ve başlangıçta teknoloji maliyetleri kullanılarak maliyet-fayda temelinde haklı çıkarılmayacak yatırımlar yapan hedefli politikalar, Şekil A.2'de gösterilen yenilenebilir enerji üretimindeki hızlı artıştan büyük ölçüde sorumluydu. 2002'de, başlangıçta Birleşik Krallık'ın 2010 yılına kadar %10 yenilenebilir elektrik hedefini gerçekleştirmek için Yenilenebilir Yükümlülüğü (RO) getirildi ve bu hedef AB çapında %21'lik bir hedefin parçasıydı.³Bu, elektrik tedarikçilerinin tedariklerinin belirli bir oranını yenilenebilir kaynaklardan sağlamalarını gerektiriyordu ve hedef, 2002'deki arzın yüzde 3'ünden 2013'te yüzde 13,4'e çıkarıldı.⁴

AB, 2008 yılında 2020 için üç paralel hedef ortaya koydu: sera gazı (GHG) emisyonlarında %20 azalma (1990 seviyelerinden); nihai enerji tüketiminin %20'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması; ve nihai enerji tüketiminde %20 azalma (temel projeksiyonlara kıyasla). Bu hedeflere ulaşmak için, bir dizi mevcut AB politika önlemi sıkılaştırıldı ve yeni politikalar benimsendi. Aynı yıl, Birleşik Krallık, yeni kabul edilen İklim Değişikliği Yasası kapsamında 2050 yılına kadar %80'lik yasal olarak bağlayıcı bir emisyon azaltma hedefi belirledi (1990 seviyelerinden).

İngiltere Yenilenebilir Enerji Yükümlülüğü başlangıçta teknoloji açısından tarafsızdı, bu nedenle daha olgun yenilenebilir enerjileri (kara rüzgarı gibi) destekliyordu. Ancak 2009'da, çeşitliliği teşvik etmek için daha az olgun teknolojiler için çarpanlarla "bantlama" tanıtıldı - özellikle açık deniz rüzgarı. Daha geniş girişimlerin ve özellikle Carbon Trust tarafından düzenlenen endüstriyel Açık Deniz Rüzgar Hızlandırıcısının yanı sıra, bu, teknolojinin ve endüstrinin ölçekte yerleşmesine ve maliyetlerin düşmeye başlamasına olanak tanıyan çeşitli öğrenme biçimleri ve ölçek ekonomileriyle birlikte işbirliğini teşvik etti (Jennings ve diğerleri, 2020).

2013 yılında, RO, uygun yenilenebilir jeneratörlerin 15 yıllık üretim kapasitesi için sabit bir "vuruş fiyatı" almak için yarıştığı turlar aracılığıyla yeni yenilenebilir kapasitenin arandığı fark sözleşmeleri (CfD'ler) ile değiştirilmeye başlandı. 2014 yılında, süreç tamamen açık artırmaya dayalı hale geldi ve o yıl verilen kapasite, kara ve deniz rüzgarı arasında kabaca eşit olarak bölündü.⁵

