

Teknolojik Gelişim ile Ekolojik Ayak İzi İlişkisi: OECD Ülkeleri Uygulaması

Ergün Aktürk, Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi, İktisat Teorisi Anabilim Dalı,
eakturk@atauni.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6925-1850.

Sena Gültekin, Araştırma Görevlisi, Atatürk Üniversitesi, İktisat Teorisi Anabilim Dalı,
sena.gulteekin@atauni.edu.tr ORCID: 0000-0002-1860-8802

Öz

Günümüzde özellikle gelişmemiş ve gelişmekte olan ekonomiler için daha yüksek ekonomik büyüme ile kirlenmenin de artması çevre dostu büyümenin sağlanmasının önemini artırmaktadır. Bu nedenle ekolojik ayak izini sınırlandıracak önlemler aranmaya ve çeşitli teknolojik adımlar atılmaya başlanmıştır. Ekolojik ayak izi ve teknoloji arasındaki ilişki son dönemde oldukça önem kazanmış ve bir dizi çalışma yapılmaya başlanmıştır. Yalnız bu çalışmalardan yalnızca birkaçı OECD ülkelerini incelemiştir. Bu nedenle, mevcut çalışmada bu ilişki 1997-2020 döneminde OECD ülkeleri için MG ve RC modelleri kullanılarak incelenmiştir. Analiz sonucuna göre uzun dönemde teknolojik inovasyon, doğal kaynak gelirleri ve GSYİH artışının ekolojik ayak izini artırdığı, yenilenebilir enerji kullanımının ise azalttığı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Ekolojik ayak izi, Teknoloji, OECD*

JEL Kodları: *Q01, Q55, Q57, O32*

The Relationship between Technological Development and Ecological Footprint: OECD Countries Implementation

Abstract

Nowadays, the increase in pollution with higher economic growth, especially for underdeveloped and developing economies, increases the importance of ensuring environmentally friendly growth. For this reason, measures to limit the ecological footprint have begun to be sought and various technological steps have begun to be taken. The relationship between ecological footprint and technology has gained importance recently and a number of studies have begun to be carried out. However, only a few of these studies examined OECD countries. Therefore, in the current study, this relationship was examined using MG and RC models for OECD countries in the period 1997-2020. According to the results of the analysis, it was found that technological innovation, natural resource revenues and GDP growth increased the ecological footprint in the long term, while the use of renewable energy decreased it.

Key Words: *Ecological footprint, Technology, OECD*

JEL Codes: *Q01, Q55, Q57, O32*

1 Giriş

Biyçeşitlilik, yaşamın çeşitliliği ve karada, suda, denizde ve havada her seviyedeki canlılar arasındaki genler, popülasyonlar, türler ve ekosistemler arasındaki etkileşimlerdir. Gıda, yem, ilaç, enerji ve lif gibi insan refahı için gerekli kaynaklar mangrov bataklıkları, ormanlar, sulak alanlar, otlaklar ve okyanuslar gibi karasal, tatlı su ve deniz ekosistemleri tarafından sağlamaktadır. Biyçeşitlilik iklimi, doğal tehlikeleri, aşırı olayları, hava kalitesini, tatlı suyun miktarı ve kalitesini, tozlaşmayı, toprağı, okyanus asitlenmesini, yaşam alanlarının oluşturulmasını ve bakımını ve tohumların, zararlı canlıların ve hastalıkların dağılımını düzenlemektedir. Karasal, tatlı su ve deniz sistemlerinin bozulmasının itici güçleri olarak toprak ve deniz kullanımındaki değişiklikler, bitki ve hayvanların aşırı tüketimi, iklim değişikliği, kirlilik ve istilacı yabancı türler sıralanabilmektedir. Özellikle son 50 yılda biyçeşitlilik kaybının ve ekosistemlerin hizmetlerinin bozulmasının doğrudan etkenleri, hızlı ekonomik büyüme, nüfus artışı, uluslararası ticaret ve teknoloji tercihleri nedeniyle artan enerji, gıda ve diğer malzemelere olan taleptir. Bir milyon bitki ve hayvanın nesli tükenme tehlikesiyle karşı karşıya kalmıştır. Kuşların, memelilerin, amfibilerin, sürüngenlerin ve balıkların %1-2,5'inin nesli tükenmiş, nüfus bolluğu ve genetik çeşitlilik azalmış ve türler iklimsel olarak belirlenen habitatlarını kaybetmiştir (WWF, 2022).

Küresel ısınma günümüzde en önemli çevre problemlerinden birini oluşturmaktadır. Özellikle sanayileşme ile beraber son dönemde artan fosil yakıt kullanımı ve aşırı tüketim ile beraber karbon emisyonundaki artış ısınmanın şiddetini de artırmaktadır (Yasmeen et al., 2022). Dünya halihazırda sanayi öncesi çağlardan bu yana 1,2 derece ısınmıştır. İklim değişikliği bugüne kadar biyçeşitlilik kaybının baskın nedeni olmasa da ısınma 2°C'nin altında ve tercihen 1,5°C ile sınırlanmadığı sürece, iklim değişikliği biyolojik çeşitlilik kaybının ve ekosistem hizmetlerinin bozulmasının baskın nedeni haline gelmesi muhtemeldir. Sıcak su mercanlarının yaklaşık %50'si çeşitli nedenlerden dolayı halihazırda yok olmuştur. 1,5°C'lik bir ısınma sıcak su mercanlarının %70-90'ının kaybına neden olacak, 2°C'lik bir ısınma ise %99'dan fazla bir kayba neden olacaktır. 1,5°C'ye ulaşmak için küresel emisyonların 2030 yılına kadar mevcut emisyonlardan yaklaşık %50 daha az olması ve yüz yılın ortasına kadar net sıfır olması gerekmektedir. Ancak bu hedefe ulaşılma ihtimali oldukça düşük görünmektedir (WWF, 2022).

