UFÜ SOSYAL VE BEŞERİ BİLİMLER DERGİSİ
FIU JOURNAL OF SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

e-ISSN: 3062-2123
Journal of Academic Social Studies - JOSSH / Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi - SOBED Vol. /Cilt: 2 / Issue/Sayı: 3, Ocak/January 2026

DOI: 10.29329/ufusobed.2026.1410.4

Araştırma Makalesi / Research Article

Geliş /Arrival
9.10.2025

Kabul/Accepted
27.12.2025

Hakan Eryüzlü
Doç. Dr.
İskenderun Teknik Üniversitesi
hakan.eryuzlu@iste.edu.tr
0000-0003-3715-0021
Cem Boran
İskenderun Teknik Üniversitesi
cem.boran.lee24@iste.edu.tr
0009-0005-2089-152X

Metadata from Crossref

SCREENED BY iThenticate Professional Plagiarism Prevention

OPEN ACCESS

Türkiye'de Hurda Çelik Geri Dönüşümü ve Çevresel Etkileri

Öz

Modern Dünyada çelik üretimi önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de hurda çelik geri dönüşümünün endüstriyel karbon emisyonları üzerindeki etkisini ampirik olarak analiz etmektir. Veri seti olarak, 2003-2022 dönemine ait yıllık veriler kullanılmıştır. Analizde, çelik üretimi için kullanılan hurda miktarı (DLTUKETIM) ve sanayi kaynaklı karbon dioksit (CO2) emisyonları (CO2INDS) olmak üzere iki temel değişkene odaklanılmıştır. Çalışmanın metodolojisi, değişkenler arasındaki uzun ve kısa dönemli ilişkileri tespit etmek üzere iki aşamalı bir ekonometrik yaklaşım benimsemiştir. İlk aşamada, uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi olup olmadığını test etmek için ARDL Sınır Testi uygulanmıştır. Test sonucunda, değişkenler arasında istatistiki olarak anlamlı bir uzun dönem ilişkisi bulunamamıştır. Bu bulgu, analizin odağını kısa dönem dinamiklerine kaydırmıştır. İkinci aşamada, kısa dönemli nedensellik ilişkisini incelemek için bir Fark Vektör Otoregresif (VAR) modeli kurulmuş ve bu model üzerinden Granger Nedensellik Testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre: Çelik üretiminde kullanılan hurda miktarındaki artıştan endüstriyel CO2 emisyonlarına doğru tek yönlü, istatistiki olarak çok güçlü (χ^2=268.81, p=0.0000) bir nedensellik ilişkisi gözlemlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, hurda kullanımındaki artışın sanayi kaynaklı karbon salınımını anlamlı bir şekilde azalttığı ampirik olarak desteklenmiştir. Bu bulgu, hurda çelik geri dönüşümünün sadece ekonomik değil, aynı zamanda güçlü bir çevresel fayda ve karbon azaltım stratejisi olduğu görüşünü desteklemektedir.

Anahtar sözcükler: *hurda çelik geri dönüşüm, karbon emisyon, enerji, sürdürülebilir üretim, çevresel etki*

Steel Scrap Recycling and Environmental Impacts in Turkey

Abstract

Steel production holds a significant place in the modern world. This study aims to empirically analyze the impact of scrap steel recycling on industrial carbon emissions in Turkey. The analysis utilizes a dataset of annual figures covering the period from 2003 to 2022, focusing on two key variables: the amount of scrap used in steel production (DLTUKETIM) and industrial carbon dioxide (CO2) emissions (CO2INDS). The methodology employs a two-stage econometric approach to detect both long-run and short-run relationships between the variables. In the first stage, the ARDL Bounds Test was applied to check for a long-run cointegration relationship. The test results indicated no statistically significant long-run relationship between the variables. This finding shifted the focus of the analysis to short-run dynamics. In the second stage, a Difference Vector Autoregressive (VAR) model was constructed, and the Granger Causality Test was performed on this model to examine short-term causal links. The results obtained are unequivocal: A unidirectional and statistically very strong (χ^2=268.81, p=0.0000) causality relationship was found running from the increase in the amount of scrap used in steel production to the reduction of industrial CO2 emissions. In other words, the increase in scrap usage was empirically proven to significantly reduce industry-based carbon emissions. This finding demonstrates that scrap steel recycling is not only an economic activity but also a potent environmental benefit and carbon mitigation strategy.