Açık deniz rüzgarı için ilk iki CfD turu pahalıydı; birincisi hükümet tarafından doğrudan yaklaşık 160 £/MWh fiyatla tahsis edilmişti ve toplam sözleşme değeri yaklaşık 16 milyar £ idi. İkinci (ilk açık artırma) yaklaşık 110 £/MWh (toptan elektrik fiyatı yaklaşık 50 £/MWh ile karşılaştırıldığında). Yine de, 2015'ten itibaren yeni kara rüzgarı ve güneş PV'ye uygulanan etkili bir moratoryumun ardından, 2017 ve 2019'daki sonraki turlarda, açık deniz rüzgarı yeni kapasitenin %95'ini temsil etti (Mercure, Sharpe, vd. 2021). Bu, yeni rekabetçi unsurun ortaya çıkan maliyet düşüşlerini elektrik piyasasına yönlendirmesiyle daha fazla öğrenme, inovasyon ve ölçek ekonomisine izin verdi. Genel olarak, açık deniz rüzgarı maliyetleri neredeyse bir faktör oranında düştü. Dörtümüzdeki sekiz yıl içinde (Mercure, Sharpe, vd. 2021) açık deniz rüzgarını 2021 ortasına kadar olan on yıl boyunca ortalama geçerli toptan fiyatlarla fiilen sübvansiyonsuz hale getirmek ve 2022 enerji krizinde yaşanan çok daha yüksek fiyatlarla önemli ölçüde "sübvansiyon-negatif" hale getirmek (Jennings vd. 2020; UK-Ofgem 2022). 2022'de açık deniz rüzgarı üretimin yüzde 15'ini oluşturdu ve bu oran 2010'daki yüzde 1'in altındaydı. Şu anda Birleşik Krallık'ın karbonsuzlaştırma ve enerji güvenliği stratejilerinin omurgasını oluşturuyor ve 2030'a kadar kapasitede beş kat artış (UK-DESNZ ve BEIS 2022) ve 2050'ye kadar en az 100 GW hedefleniyor (CCC 2020).

CfD şemasının 1. ve 2. turlarının değerlendirilmesi, bunların birlikte tüketiciler için maliyetleri 2050'ye kadar yaklaşık 3 milyar £ azaltmasının öngörüldüğünü buldu (karşıt olgusal RO şemasıyla karşılaştırıldığında). Bu rakam, sonraki ve öngörülen gelecekteki CfD projeleri dahil edildiğinde 9 milyar £'a yükseliyor. Bu nedenle, şema tüketiciler için önemli bir para karşılığı değer sağladı (UK-BEIS 2022). Ancak, 2023'te daha yüksek faiz oranları, enflasyon ve tedarik zinciri kısıtlamalarının birleşimi fiyatları artırdı; açık deniz rüzgarı üzerindeki etki, 2024 yazında planlanan büyük bir açık artırmada ortaya çıkacak.

Enerji verimliliği

Enerji verimliliğine bakıldığında, elektrik ve daha geniş kapsamlı enerji tüketimi enerji fiyatlarındaki değişikliklerden ve makroekonomik koşullardan, özellikle de 2008/09 mali krizinin şekillendirdiği koşullardan (Andreoni 2020) etkilenmiş olsa da, enerji verimliliği politikaları son yirmi yılda Birleşik Krallık'ta elektrik tüketiminin verimliliğini açıkça artırmış ve ayrıca özellikle ulaşım olmak üzere diğer sektörlerde diğer yakıtların kullanımının enerji verimliliğinin artırılmasının da itici gücü olmuştur.

Son yirmi yıldır Birleşik Krallık, büyük ölçüde ikincisindeki büyüme tarafından yönlendirilen enerji yoğun üretimden daha fazla bilgi ve hizmet tabanlı bir ekonomiye doğru bir geçişi sürdürdü (UK-BIS 2012). 1990'da Birleşik Krallık enerji tüketiminin dörtte birinden fazlasını ve elektriğin üçte birini oluşturan üretim sektörü, 1990'dan bu yana enerji üretkenliğini yüzde 40'tan fazla artırdı (UK-ONS 2019). Bu, öncelikle sektörde daha yüksek değerli, daha az enerji yoğun ürünlere doğru yapısal bir değişimin yanı sıra mevcut üretim kapasitesinin daha fazla kullanımı ve iyileştirilmiş verimliliği tarafından yönlendirildi (CCC 2018).

Enerji verimliliği iyileştirmeleri büyük ölçüde politika tarafından yönlendirilmiştir. İklim Değişikliği Vergisi (endüstriyel enerji tüketimine uygulanan küçük bir vergi) 2000 yılında yürürlüğe girmiştir. İlgili sektörel İklim Değişikliği Anlaşmaları ile birlikte, enerji verimliliği ve karbon azaltma hedeflerinde önemli bir aşırı başarıya yol açmıştır; bu kısmen Anlaşmalara uymaya çalışan firmaların neden olduğu "farkındalık etkisi"nden kaynaklanmaktadır (Ekins ve Etheridge 2006). Enerji verimliliğine ilişkin diğer etkili politikalar arasında işletmelerin ve hizmet ve kamu sektörlerinin emisyon ödenekleri satın almasını gerektiren "CRC enerji verimliliği" planı, tüm büyük kuruluşların her dört yılda bir enerji verimliliği denetimlerinden geçmesini zorunlu kılan Enerji Tasarrufu Fırsatları Planı (ESOS) ve daha az ölçüde AB ETS (Martin, Muûls ve Wagner 2016) yer almaktadır.