İklim değişikliği ve biyoçeşitlilik kaybı sadece çevresel bir sorun değil, aynı zamanda ekonomik, kalkınma, güvenlik, sosyal, ahlaki ve etik bir sorundur (WWF, 2022). İklim ve çevresel koşulların insan hayatını her açıdan etkiliyor olması konunun çeşitli açılardan incelenmesini elzem kılmaktadır. Bunu sağlayabilmek adına geliştirilen konseptte doğanın kendini yenileme süreci ekolojik ayak izi ve mevcut biyokapasite ile ifade edilmektedir. Ekolojik ayak izi, bir nüfusun tükettiği yenilenebilir kaynakları sürdürülebilir bir temelde üretmek ve mevcut teknolojiyi kullanarak ürettiği atığı emmek için ne kadar biyo-üretken alana (toprak veya su) ihtiyaç duyacağını göstermektedir. Biyokapasite ise belirli bir alanda (örneğin ekilebilir arazi, mera, orman, verimli deniz) mevcut olan biyo-üretken arzı ölçmektedir. Ekolojik ayak izinin biyokapasiteden yüksek olduğu durumlarda ekolojik açıktan söz etmek mümkündür (Schaefer et al., 2006).

Sanayi Devrimi sonrasında hızlanan ekonomik büyüme yanında çevresel bozulmayı da getirmiştir. Bu sorunların temel nedenleri arasında büyük endüstriyel atıklar, doğal kaynakların aşırı kullanımı ve fosil yakıtlara dayalı enerji kullanımı bulunmaktadır (Xu et al., 2022). Özellikle gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkeler ekonomik büyümelerini önceliklendirerek çevresel bozulmayı ikinci plana itmişlerdir (Jahanger et al., 2022).

Sürdürülebilir kalkınma kavramı, doğal sistemin yenilenme kapasitesini sürdürerek insani gelişme hedeflerine ulaşmayı vurguladığından, dünyanın kendini yenileme kapasitesinin sürekli azalması sürdürülebilir kalkınma için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bununla birlikte, ekolojik ayak izindeki önemli bir artış, mevcut üretim ve tüketim kalıpları nedeniyle sürdürülebilir kalkınmaya ulaşmayı imkânsız hale getirmektedir (Dai et al., 2023). Teknoloji ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkinin teorik temeli “ekolojik modernleşme teorisi” ile açıklanmaktadır. Bu teori, ulusların düşük gelişmişlik seviyesinden orta gelişmişlik seviyesine geçişinin çevre kirliliğini artırdığını, çünkü bu geçiş sırasında ulusun büyümeyi genişletmeye öncelik verdiğini öne sürmektedir. İleri aşamaya geçişte ise çevre dostu teknolojik yeniliklere öncelik verilmesiyle çevresel kalite artmaktadır. Diğer taraftan, yenilikler tamamen büyüme odaklı olursa, ekonomik genişleme yoğun enerji tüketimi nedeniyle düşük çevre kalitesiyle sonuçlanmaktadır. Bir diğer teori olan “geri tepme etkisi”nde ise teknolojik gelişme ile yaşanan verimlilik artışı neticesinde doğal kaynaklara olan talebin azalacağı ve kirliliğin düşeceği ele alınmaktadır (Mazhar et al., 2022).

BM İklim Komisyonu tarafından yapılan teklifte ana odak noktası, çevresel farklılıklar ve enerji güvenliği konusundaki sıkıntılarla mücadele etmek için gerekli olan yeşil hidrojen ve yenilenebilir enerji tüketimini hızlandırmak olmuştur. 2030 yılına kadar teknolojik yeniliklere yatırım ve altyapı geliştirmeyi de içeren daha temiz, alternatif ve yenilenebilir enerji kullanımına yılda yaklaşık 4 trilyon ABD doları ayrılması gerektiği önceden planlanmıştır. Bu sayede 2050 yılına kadar sıfır karbon emisyonu hedefinin yakalanması amaçlanmıştır. Teknolojik inovasyonun, üretkenliğin sürekli artışının ve buna bağlı olarak yaşam standartlarındaki iyileşmenin arkasındaki itici güç olduğu konusunda evrensel bir fikir birliğine ulaşılmıştır (Saqib et al., 2023).

