

Yeşil ve Fosil Enerji Girdileri İçin Yönlendirilmiş Teknik Değişimin Geçerliliğinin Test Edilmesi, Almanya Örneği*

Testing the Validation of Directed Technical Change for Green and Fossil Energy Inputs in Germany

*Adem ALVER***

*Erhan MUĞALOĞLU****

Başvuru Tarihi: 31 Mayıs 2025

Kabul Tarihi: 27 Haziran 2025

Makale Türü: Araştırma Makalesi

Özet

Bu çalışmada 1995-2020 dönemi için Almanya’da yönlendirilmiş teknik değişimin geçerliliği test edilmiştir. Nested CES fonksiyonlarının yönlendirilmiş teknik değişimin analizi için kullanıldığı çalışmada kurulan modellemelerde sermaye-işgücü ve enerji-yenilenebilir enerji gruplarını iki katmanlı yapısıyla üç model kurularak incelenmiştir. Her iki modelde ölçek getirisi yaklaşık birim elastik alınmıştır. İlk modelde sermaye-işgücü ve enerji-yenilenebilir grupları alt kademede eşit ağırlık taşırken, üst düzeyde sermaye-işgücünün baskınlığı belirgin olarak gözlemlenmiştir. Enerjiye yönelik teknik değişim, üretim yapısında Almanya için güçlü bir unsur olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İkinci modelde ise enerji grubunun ağırlığı daha tespit edilmiştir. Enerji formları arasında güçlü bir ikame potansiyeli tespit edilmesine karşın, sermaye ve işgücü arasındaki ikame esnekliği ikinci modelde anlamlılık kazanamamıştır, yenilenebilir enerji yönlü teknik değişim Almanya için beklenen etkinlik düzeyini sağlayamamıştır. Üçüncü modelde ise dört farklı yönlendirilmiş teknik değişim parametresi eşanlı olarak incelenmiş fakat anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir.

Anahtar Kelimeler: Fosil Enerji, Yenilenebilir Enerji, Nested CES, Yönlendirilmiş Teknik Değişim

Abstract

* Bu çalışma Dr. Öğr. Üyesi Erhan Muğaloğlu danışmanlığında Adem Alver’in Erciyes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat ABD’de 10513899 referans numarası ile yürütülen “Yeşil ve Fosil Enerji Girdileri için Yönlendirilmiş Teknik Değişimin Geçerliliğinin AB Ülkelerinde Test Edilmesi” isimli doktora tezine aittir.

** Arş. Gör., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, İktisadi Gelişme ve Uluslararası İktisat ABD, Kırşehir / Türkiye, ademalver@ahievran.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-6799-6840

*** Dr. Öğr. Üyesi, Erciyes Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, İktisat Teorisi ABD, Kayseri / Türkiye, erhanmugaloglu@erciyes.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-5362-6259

In this study, the validity of directed technical change (DTC) in Germany for the period 1995-2020 is examined. Utilizing nested CES production functions to analyze directed technical change, the study investigates three distinct models, each structured in two hierarchical layers, encompassing capital-labor and energy-renewable energy groups. In all three models, returns to scale are assumed to be approximately unit elastic. In the first model, while capital-labor and energy-renewable energy groups carry equal weights at the lower level, the capital-labor combination is observed to dominate at the upper hierarchical level. It is concluded that energy-oriented technical change constitutes a strong factor within Germany's production structure. In the second model, however, the energy group emerges with a greater weight. Although a strong potential for substitution between different forms of energy was identified, substitution elasticity between capital and labor did not achieve significance. Furthermore, renewable-energy-oriented technical change did not reach the expected effectiveness levels for Germany. The third model simultaneously examines four distinct parameters of directed technical change, but fails to identify any statistically significant relationships.

Keywords: Fossil Energy, Renewable Energy, Nested CES, Directed Technical Change

1. Giriş

Yenilenebilir enerjinin kullanımı her geçen gün artmasına rağmen pek çok alanda henüz fosil enerji kaynaklarının kullanım oranını yakalayamamıştır. Bu durumun birden fazla nedeni vardır. Fosil yakıtların kullanıma hazır hale gelmesi için çok fazla altyapı harcaması gerekmektedir. Yapılan harcamalar sonucunda oluşan tesisleşmelerin uzun ömürlü olarak tasarlanmaları temiz enerjiye geçişin önündeki en büyük engellerden birisi olarak göze çarpmaktadır. Yenilenebilir enerjinin süreksizliği, öngörülebilir olmaması, enerjinin depolanmasında problem olarak ortaya çıkmakta ve altyapı tesislerinin kurulmasını güçleştirmektedir. Bu durum öngörülemeyen maliyetleri beraberinde getirerek enerji ve ekonomi politikalarının etkinliğini azaltmaktadır. Yukarıda açıklanan bu sebeplere ek olarak beklenen teknolojik seviyeye ulaşamama, yasal ve yasal olmayan engeller, ölçek ekonomisinin elde edilememesi, politik ve siyasi nedenler enerji fiyatlarında dalgalanmalara neden olmaktadır.

Enerji fiyatlarındaki dalgalanmaların doğru ve etkin bir biçimde analiz edilmesi, çözümlenmesi ve önermelerinin sunulması bu sebeplerle büyük önem arz etmektedir. Enerji kaynaklarına ilişkin esneklik değerlerinin hesaplanması önem kazanmakta ve mevcut enerji arzının daha etkin bir biçimde düzenlenmesine olanak sağlamaktadır. Farklı enerji kaynaklarının esnekliklerine ilişkin değerlere ulaşabilmek, enerji sistemlerinin daha iyi entegre edilmesini, daha etkin bir biçimde kullanılmasını ve gerekli durumlarda farklı enerji kaynaklarının kullanıma dahil edilmesini mümkün kılmaktadır. Elde edilen bu değerler ile farklı ülkelerin enerji kaynaklarını nasıl yönlendirmesi gerektiği hakkında politika yapıcılara önermelerde bulunmayı sağlamaktadır. Mevcut enerji kaynaklarının daha etkin bir biçimde kullanılmasını teşvik eden ar-ge harcamaları ve/veya tamamen fosil yakıtların terkedilmesi bu önermeler arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda enerji kaynaklarının daha güvenilir olma, sürekli ve sürdürülebilir olma potansiyellerinin etkin olarak kullanılma ihtimali artmaktadır.

