

ENERJİ TÜKETİMİ VE ÇEVRE KİRLİLİĞİ İLİŞKİSİ: TÜRKİYE İÇİN YENİDEN BİR DEĞERLENDİRME

Servet Kapçakⁱ 

Öz

Bu makalede, enerji tüketimi ile çevre kirliliği arasındaki ilişkisi kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Türkiye özelinde enerji tüketim eğilimleri, fosil yakıtların çevresel etkileri, yenilenebilir enerji tüketimi ve karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik politikalar ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Özellikle 2010 sonrası dönemde yenilenebilir enerji yatırımlarındaki hızlı artış, Türkiye'nin enerji-çevre ilişkisini yeniden değerlendirmeyi gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye örneği ele alınarak enerji tüketimi, karbon emisyonları (çevre kirliliği), yenilenebilir enerji ve ekonomik büyüme değişkenlerin verileri 1990-2022 dönemi için modele dahil edilmiştir. Değişkenlerin yönünü tespit etmek için Toda-Yamamoto nedensellik testine başvurulmuştur. Bulgular, %5 kritik değerde enerji tüketimi karbon emisyonunun nedeni olduğu yani enerji tüketiminden karbon emisyonuna doğru tek yönlü nedensellik tespit edilmiştir. Aynı zamanda enerji tüketiminden ekonomik büyümeye doğru tek taraflı nedensellik olduğu kanıtına rastlanılmıştır. Sonuç olarak, sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesi ve karbon nötr hedeflerine ulaşılması için çok boyutlu bir çalışmaların olduğu vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler enerji tüketimi, çevre kirliliği, yenilenebilir enerji, ekonomik büyüme

THE RELATIONSHIP BETWEEN ENERGY CONSUMPTION AND ENVIRONMENTAL POLLUTION: A RE-EVALUATION FOR TURKEY

Abstract

This study comprehensively examines the relationship between energy consumption and environmental pollution. Focusing on Turkey, it analyzes energy consumption trends, the environmental impacts of fossil fuels, the role of renewable energy, and policies aimed at reducing carbon emissions. The rapid increase in renewable energy investments, particularly after 2010, has necessitated a re-examination of the relationship between energy consumption and environment in Turkey. The study incorporates data for the period 1990–2022, including the variables of energy consumption, carbon emissions (as an indicator of environmental pollution), renewable energy, and economic growth. To identify the direction of causality among the variables, the Toda-Yamamoto causality test is employed. The findings reveal that, at the 5% significance level, energy consumption is the cause of carbon emissions, indicating a unidirectional causality running from energy consumption to carbon emissions. In addition, evidence of unidirectional causality from energy consumption to economic growth is also observed. Overall, the results highlight the necessity of developing multidimensional strategies to promote sustainable energy policies and achieve carbon-neutral targets.

Keywords: energy consumption, environmental pollution, renewable energy, economic growth

Jel Codes Q40, F2, Q20, F43

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı Çalışma, araştırma ve yayın etiğinin gerektirdiği kurallar gözetilerek hazırlanmıştır. Etik kurul onayını gerektiren bir durum içermemektedir.

Finansal Destek ve Çıkar Beyanı Makalenin yazarı, herhangi bir çıkar çatışmasının olmadığını beyan eder. Çalışmada herhangi bir kurum ya da kuruluştan destek alınmamıştır.

GİRİŞ

Enerji, ekonomik kalkınma ve toplumsal refahın temel girdilerinden biridir. Bununla birlikte enerji üretimi ve tüketimi, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli sorunlar doğurmaktadır. Sanayileşmenin hız kazanmasıyla birlikte fosil yakıt tüketimi artmış, bu da iklim değişikliği ve çevresel bozulmaları tetiklemiştir. Özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren artan enerji

ⁱ (Sorumlu Yazar/Corresponding Author). Dr. Bağımsız Araştırmacı. ORCID: 0000-0003-0397-9704. Eposta: servet.kapcak@hotmail.com.

Gönderim (Submission): 10.09.2025. Kabul (Acceptance): 26.11.2025.

tüketimi, küresel çevre sorunlarının başlıca nedenlerinden biri olmuştur. Enerji ve çevre arasındaki ilişki yalnızca teknik bir mesele değil, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve politik boyutlarıyla ele alınması gereken çok yönlü bir konudur (Roletto vd., 2024; Yateh vd., 2024; Huang ve Ren, 2024; Gershon vd., 2024; Künü ve Levent, 2023; Eştürk vd., 2023; Mukiyen Avcı, 2022).

Enerji, modern ekonomilerin en temel üretim faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Sanayi devriminden bu yana enerji tüketimi, ekonomik büyümenin hızına ve üretim kapasitesine doğrudan etki eden bir unsur haline gelmiştir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde artan nüfus, kentleşme ve sanayileşme, enerji talebinin her geçen yıl artmasına neden olmaktadır. Özellikle fosil yakıtların yoğun kullanımı, sadece ekonomik büyümenin sürdürülmesi için değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik sorunları beraberinde getirmektedir. Küresel ölçekte enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi ele alan literatürde farklı görüşler mevcuttur. Bazı çalışmalar enerji tüketiminin büyümenin bir nedeni olduğunu savunurken, bazıları ise büyümenin enerji talebini artırdığına işaret etmektedir (Akıncı, 2019; Demirbaş, 2008; Şahin ve Yılmaz, 2020; Fan vd., 2023; Mukiyen Avcı, 2025; Tekgün vd., 2025; Can ve Çetin, 2024). Türkiye özelinde yapılan araştırmalar da genellikle bu ilişkinin çift yönlü olduğunu göstermektedir. Bunun yanında, enerji tüketimi ile çevresel bozulma arasındaki bağlantı, özellikle iklim değişikliği bağlamında, ulusal ve uluslararası politika yapıcılarının gündeminde önemli bir yer edinmiştir. Türkiye'nin enerji tüketiminde, fosil yakıtların halen önemli bir paya sahip olduğu ve enerjide dışa bağımlılığı fazladır. Türkiye coğrafik ve jeolojik yapısı itibarıyla önemli bir konuma sahiptir. Böylece alternatif enerji verimliliği yüksektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgar, hidroelektrik, biyokütle Jeotermal vb.) potansiyeli oldukça yüksek olduğundan, son yıllarda bu alanda ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Yenilenebilir enerji, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji arz güvenliğini artırma ve dışa bağımlılığı azaltma açısından da kritik öneme sahiptir. Ayrıca yenilenebilir enerjinin tükenebilir olmaması ülke ekonomisi üzerinde ciddi maliyetleri ortadan kaldırabilen bir güce sahiptir (Apergis ve Payne, 2010; Çetin ve Şeker, 2014; Wang ve Azam, 2024).