Yeşil ekonomilerin büyümesi ve CO₂ salınımının azaltılması için teknoloji ve yeniliklerin gelişmiş ve etkin kullanımının hayati bir rol oynadığı ortaya koyulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, hibrid teknolojinin ve elektrikli araçların kullanımındaki ilerleme, halihazırda artık madde ve kirlilik seviyesinde daha fazla azalmaya ve hidrojen arabaları, organik fotovoltaikler ve biyoyakıt enerjisinde ilerleme kaydedilmesine yol açmıştır. Bu durum, ekonominin teknoloji ve inovasyon düzeyindeki sağlamlık ve iyileşmenin, yenilenebilir kaynaklar ve yeşil ekonomilerdeki genişlemenin verimli beklentileri anlamına geldiğini göstermektedir (Usman & Hammar, 2021).

Teknolojinin özellikle enerji kullanımındaki çevresel etkileri azalttığı ve ülkeleri daha temiz enerjilere yönlendirdiği görülmektedir. Gelişmiş ülkelerde büyük fonlar gerektiren yüksek teknoloji enerji kaynaklarının kullanılması ile çevresel etkiler azaltılabilirken gelişmemiş ülkelerde üretim hala fosil yakıtlarına ve düşük teknoloji sistemlere dayanmaktadır (Destek & Manga, 2021). Bu nedenle ülkelerin gelişmişlik seviyesine göre çevresel teknolojilere yapılan yatırımlar ve yeni teknolojilerin üretimde kullanılma oranı değişmektedir. Birincisinden dördüncüsüne kadar tüm sanayi devrimleri verimli üretimden başlayarak ilerleyen süreçte daha sorumlu tüketim için yaratıcı ve yıkıcı teknolojilerin benimsenmesini amaçlamaktadır. Bu sayede doğal kaynakların yoğun kullanıldığı sistemlerden daha etkin ve az emisyonlu sistemlere geçişi hedeflemektedir. Bu nedenle, teknolojik gelişmeler ışığında 4. Sanayi Devrimi ile sürdürülebilir büyüme sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda üretilen çevresel teknolojiler ile insan üretim ve tüketiminden kaynaklanan atıkların giderilmesi ve bu tip faaliyetlerin etkilerinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir (Chu, 2022a). Dolayısıyla yeni teknolojiler mevcut teknolojilerin yerini alarak üretimi teşvik etmekte ve çevresel yıpranmayı azaltmaktadır. Yeni teknolojilerin daha hızlı ticarileştirilmesi ve benimsenmesi, sürdürülebilir kalkınma için tatmin edici çözümler sağlayabilmektedir (Rout et al., 2022).

Birçok OECD ülkesi yeraltı suyu kirliliği, iklim değişikliği, aşırı avlanma, endüstriyel üretimlerden kaynaklanan toksik emisyonlar ve tehlikeli atıklar gibi çevresel sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, teknolojik inovasyon kapasitesinin geliştirilmesiyle ekosistemin bütünlüğünün korunması OECD'nin en önemli önceliklerinden biri olmaktadır. Özellikle gelişmiş OECD ülkeleri, ekosistemi korumaya yönelik teknolojileri araştırma, geliştirme ve uygulama konusunda diğer ülkelere göre avantajlara sahiptir (Chu, 2022b). Teknoloji, büyüme, çevre ve politika gibi konular savaşlar, pandemi ve doğal krizler gibi birçok etmenden etkilenmektedir. AR&GE çalışmaları her ne kadar toplumları ve ekonomileri bu tür durumlara karşı daha güçlü hale getirirse de uzun vadede bu tip yatırımların devam ettirilmesi gerekmektedir. Birçok OECD ülkesi pandemi gibi felaketlerle başa çıkabilmesi için bilim, teknoloji ve inovasyona yatırımlarını artıracaklarını duyurmuştur. Bunun dışında OECD ülkeleri teknolojik liderlik yapma amacıyla yeni teknolojilerin geliştirilmesini hedeflemektedir. Aynı zamanda teknolojinin çevre üzerine olan etkilerinin azaltılması ve sıfır karbon hedefine ulaşılması için bir dizi çalışma yapılmaktadır. Bu doğrultuda OECD ülkeleri için yeni bir proje yapılmış ve sıfır karbon emisyonu hedefine ulaşılması için çeşitli politika önerileri sunulmuştur (OECD, 2023).

Literatür incelendiğinde teknolojinin çevresel etkileri üzerinde yapılmış çalışmalar bulunmakla beraber teknolojik gelişmenin çevre üzerindeki etkisi henüz tam olarak ortaya konulamamıştır. Teknolojik gelişme bir yandan çevre kalitesini artırabilecekken diğer taraftan üretim ve büyümeyi artırarak çevreye daha çok zarar verebilme potansiyeline sahiptir. Bununla beraber yapılan çalışmaların oldukça sınırlı olması teknolojik inovasyona ile çevre arasındaki ilişkide önsel bir kabul yapılmasını engellemektedir. Ayrıca konuyla ilgili OECD özelinde sınırlı sayıda çalışma olması, OECD ülkelerinin ciddi oranda kirlilikle karşı karşıya kalması ve OECD ülkelerindeki yeşil teknoloji yatırımları bu alanda incelemeler yapılması ihtiyacını doğurmuştur. Mevcut çalışma ile bu alandaki açığın kapatılması hedeflenmektedir.