Keywords: Scrap Steel Recycling, Carbon Emission, Energy, Sustainable Production, Environmental Impact

Giriş

Çelik üretiminin tarihçesi, insanlık tarihindeki en önemli endüstri gelişmelerinden biri olarak kabul edilir. İlk çelik üretimi, antik çağlarda demirin kullanılmasıyla başladı ve zaman içinde teknolojik gelişmeler sayesinde kalite ve verimlilik arttı (metaldunyası.com). Günümüzde de çelik üretimi, endüstri ve inşaat sektörlerinin temel yapı taşlarındandır. Ayrıca çelik üretimi ve ticareti ekonomilerin gelişim seviyeleri hakkında da bilgi sunan göstergelerden biridir. Worldsteel'in istatistiklerine göre (2024 yılı için) çelik üretiminde ilk 10'da yer alan ülkeler arasında; Çin, Japonya, ABD, Rusya, Güney Kore ve Almanya gibi görece gelişmiş ülkeler kategorisinde bulunan ülkeler yer almaktadır. Bu ülkelerin yüksek nüfusu ve sanayileşmiş ekonomileri, çelik talebini sürekli artırmakta ve üretim süreçlerini eskisinden daha hızlı, ekonomik ve sürdürülebilir bir noktaya taşımaktadır. Ayrıca, teknolojik gelişmelerle birlikte geri dönüşüm ve hurda çelik kullanımı da önemli bir yer tutmaktadır. Hurda çelik, özellikle maliyet avantajı ve çevresel faydalarıyla öne çıkarak, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır. Çok eski bir tarihe dayanan çelik üretim süreci teknolojinin gelişmesi ile hem ürün kalitesini artırmak hem de karbon ayak izini azaltacak yeniliklerle değişmekte, aynı zamanda sektörün sürdürülebilirliği sağlanmaktadır.

Genel olarak çelik üretimi; entegre demir çelik tesislerinde cevherden üretim yapan Bazik Oksijen Fırınlı (BOF) proses ve hurdadan üretim yapan Elektrik Ark Ocağı (EAO) ile İndüksiyon Fırınlı (IF) prosesler olmak üzere 3 ana proses altında gerçekleştirilmektedir. Cevherden üretim hem cevherin elde edilmesi hem de işlenmesindeki süreç itibariyle hurdadan üretilen çeliğe göre daha fazla enerji harcanmasını gerektirmektedir. Bu haliyle de cevherden üretim daha fazla

karbondioksit salınımına neden olmaktadır. Bu sebeple karbon salınımı azaltılması politikaları doğrultusunda, hurdadan çelik üretimi ülkeler açısından önemli bir üretim prosesidir. Buradaki hurda, kullanım dışı olan bir malzemenin posasını ifade etmektedir. Hurda çelik de artık kullanılmayacak bir malzemenin posasından elde edilen çeliktir. Bu sayede demir üretimi, cevherinden değil hurdadan geri dönüşüm yolu ile sağlanmış olur ki bu daha az enerji harcaması anlamına gelmektedir. Hurda çelik sadece modern endüstri üretim süreçlerinde önemli ekonomik bir kaynak olarak değil, çevreye duyarlılık açısından da kritik bir ürün olarak değerlendirilebilir. Çünkü çelik üretiminde hurda kullanımı, endüstriyel enerji tüketimini, sera gazı salınımlarını ve doğal kaynak kullanımını önemli ölçüde azaltır (Baş, 2023). Yeni çelik üretiminde hurda çelik kullanımı doğal kaynakları olan demir cevherine ve kömür bağımlılığını azaltarak çevre üzerindeki etkiyi en az seviyeye indirmeye yardımcı olur. Hâlihazırda çelik dünya genelinde en çok geri dönüştürülen malzemelerden biridir ve hurda demir çelik kullanımı enerji tasarrufu sağlayarak doğal kaynakların korunmasına ve karbon emisyonlarının azaltılmasına katılan önemli bir rol oynamaktadır (World Steel Association 2022).

Söz konusu hurdadan çelik üretimi için elektrik ark ocakları (EAO) kullanılır. Bu yöntemde, EAO ünitesinde, önceden indirgenmiş demir kaynakları (hurda çelik veya cevher bazlı demir metalleri) kullanılarak yeni ham çelik üretimi gerçekleştirilir (Baş, 2023). Geri dönüşüm odaklı üretim teknolojileri arasında yer alan elektrik ark ocakları sayesinde hurda çelik kullanımıyla geleneksel yüksek fırınlara kıyasla daha az enerji harcanabilmektedir. Bu kapsamda Hurda çelik, demir çelik endüstrisinde sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından son derece önemlidir. Türkiye

de çelik üretiminin yaklaşık yüzde 75'ini elektrik ark ocaklı tesislerde yapmaktadır (World Steel Association 2022).

Sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği, günümüzün üretim süreçlerinde giderek daha fazla öncelik kazanırken, yeni teknolojiler aracılığıyla enerji tüketiminin azaltılması temel hedeflerden biri haline gelmiştir. Bunun yanı sıra yukarıda da belirtildiği gibi, geri dönüşüm ve hurda çelik kullanımının giderek artması çevresel etkileri azaltarak kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Çelik üretimindeki bu dinamikler, piyasa talepleri, ekonomik koşullar ve teknolojik yenilikler ışığında biçimlenerek sektörün gelecekteki yönelimlerini belirlemektedir. Aynı zamanda, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik adına geliştirilen yeni yaklaşımlar ve politikalar, sektörün uzun vadeli devamlılığı açısından kritik bir önem taşımaktadır. (Pauliuk vd., 2013). Literatürde bu minvalde gelişmiştir. Dyer (2007), Çelik işleme süreçlerinden kaynaklanan atıkların çevresel etkileri üzerinde durmuş ve sürekli döküm makinelerinin bu etkiler açısından en az olumsuzluk yarattıkları ifade etmiştir. Bu kapsamda, atıkların geri dönüştürülmesinin, maliyetlerin azaltılması ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesi bakımından büyük önem taşıdığı özellikle vurgulanmaktadır. Başka bir çalışmada Genaidy vd. (2009), çelik endüstrisinde geri dönüşüm uygulamaları ve atık azaltma teknolojilerinin etkilerini ele almışlardır. Bu bağlamda, özellikle sürekli hurda eritme süreçlerinin enerji verimliliği ve olumlu çevresel etkileri vurgulamışlardır.

Son yıllarda daha yeşil dostu üretim kapsamında sektörler dönüşümler yaşamaya başlamıştır. 2024 yılı verilerine göre Dünyada toplam ham çelik üretimi 1.8 milyon tondur. 2025 yılı itibariyle de dünya genelinde üretilen çeliğin yaklaşık %98'inden fazlası sıfır karbon emisyonu hedefi belirlemiş ülkelerde gerçekleştirilmektedir (worldsteel.org).

Sıfır karbon emisyonu hedefi içinse hurda çelikten dönüşüm en önemli araçtır. 2020 yılında geri dönüştürülmüş çelik kullanımı sayesinde dünya çapında yaklaşık 950 milyon ton karbon salınımının önüne geçilmiştir (International Recycling Bureau 2021). Halihazırda çeliğin ticareti ve gerekliliği de üretiminin çok üstündedir. Bu sebeple hurda çelik üretimi önemli bir konumdadır. Gelişmiş ekonomiler arasında ABD ve Avrupa Birliği ülkelerinin yanı sıra Japonya gibi ülkeler dünya hurda çelik ticaretinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu ülkeler yüksek geri dönüşüm kapasitesine sahip oldukları için küresel hurda çelik ihracatının büyük bir bölümünü gerçekleştirmektedirler. Örneğin 2021 yılında ABD dünya genelinde en büyük hurda çelik ihracatçısı konumuna gelerek yaklaşık 17 milyon ton hurda çelik ihraç etmiştir. Aynı yıl Avrupa Birliği ülkelerinin ise toplam ihracat miktarı 19 milyon ton seviyesine ulaşarak dikkate değer bir performans göstermiştir (OECD, 2022). Türkiye'nin yanı sıra Hindistan ve Çin gibi hızlı gelişen ülkeler de dünya çapında en büyük hurda çelik ithalatçıları arasında bulunmakta ve üretim kapasitelerini de artırmaktadırlar.

1.1. Türkiye'de Hurda Çelik Üretimi ve Tüketimi

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de hurda çelik üretimi, sanayileşme süreçlerinin hızlanması, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve çevresel kaygıların artmasıyla birlikte giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Türkiye'nin demir çelik endüstrisinde; hurda çelik üretiminin rolü, ithalat bağımlılığı, üretim teknolojileri, çevresel etkiler ve sektörel rekabet gibi birçok unsur bulunmaktadır. Özellikle, geri dönüşüm süreçlerinin düşük verimliliği, hurda çelik kalitesindeki dalgalanmalar ve küresel tedarik zincirindeki kırılganlıklar gibi sorunlar, sektörün sürdürülebilir büyümesini kısıtlayan zorluklar arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, teknolojik yeniliklerin ve daha etkili geri dönüşüm politikaları-

nın uygulanması, hurda çelik sektörünün geleceği açısından kritik bir öneme sahiptir. Türkiye gibi ülkelerde çelik ithalat bağımlılığı, sektör için bir "dışa bağımlılık riski" ve "kırılganlık" taşımakta, özellikle küresel fiyat dalgalanmaları ve politika değişiklikleri (örneğin Avrupa Yeşil Mutabakatı) karşısında sektörü savunmasız bırakabilmektedir. Riskleri azaltmak için "yerel hurda toplama altyapısının güçlendirilmesi" ve "temiz teknolojilere yatırım" gibi politikalar büyük önem taşımaktadır (Ergün vd., 2024).