Esneklik değerlerinin hesaplanması enerji kaynaklarının güvenliği için de katkı sağlamaktadır. Etkili olarak yönetilen enerji kaynakları, enerji arz eden ülkeler açısından da daha iyi bir gelecek ve daha az karbon salınımını mümkün kılmaktadır. Daha iyi bir geleceğin planlanması, enerji dönüşümlerinin öngörülebilir olmasını ve günümüzde çok daha kırılgan olan enerji arz

ve talep dalgalanmalarını öngörülebilir hale getirmektedir. Bu öngörülebilirlik ise iktisadın temelinde yer alan değişen ihtiyaçların uyumlu bir biçimde karşılanmasını amaçlamaktadır.

Klasik üretim fonksiyonlarında enerji girdilerinin fosil ve yenilenebilir şeklinde ayrıştırılmadan dahil edilememesi esneklik hesaplamalarında doğru sonuçların elde edilmesinin önüne geçmektedir. Bu çalışmada kullanılan nested CES fonksiyonları, analizin gerçekleştirilmesinde, modellerin kurulmasında geniş bir alan sağlayarak seçenekleri arttırmaktadır. Böylelikle fosil ve/veya yenilenebilir enerjiye ilişkin politika şokları ve bu değişkenlerin teknik değişimi nasıl yönlendireceğine ilişkin yüksek anlamlılığa sahip sonuçlar vermektedir. Çalışmanın motivasyon kaynaklarının temelinde yer alan enerji geçişinde, ikame esnekliklerinin ve yönlendirilmiş teknik değişimin literatürde yeterince analiz edilmemiş olması, çalışmada katkı sağlaması beklenen konular arasında yer almaktadır.

Bu çalışmanın amaçlanan en önemli çıktılarından birisi de elde edilmesi planlanan esneklik değerleri kullanılarak yönlendirilmiş teknik değişime ulaşmaktır. Teknik değişimin hangi üretim faktörü yönünde olduğunun tespit edilmesi ile beraber enerji kaynakları arasında geçişin çevresel etkilerinin minimuma indirilmesi ve potansiyel etkilerinin azaltılması beklenmektedir.

Teknik değişim üretim sürecinde verimlilik artışını açıklayan bir kavram olmakla birlikte büyümenin temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Geleneksel büyüme modellerinde teknik değişim, teknolojik ilerleme ve gelişme gibi kavramlar, büyümenin hesaplanmasında yapılan modellemelerde dışsal ve homojen olarak yer almıştır. Basit bir biçimde ifade edilmesi sebebiyle Cobb-Douglas (1928) tipi üretim fonksiyonları ekonomideki girdilerin temsil edilmesinde büyük kolaylıklar sağlamıştır. Basit olması ve etkili bir biçimde modellenme kolaylığı sağlaması, toplam üretimi sadece sermaye ve işgücüne indirgemesi ve son olarak girdiler arasında sabit bir ikame esnekliği olduğunu kabul etmesi Cobb-Douglas fonksiyonunu ekonominin modellenmesinde temel dayanaklardan birisi olmasını sağlamıştır.

$$Y = AK^{\alpha}L^{1-\alpha} \quad (1)$$

Yukarıda yer alan fonksiyonda Y toplam üretimi, A toplam faktör verimliliğini, K sermayeyi, L iş gücünü ve α da sermayenin içindeki üretim payını temsil etmektedir. Bu varsayımlar zaman içerisinde ekonomik koşulların gelişmesi ve değişmesi sebebiyle, girdilerin geçerliliğini yitirmesine sebep olmuştur. Teknolojik ilerlemelerin model içerisinde yer almaması nedeniyle duyarsız hale gelmesi de geçerliliğin azalmasına katkı da bulunmuştur.

Teknolojik gelişmelerin ve yeniliklerin belirli girdilere veya sektörlere yönelik olarak gerçekleştiğini ifade eden yönlendirilmiş teknik değişimde bu girdiler içsel olarak kabul edilir. Enerji kaynaklarının ekonomik faaliyetlerde artan rolü ve etkisi, yönlendirilmiş teknik değişimi daha belirgin hale getirmiştir.

$$Y = A(k, e) \cdot K^{\alpha} \cdot E^{1-\alpha} \quad (2)$$

A teknoloji düzeyini temsil ederken sermaye K ve enerji E girdilerine bağlı olarak tanımlanmaktadır. $A(k, e)$ denklemi, teknolojik gelişmenin sermaye veya enerji yönünde içsel olarak değişim gösterdiğinin matematiksel ifadesidir. Bu ifade teknik değişimin hangi girdiye yönlendirildiğini basit bir göstergesidir.

Böylelikle enerji türleri arasında ikame edilebilirliğin hesaplanmasını mümkün olmaktadır. Doğru kurulan modellemeler, ikame edilebilirlik hakkında anlamlı sonuçlar sağlayarak ekonomi ve enerji politikalarının etkinliğini arttırmaktadır (Hassler ve Krusell, 2012).

Yönlendirilmiş teknik değişimin, enerji kaynaklarının modellenenebilmesini mümkün kılması üretim fonksiyonlarındaki girdilerin esneklik derecelerinin hesaplanmasında büyük önem arz etmektedir.

$$Y = A[\alpha \cdot K^{-\rho} + \beta \cdot L^{-\rho} + (1 - \alpha - \beta) \cdot E^{-\rho}]^{-\frac{1}{\rho}} \quad (3)$$

Enerjiye yönelik yönlendirilmiş teknik değişim, A'nın ya da ağırlıkların enerjiye kaymasıyla temsil edilir. Bu yapıdan Allen-Uzawa ya da Hicks-McFadden ikame esneklikleri türetilir.

Geleneksel Cobb-Douglas üretim fonksiyonunda, üretim faktörleri arasında esneklik değerleri hesaplanmasına rağmen sabit ikame esnekliği varsayımı girdilerin katkılarını homojen kabul ederek sınırlamaktadır (Cobb ve Douglass, 1928). Dolayısıyla Cobb-Douglas fonksiyonu üretim süreçlerinde karşılaşılan karmaşık ve katmanlı yapının içeriğini tam olarak açıklayamamaktadır.