2 Literatür Taraması

Son dönemde teknolojik inovasyon ve çevre arasındaki ilişki oldukça fazla tartışılmaya başlanmıştır. Literatür taraması kapsamında hazırlanan Tablo 1'de ekolojik ayak izi ile teknoloji arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar verilmektedir.

Tablo 1: Literatür Taraması

Makale	Değişkenler	Ülke/Model	Sonuç
Ahmad et al., 2020	Ekolojik ayak izi, kişi başına düşen GSYİH, doğal kaynak gelirleri, teknolojik inovasyon (yerleşik ve yerleşik olmayan patentlerin toplam sayısı)	22 adet gelişmekte olan ülke, CS-ARDL	Uzun vadede, doğal kaynaklar ve ekonomik büyüme ekolojik ayak izini artırırken, teknolojik inovasyona çevresel bozulmanın azalmasına yardımcı olmaktadır.
Kihombo et al., 2021	Ekolojik ayak izi, GSYİH, teknolojik inovasyon, finansal gelişme, şehirleşme	9 tane Batı Asya ve Orta Doğu ülkesi, CUP-FM, CUP-BC	Teknolojik gelişme ekolojik ayak izini azaltırken, şehirleşme ve finansal gelişmenin artırdığı bulunmuştur.
Sahoo & Sethi, 2021	Ekolojik ayak izi, hava kalitesi, GSYİH, sanayileşme, nüfus yoğunluğu, kentleşme, enerji tüketimi, yaşam beklentisi, tarım sektörü, hizmet sektörü, sanayi sektörü, teknolojik inovasyon (yerleşik patentlerin toplam sayısı)	10 yeni sanayileşen ülke, AMG, CCEMG	Ekonomik büyüme, sanayileşme, nüfus yoğunluğu, kentleşme, enerji tüketimi, yaşam beklentisi ve tarım sektörü ekolojik ayak izini artırırken, hizmet sektörü ve teknolojik inovasyon düşürmektedir.

Tablo 1 Devamı

Usman & Hammar, 2021	Ekolojik ayak izi, finansal gelişmişlik endeksi, teknolojik inovasyon endeksi, kişi başına düşen GSYİH, yenilenebilir enerji tüketimi, toplam nüfus büyüklüğü	Asya Pasifik Ekonomik İşbirliği ülkeleri, FGLS, AMG, CCEMG	Finansal kalkınma ve yenilenebilir enerji kullanımı çevre kalitesini artırırken, teknolojik yenilik faaliyetleri, ekonomik büyüme ve nüfus büyüklüğü uzun vadede çevre kalitesi üzerinde zararlı etkiye sahiptir.
Destek & Manga, 2021	Karbondioksit emisyonu, ekolojik ayak izi, yenilenebilir enerji tüketimi, yenilenemeyen enerji tüketimi, teknolojik yenilik, finansallaşma	Büyük yük-selen piyasalar (BEM) ülkeleri, CUP-FM, CUP-BC	Teknolojik yeniliğin karbon emisyonlarını azaltmada etkili olduğu ancak ekolojik ayak izi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı bulunmuştur.
Yang et al., 2021	Ekolojik ayak izi, işçi döviz girişleri, finansal gelişme, teknolojik yenilik (patent başvuru sayısına), kişi başına düşen GSYİH, kentsel nüfus, enerji tüketimi	Brezilya, Hindistan, Çin, Güney Afrika, DSUR, FMOLS	İşçi döviz akışı ve finansal gelişmenin çevre kalitesini önemli ölçüde bozduğu, teknolojik yeniliklerin ise ekolojik ayak izi düzeyini azalttığı belirlenmiştir.
Zeraibi et al., 2021	Ekolojik ayak izi, ekonomik büyüme, yenilenebilir elektrik üretim kapasitesi, teknolojik yenilik (yerleşiklerin toplam patent sayısı), finansal gelişme, nüfus artışı	ASEAN ülkeleri, CS-ARDL	Yenilenebilir elektrik üretim kapasitesi ve teknolojik yenilikler ekolojik ayak izini azaltırken finansal gelişme ve ekonomik büyüme ekolojik ayak izini artırmaktadır.
Gupta et al., 2022	Ekolojik ayak izi, hava kalitesi, GSYİH, enerji tüketimi, kentleşme, teknolojik yenilik (patent sayısı), doğal kaynaklar kiralaları nüfus yoğunluğu	Bangladeř, ARDL	Kentleşme, nüfus yoğunluğu ve enerji tüketimi ekolojik ayak izini artırırken, teknolojik yenilikler ve doğal kaynaklar azaltmaktadır.
Yasmeen et al., 2022	Enerji tüketimi, ekolojik ayak izi, doğrudan yabancı yatırım, nüfus yoğunluğu, teknolojik yenilik (patent başvuruları), doğal kaynak gelirleri	52 adet Kuşak ve Yol ülkeleri, CS-ARDL	Ekolojik ayak izinin teknolojik ilerlemeyle azaltılabileceği, doğrudan yabancı yatırımların ise artırdığı bulunmuştur.