Türkiye'nin çelik üretim kapasitesinin büyük bir kısmı EAO ile gerçekleştirilmektedir. Bu üretim yöntemi, büyük oranda hurda çelik kullanımını gerektirdiği ve iç üretim de yetmediği için Türkiye, hurda çelik ithalatına bağımlı bir ülke konumundadır. Türkiye, özellikle hurda çelik ithalatında lider ülkelerden biridir. 2022 yılı itibarıyla, Türkiye yaklaşık 25 milyon ton hurda çelik ithalatı gerçekleştirmiştir. Bu miktar, dünya toplam hurda çelik ticaretinin yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır (Turkish Steel Producers Association, 2023). Türkiye'nin ithalatında en büyük tedarikçiler ise ABD, Avrupa Birliği ülkeleri ve Rusya'dır. 2021 yılında Türkiye'nin ithal ettiği hurda çeliğin yaklaşık %50'si AB ülkelerinden, %20'si ABD'den ve kalan kısmı diğer ülkelerden yapılmıştır (World Steel Association, 2022).

Türkiye'deki demir çelik tesislerinin çoğunluğu entegre demir çelik tesisleri olmakla birlikte, elektrik ark ocaklı tesislerin sayısı ve üretim kapasitesi de oldukça yüksektir. Bu tesislerde, hurda metalin geri dönüşümüyle elde edilen çelik hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. EAO ile üretim yapan tesislerde, atıkların geri dönüşümü ve tekrar kullanımı açısından yapılan değerlendirmelerde, mevcut durumun Avrupa Birliği'nin Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Direktifi'ne

(IPPC) ve Mevcut En İyi Teknikler (MET) Referans Dokümanına (BREF) büyük oranda uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, Türkiye'de hurda çelik üretiminin çevresel standartlara uygun şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir (Gökcecik ve Dulkadiroğlu, 2021).

Hurda çelik üretiminin Türkiye'deki önemi, yalnızca çevresel faydalarla sınırlı kalmamaktadır. Hurda çelik, sektörün temel girdilerinden biri olarak, üretim teknolojileri ve maliyet yapısında belirleyici bir rol üstlenmektedir. Bu haliyle Türkiye, demir çelik sektöründe hem cevher hem de hurda ithalatına bağımlı bir ülke durumundadır. Özellikle hurda çelik ithalatı, sektörün sürdürülebilirliği ve rekabet gücü açısından önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'nin demir çelik ithalatında en yüksek ithalat değeri, demir çelik döküntüleri ve hurdaları ile bunların külçeleri ürünlerine aittir. Endüstri öncesi dönemde değersiz olarak görülen hurda ve atıklar, artan tüketim ve üretimle birlikte ekonomik katma değere sahip ürünler haline gelmiştir (Ergün ve Bulut, 2024). Bu durum, hurda çelik üretiminin Türkiye ekonomisindeki stratejik konumunu güçlendirmektedir.

Türkiye'de hurda çelik üretiminin gelişimi, uluslararası ticaret ilişkileri ve küresel piyasalardaki dinamiklerle sıkı bir ilişki içindedir. Hurda demir ticareti, demir cevherinin yer altından çıkarılması ve işlenmesi sırasında oluşan yüksek enerji ve kaynak tüketimi nedeniyle son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Uluslararası hurda demir ticaret ilişkilerinin sosyal ağ analiziyle yapılan değerlendirmelerde, Türkiye'nin 2010 ve 2020 yıllarında ağın en fazla gelen bağlantıya sahip ülkesi olduğu ve bu durumun ülkeyi en önemli ihracat pazarı konumuna getirdiği tespit edilmiştir. ABD ve Almanya ise giden bağlantısı en fazla olan ülkeler olup, hurda demir ticaretinde en önemli malzeme tedarikçileri arasında yer

almaktadır (Çetin ve Filiz, 2023). Bu bulgular, Türkiye'nin hurda çelik üretimindeki dışa bağımlılığının ve uluslararası ticaret ağındaki merkezi rolünün altını çizmektedir.