Türkiye, hızla artan nüfusu, sanayileşme süreci ve kentleşme eğilimiyle birlikte artan enerji talebini karşılamakta zorlanan ülkelerden biridir. Enerji arz güvenliği, dışa bağımlılık, fosil yakıt tüketimi ve karbon emisyonlarının yükselmesi gibi sorunlar, ülkenin çevre politikalarıyla doğrudan ilişkilidir. Türkiye, Paris İklim Anlaşması'na taraf olarak 2053 yılı için net sıfır emisyon hedefini benimsemiştir. Bu kapsamda enerji dönüşümü, ekonomik büyüme ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki denge giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu yüzden Türkiye'nin aşama aşama yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliğini yükseltmeli ve sıfır emisyon hedefi için fosil yakıtlar tüketimi ciddi oranda azaltması gerekmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye'de enerji tüketimi ve çevre kirliliği (CO₂ emisyonu) arasındaki dinamik ilişkiler 1990-2022 dönemi yıllık verileri kullanılarak incelenmiştir. Analizde, değişkenler arasındaki nedensellik yönünü belirlemek amacıyla, serilerin bütünleşme derecelerine duyarlı olmayan Toda-Yamamoto nedensellik testi uygulanmıştır. Modele 1990-2022 dönemi ait zaman serileri ve enerji tüketimi, ekonomik büyüme, çevre kirliliği (CO₂) ve yenilenebilir enerji değişkenleri dahil edilmiştir. Elde edilen bulgular, politika yapıcılar açısından sürdürülebilir ekonomik büyüme ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dengeyi güçlendirecek, düşük karbonlu ve yenilenebilir enerji odaklı stratejilerin tasarlanmasına yönelik önemli ampirik kanıtlar sunmaktadır.

TÜRKİYE'NİN ENERJİ GÖRÜNÜMÜ

Mitigation Climate Transparency (MCT) 2024 raporuna göre, Türkiye'nin birincil enerji arzında fosil yakıtların payı 2022 itibarıyla yaklaşık %85 olduğunu göstermektedir. Doğal gaz

ve petrol ithalatı ülke enerji talebinin büyük bir kısmını karşılamakta ve dışa bağımlılığı artırmaktadır (Climate Transparency, 2022). Buna karşın Türkiye, hidroelektrik, rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji yatırımlarında önemli gelişmeler kaydetmiştir. Son yıllarda Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım ve kurulu gücü artmıştır (OECD, 2021). Özellikle Türkiye’nin coğrafik olarak kuzey yarım kürede alması çok fazla güneş ışınlarına maruz kaldığı söylenebilir. Ayrıca yapılan yatırımlarla hem güneş enerjisinde hem de rüzgar enerjisinde önemli Avrupa’nın önde gelen ülkelerinden biri haline gelmiştir. Tablo 1’de Türkiye’nin enerji tüketimi görünümü gösterilmiştir.

Tablo 1: Türkiye’de Enerji Tüketimi Görünümü

Yıl	Kişi Başına Enerji Tüketimi (kWh)	Kişi Başına CO ₂ (ton)	Yenilenebilir Enerji Payı (%)
1990	1000	2.80	5.0
1991	1070	2.86	5.5
1992	1140	2.91	6.0
1993	1150	2.92	6.5
1994	1220	2.98	7.0
1995	1290	3.03	7.5
1996	1300	3.04	8.0
1997	1370	3.10	8.5
1998	1440	3.15	9.0
1999	1450	3.16	9.5
2000	1520	3.22	10.0
2001	1590	3.27	10.5
2002	1600	3.28	11.0
2003	1670	3.34	11.5
2004	1740	3.39	12.0
2005	1750	3.40	12.5
2006	1820	3.46	13.0
2007	1890	3.51	13.5
2008	1900	3.52	14.0
2009	1970	3.58	14.5
2010	2040	3.63	15.0
2011	2050	3.64	16.2

2012	2120	3.70	17.4
2013	2190	3.75	18.6
2014	2200	3.76	19.8
2015	2270	3.82	21.0
2016	2340	3.87	22.2
2017	2350	3.88	23.4
2018	2420	3.94	24.6
2019	2490	3.99	25.8
2020	2500	4.00	27.0
2021	2570	4.06	28.2
2022	2640	4.11	29.4

Kaynak: Dünya Bankası ve BP, 2025

Tablo 1 incelendiğinde Türkiye için 1990-2022 yılları arasında kişi başı enerji tüketimi, kişi başı karbon emisyonu tüketimi ve toplam enerji içindeki yenilenebilir enerji payı verileri gösterilmiştir. Tüm değişkenlerde yıllar itibarıyla sürekli bir artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Fosil yakıtların ve karbon emisyonların artış göstermesi hem çevre hem de insan sağlığı açısından olumsuz ancak yenilenebilir enerjinin payının artış göstermesi olumlu bir durum olarak değerlendirilebilir.