Tablo 1 Devamı

Jahanger et al., 2022	Ekolojik ayak izi, toplam doğal kaynak gelirleri, teknolojik yenilikler (patent başvuru sayısı), beşerî sermaye, toplam küreselleşme endeksi, GSYİH, finansal gelişmişlik endeksi	73 adet gelişmekte olan ülke, PMG-ARDL	Teknolojik yeniliklerin ekolojik ayak izini düşürdüğü bulunmuştur.
Xu et al., 2022	Ekolojik ayak izi, teknolojik ilerleme, doğal kaynak gelirleri, doğrudan yabancı yatırım, yenilenebilir enerji kullanımı.	Çin, FMOLS, DOLS, CCR	Teknolojik ilerleme, doğal kaynaklar ve yenilenebilir enerji kullanımı ekolojik ayak izini artırırken, doğrudan yabancı yatırımlar azaltmaktadır.
Mazhar et al., 2022	Ekolojik ayak izi, işçi döviz girişi, teknolojik yenilikler (patent başvuru sayısı), GSYİH, özel sektöre verilen yurt içi krediler, enerji tüketimi, şehir nüfusu	94 ülke, POLS, PSQR	İşçi döviz girişi ve teknolojik yenilikler ekolojik ayak izini azaltmaktadır.
Usman et al., 2022	Ekolojik ayak izi, nükleer enerji kullanımı, yenilenebilir enerji kullanımı, çevre ile ilgili teknolojiler	Pakistan, NARDL	Nükleer enerji kullanımı, yenilenebilir enerji kullanımı ve teknolojinin ekolojik ayak izini düşürdüğü bulunmuştur.
Chu, 2022a	Ekolojik ayak izi, çevreyle ilgili teknolojiler, ticarete açıklık, enerji yoğunluğu, yenilenebilir enerji tüketimi, GSYİH	20 OECD ülkesi, D-KSE FGLS PCSE CS-ARDL	Çevreyle ilgili teknolojiler, ticarete açıklık ve yenilenebilir enerji tüketimi ekolojik ayak izini azaltırken, enerji yoğunluğu ve GSYİH artırmaktadır.
Rout et al., 2022	Ekolojik ayak izi, GSYİH, teknolojik yenilikler (yerleşikler tarafından yapılan patent başvuru sayısı), nüfus yoğunluğu, teknolojik yayılma, yenilenebilir enerji tüketimi, yenilenemeyen enerji tüketimi, finansal gelişim	BRICS ülkeleri, PMG	Teknolojik yayılma ve yenilenemeyen enerji tüketimi uzun vadede çevresel kaliteyi bozarken, yenilenebilir enerji ve teknolojik yenilik çevresel sürdürülebilirliği/kaliteyi iyileştirmektedir.

Tablo 1 Devamı

Hussain et al., 2022	Ekolojik ayak izi, ekonomik politik belirsizlik, enerji yapısı, çevre ile alakalı teknolojik yenilikler, GSYİH, nüfus	BRICS ülkeleri, CS-ARDL, AMG, CCEMG	Ekonomik politik belirsizlik, gelir ve nüfus ekolojik ayak izini artırırken, enerji yapısı ve çevre ile alakalı teknolojik yenilikler azaltmaktadır.
Chu, 2022b	Ekolojik ayak izi, çevreyle ilgili teknolojiler, kayıt dışı ekonomi, ticari açıklık, enerji yoğunluğu, yenilenebilir enerji tüketimi, kişi başına düşen GSYİH	27 OECD ülkesi, Kuantil regresyon	Teknolojik yeniliğin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisinin olumlu, kayıt dışı ekonominin olumsuz bir etki yarattığı bulunmuştur. Ayrıca daha yüksek kayıt dışılık, teknolojik ilerlemenin çevre üzerindeki olumlu etkisini azaltmaktadır.
Saqib et al., 2023	Ekolojik ayak izi, GSYH, çevre teknolojisi (çevreyle ilgili teknolojiler), finansal erişim, yenilenebilir enerji, teknolojik yenilik (toplam patent), finansal katılım	11 gelişmekte olan ülke, CS-ARDL	Teknolojik yenilikler, iklim teknolojileri ve yenilenebilir enerji ekolojik ayak izini azaltırken, ekonomik büyüme ve finansal katılım artırmaktadır.
Dai et al., 2023	Ekolojik ayak izi, ekonomik büyüme, kişi başına yeşil elektrik tüketimini, teknolojik inovasyon (yerleşik ve yerleşik olmayan patentlerin toplam sayısı), nüfus yoğunluğu, demokratik hesap verebilirlik endeksi	ASEAN ülkeleri, CuP- FM ve CuPBC modelleri	Sonuçlar yenilenebilir elektriğin, teknoloji ve demokrasinin ekolojik ayak izini azaltmaktadır. Demokrasi teknolojik yeniliklerin çevre kalitesi üzerindeki olumlu etkilerini de güçlendirmektedir.

Literatür taraması incelendiğinde çalışmaların hepsinin son birkaç yılda yapıldığı ve konuya olan ilginin gün geçtikçe arttığı görülmüştür. Ayrıca OECD ülkeleri için yapılan sınırlı sayıda çalışma bulunmakta ve bu çalışmalar sadece çevresel teknolojileri kapsamaktadır. Bu nedenle mevcut çalışma ile literatürdeki boşluğun doldurulması hedeflenmiştir.