Hurda çelik üretiminin Türkiye'deki çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik boyutu da giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ergün (2024) çalışmasında, küresel iklim krizi uyum tedbirleri ve çevresel regülasyonlar açısından, demir çelik endüstrisinde çelik üretimi, demirli atık ve hurda ithalatı ile karbon emisyonları arasındaki ilişki, yapısal kırılmalı zaman serileri analiziyle incelenmiştir. Simetrik nedensellik sonuçlarına göre, demirli atık ve hurda malzeme ithalatından çelik üretimine doğru güçlü bir nedensellik ilişkisi olduğu görülmektedir. Ayrıca, karbon emisyonlarının negatif şoklarından demirli atık ve hurda ithalatının pozitif şoklarına doğru ve ham çelik üretiminin negatif şoklarından demirli atık ve hurda ithalatının negatif şoklarına doğru tek yönlü nedensellik olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, Türkiye'nin demir çelik endüstrisinde yatırım ve ticaret politikalarını iklim krizi etkilerine göre yeniden değerlendirmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Türkiye'de hurda çelik üretiminin geleceği, teknolojik yenilikler, uluslararası rekabet, çevresel düzenlemeler ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda şekillenmektedir. Sektörde enerji verimliliğinin artırılması, çevre dostu üretim yöntemlerinin benimsenmesi ve yerli hurda kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük önem arz etmektedir. Hurda çelik üretimi, Türkiye'nin sanayileşme ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Bu çalışama amacı da hem ekonomik hem de çevresel olarak olumlu katkıları olan hurda çelik geri dönüşümü

konusunda Türkiye özelinde analiz yapmak ve olası yararları ile politika önerilerinde bulunmaktır. Bu amaçla Türkiye için hurda çeliğin Türkiye'de karbon emisyon oranları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla hurda çeliğin üretim ve tüketim miktarları ile endüstriyel karbon emisyon hacmi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışmanın araştırma sorusu "hurda çelik üretimi karbon emisyon hacminin azalmasına katkıda bulunmakta mıdır?" olarak belirlenmiştir.

Avrupa Yeşil Mutabakatı ve sınırda karbon düzenleme mekanizması gibi uluslararası regülasyonlar, Türkiye'nin çelik sektöründe karbon emisyonlarını azaltma önlemleri almasını zorunlu kılmaktadır. Uçak ve Villi'nin analizine göre (2021), Türkiye, AB'ye çelik ihracatındaki rekabet gücünü korumak için üretimde karbon emisyonlarını düşürücü tedbirler almak zorundadır. Aksi takdirde, sınırda karbon mekanizması ile %8 ile %19 arasında ek vergilerle karşılaşacaktır. Bu durum, hurda çelik ithalatı ve geri dönüşümünün, karbon emisyonlarının azaltılması ve uluslararası rekabetçiliğin sürdürülmesi açısından stratejik bir politika aracı olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Türkiye özelinde yapılan ampirik çalışmalar, çelik üretimi ve karbon emisyonları arasındaki nedensellik ilişkilerinin tarihsel ve yapısal faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Miçooğulları'nın 1923-2018 dönemini kapsayan çalışmasında, karbon emisyonları ile ekonomik büyüme arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi tespit edilmiştir. Özellikle, belirli alt dönemlerde karbon emisyonlarından GSYİH'ye ve ekonomik büyümeden karbon emisyonlarına doğru nedensellik ilişkileri gözlemlenmiştir. Bu bulgu, çelik sektörünün hem ekonomik büyüme hem de çevresel etkiler bakımından kritik bir ara yüz oluşturduğunu göstermektedir (Miçooğulları, 2023). Benzer şekilde, Han'ın BRICS-T ülkeleri üzerinde yaptığı analizde,

karbon emisyonlarından yenilenebilir enerjiye doğru tek yönlü bir nedensellik ilişkisi olduğu ve ekonomik büyümenin yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik ettiği belirlenmiştir. Bu durum, Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında çelik sektörünün karbon emisyonlarını azaltıcı politikalar ve yenilenebilir enerji yatırımlarının önemini vurgulamaktadır (Han, 2024).

2. Metodoloji ve Ampirik Sonuçlar

Çalışma için "steel-data" veri tabanından alınmış, 2003-2022 yılları arasına ait yıllık; Tüketim (çelik üretimi için kullanılan hurda çelik miktarı), üretim (Türkiye'de toplanan hurda miktarı) ve endüstri karbon salınım miktarı verileri kullanılmıştır.

Çalışmada, serilerin durağanlık özelliklerini tespit etmek ve birim kök içerip içermediklerini değerlendirmek amacıyla üç farklı birim kök testi kullanılmıştır. ADF ve PP testleri kullanılarak serilerin birim kök içerip içermediği sınanmıştır. ADF testi, Dickey ve Fuller tarafından geliştirilen birim kök testinin genişletilmiş bir versiyonu olarak, seride otokorelasyon problemini gidermek amacıyla gecikmeli fark terimleri eklemek suretiyle modelleme yapar. PP testi ise ADF testiyle benzer bir amaca sahiptir ve serilerin birim kök içerip içermediğini değerlendirir. Ancak, otokorelasyon ve değişen varyans problemlerini non-parametrik yöntemlerle düzeltmesi açısından farklılık gösterir ve gecikme uzunluğuna karşı duyarlılığı daha düşüktür. KPSS testi ise serilerin durağanlık varsayımını desteklemek amacıyla uygulanmıştır. KPSS testi ise diğer testlerden ayrışarak, sıfır hipotezi olarak serinin durağan olduğunu kabul eder ve durağanlıktan sapma derecesini hata terimlerinin varyansı üzerinden ölçer. ADF ve PP testlerinde sıfır hipotezinin reddedilmesi, serilerin durağan olduğu anlamına gelirken, KPSS testinde sıfır hipotezinin reddedilmemesi aynı şekilde durağanlığı ifade etmektedir. Bu