Cobb-Douglas fonksiyonunun sınırlılığı, faktörler arasında ikame esnekliklerinin farklı değerler alabileceği modellemelerin mümkün olduğu CES (Constant Elasticity of Substitution) fonksiyonlarının gelişimine yol açmıştır (Arrow vd., 1961). Üretim fonksiyonlarındaki girdiler arası ikame esnekliklerinin birden farklı olabileceği kabul edilerek, Cobb-Douglas üretim fonksiyonunun varsayımları esnetilmiştir. Arrow vd. (1961) ekonomik sistemlerin tam olarak tahmin edilememesi problemini ortadan kaldırmak için üretim süreçlerinin daha esnek bir şekilde değerlendirilebildiği, esnekliğin yine sabit olduğu fakat sıfırdan farklı olduğu varsayımlarına dayanarak yeni ve daha gerçekçi bir CES fonksiyonunu ortaya koymuşlardır. Farklı sektörlerdeki işgücü ve sermaye ilişkisini açıklayan ikame esnekliğini daha etkin bir biçimde yansıtmayı, modelin uluslararası ticaret ve ekonomik büyüme modellemelerinde daha fazla kullanılmasına yol açarak büyük bir etki yaratmıştır. Esnekliğin sıfırdan farklı olduğu varsayımı, üretim fonksiyonlarının farklı ekonomik koşullar karşısında etkinliğini artırarak daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini mümkün kılmıştır. Bu esnek yapı sayesinde pek çok farklı ampirik uygulamanın önü açılmıştır (Uzawa, 1962; Klump ve de La Grandville, 2000). Modellemeler gelişen literatür ile gelir dağılımı eşitsizliğinin hesaplanmasında, enerji ve çevre ekonomisi modellemelerinde de sıklıkla kullanılmıştır. Bahsedilen bu özelliklerine rağmen CES fonksiyonlarının, girdiler arasındaki hiyerarşik yapıyı ve farklı ikame ilişkilerini yeterince açıklayamayabilir. Özellikle, enerji sektöründeki farklı enerji türlerinin ikame esnekliklerine ek olarak üretim sürecinde enerji kaynaklarının kullanım oranlarının farklı olması bunun nedeni olarak ileri sürülebilir.

1973 yılındaki petrol krizi sebebiyle fiyatlarda meydana gelen ani ve büyük artışlar ekonomik durgunluğu beraberinde getirmiştir. Toplam çıktının bu durgunluktan nasıl etkilendiğinin hiyerarşik bir yapıda katmanlı olarak incelenmesi Nested (iç içe geçirilmiş) CES fonksiyonları ile mümkün olmuştur. Yaşanan petrol krizinin ardından, enerji girdilerinin diğer üretim faktörleriyle nasıl etkileşimde bulunduğu modellemesinde kullanılmasıyla birlikte bu modellemeler karbon emisyonlarının düşürülmesine ilişkin politikaların maliyetlerinin belirlenmesinde büyük rol oynamıştır (Manne vd., 1995).

1973 sonrası özellikle petrole bağımlılığı yüksek olan sanayi ülkelerinde yakıt kıtlığı, ekonomik durgunluk, fiyat artışları gibi sonuçlar neticesinde üretim maliyetleri artmış ve stagflasyon derinden hissedilmiştir. Sanayi ülkelerinin dışında fosil yakıtların yoğun bir biçimde kullanıldığı ülkelerde de yaşanan enerji krizleri ekonomik büyüme üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkarmıştır. İfade edilen bu durumlar enerji girdilerinin önemini arttırmıştır. Nested CES fonksiyonları, enerji girdilerinin ekonomi ve üretim sürecindeki karmaşıklığı etkin bir biçimde açıklayarak, literatürde önemli bir yere sahip olmuştur.

Bu çalışmada da kullanılacak olan nested CES üretim fonksiyonları, farklı enerji kaynaklarının modellenmesinde ve yönlendirilmiş teknik değişimin analizinde hem önemli avantajlar sağlamakta hem de elde edilecek olan ikame esnekliklerine ilişkin değerlerin güvenilirliğini arttırmaktadır. Nested CES hesaplamalarına ilişkin modellerde üretim girdileri arasında hiyerarşik bir yapı kurmuş ve farklı ikame esnekliklerinin birbirlerinden bağımsız bir şekilde hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Böylelikle modellemelerin istenilen biçimde alt gruplar halinde yapılması ve bu alt gruplara ilişkin ikame esnekliklerinin hassas bir biçimde ölçülmesi mümkün olmuştur.

Nested CES üretim fonksiyonlarındaki bu özellik, enerji politikalarının etkinliğinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde büyük avantaj sağlamaktadır. Özellikle üretim sürecinde enerji kaynaklarında planlanan dönüşümün ne kadar ikame edilebilir olduğuna ilişkin politika yapıcılara çok önemli parametreler sunmaktadır. İklim değişikliği politikalarının gerçekçi bir çerçevede değerlendirilmesi ve bu doğrultuda politikaların belirlenmesinde yönlendirilmiş teknik değişim büyük önem arz etmektedir (Acemoğlu vd., 2012; Hassler ve Krusel, 2012). Nested CES fonksiyonları ile ilgili yapılan ampirik uygulamalar, elde edilen esneklik değerleri ve yönlendirilmiş teknik değişim, enerji kaynaklarının yönetilmesinde kritik öneme sahip sonuçlar sunmaktadır.

Çalışmanın kalan kısmında literatür, uygulama, sonuç ve öneriler kısımları yer almaktadır, literatür kısmında çalışmalar detaylı bir biçimde analiz edilip, kurulan CES yapılarına ilişkin modellemeler ve sonuçları açıklanmıştır. Uygulama kısmında analiz edilen ülke için gerekli istatistiki bilgiler paylaşıp takip edilecek yöntem modeller tanıtılmıştır. Sonrasında ise gerekli süreçler açıklanıp farklı nest yapıları sonuçları paylaşılmıştır. Sonuç ve öneriler kısmında ise ampirik uygulamalar sonucunda elde edilen değerler açıklanmış ve öneriler sunulmuştur.

2. Literatür

Yönlendirilmiş teknik değişim literatürde hem tek başına hem de enerji kaynaklarının üretim sürecindeki rolü ile literatürde oldukça fazla tartışılan konulardan birisi olarak yer almaktadır. Çevresel kaygıların ve enerji merkezli krizlerin her geçen gün daha fazla hissedilmesi bu çalışmaların sayısını ve yoğunluğunu arttırmaktadır. Bu çalışmaların temelinde üretim süreçlerinde enerji kaynaklarının etkin bir biçimde kullanılması amaçlanmaktadır. Enerji kaynaklarının, ekonomi modellemelerinde içsel olarak yer aldığı öncü çalışmalar temel oluşturarak ampirik uygulamaların ne kadar farklılaştırılabileceğini göstermiştir.