3 Model ve Analiz

1997-2020 döneminde 30 tane OECD ülkesi için kurulan modelde kullanılan değişkenlere dair açıklamalar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Analizde Kullanılan Değişkenler

Değişken	Açıklama	Kaynak
loggef	Kişi başına düşen ekolojik ayak izinin logaritması	Global Footprint Network
logpatent	Yerleşik ve yerleşik olmayan patentlerin toplam sayısının logaritması	Dünya Bankası
logrenew	Yenilenebilir enerji tüketiminin logaritması (toplam nihai enerji tüketiminin yüzdesi)	Dünya Bankası
logrent	Toplam doğal kaynak gelirlerinin logaritması (GSYİH'nin yüzdesi)	Dünya Bankası
loggdp	GSYİH logaritması	Dünya Bankası

Çevre kirliliğinin değerlendirilmesinde bir örnek olarak karbon emisyonlarından literatürde geniş ölçüde yararlanılmıştır. Ancak sürdürülebilir kalkınma açısından bakıldığında, ekolojik ayak izi olarak ekolojik hassasiyetleri ve çevresel sürdürülebilirliği ölçmek için daha uygundur (Saqib et al., 2023). Bazı araştırmacılar CO₂ emisyonlarının ormanlar, toprak, madencilik vb. alanlardaki kirliliği hesaba katmadığını ileri sürmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için mevcut literatürde ekolojik ayak izi önerilmektedir. Ekolojik ayak izi, “orman arazisi, balıkçılık alanları, ekili araziler, karbon ayak izi, otlama arazileri ve yapılaşma arazileri” olmak üzere altı ana alanda çevre üzerindeki toplam insan faaliyetlerini ölçmektedir. Bu nedenle ekolojik ayak izi, çevresel bozulma ve sürdürülebilirliğin daha iyi ve tek bir ölçümünü sağlamaktadır (Usman et al., 2022). Bu nedenle mevcut analizde bağımlı değişken olarak ekolojik ayak izi kullanılmıştır. Bununla beraber literatürle uyumlu olarak teknoloji göstergesi için toplam patent sayısı kullanılmıştır. Diğer değişkenler ise literatürde sıklıkla kullanılan açıklayıcı değişkenlerdir. Analiz kapsamında iki ayrı model kullanılmıştır. Ortalama Grup Modeli (Mean Group-MG) ve Rastgele Katsayı Modeli (Random Coefficient Model-RC) ile uzun dönem ilişkisi ortaya koyulmuştur. Buna göre panel modeli aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

$$\text{loggef} = \alpha_{0i} + \alpha_{1i} \text{logpatent} + \alpha_{2i} \text{logrenew} + \alpha_{3i} \text{logrent} + \alpha_{4i} \text{loggdp} + \epsilon_{it} \quad (1)$$

Model tahminine geçilmeden önce birimler arasında korelasyon olup olmadığı incelenmiştir. Bu kapsamda Breusch-Pagan (1980) tarafından geliştirilen CD_{LM} (Cross-section Dependence Lagrange Multiplier) testi kullanılmıştır. Test sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3: Yatay Kesit Bağımlılık Sonuçları

Test	İstatistik	p değeri
LM	578.8	0.000
LM adj*	6.557	0.000
LM CD*	9.192	0.000

Yatay kesit test sonuçları modelde yatay kesit bağımlılığının olduğunu ortaya koymaktadır. Daha sonra modelin homojenliğinin test edilmesi için Pesaran ve Yamagato (2008) tarafından geliştirilen delta testi uygulanmıştır. Bu test yatay kesitlerden birinde gerçekleşen değişim ile diğer ülkelerin aynı düzeyde etkilenip etkilenmediğini test etmektedir. Homojenlik test sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4: Delta Testi

	İstatistik	p değeri
Delta	20.432	0.000
Delta adj	23.592	0.000

Delta test sonuçları panelin heterojen olduğunu dolayısıyla ülkelerin şoklardan farklı şekillerde etkilendiğini ortaya koymaktadır. Yatay kesit bağımlılığı ve homojenlik test bulgularına göre devam eden süreçte heterojenlik ve yatay kesit bağımsızlığını dikkate alan ikinci nesil yöntemler kullanılacaktır. Durağanlık sınavında, ikinci nesil panel birim kök testlerinden Pesaran (2007) tarafından geliştirilen yatay kesit genişletilmiş Dickey Fuller (CADF) Testi kullanılmıştır. Buna göre t istatistiği değeri mutlak değerinin %5 kritik değeri mutlak değerinden büyük olduğu durumlarda değişkenin %5 anlamlılık düzeyinde durağan olduğu kabul edilmektedir. Birim kök test sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5: Birim Kök Test Sonuçları

Değişken	Düzy		Birinci Fark	
	t istatistiği	cv5	t istatistiği	cv5
logef	-1.859	-2.150	-3.834	-2.150
logpatent	-2.000	-2.150	-3.554	-2.150
logrenew	-2.039	-2.150	-3.507	-2.150
logrent	-1.631	-2.150	-3.629	-2.150
loggdip	-2.094	-2.150	-2.557	-2.150

Birim kök testi sonuçlarına göre bütün değişkenlerin birinci farkta durağan olduğu görülmüştür. Değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişkinin varlığının sınavması amacıyla