analizler farklı gecikme uzunlukları ve model türleri (none, sabit, trend ve sabit) altında gerçekleştirilmiş ve sonuçların tutarlılığı detaylı şekilde değerlendirilmeye alınmıştır.

Değişkenler arasındaki kısa ve uzun dönem ilişkilerini incelemek hem politika yapıcılar hem de araştırmacılar açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla çalışmanın eşbütünleşme analizi aşamasında ise ARDL sınır testi yöntemi kullanılmıştır. Pesaran, Shin ve Smith tarafından geliştirilen Otoregresif Dağıtılmış Gecikme (ARDL) modeli, gerek durağan (I(0)) gerekse birim köklü (I(1)) serilerle çalışabilmesi bakımından yaygın bir kullanıma sahiptir. Küçük örneklem büyüklüklerinde güvenilir sonuçlar sunması ve eşbütünleşme analizine olanak tanıması ARDL modelini diğer yöntemlerden ayıran başlıca avantajlardır. ARDL analizi, eşbütünleşme ilişkisini sınır testi yaklaşımıyla test ederek kısa dönem dinamikleri ile uzun dönem denge ilişkilerini aynı modelde ele alabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde makroekonomik değişkenler arasındaki ilişkileri analiz etmede ve politika önerileri geliştirmede etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Model ayrıca bağımsız değişkenlerin farklı gecikme uzunluklarında dâhil edilmesine olanak tanıyarak, değişkenler arasındaki karmaşık ilişkilerin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

Değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisinin yönünü tespit etmek amacıyla Vektör Otoregresif (VAR) modeli temelinde Granger nedensellik testi uygulanmıştır. Granger nedensellik testi, bir değişkenin gecikmeli değerlerinin, diğer bir değişkeni tahmin etme gücünün istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını sınamaktadır (Granger, 1969). Bu çalışmada, 2003-2022 dönemini kapsayan yıllık verilerle oluşturulan ve hurda çelik üretimi, tüketimi, ithalatı ile endüstriyel karbon emisyonu (CO2İnds) değişkenlerini içeren VAR sisteminde, optimal gecikme uzunluğu Akaike Bilgi Kriteri (AIC) esas

alınarak belirlenmiştir. VAR modelinin durağanlık koşulu, birim kök çemberi kriteri ile kontrol edilmiş ve nedensellik testleri, değişkenler arasındaki kısa dönemli dinamik ilişkileri ortaya koymak için kullanılmıştır (Lütkepohl, 2005). Bu yöntem, değişkenlerin birbirlerinin gelecek değerlerini öngörmede ne ölçüde katkı sağladığını belirleyerek, "hurda çelik üretiminin karbon emisyonlarını azaltıp azaltmadığı" ana araştırma sorusuna yanıt aramada etkin bir araç sunmaktadır.

Önerilen metodoloji kapsamında ulaşıan ampirik sonuçlar şu şekildedir; serilerin üç teste göre durağanlık analizleri tablo 1'de özetlenmiştir (üretim ve tüketim serileri test edilmeden önce logaritmaları alınmıştır);

Tablo 1 Serilerin Durağanlık Analizleri Sonuçları

ADF TESTİ*	**SEVİYESİNDE**			**1. FARKINDA**		
	None	**C**	**C+T**	**None**	**C**	**C+T**
Üretim	1.219249 (0.9367)	**-4.653305 (0.0018)**	**-4.253989 (0.0170)**	**-6.489045**	**-31392 (0.0001)**	**-3.759416 (0.0460)**
Tüketim	1.464380 (0.9581)	**-33204 (0.0356)**	-2.154528 (0.4822)	**-3.832054 (0.0007)**	**-40454 (0.0050)**	**-5.112527 (0.0041)**
CO_2	0.279007 (0.7562)	-1.085403 (0.6991)	-1.925736 (0.6022)	**-4.237816 (0.0003)**	**-82624 (0.0052)**	**-4.763631 (0.0094)**
PP TESTİ*	**SEVİYESİNDE**			**1. FARKINDA**		
	None	**C**	**C+T**	**None**	**C**	**C+T**
Üretim	1.307622	**-4.853714**	**-4.253989**	**-7.118856**	**-7.302852**	**-18.24291**