Yönlendirilmiş teknik değişimin Nested CES fonksiyonları kullanılarak analiz edildiği çalışmalarda farklı modellemelerin kullanıldığı görülmektedir. Kemfert ve Welsch (2000), Almanya Endüstrileri'ni 1970-1988 dönemi için analiz ettiği çalışmada, esneklik değerlerinin “standart” esnekliklerden ortalama olarak daha yüksek ve bire yakın olduğundan, daha düşük vergi oranları ve vergi gelirleri ve daha istikrarlı bir gelir/GSYİH oranı elde etmiştir. (KE)L, (KL)E ve (EL)K nest yapılarının kullanıldığı çalışmada, vergi gelirinin işgücü maliyetlerini azaltmak için kullanılması durumunda, daha düşük gelir, istihdam ve GSYİH üzerinde daha az olumlu (ancak yine de olumlu) bir etki olacağı tespit edilmiştir.

Acemoğlu vd., (2012) yönlendirilmiş teknik değişimi çevresel etmenler üzerinden inceleyen ve bu açıdan temel eserlerden birisi olarak öne çıkmaktadır. Çevre politikaların ve karbon vergilerinin ekonomik büyüme ve yönlendirilmiş teknik değişim üzerindeki etkiler teorik ve ampirik olarak incelenmiştir. Yapılan analizlerin gelişmiş ülkeler özelinde yoğunlaştığı çalışmada simülasyon tekniklerinden de faydalanılmıştır. Böylelikle farklı politikaların ve senaryoların uzun vadeli etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular kısmında, çevre politikalarının etkinliğinin, yönlendirilmiş teknik değişime bağlı olduğu sonucu elde edilmiştir. Karbon

vergilerinin, destekleyici politikalar ile beraber çevre dostu teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Öne çıkan bu sonuçlar, politika önermeleri ve teorik yaklaşım çalışmaya referans niteliği kazandırmıştır.

Hassler vd., (2020), enerji kıtlığının ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın yönlendirilmiş teknik değişim ile olan ilişkisini analiz etmiş ve enerji kıtlığının teknolojik gelişmeyi girdiler açısından nasıl yönlendirdiğini Nested CES fonksiyonları ile tahmin etmişlerdir. Enerji kaynaklarının kıtlığı ve enerji politikalarına duyarlılığın yüksek olduğu gelişmiş ülkeler üzerinde çalışma yoğunlaşmıştır. Modeldeki parametreler detaylı bir biçimde ampirik bulgular neticesinde kalibre edilmiştir. Kalibre edilen bu bulguların farklı enerji politikaları ve senaryoları karşısında ekonomik etkileri incelenmiştir. Enerji kıtlığının, yenilenebilir enerji teknolojilerinde gelişimi teşvik ettiği ve uzun vadede ekonomik sürdürülebilirliği desteklediği ortaya konmuştur. Teknik değişimin yönlendirilmesinde kaynak kıtlığının öneminin vurgulandığı bu çalışma enerji ve çevre politikalarının birlikte ele alınmasının avantajlarını da vurgulamaktadır.

Sato (1967), üretim sürecinde işgücü ve sermaye dışında girdiler birbirleriyle olan etkileşimini ve birbirlerini ikame etme oranlarını analiz etmek için çok katmanlı bir yaklaşım ortaya koymuştur. Normal CES fonksiyonuna enerji girdisini de dahil edilerek ikame esnekliğinin hiyerarşik bir yapıda analiz edilmesinin mümkün olduğunu ifade edilmiştir. Artan üretim çeşitliliği, artan bir şekilde enerjiye olan bağımlılık giderek güçlenmiştir. Diğer üretim fonksiyonları gibi Sato'nun ortaya koyduğu Nested CES modelinde farklı girdilerinin kombinasyonlarının mümkün olması daha üst düzey bir etkileşimin analizinde etkin sonuçların elde edilmesinin önünü açmıştır.

Popp (2004), KLE nest yapısını kullanarak 13 bölgeyi (1972-1998) analiz etmiştir. İçsel teknolojik değişim yönteminin kullanıldığı çalışmada sonuçlar, uyarılmış yeniliğin DICE modelinden çıkarılmasının, karbon değişikliği politikalarına uyma maliyetlerini arttırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, bilgi piyasalarının önemli özellikleri, iklim değişikliği sorununu çözmek için tetiklenen teknolojik değişimin potansiyelini sınırlamaktadır. Temel parametreleri kullanarak, uyarılmış yenilik dikkate alındığında optimal bir karbon vergisi altındaki refah oranında iyileşmeler mümkündür. Duyarlılık analizi, bilgi piyasalarının önemli özellikleri göz ardı edildiğinde bu refah kazanımlarının çarpıcı biçimde artabileceğini ortaya koymaktadır.

Bosetti vd., (2006), 12 büyük bölge için geleceğe ilişkin hesaplamalar yapmıştır. 2000-2100 dönemi WITCH modeli ve (KL)E nest yapısı kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yatırımlar kendisi içsel olan ve yatırım yollarının yanı sıra fiyatlara ve diğer ekonomik ve iklimsel değişkenlere (iklim politikası dahil) bağlı olan teknik değişimin dinamiklerine bağlıdır. Modelde belirtilen çeşitli karşılıklı bağımlılık kanalları göz önüne alındığında, bir ülkedeki yatırım kararları diğer ülkelerdekilere bağlıdır.

12 OECD ülkesinin 1978-1996 dönemi için analiz edildiği çalışmada Edwin van der Werf (2008), (KL)E, (KE)L ve LE(K) nest yapılarını tercih etmiştir. İlk olarak sermaye ve emeğin bir CES işlevi kullanılarak birleştirildiği ve daha sonra bu sermaye ve emek bileşiminin ikinci bir CES işlevinde enerji ile birleştirildiği iç içe geçmiş yapının verilere en iyi şekilde uyduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu (KL)E iç içe yapı için, çoğu ülke ve çoğu endüstri için, esnekliklerin her iki yuva için eşit olduğu hipotezi reddedilmemiştir. Bununla birlikte, ikame esnekliklerine ilişkin tahminlerde, ülkelere ve sektörler göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ve bazı modellerde kullanılanlardan daha düşük olduğu görülmüştür. Ek olarak, ikamenin birim esnekliklerini (yani, Cobb-Douglas üretim fonksiyonları) açıkça reddedilmiştir. Teknolojik değişim ile ilgili olarak, anlamlı ve çoğunlukla birbirinden önemli ölçüde farklı olan faktöre özgü büyüme oranları bulunmuştur. Girdiden bağımsız toplam faktör verimliliği artışını

(faktöre özgü teknolojik değişim lehine) ve "yalnızca enerji artırıcı teknolojik değişimi" reddedilmiştir.