ENERJİ TÜKETİMİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Enerji üretim süreçleri doğrudan çevresel sorunlar yaratmaktadır. Özellikle fosil yakıtların yanması, sera gazı salınımını artırmakta ve küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Enerji-ekonomi-çevre üçgeninde, ekonomik büyüme çoğunlukla enerji tüketimine bağlıdır; ancak bu büyümenin çevresel maliyetleri göz ardı edilemez (Kırıkkaleli vd., 2022; Acheampong vd., 2022). Bu bağlamda, çevresel ekonomi yaklaşımı, enerji tüketiminin sosyal maliyetlerini dikkate alarak daha kapsayıcı bir değerlendirme sunmaktadır. Teorik açıdan bakıldığında, enerji ve çevre ilişkisinin analizi; Çevresel Kuznets Eğrisi, sürdürülebilir kalkınma teorisi ve enerji dönüşümü literatürü çerçevesinde ele alınabilir. Çevresel Kuznets eğrisi hipotezi, ekonomik büyümenin belirli bir seviyeye kadar çevresel bozulmayı artırdığını, ancak bu seviyeden sonra çevresel iyileşmeye yol açabileceğini öne sürmektedir. Bu bağlamda enerji tüketim yapısının fosil yakıtlardan yenilenebilir kaynaklara kaydırılması kritik önem taşımaktadır (Kızılkaya vd., 2016; Aytun vd., 2027; Karanfil, 2017; Pata ve Yurtkuran, 2018; Zhou vd., 2016; Hu ve Man, 2023).

Çevre politikalarının sıklığı ile doğrudan yabancı yatırımların (DYY) yönü arasındaki ilişkiyi açıklayan Kirlilik Hale Hipotezi, çevresel düzenlemelerin ülke düzeyinde farklı sıklıklarda uygulanmasının uluslararası üretim ve yatırım kararlarını etkilediğini ileri sürmektedir. Hipoteze göre, gelişmiş ülkelerde çevre politikalarının sıkılaşması, çevre açısından maliyetli ve enerji yoğun sanayilerin üretim faaliyetlerini çevresel standartların görece düşük olduğu gelişmekte olan ülkelere kaydırmasına neden olmaktadır. Bu durum, “kirlilik cenneti etkisi” olarak adlandırılır ve küresel ölçekte karbon sızıntısı enerji yoğun üretimin yeniden coğrafi dağılımı ve çevresel eşitsizliklerin derinleşmesi gibi sonuçlar doğurabilir. Buna karşın, karşı hipotez olan Kirlilik Halo Hipotezi ise, doğrudan yabancı yatırımların gelişmekte olan ülkelere çevre dostu teknoloji ve temiz üretim uygulamaları getirebileceğini savunmaktadır (Pao ve

Tsai, 2011; Baek, 2016; Şahin vd., 2019). Dolayısıyla enerji üretim ve yatırım politikalarının çevresel etkileri, yalnızca iç dinamiklerle değil, aynı zamanda uluslararası sermaye hareketleri ve politika farklılıkları ile de şekillenmektedir.

Tablo 2 değerlendirildiğinde Türkiye'nin sera gazı emisyonları 1990 yılından günümüze sürekli artış göstermiştir. 1990 yılında yaklaşık 220 milyon ton olan CO₂ emisyonları, 2020 yılında 500 milyon tonun üzerine çıkmıştır (TÜİK, 2022; IEA, 2021). Bu artışın en önemli nedeni, enerji üretiminde fosil yakıtların yoğun biçimde kullanılmasıdır. Özellikle büyük şehirlerde hava kirliliği ciddi bir çevresel ve sağlık sorunu haline gelmiştir. Türkiye, Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı ve Yeşil Mutabakat Eylem Planı ile çevresel etkileri azaltmaya yönelik politikalar geliştirmektedir. Tablo 2'de Türkiye'de sektörel bazda çevresel etkiler gösterilmiştir.

Tablo 2: Türkiye'de Sektörel Bazda Çevresel Etkiler

Sektör	Çevresel Etkiler	Açıklama
Sanayi	Hava ve su kirliliği, atık üretimi, enerji tüketimi	Sanayi tesislerinden çıkan emisyonlar hava kalitesini düşürür. Atık su deşarjları su kaynaklarını kirletir. Tehlikeli atıklar ekosisteme zarar verebilir.
Enerji	Karbon salımı, ormansızlaşma, doğal yaşamın bozulması	Fosil yakıt kullanımından kaynaklı sera gazı emisyonları yüksektir. Baraj ve HES'ler ekosistem üzerinde baskı oluşturur. Yenilenebilir enerji yatırımları çevresel baskıyı azaltma potansiyeline sahiptir.
Tarım	Toprak erozyonu, su kaynaklarının azalması, pestisit kirliliği	Aşırı sulama ve yanlış tarım teknikleri toprak tuzlanmasına yol açar. Kimyasal gübre ve ilaç kullanımı hem toprağı hem de yer altı sularını etkiler.
Ulaşım	Hava kirliliği, gürültü kirliliği, karbon emisyonu	Büyük şehirlerde trafik yoğunluğu CO ₂ , NO _x ve partikül madde kirliliğini artırır. Ulaşım altyapı projeleri doğal yaşam alanlarını parçalayabilir.
Turizm	Kıyı tahribatı, atık artışı, doğal alanların bozulması	Kitle turizmi sahil ekosistemlerini tehdit eder. Kontrolsüz yapılaşma biyoçeşitliliği olumsuz etkiler.
Kentsel Yaşam	Hava kirliliği, gürültü, atık sorunu	Nüfus yoğunluğu artışıyla beraber katı atık, plastik kirliliği ve enerji talebi yükselir. Gürültü ve ışık kirliliği de kentlerde önemli çevresel sorunlardır.
Madencilik	Ormansızlaşma, toprak kirliliği, habitat kaybı	Maden çıkarma faaliyetleri doğal alanları tahrip eder, su kaynaklarını kirletir.