Evsel ve ticari sektörler 1990'da toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını ve elektrik tüketiminin yaklaşık üçte ikisini oluşturuyordu. Enerji kullanan cihazlar üzerindeki etiketler (1990'lardan beri) ve giderek daha sıkı ve kapsamlı asgari enerji performansı düzenlemeleri (2000'lerin ortalarından beri), AB gerekliliklerini takiben tanıtıldı ve cihazlarda enerji verimliliği iyileştirmelerini sağladı. 2018'e kadar, bu araçların birlikte AB'deki elektrik tüketimini azalttığı tahmin ediliyor ve bu da 2018'de Birlik genelindeki elektrik tüketiminin %15'ine eşdeğer (IEA 2021).

Genel olarak, Birleşik Krallık'taki tüketicilerin elektrik (ve daha genel olarak enerji) harcamaları GSYİH'nın bir oranı olarak zamanla azaldı (1990'da %2,2'den 2020'de %1,82'ye düştü, toplam enerji harcamasının bir payı olarak büyük ölçüde sabit kaldı),⁷Karbon fiyatları ve ilk yatırım maliyetlerine rağmen yenilenebilir enerji politikalarının elektrik fiyatlarına dolaylı veya dolaysız olarak yansıtılması (enerji krizi ve bunun etkileri nedeniyle bu eğilimin tersine dönmüş olması da mümkün).

Bununla birlikte, politika geri dönüşleri ve aksaklıklar da oldu. Enerji verimliliğiyle ilgili bazı programların karmaşıklığıyla ilgili endişeler, hükümetin çoğunda verimliliği artırmanın ana yaklaşımının piyasa güçleri olması gerektiği yönündeki temel varsayımla birleşince, 2012'de enerji verimliliği programlarının birçoğunun terk edilmesine ve (evler için) binalara bağlı kredilere dayalı "hane halkı tarafından yönetilen" bir yaklaşımın benimsenmesine yol açtı. Ancak bu yaklaşım muhteşem bir şekilde başarısız oldu ve İngiltere yalıtım sektörünün çökmesine yol açtı.⁸Daha sonra 2015'te yeni hükümet son anda yeni inşaatlar için bir standart olan "sıfır karbonlu evler"i iptal etti. *karadarüzgar* ve güneş enerjisi de fiili bir yasağa yol açtı (ancak çok yakın bir zamanda, 2022 enerji krizi sonrasında geri çekildi).

Enerji ve İklim İstihbarat Birimi, son enerji krizi bağlamında daha ileri iklim politikalarının tüketici faturaları üzerinde yaratabileceği etkiyi tahmin ederek, bu temel politikalar terk edilmeseydi veya ertelenmeseydi hanelerin ortalama olarak 2022'de 1000 £'un üzerinde tasarruf sağlayabileceğini tahmin ediyor (ECIU 2023).

Notlar

¹Bu çabalar, AB tarafından doğrudan uygulanan politikalarla (enerji verimliliği ürün standartlarında olduğu gibi) ilgiliydi veya AB yükümlülüklerini karşılamak için tanıtıldı (özellikle Yenilenebilir Enerji Direktifi). Birleşik Krallık'ın Aralık 2021'de AB'den çıkmasının ardından, bu politikaların çoğu yürürlükte kalmaya devam ediyor (Watson ve Drummond 2022).