Okagawa ve Ban (2008), OECD ülkeleri için CGE analizini kullanarak (KL)E, (KE)L ve LE(K) nest yapılarını analiz etmişlerdir. İklim politikasının CGE modellemesinin güvenilirliğini artırmaya yardımcı olmak için ikame esnekliklerini yeniden tahmin edilmiştir. Enerji girdileriyle yakından ilişkili ikame esneklikleri için, mevcut modellerde varsayılan parametrelerle karşılaştırıldığında, enerji yoğun endüstrilerde daha yüksek, diğer endüstrilerde daha düşük değerlere ulaşılmıştır. Simülasyon sonuçlarını farklı parametrelerle karşılaştırarak, iklim politikasının makroekonomik etkisinin geleneksel parametrelerle potansiyel olarak fazla tahmin edilebileceğini bulunmuştur. Ayrıca, endüstriler arasında CO2 emisyonu azaltma yükünün dağılımında da farklılıklar mevcuttur. İstatistiksel olarak tahmin edilen esneklikleri kullanan (KE)L formülü model, Kyoto'nun %13'lük emisyon azalmasının etkisini (KL)E formülü modelden %9,2 daha fazla değerlendirir.

3. Uygulama

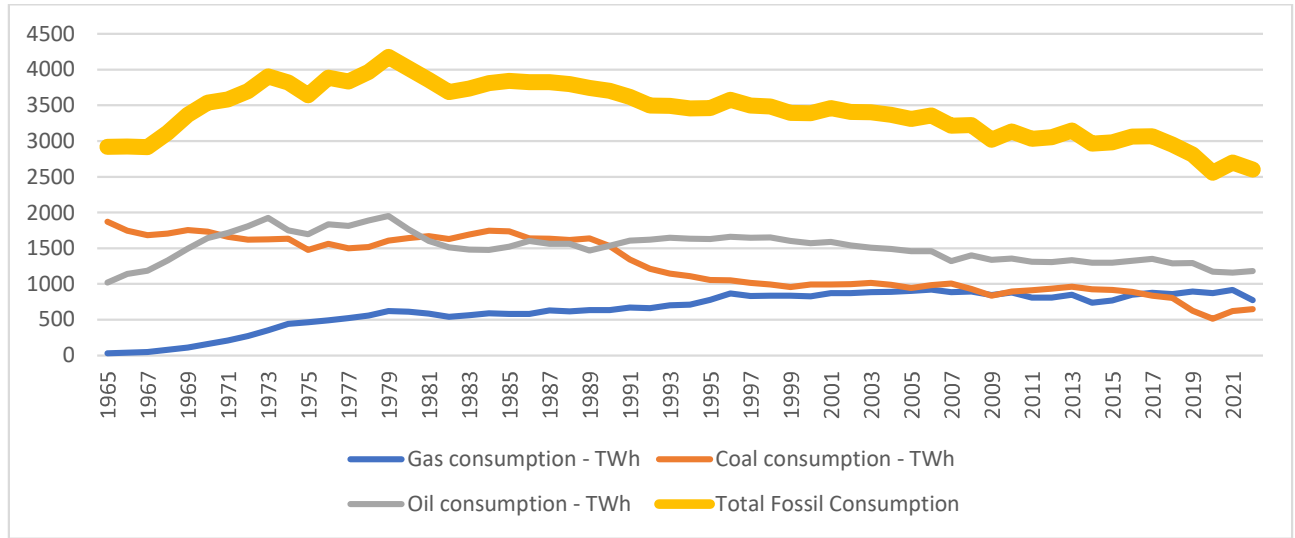
Uygulama kısmında ilk olarak analizde kullanılacak değişkenlerin kullanılan değişkenlere ilişkin bilgiler verilecektir. Sonrasında ise tahmin sürecindeki nested CES modellerine ait ampirik bulgular ifade edilip, değerlendirilecektir.

Tablo 1. Tahmin Sürecinde Kullanılan Değişkenler

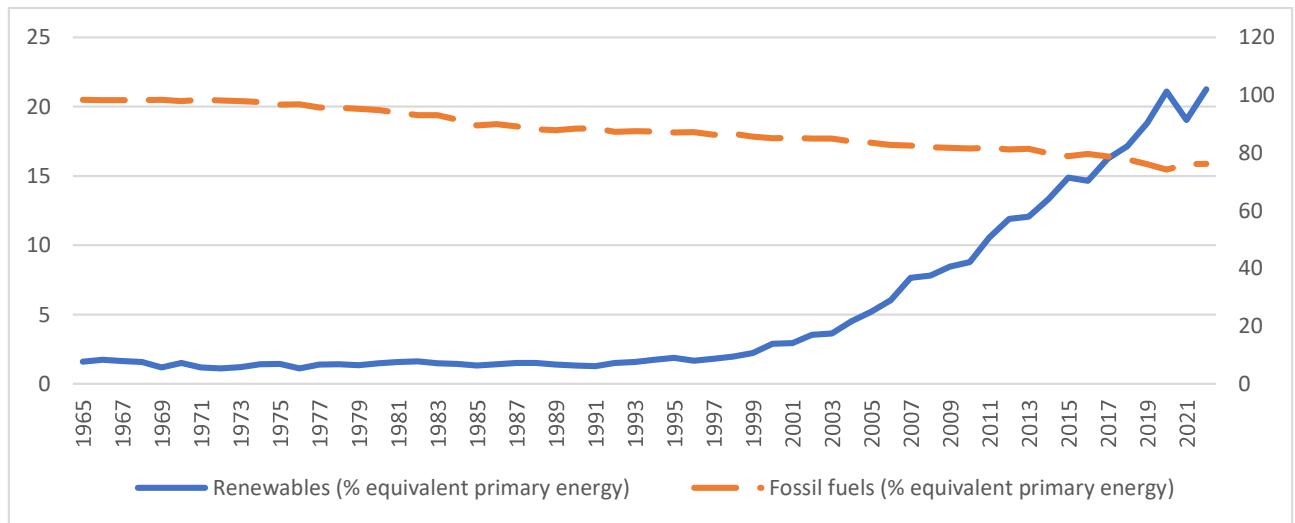
Değişken	Kaynak	Birim
Toplam Çıktı (y)	EUKLEM	Toplam Çıktı / Fiyat Endeksi (2015)
Sermaye (k)	EUKLEM	Sabit Sermaye / Fiyat Endeksi (2015)
İşgücü (l)	Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO)	İşgücüne Katılım Oranı
Fosil Enerji (e)	Our World in Data	Fosil Yakıttan Elde Edilen Birincil Enerji Tüketim Payı Oranı
Yenilenebilir Enerji (re)	Our World in Data	Yenilenebilir Yakıttan Elde Edilen Birincil Enerji Tüketim Payı Oranı