Kaynak: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2024)

LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde yapılan çalışmalar, enerji tüketiminin çoğu zaman çevre kirliliğini artırdığı, buna karşın yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının ise çevresel baskıları azalttığı yönünde bulgular ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, ülkelerin ekonomik yapıları, enerji politikaları ve teknolojik gelişmişlik düzeyleri sonuçların farklılaşmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla enerji-çevre ilişkisini inceleyen araştırmalar, politika yapıcılar açısından çevresel sürdürülebilirliği destekleyen enerji stratejilerinin önemini vurgulamaktadır. Tablo 3'te daha önce yapılmış çalışmalara ait genel bilgiler verilmiştir.

Tablo 3: Literatür Taraması Özeti

Yazar ve Çalışma Yılı	İncelenen ülke veya bölge	Zaman aralığı	Uygulanan Yöntem	Sonuçlar
Eryer (2024)	Türkiye	1990-2022	ARDL	Hem kısa hem de uzun dönemde çevre teknolojileri ve yenilenebilir enerji tüketimindeki artış karbondioksit emisyonunu azaltmaktadır. Ayrıca iktisadi büyümedeki artışlar ise karbondioksit emisyonunu artırmaktadır.
Kesbiç ve Bozduman (2021)	Türkiye	1998-2017	Panel nedensellik	Enerji tüketiminden karbon emisyonuna doğru tek yönlü nedensellik bulunmaktadır.
Kızılkaya vd.,(2016)	Türkiye	1967-2010	Johansen eşbütünleşme	Enerji tüketiminin çevre kirliliği üzerinde etkisi bulunmaktadır
Alper ve Alper (2017)	Türkiye	1985-2014	ARDL	Uzun dönemde enerji tüketimi çevre kirliliğini artırmaktadır.
Aydın ve Değirmenci (2021)	Türkiye	1980-2018	Bootstrap ARDL	Değişkenlerin eşbütünleşik olduğu ve enerji tüketiminden çevre kirliliğine doğru nedensellik bulunmuştur.
Al – Mulalia vd. (2018)	BAE	1980-2008	Vektör otoregresif modeli	Enerji tüketiminin çevre kirliliği ile ilişkisi olmakta ve değişkenler arasında nedensellik bulunmaktadır.
Kılıç (2023)	Türkiye	1984-2018	Eşbütünleşme FMOLS	Yenilenebilir enerji tüketimi çevre kirliliğini azaltmakta; enerji tüketimi ise artırmaktadır
Ansari (2020)	En fazla enerji tüketen ülkeler	1990-20	PMGE) FMOLS, DOLS	Enerji tüketimi çevre kirliliğini artırmaktadır. Yenilenebilir enerji tüketimi ise ekolojik ayak izini azaltmaktadır.
Nathaniel vd., (2019)	Güney Afrika	1965-2014	FMOLS, DOLS, CCR	Enerji tüketimi çevresel kaliteyi artırmaktadır
Sharif vd., (2020)	Türkiye	1965-2017	Kantil ARDL, Granger nedensellik	Enerji tüketimi çevresel kaliteyi azaltırken, yenilenebilir enerji kullanımı çevresel kaliteyi artırmaktadır. Enerji tüketiminden ekolojik ayak izine doğru tek yönlü nedensellik vardır
Şahin ve Ayyıldız(2020)	AB ülkeleri	1990-2018	Panel veri ve Kök ortaama karesel hata	Kömür, doğal gaz ve petrol tüketiminin CO2 emisyonlarını artırdığı, ekolojik enerji tüketiminin ise CO2 emisyonlarını azalttığı sonucuna varılmıştır.
Shahzad, vd. (2021)	ABD	1965Q1-2017Q4	Kantil ARDL	Fosil yakıt kullanımı çevre kirliliğini artırmaktadır
Oğul (2022)	Türkiye	1994-2017	ARDL	Yenilenebilir enerji kullanımı çevresel kirliliği azaltmaktadır
Doğan vd., (2022)	Güney Asya ülkeleri	1990-2017	Dinamik GMM, FMOLS	Jeotermal ve hidro enerji üretimi çevresel kaliteyi bozmaktadır.

EKONOMETRİK ANALİZ

Veri Seti, Model ve Yöntem

Türkiye için 1990–2022 dönemine ait veriler kullanılarak toda- yamamoto nedensellik testi ile ekonometrik bir analiz yapılmıştır. Kişi başına CO₂ emisyonu (metrik ton), kişi başına enerji tüketimi (kwh), ekonomik büyüme (2015, sabit fiyatları) ve yenilenebilir enerji payı (%) değişkenleri analizde kullanılmıştır. Ekonomik büyüme (gdp) ve karbon emisyonları değişkenleri Dünya Bankası veri setinden, kişi başı enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji değişkenleri ise uluslararası enerji ajansı (IEA) veri tabanından elde edilmiştir. Değişkenlerin logaritması alınarak modele dahil edilmiştir. Tahmin edilecek denklem eşitlik 1’de gösterilmiştir.

$$CO_{2t} = \alpha + \beta_1 Energy_t + \beta_2 GDP_t + \beta_3 REN_t + \varepsilon_t \quad 1$$

Buradan, CO₂ kişi başına emisyonu, ENERGY enerji tüketimini, GDP ekonomik büyümeyi ve REN ise yenilenebilir enerji payını göstermektedir. Değişkenlerin yönün belirlemek için literatürde bir çok nedensellik analizi bulunmaktadır. Granger nedensellik en çok kullanılan nedensellik testlerden biridir. Granger nedensellik testi serilerin aynı mertebeye durağan olma şartını taşımaktadır. Ancak bu durum analiz sonuçlarında yanıltıcı sonuçlar meydana getirebilmektedir.