	(0.9456)	**(0.0012)**	**(0.0170)**	**(0.0000)**	**(0.0000)**	**(0.0001)**
Tüketim	1.706495 (0.9739)	**-4.286446** **(0.0039)**	**-2.355170** **(0.3881)**	**-3.652720** **(0.0011)**	**-3.995758** **(0.0076)**	**-6.131247** **(0.0006)**
CO_2	0.697088 (0.8574)	-1.022301 (0.7231)	-1.655517 (0.7308)	**-4.295870** **(0.0002)**	**-4.392958** **(0.0034)**	**-8.230553** **(0.0000)**
KPSS TESTİ**	**SEVİYESİNDE**			**1. FARKINDA**		
	None***	**C**	**C+T**	**None*****	**C**	**C+T**
Üretim	Null	0.591338 %5 (0.463)	0.185419 %5 (0.146)	Null	**0.385634** **%5 (0.463)**	**0.194907** **%5 (0.146)**
Tüketim	Null	0.520534 %5 (0.463)	0.159382 %5 (0.146)	Null	**0.391150** **%5 (0.463)**	**0.500000** **%1 (0.216)**
CO_2	Null	**0.396284** **%5 (0.463)**	**0.180129** **%1 (0.216)**	Null	**0.446633** **%5 (0.463)**	**0.420918** **%1 (0.216)**

*Üst değerler T istatistiğini, parantez içindeki değerler ise anlamlılık düzeyini göstermektedir.
**Üst değer KPSS test istatistiğini, altaki değer %1, %5 veya %10'a göre kritik değerleri göstermektedir.
***KPSS testinde hesaplanmaz.

Durağanlık testi sonuçlarına göre Üretim serisi ADF testine göre seviyesinde, PP testine göre seviyesinde KPSS testine göre ise 1. Farkında durağandır. Tüketim serisi ADF testine göre seviyesinde, PP testine göre seviyesinde KPSS testine göre ise 1. Farkında durağandır. CO2 serisi ise ADF testine göre 1. Farkında, PP testine göre 1. Farkında, KPSS testine göre ise seviyesinde durağandır. Değişkenlerin entegrasyon derecelerini belirlemek için ADF, PP ve KPSS birim kök testleri uygulanmıştır. Test sonuçları arasında çelişki olması durumunda, hipotezlerinin yapısı gereği KPSS testinin daha güvenilir olduğu kabul edilmiş ve nihai kararlar bu doğrultuda verilmiştir (Örneğin, Kwiatkowski vd., 1992).

Buna göre üretim ve tüketim serileri 1. Farklarında durağan (I(1)), CO2 serisi ise seviyesinde (I(0)) durağan kabul edilmiştir.

Serilerin farklı seviyelerinde durağanlığını da göz önüne alındığında eşbütünleşme analizi için ARDL testi uygulanmıştır. Üretim - CO_2 ve Tüketim – CO_2 olmak üzere iki eşbütünleşme analizi yapılmıştır. Öncelikle Üretim - CO_2 ilişkisi için ARDL sınır testi yapılmıştır. Bu analizde "Üretim CO_2 emisyonlarını etkiler mi?" sorusu kapsamında CO_2 serisi bağımlı değişken alınmıştır. Buna göre ARDL F istatistiği sonuçları tablo 2'de verilmiştir;

Tablo 2. ARDL Sınır Testi Sonuçları

F istatistiği	K (gecikme)	I(0) "alt sınır"	I(1) "üst sınır"
5.200837	1	4.13 (%1)	5.58 (%1)

Bu sonuçlara göre F istatistiği alt ve üst sınır değerleri arasında kalmıştır. Yani Türkiye için Üretim - CO_2 serileri arasında uzun dönemli bir ilişki yoktur. Seriler arasındaki kısa dönemli ilişki içinse fark VAR modeli kurulmuştur. Sistemin optimal gecikme uzunluğu 5 olarak belirlenmiştir. Bu gecikmede kurulan Granger nedensellik modeli sonuçları ise tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Fark VAR Modeli Granger Nedensellik Sonuçları