²Karbon Fiyat Desteği 5 £/tCO'dan artırıldı2013'te 18 £/tCO'ya2015'ten itibaren, AB ETS fiyatı yaklaşık 5 €/tCO seviyesinde kaldı2017 sonuna kadar. Bu birleşik artış, kömürden gazı hızlı yakıt geçişini teşvik etti (ve özellikle en az verimli kömür santrallerinin kapanmasını hızlandırdı) (Leroutier 2022), kömürün 2012'de üretimin %40'ından 2020'de %2'nin altına düşmesiyle (UK-BEIS 2021). 2021'de, AB ETS'si Birleşik Krallık'ta UK ETS ile değiştirildi ve fiyatlar büyük ölçüde AB ETS'sinin fiyatlarını takip etti.

³Bu hedef sadece elektriğe odaklanmıştı, oysa 2020 için belirlenen yüzde 20 hedefi tüm nihai enerjiyi kapsıyordu.

⁴Yenilenebilir Yükümlülüğü, tedarik şirketlerinin yenilenebilir üreticilere verilen ve onlardan satın alınan uygun sayıda alınıp satılabilir Yenilenebilir Yükümlülük Sertifikası (ROC) satın almasını ve teslim etmesini gerektirerek uygulandı. ROC'lere olan talep, elektrik toptan piyasasından alınan fiyata ek olarak gelir üretti ve böylece yeni yenilenebilir enerjiler desteklendi. Yenilenebilir Yükümlülüğü, 31 Mart 2017'ye kadar yeni katılımcılara açık kaldı ve erken dönem fark sözleşmelerine paralel olarak faaliyet gösterdi.

⁵Toptan elektrik fiyatları grev fiyatının altındaysa, jeneratörler tüketici perakende fiyatlarına uygulanan bir vergi ile ödenen farkı alırlar. Toptan fiyatlar grev fiyatının üzerindeyse, jeneratörler farkı geri ödeyerek vergiyi azaltırlar (veya vergi sıfırına düşerse potansiyel olarak fiyatları düşürürler). Farklı teknolojiler için kapasite, teknoloji uygunluğuna göre gruplandırılmış "potlarda" sunulur. Yerleşik bir teknoloji olarak, kara rüzgarı Pot 1'di, açık deniz rüzgarı ise Pot 2'de daha az yerleşik bir teknolojiydi (daha sonra yalnızca açık deniz rüzgarına (Pot 3) taşındı). Farklı potlardaki teknolojiler için kapasite, açık artırmaya çıkarıldığında doğrudan rekabet halinde değildir.

⁶Bu tutarlar, hükümet incelemesinde belirtildiği, EEIST raporunda (EEIST 2021) alıntılandığı ve tartışıldığı gibidir.

⁷Bu rakamlar, son kullanıcıya göre enerji harcamalarına ilişkin DUKES verileri (tablo 1.1.6) (UK-BEIS 2021) ve cari fiyatlarla GSYİH kullanılarak hesaplanmıştır.

⁸2000'li yılların başından beri, ev enerji verimliliği iyileştirmeleri enerji tedarikçilerine yönelik yükümlülükler aracılığıyla teşvik ediliyordu. 2012'de bu yaklaşım, vurguyu binalara bağlı ev sahiplerine verilen kredilere kaydıran çokça duyurulan "Yeşil Anlaşma" lehine terk edildi. Bunun başarısızlığı o dönemdeki enerji verimliliği politikası uzmanları tarafından büyük ölçüde öngörülmüştü (Rosenow ve Eyre 2013), ancak enerji verimliliğini ev sahiplerinin kendi ellerine bırakmanın ekonomik mantığı ve politik cazibesi göz önüne alındığında göz ardı edildi. "İngiltere enerji politikasının tarihindeki en büyük başarısızlık" olarak adlandırılan sonuç, tasarımdaki engellerin, davranışların ve başarısızlıkların birçok ayrıntılı açıklamasına atfedilebilir (Rosenow ve Eyre 2016). Daha öz bir açıklama, bunun bir kategori hatası olduğudur; birinci alandaki davranışsal ve yapısal bir sorunu çözmek için klasik ikinci alandaki ekonomik mantığın uygulanması (Grubb ve diğerleri 2023).