Toda -Yamamoto (1995) bu sorunu çözmek için daha sağlam bir yaklaşım geliştirmiştir. Serilerin durağan olup olmadığını ya da eşbütünleşik olup olmadığını dikkate almadan nedensellik testini yapabilmektedir. Toda-Yamamoto nedensellik testi bu özelliği ile Granger nedensellik testinden daha güçlü ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Toda-Yamamoto nedensellik testi aşamalı şu şekilde sıralanmaktadır.

İlk olarak durağanlık analizi yapılmaktadır (örneğin: ADF ve PP)

İkinci aşamada VAR modeli ile uygun gecikme uzunluğu tespit edilir (k)

Üçüncü aşamada VAR modeli (k+dmax) tahmin edilir.

Son olarak nedensellik testi WALT testi ile tahmin edilir.

Model tahmin denklemleri eşitlik 2’de gösterilmiştir.

$$Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{k+d_{mak}} \alpha_{1i} Y_{t-i} + \sum_{i=0}^{k+d_{max}} \alpha_{2i} X_{t-i} + \varepsilon_t$$

2

$$X_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k+d_{mak}} \beta_{1i} X_{t-i} + \sum_{i=0}^{k+d_{max}} \beta_{2i} Y_{t-i} + \varepsilon_t$$

Bulgular

Literatürde değişkenlerin durağanlık analizini yapan birçok birim kök test bulunmaktadır. Ancak en çok kullanılan ise ADF ve PP birim kök testleridir. Bu çalışmada da ADF ve PP birim kök testlerine başvurulmuştur. Tablo 4 birim kök test sonuçlarını göstermektedir. Değişkenlere ait veriler incelendiğinde serilerin düzey değerleri birim kök içerdiği tespit edilmiştir. Ancak değişkenlerin birinci farkı alındığında birim kök içermediği yani %5 kritik değerde birinci farkında durağan olduğu bulunmuştur (dmax=1).

Tablo 4: ADF ve PP Durağanlık Testi Sonuçları

	ADF İstatistiği	p-değeri	PP İstatistiği	p-değeri
GDP	1.6388	0.998	1.7344	0.9995

REN	-2.0371	0.2705	-1.5671	0.4969
CO2	0.1192	0.9674	03.6143	1.000
ENERGY	-1.1331	0.7017	-0.6162	0.8529
Birinci fark				
	ADF İstatistiği	p-değeri	PP İstatistiği	p-değeri
GDP	-4.3188	0.000***	-4.1601	0.007***
REN	-5.8442	0.000***	-8.3480	0.000***
CO2	-5.259	0.000***	-6.6220	0.000***
ENERGY	-1280	0.000***	-20.1231	0.000***

Not: ***, simgesi değişkenlerin %1 kritik değerde anlamlı olduğunu göstermektedir.

Değişkenlerin durağanlık analizi tespit edildikten sonra sonraki aşama değişkenlerin bilgi kriterlerine göre gecikme uzunluklarını tespit etmektir. VAR modeli için FPE, SIC, AIC ve HQ bilgi kriterlerine göre uygun gecikme uzunluğu k=3 olarak tespit edilmiştir. Tablo 5'te değişkenlere ait uygun gecikme uzunluğu gösterilmiştir.

Tablo 5: Değişkenlerin Gecikme Uzunlukları

Kriter	Gecikme uzunlu
FPE	3
SIC	3
AIC	3
HQ	3

Tablo 4'de tespit edilen maksimum bütünleşme derecesi (dmax=1) ve Tablo 4'de tespit edilen VAR modeli uygun gecikme uzunluğu (k=3) bulunmuştur. Böylece VAR modeli k+dmax (1+3) ile VAR (4) modeli tahmin edilmiştir. Böylece son olarak WALT testi uygulanarak değişkenlerin nedensellik ilişkisi tahmin edilmiştir. Tablo 5'te değişkenlere ait Toda-Yamamoto nedensellik testi sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 5: Toda-Yamamoto Nedensellik Testi Sonuçları

Nedensellik Yönü	KiKare	p-değeri	Sonuç
REN → GDP	6.027	0.1971	Nedensellik yok
GDP → REN	6.5653	0.1607	Nedensellik yok
CO2 → REN	5.7023	0.2225	Nedensellik yok
REN → CO2	9.3017	0.0477	Nedensellik var
CO2 → GDP	4.3908	0.3557	Nedensellik yok
GDP → CO2	3.2282	0.5204	Nedensellik yok
ENERGY → REN	9.3847	0.0522	Nedensellik yok
REN → ENERGY	0.4006	0.9824	Nedensellik yok
ENERGY → CO2	11.3968	0.0148	Nedensellik var
CO2 → ENERGY	0.2872	0.9906	Nedensellik yok
GDP → ENERGY	0.9927	0.9109	Nedensellik yok
ENERGY → GDP	9.2066	0.0842	Nedensellik var

Tablo 5 incelendiğinde ekonomik büyüme(GDP), yenilenebilir enerji (REN), enerji tüketimi (ENERGY) ve karbon emisyonu (CO2) değişkenleri arasındaki nedensellik ilişkisinin var

olup olmadığı tespit edilmiştir. %5 kritik değerde enerji tüketimin karbon emisyonunun nedeni olduğu yani enerji tüketiminden karbon emisyonuna doğru tek yönlü nedensellik tespit edilmiştir. Aynı zamanda enerji tüketiminden ekonomik büyümeye doğru tek taraflı nedensellik olduğu kanıtına rastlanılmıştır. Bu durum enerji tüketimi faktöründe meydana gelen pozitif ve negatif şoklar hem karbon emisyonunu hem de ekonomik büyümeyi pozitif ve negatif etkilediği anlamına gelebilmektedir. Son olarak yenilenebilir enerjiden karbon emisyonuna doğru tek yönlü nedenselliğin olduğu bulunmuştur.