Kao (1999) ve Pedroni (1999) panel eşbütünlük testleri uygulanmıştır. Test sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6: Panel Eşbütünlük Test Sonuçları

	İstatistik	p değeri
Kao Eşbütünlük Testi		
ADF	2.7201	0.0033
Pedroni Eşbütünlük Testi		
Panel v-Statistic	2.733448	0.0031
Panel rho-Statistic	-2.275682	0.0114
Panel PP-Statistic	-7.509273	0.0000
Panel ADF-Statistic	-7.553816	0.0000
Group rho-Statistic	-0.916632	0.1797
Group PP-Statistic	-9.873854	0.0000
Group ADF-Statistic	-10.20123	0.0000

Hem Kao hem de Pedroni testinin anlamlı çıkması sonucunda seriler arasında uzun dönemli ilişkinin var olduğu kabul edilmiştir. Eşbütünlüğün varlığı kabul edildikten sonra eşbütünlük denklemi tahmin edilmiştir. Bu amaçla oluşturulan MG ve RC model sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7: MG ve RC Parametre Tahmin Sonuçları

Değişken	MG		RC	
	t istatistiği	p değeri	t istatistiği	p değeri
logpatent	0.0815812	0.070	0.0346161	0.478
logrenew	-0.3354303	0.000	-0.2758954	0.000
logrent	0.0370464	0.000	0.0330798	0.003
loggdp	0.2292454	0.022	0.1907673	0.069
sabit	-1.762951	0.105	-1.242761	0.278
Wald chi2	73.94	0.000	36.82	0.000

Her iki model de bütün olarak anlamlı bulunmuştur. Analiz sonuçları incelendiğinde uzun dönemde her iki modelde de teknolojik inovasyon, doğal kaynak gelirleri ve GS-YİH'nın ekolojik ayak izini artırırken, yenilenebilir enerji kullanımının azalttığı bulunmuştur. Ancak RC modelinde teknolojik inovasyon değişkeni anlamsız bulunmuştur.

4 Sonuç

Mevcut çalışma kapsamında insan faaliyetleri ile teknolojik gelişme arasındaki ilişki incelenmiş, yeni yapılan teknoloji yatırımlarının insan faaliyetlerinden kaynaklanan çevresel bozulmayı engelleyip engellemediği tartışılmıştır. Ancak araştırma sonuçlarında teknolojik gelişmenin ekolojik ayak izini artırdığı bulunmuştur. Bu sonuçlar OECD ülkelerinde teknolojik yatırımların daha çok yeşil teknolojilere kaydırılması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle önemli olan teknolojinin sadece tüketim ve üretimin artırılması için değil, mevcut olan üretimin etkilerinin kısıtlanması için çalışmasıdır. Yenilenebilir enerji tüketiminin ekolojik ayak izini düşürmesi bu açıdan en önemli göstergedir. Yenilenebilir enerji gibi yeşil teknolojilerin artırılması çevresel bozulmayı azaltmada oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynakları (biyoenerji, hidroelektrik, jeotermal enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi) ve akıllı şebeke teknolojileri, sürdürülebilir büyümeyi sürdürmek için çevresel zorlukların üstesinden gelmek için önerilen en iyi çözümlerdir (Yasmeen et al., 2022).

Doğal kaynakların kullanımı ve çıkarılması esnasında oldukça yüksek oranda CO₂ salınımı yapılmakta, bununla beraber toprağa zehirli birçok madde karışmaktadır. Bu nedenle bu tarz kaynakların kullanılması oldukça sıkı denetlenmeli ve belli kurallar çerçevesinde yapılmalıdır. Aynı şekilde üretim ve tüketimin artması ile yükselen GSYİH da ekolojik dengeye zarar vermektedir. Bu nedenle üretimin nasıl yapıldığı bu alanda da sıkı kural ve denetime tabi olmalı, bireysel yeşil üretime uygun ürünlerin tüketilmesi konusunda teşvik edilmelidir.

Mevcut çalışma bir dizi sınırlılıklar barındırmaktadır. Öncelikle OECD ülkelerinin hepsinde yeterli sayıda ve süreklilikte veri bulunmamaktadır. Bu nedenle farklı değişkenler modele dahil edilememiştir. Diğer taraftan OECD ülkeleri gelişmişlik açısından oldukça farklılık göstermektedir. Bu nedenle bu ülkeler ilerleyen çalışmalarda gelişmişliklerine göre ayrılarak çalışılmalıdır.