Tablo 2. Tanımlayıcı İstatistikler

Değişken	Ortalama	Standart Sapma	Medyan	Medyan Mutlak Sapma	Aralık (Maks -Min)	Çarpıklık	Basıklık	Standart Hata
y	92,90	7,80	91,91	10,15	24,29	0,39	-1,23	1,53
k	93,08	7,58	89,69	4,86	23,42	0,86	-0,68	1,49
l	98,22	2,50	98,38	3,62	8,39	0,16	-1,41	0,49
e	104,39	4,35	104,34	5,00	16,47	-0,50	-0,54	0,85
re	57,35	40,19	51,99	48,05	130,67	0,49	-1,12	7,88

Şekil 1. Fosil Enerji Tüketimi

Yönlendirilmiş teknik değişim kapsamında değerlendirildiğinde fosil yakıtlardan, yenilebilir yakıtlara yönlendirilmiş değişim, alt bileşenleri ile birlikte net bir biçimde görülmektedir. 2000 sonrası bu değişimi, politika ekseninde de değerlendirmek gerekmektedir. Teknik ve teknolojik değişim ile daha düşük karbonlu kaynakların kullanımı teşvik edilmiş ve bunun devamlılığını sağlayacak politikalar eşlik etmiştir.

Şekil 2. Birincil Enerji Payı

2000 sonrasında teknolojik gelişmeler neticesinde yenilenebilir kaynaklara geçiş çok net bir biçimde grafiğe yansımıştır. Paralel dönemde fosil yakıtlarda azalma ise yönlendirilmiş değişimi göstermektedir. Bu grafikten yola çıkarak teknik değişimin amacı olduğu ve yönlendirilmiş bir dönüşüm olduğu söylenebilir.

3.1. Tahmin Süreci

Nested CES hesaplamalarına ilişkin kurulacak olan modellerde üretim girdileri arasında hiyerarşik bir yapı kurmak mümkündür. Böylelikle farklı ikame esneklikleri formüllerde gösterildiği üzere bağımsız bir biçimde hesaplanabilir. İstenilen alt yapıların modellenmesi ve hassas ikame esnekliği ölçümü bu şekilde gerçekleştirilmektedir. Tahmin sürecinde modellemenin

tasarım aşamasında, nested CES hiyerarşisi kurarak önce sermaye-emek bileşenini (W_1) sonrasında ise enerji–yenilenebilir enerji bileşenini (W_2) tanımlanacaktır. Bu alt gruplar, kendi ikame parametreleri (ρ_1, ρ_2) ve ağırlıkları (δ_1, δ_2) çerçevesinde hesaplandıktan sonra, üst seviyede birleşme parametresi (ρ, δ) ile nihai üretim fonksiyonu şeklinde modellenecektir.

$$W_1 = [\delta_1 k^{\rho_1} + (1 - \delta_1) l^{\rho_1}]^{1/\rho_1} \quad (4)$$

$$W_2 = [\delta_2 e^{\rho_2} + (1 - \delta_2) re^{\rho_2}]^{1/\rho_2} \quad (5)$$

$$y = \gamma [\delta W_1^\rho + (1 - \delta) W_2^\rho]^{1/\rho} \quad (6)$$

Nested CES üretim fonksiyonunu elde ettikten sonra, bu fonksiyona Levenberg–Marquardt (LM) algoritmasını çalıştırarak parametrik yakınsamaları inceleyeceğiz. LM algoritmasını çalıştırmak için başlangıç vektörü değerleri $\gamma=1.0$, $\delta_1=0.6$, $\delta_2=0.7$, $\delta=0.5$, $\rho_1=-1$, $\rho_2=-1$, $\rho=1$ olarak belirlenmiştir. R Studio istatistik programında “micEconCES::cesEst()” fonksiyonu altında gerçekleştirilecek bu doğrusal olmayan en küçük kareler (NLS) çözümlemesi oluşturulmuştur. Bu fonksiyon, her iterasyonda tahmin parametreleri üzerindeki küçük ayarlamaları hesaplamak için Jacobi matrisi (duyarlılık matrisi) oluşturmaktadır. Bu matrisin satırları, modelin her bir gözleme duyarlılığını; sütunları ise her bir parametrenin fonksiyon değerlerindeki türevini yansıtır. LM algoritması, Gauss–Newton yönteminin parçalı yakınsaklığını ve gradyan inişin esnekliğini birleştirerek, bu Jacobi bilgilerini hem yöney hem de ölçek adımlarında kullanılmaktadır.

3.2. Tahmin Sonuçları

Tablo 5. Yönlendirilmiş Teknik Değişim Sonuçları 1 {y = (e, r), (k, l)}

$$Y_t = \gamma \cdot \left[\alpha (k^{\rho_1} + l^{\rho_1})^{\frac{1}{\rho_1}} + \beta (e^{\rho_2} + (re \cdot e^{gEt})^{\rho_2})^{\frac{1}{\rho_2}} \right] \quad (7)$$

Nest Yapısı, y = (e, r), (k, l)				
Yönlendirilmiş Teknik Değişim Parametresi = e				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
gamma	9,27E+02	2,42E+01	38.322	< 2e-16****
alpha	2,02E+02	6,06E+02	0.334	0.741929
rho1	1,51E+05	2,95E+05	0.513	0.613668
beta	7,44E+02	2,76E+01	26.963	< 2e-16****
rho2	9,38E+02	2,29E+02	4.092	0.000567****
gE	9,72E+00	3,12E+00	3.114	0.005473***
Signif. codes: 0 ‘****’ 0.001 ‘***’ 0.01 ‘**’ 0.05 ‘*’ 0.1 ‘.’ 1				
Residual standard error: 0.472 on 20 degrees of freedom				
Number of iterations to convergence: 30				

İki katmanlı olarak ayrı ayrı ele alınan modelde ((k, l) ve (e, re)), yenilenebilir enerjini zaman içerisinde yönlendirilmiş teknik değişim (gE) ile verim kazandığı görülmektedir. gE’nin anlamlı olması Almanya’da enerji girdisinin teknolojik gelişmeler tarafından desteklendiğini göstermektedir. Beta ve rho2’nin enerji katmanında anlamlı olması, enerji bloğunun çıktıyı güçlü bir biçimde etkilediğini ifade etmektedir. Rho2’nin anlamlı ve pozitif olması ayrıca sermaye ve işgücü arasında kuvvetli bir ikame ilişkisinin olduğunu göstermektedir. k ve l bloğunun Leontief’e yakın olduğu görülmektedir, katsayıları itibariyle katkısı düşüktür.