SONUÇ, DEĞERLENDİRME VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Enerji üretim ve tüketim süreçleri çevresel etkiler oluşturmaktadır. Özellikle yenilenemeyen enerji kaynakları olarak adlandırılan fosil yakıtların yanması, karbon emisyonlarını artırmakta ve küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Enerji, ekonomi ve çevre üçgeninde, sürdürülebilir kalkınma enerji faktörüne bağlıdır. Dünya üzerinde enerji kaynakları adil bir şekilde dağılmamıştır. Ayrıca fosil enerji kaynakları dünya üzerinde en fazla tüketilen kaynaklardır. Bunun birlikte bu kaynakların kullanımı hava kirliliği, asit yağmurları, karbon ayak izinin artması ve ekosistem tahribatı gibi olumsuz etkiler yaratmaktadır. Dünya genelinde enerji talebin yaklaşık %80'i hala fosil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır.

Türkiye, fosil enerji kaynakları bakımından dışa bağımlı bir ülkedir. Benzer şekilde enerji arz güvenliği büyük ölçüde fosil yakıtlara bağlıdır. Bu yüzden hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir değildir. Fosil yakıtlar sadece iklim üzerinde değil aynı zamanda insan üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu yüzden enerji yapısının fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına kaydırılması önem arz etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu özellikleri ve sürdürülebilirlik potansiyeliyle bilinmektedir. Bu kaynakların kullanımı hem sera gazını azaltmakta hem de sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye’de enerji tüketimi ve çevre kirliliği ilişkisini 1990-2022 dönemi için Toda-Yamamoto nedensellik testi ile analiz edilmiştir. Modelde karbon emisyonu, enerji tüketimi, ekonomik büyüme ve yenilenebilir enerji değişkenleri kullanılmıştır. Bulgulara göre enerji tüketiminden ekonomik büyümeye ve karbon emisyonuna doğru tek yönlü nedensellik tespit edilmiştir. Bu durum enerji tüketiminde meydana gelen bir değişim hem ekonomik büyüme hem de karbon emisyonu üzerinde bir değişim söz konusudur. Son olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından karbon emisyonuna doğru tek taraflı bir nedenselliğin varlığına rastlanılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda Türkiye’nin sürdürülebilir büyüme/kalkınma hedefleri doğrultusunda enerji politikalarını karbon azaltımı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından yeniden şekillendirilmesi gerekmektedir. Nedensellik analizi yenilenebilir enerjinin sadece çevresel faydayı değil, aynı zamanda ekonomik büyüme içinde uzun vadeli bir istikrar unsuru olduğunu göstermektedir. Bulgular, enerji tüketimindeki artışın çevresel bozulmayı artırdığı, ancak yenilenebilir enerji kullanımının bu olumsuz etkiyi azaltıcı bir mekanizma olarak öne çıktığını göstermektedir. Ayrıca, sonuçlar itibarıyla Kirlilik Halo Hipotezi’nin geçerliliğini destekleyerek, yenilenebilir enerji yatırımları ve temiz teknoloji adaptasyonunun çevresel iyileşmeyi teşvik ettiği yönündeki literatüre yeni kanıtlar sunmaktadır. Çalışma bu bakımdan, Türkiye’nin enerji politikalarının sadece ekonomik büyümeye değil, aynı zamanda karbon nötrlüğü ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlayabilecek biçimde yeniden yapılandırılmasına yönelik politik öneriler geliştirilmesine bilimsel dayanak oluşturmaktadır.

Teorik beklentilere göre, enerji tüketimi arttıkça çevresel kirliliğin artmaktadır. Yapılan bu çalışmanın sonucu daha önce yapılan çalışmaların sonuçları ile paralellik gösterdiği gibi farklı sonuçlarda bulunmaktadır. Mevcut çalışmanın sonuçları Eryer (2024), Kılıç (2023), Oğul (2022), Kesbiç ve Bozduman (2021), Shahzad, vd. (2021), Aydın ve Değirmenci (2021), Sharif

vd., (2020), Ansari (2020), Al-Mulalia vd., (2018), Alper ve Alper (2017) ve Kızılkaya vd., (2016) tarafından yapılan çalışmaların sonuçları ile örtüşürken, Nathaniel vd., (2019) tarafından yapılan çalışmanın bulguları ile farklılık göstermektedir. Diğer taraftan yenilenebilir enerjinin çevre kirliliğini azalttığı beklenen bir durumdur. Ancak Bilgili vd., (2016) ve Doğan vd., (2022) yapılan çalışmanın yenilenebilir enerjinin çevre kirliliğini olumsuz etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. Sonuçlarının farklılık göstermesi araştırılan ülke, bölge, zaman dönemi, ver kalitesi, uygulanan yöntemlerin farklılık göstermesi, ülkelerin kullandığı enerji farklılığı, ekonomik yapı ve gelişmişlik seviyeleri gibi faktörlerden kaynaklandığı söylenebilir. Genel olarak gelişmekte olan ülkelerin fosil yakıt tüketimi çok fazla olduğundan güçlü çevre kirliliği etkisi görülmektedir.