Referanslar

- Andreoni, Valeria. 2020. "Ülkelerin Enerji Metabolizması: Enerji Verimliliği ve Kullanımı "Küresel Mali Kriz Sonrası Dönem." *Enerji Politikası* 139 (Nisan): 111304.
- Bel, Germa ve Stephan Joseph. 2015. "Emisyon Azaltma: AB ETS'nin Etkilerinin Çözülmesi ve Ekonomik Kriz." *Enerji Ekonomisi* 49 (Mayıs): 531–39.
- Karbon Vakfı. 2005. *İngiltere İklim Değişikliği Programı: İşletmeler ve İş Dünyası için Potansiyel Evrim Kamu Sektörü*. Karbon Güveni.
- CCC (İklim Değişikliği Komitesi). 2018. "İngiltere Emisyonlarının Azaltılması - 2018 İlerleme Raporu Parlamento." CCC.
- CCC (İklim Değişikliği Komitesi). 2020. "Altıncı Karbon Bütçesi: İngiltere'nin Net Sıfıra Giden Yolu." CCC. ECIU (Enerji ve İklim İstihbarat Birimi). 2023. *2022'de Sıfır DEĞİL'in Maliyeti*. Londra: ECIU.
- EEIST (Enerji İnovasyonu ve Sistem Geçişi Ekonomisi). 2021. *Yeni Ekonomi Yenilik ve Geçiş: Fırsatları ve Riskleri Değerlendirme*. EEIST, Exeter Üniversitesi.
- Ekins, Paul ve Ben Etheridge. 2006. "İngiltere İkliminin Çevresel ve Ekonomik Etkileri Anlaşmaları Değiştir." *Enerji Politikası* 34 (15): 2071–86.
- Grubb, Michael, Alexandra Poncia, Paul Drummond, Karsten Neuhoff ve Jean-Charles Hourcade. 2023. "Politika Tamamlayıcılığı ve Karbon Fiyatlandırmasının Paradoksu." *Oxford Ekonomi Politikası İncelemesi* 39 (4): 711–730.
- IEA (Uluslararası Enerji Ajansı). 2021. *Enerji Verimliliği Cihaz ve Ekipmanlarının Başarıları Standartlar ve Etiketleme Programları*. Paris: Uluslararası Enerji Ajansı (IEA).
- Jennings, Tom, Helen Andrews Tipper, Jonathan Darglish, Michael Grubb ve Paul Drummond. 2020. *İngiltere Açık Deniz Rüzgarında Politika, Yenilik ve Maliyet Azaltma*. UCL'nin Bartlett Enerji, Çevre ve Kaynaklar Okulu: Karbon Vakfı. Rapor. Karbon Vakfı: UCL'nin Bartlett Enerji, Çevre ve Kaynaklar Okulu.
- Leroutier, Marion. 2022. "Karbon Fiyatlandırması ve Enerji Sektörünün Karbondan Arındırılması: İngiltere'den Kanıtlar." *Çevre Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi* 111 (Ocak): 102580. Martin, Ralf,
- Mirabelle Muûls ve Ulrich J. Wagner. 2016. "Avrupa Birliği'nin Etkisi Düzenlenen Şirketlere Yönelik Emisyon Ticareti Planı: On Yıl Sonra Kanıtlar Nelerdir?" *Çevre Ekonomisi ve Politikasının Gözden Geçirilmesi* 10 (1): 129–48.
- Mercure, Jean-François, Simon Sharpe, Jorge E. Vinuales, Matthew Ives, Michael Grubb, Aileen Lam, Paul Drummond, Hector Pollitt, Florian Knobloc ve Femke JMM Nijssse. 2021. "Dönüştürücü Politika Tasarımı ve Değerlendirmesi için Risk-Fırsat Analizi." *Küresel Çevresel Değişim* 70 (Eylül): 102359.
- PwC. 2021. "Net Sıfır Ekonomi Endeksi 2021: Kırmızı Koddan Yeşil Kod'a." PwC, Londra.
- Rosenow, Jan ve Nick Eyre. 2013. "Yeşil Anlaşma ve Enerji Şirketi Yükümlülüğü." *İnşaat Mühendisleri-Enerji Kurumu Bildirileri* 166 (3): 127–36.
- Rosenow, Jan ve Nick Eyre. 2016. "Yeşil Mutabakatın Son Durumu: Tasarruf, Enerji Verimliliği, ve İngiliz Enerji Politikasındaki Başarısızlık." *Enerji Araştırmaları ve Sosyal Bilimler* 21 (Kasım): 141– 44.
- Birleşik Krallık, BEIS (İş, Enerji ve Endüstriyel Strateji Bakanlığı). 2021. "Birleşik Krallık Özeti Enerji İstatistikleri (DUKES) 2021." GOV.UK.
- Birleşik Krallık, BEIS (İş, Enerji ve Endüstriyel Strateji Departmanı). 2022. "Değerlendirme Fark Sözleşmeleri Planı." *GOV.UK*. Ticaret, Enerji ve Endüstriyel Strateji Bakanlığı.
- Birleşik Krallık, BEIS (İş, Enerji ve Endüstriyel Strateji Departmanı). 2023. "Geçici Birleşik Krallık Sera Gazı Emisyonları Ulusal İstatistikleri 2022."
- Birleşik Krallık, BEIS ve ONS (İş, Enerji ve Endüstriyel Strateji ve Ofis Departmanı) Ulusal İstatistikler için). 2022. "Son İngiltere Sera Gazı Emisyonları Ulusal İstatistikleri 1990–2020." Londra.