Tablo 6. Yönlendirilmiş Teknik Değişim Sonuçları 2 {y = (e, r), (k, l)}

Nest Yapısı, y = (e, r), (k, l)				
Yönlendirilmiş Teknik Değişim Parametresi = re				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
gamma	0.93351	0.04071	22.930	7.82e-16****
alpha	0.24436	0.71225	0.343	0.73512
rho1	15.123.135	31.052.357	0.487	0.63154
beta	0.82413	0.06615	12.459	6.99e-11****
rho2	0.40050	0.13537	2.959	0.00777***
gRE	0.03392	0.03135	1.082	0.29220
Signif. codes: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1				
Residual standard error: 0.4996 on 20 degrees of freedom				
Number of iterations to convergence: 33				

Enerji bloğunu temsil eden katsayılar incelendiğinde, çıktı düzeyinin baskın bir şekilde bu blok tarafından etkilendiği görülmektedir. Yenilenebilir enerji (re) teknik değişim terimi (gRE) istatistiksel olarak anlamsızdır. Dolayısıyla yenilenebilir enerji yönlü teknik değişimin yeterli seviyeye ulaştığı söylenemez. $\rho_2 < 1$ olması nedeniyle enerji bloğunun ikame esnekliği yüksektir ve enerji girdileri ile k-l arasında değişimin olduğunu göstermektedir.

Tablo 7. Yönlendirilmiş Teknik Değişim Sonuçları 3 {y = (e, r), (k, l)}

Nest Yapısı, y = (e, r), (k, l)				
Yönlendirilmiş Teknik Değişim Parametresi = e + re + k + l				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
gamma	0.953424	0.145607	6.548	4.97e-06****
alpha	0.863604	4.424.997	0.195	0.848
rho1	150.112.873	606.166.294	0.248	0.807
beta	0.677370	0.374179	1.810	0.088*
rho2	1.112.365	1.003.230	1.109	0.283
gK	0.001457	216.011.896	0.000	1.000
gL	0.002338	216.010.543	0.000	1.000
gE	0.007964	216.010.724	0.000	1.000
gRE	-0.010118	216.013.963	0.000	1.000
Signif. codes: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1				
Residual standard error: 0.5135 on 17 degrees of freedom				
Number of iterations to convergence: 31				

Bütün üretim faktörlerinin ayrı ayrı olacak şekilde teknik değişiminin hesaplandığı bu model yapısında her değişken için teknik değişim tespit edilmesine rağmen parametreler anlamsız çıkmıştır. Diğer kurulan modellerden elde edilen sonuçlarda olduğu gibi, enerji bloğunun model içerisindeki çıktısı yüksek düzeyde olsa da istatistiksel olarak güven düzeyi zayıftır. Literatürde incelenen çalışmalarda da görüldüğü üzere, birden fazla üretim faktörüne yönelik yönlendirilmiş teknik değişim aynı anda hesaplandığı analizlerinde bu tarz durumlarla karşılaşılmaktadır. Bütün teknik değişim parametrelerinin modellendiği çalışmalarda anlamlı ve güven düzeyi yüksek sonuçlar elde etmek beklenen bir durum değildir. Kurulan diğer iki modele oranla modelin kapsamının genişletilmesi katsayı belirsizliklerinin artmasına neden

olmuştur. Beklendiği üzere standart hata terimleri çok büyük çıkmış ve üretim faktörleri arasında belirsizlik tespit edilmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Sunulan üç farklı ekonometrik modellerin analizlerinde teknik değişimin katsayıları incelenmiştir. Almanya'nın üretim yapısının incelendiği bu çalışmada elde edilen parametreler, özellikle ekonomik büyüme, sürdürülebilir kalkınma ve enerji politikalarının yönlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu parametreler politika hedeflerine ulaşmak için yönlendirilmiş teknik değişim stratejileri kritik öneme sahip olacaktır.

Elde edilen parametreler değerlendirilirken Almanya'nın üretim yapısında enerji faktörünün güçlü bir unsur olduğu yapılan üç analizde de ortaya çıkmıştır. Avrupa'nın en büyük ve nitelikli sanayi sektörlerinin yer aldığı Almanya'da enerji verimliliği ve tasarrufuna ilişkin gerçekleştirilen ar-ge ve yatırım harcamalarının ekonomik performansı desteklediği ve etkinliğe katkı sağladığı görülmektedir.

Analizler sonucu elde edilen sonuçlar, yenilenebilir enerji yönlü teknik değişimin varlığını kanıtlamakla beraber henüz istenilen düzeyde gerçekleşmediğini de göstermektedir. Özellikle son yıllarda büyük yatırımlar gerçekleştirilmesine rağmen istenilen düzeyde sonuç alınamaması bir problem olarak değerlendirilmektedir. Bunun nedeni olarak ise çok yüksek maliyetleri, yenilenebilir enerjinin öngörülebilmesi nedeniyle ortaya çıkan belirsizlikleri, sektörlerde beklenen enerji dönüşümünün bir türlü istenilen düzeyde gerçekleşmemesi gösterilebilir.

Yenilenebilir enerji yönlü teknik değişim politikalarının etkinliğinin sağlanması, büyüme potansiyelini arttırarak, pek çok çevresel anlaşmayla hedeflenen iklim politikalarının uygulanabilirliğine de katkı sağlamaktadır.

Paylaşılan elastikiyet ve ikame esnekliği bulguları, üretim süreçlerinde girdiler arasındaki yönlendirilmiş teknik değişimin ne denli kritik olduğunu gösteriyor. Enerji ve yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki yüksek ikame esneklik değerleri temiz teknolojilere geçişin Ar-Ge teşvikleriyle yönlendirilebileceğini işaret etmektedir (Acemoglu vd., 2012; Popp, 2010). Bu doğrultuda, karbon vergilerinin yanı sıra temiz enerji inovasyonuna ayrılan kamu ve özel Ar-Ge sübvansiyonları, yeni teknolojilerin hızla ölçeklenmesini sağlayacak şekilde eşzamanlı olarak uygulanmalıdır (Aghion vd., 2016). Özellikle fosil yakıtlara dayalı üretim süreçlerinde karşılaşılan yapısal bağımlılıklar, birinci alt kümedeki sermaye-emek grubu ile enerji grubu arasında neredeyse sifıra yakın ikame esnekliği bulgusu ile örtüşmektedir. Bu durum, enerji kullanımında ortaya çıkan dalgalanmaların ya da fosil yakıt fiyat şoklarının ekonomideki bütün sektörleri doğrudan etkilediğini ve alternatif enerji altyapısı olmadan üretimin sürdürülebilirliğinin tehlikeye girdiğinin göstergesidir (Sovacool, 2017; Jaffe vd., 1999). Uzun vadede, piyasaların sadece karbon vergisi gibi tek taraflı fiyat sinyallerine değil, çift yönlü politikalara ihtiyacı var. Vergileme ve sübvansiyon dengesinin, temiz enerji teknolojilerine yönelik yenilikçiliği besleyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ar-Ge harcamalarına yönelik vergi indirimi ve araştırma kredileri, ikinci aşamada ticarileşme ve ölçek ekonomilerinden yararlanmayı kolaylaştıran alım garantileri veya “yenilenebilir enerji sertifikaları” ile bunlara örnek olarak sunulabilir (Parry vd., 2012; Haas, 2019). Bu kombinasyon, hem şirketlerin Ar-Ge'ye yatırım yapma isteklerini hem de temiz teknoloji pazarını büyütme dinamiklerini aynı andaki güçlü piyasa büyüklüğü etkisiyle desteklemesi öngörülmektedir.