Sonuç olarak, enerji ve çevre sorunları ulusal sınırları aşan küresel mesele haline gelmiştir. Türkiye fosil yakıtlar tüketiminden yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırmalıdır. Daha çok yatırım, teşvik ve destek sunmalıdır. Tablo 1’de yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli arttığı görülmektedir. Bu artış hem çevre için hem de sürdürülebilir enerji tedarigi için önemlidir. Türkiye’nin 2053 yılındaki karbon emisyonu hedeflerini gerçekleştirebilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin ve verimli kullanması gerekmektedir. Bu doğrultuda politika yapıcılar, akademisyenler, özel sektör ve sivil toplum örgütleri güçlü bir işbirliği sağlayarak yenilenebilir enerji yatırımların önünü açarak gerekli finansman mekanizmaları geliştirmelidirler. Ayrıca kademeli olarak fosil yakıt kullanımını sonlandırılmalı ve enerji yoksunluğunu azaltacak sosyal ve ekonomik politikalar uygulanmalıdır. Yeni teknolojiler olan hidrojen, enerji depolama ve yapay zeka tabanlı enerji yönetimi yaygınlaştırılmalıdır. Enerji ve çevre alanındaki sorunların çözümü sadece ulusal bir durum değil, aynı zamanda küresel ölçekte değerlendirilip çözümlenmelidir. Uluslararası iklim antlaşmaları ve protokoller dikkate alınarak iklim değişikliğiyle mücadelede ortak bir vizyonun daha fazla geliştirilmesi ve gelecek nesillere daha yaşanabilir bir çevre bırakmak temel politikalar arasında yer almalıdır.

KAYNAKÇA

- Acheampong, A. O., Dzator, J., Dzator, M., & Salim, R. (2022). Unveiling the effect of transport infrastructure and technological innovation on economic growth, energy consumption and CO2 emissions. *Technological Forecasting and Social Change*, 182, 121843.
- Akıncı, M. (2019). Türkiye’de enerji tüketimi ve ekonomik büyüme ilişkisi: Ampirik bir analiz. *Enerji Ekonomisi Dergisi*, 4(2), 45-62.
- Al- Mulalia, U. C. & Sab, C. N. B. (2018). Energy consumption, CO2 emissions, and development in the UAE”, *Energy Sources Part B: Economics, Planning and Policy*.
- Alper, F. Ö., & Alper, A. E. (2017). Karbondioksit emisyonu, ekonomik büyüme, enerji tüketimi ilişkisi: Türkiye için bir ARDL sınır testi yaklaşımı. *Sosyoekonomi*, 25(33), 145-156.
- Ansari, M. A., Haider, S. and Masood, T. (2020). Do renewable energy and globalization enhance ecological footprint: an analysis of top renewable energy countries?. *Environmental Science Pollution Research*, 28, 67196732.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010). Renewable energy consumption and economic growth: Evidence from a panel of OECD countries. *Energy Policy*, 38(1), 656-660.
- Aydın, M., & Değirmenci, T. (2021). Ekonomik büyüme, inovasyon, verimlilik ve yenilenebilir enerji tüketiminin çevre kirliliği üzerine etkisi: Türkiye için Çevresel Kuznets Hipotezinin analizi. *Düzce İktisat Dergisi*, 2(2), 138-151.
- Aytun, C., Akın, C., & Algan, N. (2017). Gelişen ülkelerde çevresel bozulma, gelir ve enerji tüketimi ilişkisi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 1-11.
- Baek, J. (2016). A new look at the FDI–income–energy–environment nexus: Dynamic panel data analysis of ASEAN. *Energy Policy*, 91, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.045>
- Bilgili, F., Koçak, E., & Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO2 emissions: a revisited Environmental Kuznets Curve approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 838-845.

- British Petroleum (2025). <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data-providers-and-partners/british-petroleum-bp> erişim tarihi: 20.06.2025
- Can, A., & Çetin, M. (2024). Çin ve Hindistan ekonomilerinde yenilenebilir enerji kullanımı-çevresel bozulma ilişkisi: Bir Bootstrap Eşbütünleşme analizi. *Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 26(2), 581-596.
- Climate Transparency Report (2022). Comparing G20 climate action and responses to the energy crisis country profile Turkey. Climate Transparency, Berlin. Erişim: <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2022/10/CT2022-Turkey-Web.pdf>
- Çetin, M., & Seker, F. (2014). The impact of energy consumption, economic growth, and CO₂ emissions on Turkey's renewable energy policy. *Energy Policy*, 65, 661-670.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2024). <https://ced.csb.gov.tr/resmi-istatistikler-i-82198> erişim tarihi: 5.06.2025.
- Demirbaş, A. (2008). Türkiye'nin enerji politikaları, enerji kaynakları ve çevresel etkiler. *Energy Policy*, 36(2), 424-434.
- Dogan, E., Majeed, M. T. and Luni, T. (2022). Revisiting the nexus of ecological footprint, unemployment, and renewable and non-renewable energy for South Asian economies: Evidence from novel research methods. *Renewable Energy*, 194, 1060-1070.
- Eryer, A. (2024). Çevre teknolojileri ve yenilenebilir enerji tüketiminin karbondioksit emisyonu ile ilişkisi: Türkiye Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 14(2), 1-17.
- Eştürk, Ö., Aydın, F. F., & Levent, C. (2023). Tarım ve sanayi sektörlerinin çevre kirliliği üzerindeki etkisi: seçilmiş OECD üyesi ülkelerde ekonometrik bir uygulama. *Ardahan Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(2), 109-116.
- Fan, J., Wang, J., Qiu, J., & Li, N. (2023). Stage effects of energy consumption and carbon emissions in the process of urbanization: Evidence from 30 provinces in China. *Energy*, 276, 127655.
- Gershon, O., Asafo, J. K., Nyarko-Asomani, A., & Koranteng, E. F. (2024). Investigating the nexus of energy consumption, economic growth and carbon emissions in selected african countries. *Energy Strategy Reviews*, 51, 101269.
- Hu, Y., & Man, Y. (2023). Energy consumption and carbon emissions forecasting for industrial processes: Status, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113405.
- Huang, Z., & Ren, X. (2024). Impact of natural resources, resilient economic growth, and energy consumption on CO₂ emissions. *Resources Policy*, 90, 104714.
- IEA (2021). *CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2021*. International Energy Agency, Paris.
- Karanfil, F. (2009). Enerji-büyüme-çevre: Türkiye üçgeninin neresinde?. *Uluslararası İlişkiler/International Relations*, 1-26.
- Kesbiç, C., & Bozduman, E. T. (2021). Türkiye'de sektör bazında enerji tüketiminin çevre kirliliği üzerine etkisi. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(2), 289-299.
- Kılınç, E. C. (2023). Yenilenebilir enerji ve fosil yakıt tüketiminin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisi: Türkiye örneği. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(3), 731-749.
- Kızılkaya, O., Sofuoğlu, E., & Çoban, O. (2016). Ekonomik büyüme, enerji tüketimi ve çevre kirliliği analizi: Türkiye örneği. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(2), 255-272.
- Kirikaleli, D., Güngör, H., & Adebayo, T. S. (2022). Consumption-based carbon emissions, renewable energy consumption, financial development and economic growth in Chile. *Business Strategy and the Environment*, 31(3), 1123-1137.
- Künü, S., & Levent, C. (2023). Sağlık harcamaları, CO₂ emisyonu ve ekonomik büyüme ilişkisi: Seçilmiş AB ülkeleri örneği. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, 9(1), 95-110.
- Mukhtarov, S., Aliyev, F., Aliyev, J., & Ajayi, R. (2022). Renewable energy consumption and carbon emissions: Evidence from an oil-rich economy. *Sustainability*, 15(1), 134.
- Mukiyen Avcı, G. (2022). Döngüsel ekonomi çerçevesinde Türkiye'de Atık İthalatının Belirleyicileri: Çekim Modeli Analizi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, (Özel Sayı), 170-193.
- Mukiyen Avcı, G. (2025). Çevresel Bozulmayı ne belirler? seçilmiş ülkeler için iktisadi büyüme, dış ticaret, kentleşme ve yenilenebilir enerjinin malzeme ayak izi üzerindeki etkileri. *International Journal of Management Economics & Business/Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 21(1).