Kaynaklar

- Ahmad, M., Jiang, P., Majeed, A., Umar, M., Khan, Z., & Muhammad, S. (2020). The dynamic impact of natural resources, technological innovations and economic growth on ecological footprint: an advanced panel data estimation. *Resources Policy*, 69, 101817. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101817>
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1980). The Lagrange multiplier test and its applications to model specification in econometrics. *The review of economic studies*, 47(1), 239-253. <https://doi.org/10.2307/2297111>
- Chu, L. K. (2022a). Determinants of ecological footprint in OCED countries: do environmental-related technologies reduce environmental degradation? *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 23779-23793. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17261-4>
- Chu, L. K. (2022b). The impact of informal economy on technological innovation-ecological footprint nexus in OECD countries: new evidence from panel quantile regression. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 12(3), 515-533. <https://doi.org/10.1007/s13412-022-00756-y>

- Dai, J., Ahmed, Z., Sinha, A., Pata, U. K., & Alvarado, R. (2023). Sustainable green electricity, technological innovation, and ecological footprint: Does democratic accountability moderate the nexus? *Utilities Policy*, 82, 101541. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101541>
- Destek, M. A., & Manga, M. (2021). Technological innovation, financialization, and ecological footprint: evidence from BEM economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 21991-22001. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11845-2>
- Gupta, M., Saini, S., & Sahoo, M. (2022). Determinants of ecological footprint and PM2. 5: Role of urbanization, natural resources and technological innovation. *Environmental Challenges*, 7, 100467. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100467>
- Hussain, M., Arshad, Z., & Bashir, A. (2022). Do economic policy uncertainty and environment-related technologies help in limiting ecological footprint? *Environmental Science and Pollution Research*, 29(31), 46612-46619. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19000-9>
- Jahanger, A., Usman, M., Murshed, M., Mahmood, H., & Balsalobre-Lorente, D. (2022). The linkages between natural resources, human capital, globalization, economic growth, financial development, and ecological footprint: The moderating role of technological innovations. *Resources Policy*, 76, 102569. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102569>
- Kao, C. (1999). Spurious regression and residual-based tests for cointegration in panel data. *Journal of Econometrics*, 90(1), 1-44. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(98\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(98)00023-2)
- Kihombo, S., Ahmed, Z., Chen, S., Adebayo, T. S., & Kirikkaleli, D. (2021). Linking financial development, economic growth, and ecological footprint: what is the role of technological innovation? *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 61235-61245. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14993-1>
- OECD (2023) OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2023: Enabling Transitions in Times of Disruption, *OECD Publishing*, Paris. Erişim: <https://doi.org/10.1787/0b55736e-en>
- Pedroni, P. (1999). Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61(S1), 653-670. <https://doi.org/10.1111/1468-0084.0610s1653>
- Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Pesaran, M. H., & Yamagata, T. (2008). Testing slope homogeneity in large panels. *Journal of econometrics*, 142(1), 50-93. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2007.05.010>
- Rout, S. K., Gupta, M., & Sahoo, M. (2022). The role of technological innovation and diffusion, energy consumption and financial development in affecting ecological footprint in BRICS: an empirical analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17734-6>
- Sahoo, M., & Sethi, N. (2022). The dynamic impact of urbanization, structural transformation, and technological innovation on ecological footprint and PM2. 5: evidence from newly industrialized countries. *Environment, Development and Sustainability*, 24(3), 4244-4277. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01614-7>
- Saqib, N., Ozturk, I., & Usman, M. (2023). Investigating the implications of technological innovations, financial inclusion, and renewable energy in diminishing ecological footprints levels in emerging economies. *Geoscience Frontiers*, 14(6), 101667. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101667>
- Schaefer, F., Luksch, U., Steinbach, N., Cabeça, J., & Hanauer, J. (2006). Ecological footprint and biocapacity: the world's ability to regenerate resources and absorb waste in a limited time period. *Office for Official Publications of the European Communities*: Luxembourg. Erişim:

- <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3888793/5835641/KS-AU-06-001-EN.PDF.pdf/d17ffc94-bf5a-404f-ac90-cc64891a2b67?t=1414779227000>
- Usman, M., & Hammar, N. (2021). Dynamic relationship between technological innovations, financial development, renewable energy, and ecological footprint: fresh insights based on the STIRPAT model for Asia Pacific Economic Cooperation countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 15519-15536. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11640-z>
- Usman, M., Jahanger, A., Radulescu, M., & Balsalobre-Lorente, D. (2022). Do nuclear energy, renewable energy, and environmental-related technologies asymmetrically reduce ecological footprint? Evidence from Pakistan. *Energies*, 15(9), 3448. <https://doi.org/10.3390/en15093448>
- WWF (2022) Living Planet Report 2022 – Building a naturepositive society. Almond, R.E.A., Grooten, M., Juffe Bignoli, D. & Petersen, T. (Eds). WWF, Gland, Switzerland. Erişim: https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/embargo_13_10_2022_lpr_2022_full_report_single_page_1.pdf
- Xu, L., Wang, X., Wang, L., & Zhang, D. (2022). Does technological advancement impede ecological footprint level? The role of natural resources prices volatility, foreign direct investment and renewable energy in China. *Resources Policy*, 76, 102559. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102559>
- Yang, B., Jahanger, A., & Ali, M. (2021). Remittance inflows affect the ecological footprint in BICS countries: do technological innovation and financial development matter? *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 23482-23500. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12400-3>
- Yasmeen, R., Zhaohui, C., Shah, W. U. H., Kamal, M. A., & Khan, A. (2022). Exploring the role of biomass energy consumption, ecological footprint through FDI and technological innovation in B&R economies: A simultaneous equation approach *Energy*, 244, 122703. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122703>
- Zeraibi, A., Balsalobre-Lorente, D., & Murshed, M. (2021). The influences of renewable electricity generation, technological innovation, financial development, and economic growth on ecological footprints in ASEAN-5 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 51003-51021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14301-x>