Birinci alt kümedeki (sermaye-emek) ikame esnekliği parametrelerinin anlamlı çıkmaması, işgücü-sermaye dengelerinde teknoloji yönelimli reformun yavaş ilerlediğini düşündürüyor (Acemoglu ve Restrepo, 2018). Bu alanda, beceri geliştirme programları ve işgücünün

dönüşüm maliyetlerini karşılayacak yeniden eğitim destekleri, teknolojik değişimin işgücü piyasasına yansımalarını olumlu etkileyecektir (Autor vd., 2020). Yönlendirilmiş teknik değişimin etkinliği, müdahalenin zamanlamasıyla da doğrudan ilişkili. Modellemede görüldüğü üzere geç müdahale, dönüşümü yavaşlatıp daha uzun adaptasyon süreçleri gerektiriyor; oysa etkin ve koordineli politikalar, temiz teknolojilerin yayılımını kısaltarak ekonomik büyümeyi destekler (Acemoglu vd., 2012). Son olarak, çok paydaşlı yönetim mekanizmaları kurmak önem taşımaktadır.

Modellemesi yapılan nested CES fonksiyonları ve elde edilen ampirik bulgular doğrultusunda, enerji türleri (fosil ve yenilenebilir) anlamlı ve kuvvetli bir ikame ilişkisinin olduğu görülmüştür. Fakat aynı durum sermaye ve emek için söylenememektedir. İlk nest yapısından elde edilen sonuçlar, yönlendirilmiş teknik değişimin enerji türleri arasında olduğunu gösterirken, ikinci nest yapısında üretim faktörleri arasında derinlikleri olan bir yönlendirilmiş teknik değişimin olmadığını ortaya koymaktadır. Enerji merkezli yönlendirilmiş teknik değişimin, daha geniş geniş üretim faktörlerine etki edebilmesi için yapısal müdahalelerin gerekli olduğu açıktır.

Kaynakça

- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2018). The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American economic review*, 108(6), 1488-1542.
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American economic review*, 102(1), 131-166.
- Aghion, P., Dechezleprêtre, A., Hemous, D., Martin, R., & Van Reenen, J. (2016). Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry. *Journal of Political Economy*, 124(1), 1-51.
- Allen, R. G. D. [1938], *Mathematical Analysis for Economists*, London: Macmillan.
- Arrow, K. J., Chenery, H. B., Minhas, B. S., & Solow, R. M. (1961). Capital-labor substitution and economic efficiency. *The review of Economics and Statistics*, 225-250.
- Autor, D., Goldin, C., & Katz, L. F. (2020, May). Extending the race between education and technology. In *AEA papers and proceedings* (Vol. 110, pp. 347-351). 2014 Broadway, Suite 305, Nashville, TN 37203: American Economic Association.
- Bosetti, V., Carraro, C., Galeotti, M., Massetti, E., & Tavoni, M. (2006). A world induced technical change hybrid model. *The Energy Journal*, 27(2_suppl), 13-37.
- Cobb, C. W., & Douglas, P. H. (1928). A theory of production. *The American Economic Review*, 18(1), 139-165.
- Haas, T. (2019). Comparing energy transitions in Germany and Spain using a political economy perspective. *Environmental innovation and societal transitions*, 31, 200-210.
- Hassler, J., Krusell, P., & Olovsson, C. (2012). *Energy-saving technical change* (No. w18456). National Bureau of Economic Research.
- Hassler, J., Krusell, P., Olovsson, C., & Reiter, M. (2020). On the effectiveness of climate policies. *IIES WP*, 53, 54.

- Hicks, J. (1970). Elasticity of substitution again: substitutes and complements. *Oxford economic papers*, 22(3), 289-296.
- Jaffe, A. B., Newell, R. G., & Stavins, R. N. (1999). Energy-Efficient Technologies and Climate Change Policies: Issues And Evidence.
- Kemfert, C., & Welsch, H. (2000). Energy-capital-labor substitution and the economic effects of CO2 abatement: Evidence for Germany. *Journal of Policy Modeling*, 22(6), 641-660.
- Klump, R., & de La Grandville, O. (2000). Economic growth and the elasticity of substitution: Two theorems and some suggestions. *American Economic Review*, 91(1), 282-291.
- Manne, A., Mendelsohn, R., & Richels, R. (1995). MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. *Energy policy*, 23(1), 17-34.
- McFadden, D. (1963). Constant elasticity of substitution production functions. *The Review of Economic Studies*, 30(2), 73-83.
- Okagawa, A., & Kanemi, B. A. N. (2008). *Estimation of substitution elasticities for CGE models* (No. 08-16).
- Parry, I. W., Norregaard, J., & Heine, D. (2012). Environmental tax reform: principles from theory and practice. *Annu. Rev. Resour. Econ.*, 4(1), 101-125.
- Popp, D. (2004). ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming. *Journal of Environmental Economics and management*, 48(1), 742-768.
- Sato, K. (1967). A two-level constant-elasticity-of-substitution production function. *The Review of Economic Studies*, 34(2), 201-218.
- Sovacool, B. K. (2017). Reviewing, reforming, and rethinking global energy subsidies: towards a political economy research agenda. *Ecoogical Economics*, 135, 150-163.
- Uzawa, H. (1962). Production functions with constant elasticities of substitution. *The review of economic studies*, 29(4), 291-299.
- Van der Werf, E. (2008). Production functions for climate policy modeling: An empirical analysis. *Energy economics*, 30(6), 2964-2979.