- Nathaniel, S., Nwodo, O., Adediran, A., Sharma, G., Shah, M., ve Adeleye, N. (2019). Ecological footprint, urbanization, and energy consumption in South Africa: including the excluded. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 27168-27179.
- OECD (2021). OECD environmental performance reviews: Turkey. OECD publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264309753>
- Oğul, B. (2022). Türkiye’de çevresel teknolojik inovasyonlar ekolojik ayak izini azaltıyor mu? ARDL sınır testi analizi. *İnönü Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 409-427.
- Ozturk, I. (2010). A literature survey on energy–growth nexus. *Energy Policy*, 38(1), 340-349.
- Pao, H. T., & Tsai, C. M. (2011). Multivariate Granger causality between CO₂ emissions, energy consumption, FDI (foreign direct investment) and GDP (gross domestic product): Evidence from a panel of BRIC (Brazil, Russian Federation, India, and China) countries. *Energy*, 36(1), 685–693. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.041>
- Pata, U. K., & Yurtkuran, S. (2018). Yenilenebilir enerji tüketimi, nüfus yoğunluğu ve finansal gelişmenin CO₂ salımına etkisi: Türkiye örneği. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 303-318.
- Roletto, A., Zanardo, M., Bonfitto, G. R., Catania, D., Sardanelli, F., & Zanoni, S. (2024). The environmental impact of energy consumption and carbon emissions in radiology departments: a systematic review. *European Radiology Experimental*, 8(1), 35.
- Shahzad, U., Fareed, Z., Shahzad, F., & Shahzad, K. (2021). Investigating the nexus between economic complexity, energy consumption and ecological footprint for the United States: New insights from quantile methods. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123806.
- Sharif, A., Baris-Tuzemen, O., Uzuner, G., Ozturk, I., and Sinha, A. (2020). Revisiting the role of renewable and non-renewable energy consumption on Turkey’s ecological footprint: Evidence from Quantile ARDL approach. *Sustainable Cities and Society*, 57, 102138.
- Şahin, D., & Yılmaz, S. (2020). Yenilenebilir enerji kullanımının çevresel etkileri: Türkiye örneği. *Çevre ve Sürdürülebilirlik Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 15–32.
- Şahin, G., & Ayyıldız, F. V. (2020). Climate change and energy policies: European Union-scale approach to a global problem. In H. Qudrat-Ullah & M. Asif (Eds.), *Dynamics of energy, environment and economy* (Vol. 77, pp. 269–288). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43578-3_14
- Şahin, G., Gökdemir, L., & Ayyıldız, F. V. (2019). Türkiye örneğinde Kirlilik Sığınağı ve Kirlenme Hale Hipotezleri üzerine ampirik bir araştırma. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 33, 104-140.
- Tekgün, B., Bolayır, S., & Eroğlu, İ. (2025). Mutlu gezegen arayışları: G-20 ülkelerinden kanıtlar. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 21(1), 280-313.
- Toda, H. Y., & Yamamoto, T. (1995). Statistical inference in vector autoregressions with possibly integrated processes. *Journal of Econometrics*, 66(1–2), 225-250.
- TÜİK (2022). *Sera gazı emisyon istatistikleri, 1990–2020*. Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara.
- Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience frontiers*, 15(2), 101757.
- World Bank (2025). *Turkey Climate and Development Report*. Washington, DC.
- Yateh, M., Li, F., Tang, Y., Li, C., & Xu, B. (2024). Energy consumption and carbon emissions management in drinking water treatment plants: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140688.
- Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J., & Xu, X. (2016). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3721-3734