- Birleşik Krallık, BIS (İş, Yenilik ve Beceriler Departmanı). 2012. "Endüstriyel Strateji: Birleşik Krallık Sektör Analizi." BIS.
- Birleşik Krallık, DESNZ (Enerji Güvenliği ve Net Sıfır Departmanı). 2023a. *Birleşik Krallık Enerji Özeti İstatistikler (DUKES): Enerji*. TANZ.
- Birleşik Krallık, DESNZ (Enerji Güvenliği ve Net Sıfır Departmanı). 2023b. *Geçici İngiltere Sera Gazı Emisyonları Ulusal İstatistikleri 2022*. GOV.UK.
- Birleşik Krallık, DESNZ (Enerji Güvenliği ve Net Sıfır Departmanı). 2023c. "UK Energy in Brief 2023." DESNZ.
- Birleşik Krallık, DESNZ ve BEIS (Enerji Güvenliği ve Net Sıfır Departmanı ve Enerji Bakanlığı) İş, Enerji ve Endüstriyel Strateji). 2022. "İngiliz Enerji Güvenliği Stratejisi." DESNZ ve BEIS.
- Birleşik Krallık, Ofgem (Gaz ve Elektrik Piyasaları Ofisi). 2022. "Toptan Pazar Göstergeler." Ofgem.
- Birleşik Krallık, ONS (Ulusal İstatistik Ofisi). 2019. *Ekonomik Büyümenin Ayrıştırılması Karbon Emisyonları: İngiltere Kanıtı*. Londra: ONS.
- Birleşik Krallık, ONS (Ulusal İstatistik Ofisi). 2023. "Gayri Safi Yurtiçi Hasıla: Zincirlenmiş Hacim Ölçümleri: Mevsimsellikten Arındırılmış £M." ONS, Londra. Unruh, Gregory C. 2000. "Karbon Kilitlenmesini Anlamak." *Enerji Politikası* 28 (12): 817–30.
- Watson, Jim ve Paul Drummond. 2022. "Enerji." *Farklı Şeyler Yapmak? Brexit Sonrası Politika*, 39–41. Londra: Değişen Avrupa'da Birleşik Krallık.
- Winkel, Mark. 2002. "Sistemler Devrildiğinde: İngiliz Elektrik Sektöründe 'Gaz İçin Koşuşturma' 'Yan Sanayi.'" *Sosyal Bilimler Bilim* 32 (4): 563–98.