Bağımlı değişken CO_2

	Chi-sq	df	Prob.
Üretim	18.40413	5	0.0025

Bu sonuçlara göre Üretim büyümesi, CO_2 emisyon seviyelerinin Granger nedenidir. Bir başka şekilde; Hurda toplama miktarındaki artış, sanayi kaynaklı CO_2 emisyonlarının Granger nedenidir. Bu sonuca göre bazı çıkarımlar yapılabilir; örneğin, Türkiye'deki çelik ve metalürji sanayisi gibi enerji yoğun sektörler, hurdayı önemli bir ham madde kaynağı olarak kullanır. Hurda metalın ergitilerek yeni ürüne dönüştürülmesi, cevherden metal üretimine kıyasla çok daha az enerji gerektirir ve dolayısıyla daha düşük CO_2 emisyonuna yol açar. Yine rtan hurda toplama miktarı, ekonomideki döngüsellik (circularity) oranının arttığına işaret eder. Geri dönüştürülmüş hurdanın üretim sürecine daha fazla dahil edilmesi, birim çıktı başına düşen emisyon yoğunluğunu (carbon intensity) azaltıyor olabilir. Yani, sanayi aynı seviyede çıktı üretirken daha az kirletiyordur.

İkinci olarak Tüketim - CO_2 ilişkisi için ARDL sınır testi yapılmıştır. Bu analizde "Tüketim CO_2 emisyonlarını etkiler mi?" sorusu kapsamında CO_2 serisi bağımlı değişken alınmıştır. Buna göre ARDL F istatistiği sonuçları tablo 4'de verilmiştir;

Tablo 4. ARDL Sınır Testi Sonuçları

F istatistiği	K (gecikme)	I(0) "alt sınır"	I(1) "üst sınır"
1.737549	1	4.13 (%1)	5.58 (%1)

Bu sonuçlara göre F istatistiği alt ve üst sınır değerleri arasında kalmıştır. Yani Türkiye için Tüketim - CO_2 serileri arasında uzun dönemli bir ilişki yoktur. Seriler arasındaki kısa dönemli ilişki içinse fark VAR modeli kurulmuştur. Sistemin optimal gecikme uzunluğu 5 olarak belirlenmiştir. Bu gecikmede kurulan Granger nedensellik modeli sonuçları ise tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Fark VAR Modeli Granger Nedensellik Sonuçları

Bağımlı değişken CO_2			
	Chi-sq	df	Prob.
Tüketim	268.8133	5	0.0000

Bu sonuçlara göre Çelik üretiminde kullanılan hurda miktarındaki artış, endüstriyel karbon salınımı seviyelerinin Granger nedenidir. Bu bulgu, Türkiye çelik sektörü özelinde, hurda kullanımındaki artışın sanayi kaynaklı karbon emisyonlarını istatistiki olarak anlamlı bir şekilde azalttığına işaret etmektedir. Bu durum, hurda metalin birincil ham maddeye (demir cevheri) kıyasla çok daha düşük enerji ve emisyon yoğunluğuna sahip olmasıyla açıklanabilir. Dolayısıyla, bu sonuç, hurda metallerin geri dönüşümünü teşvik eden politikaların, aynı zamanda bir karbon azaltım (mitigasyon) stratejisi olarak da değerlendirilebileceğine dair ampirik kanıt sunmaktadır.

Sonuç ve Politika Önerileri

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de hurda çelik geri dönüşümünün endüstriyel karbon emisyonları üzerindeki etkisini ampirik olarak incelemekti. Çalışmada, 2003-2022 dönemine ait yıllık veriler kullanılarak, çelik üretiminde kullanılan hurda miktarı ile sanayi kaynaklı CO2 emisyonları arasındaki ilişki ARDL sınır testi ve Fark VAR modeli ile analiz edilmiştir.

ARDL sınır testi sonuçları, değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi olmadığını göstermiştir. Bu durum, analizin odağını kısa dönemli dinamik ilişkilere kaydırmıştır. Fark VAR modeli üzerinden yapılan Granger nedensellik testi sonuçları ise, çelik üretiminde kullanılan hurda miktarındaki artıştan, endüstriyel karbon salınımına doğru tek yönlü, istatistiki olarak güçlü (χ^2=268.81, p=0.0000) bir nedensellik ilişkisi olduğunu ortaya koymuştur. Diğer bir ifadeyle, çelik üretiminde hurda kullanımındaki artış, sanayi kaynaklı karbon emisyonlarını anlamlı bir şekilde azaltmaktadır. Türkiye çelik sektörü özelinde, hurda kullanımının enerji verimliliği sağlayarak birim çıktı başına düşen karbon emisyon yoğunluğunu düşürdüğü ve bu sayede toplam emisyonları azalttığı söylenebilir. Bu durum, çalışmanın giriş kısmında belirtildiği gibi, Elektrik Ark Ocaklı (EAO) üretim prosesinin, Bazik Oksijen Fırınlı (BOF) prosese kıyasla çevresel üstünlüğünü ampirik olarak doğrulamaktadır.

Bu kapsamda şu tedbirler veya politikalar yapmak karbon emisyon salınımı azaltımına olumu etki edecektir;

- Yerli hurda arzının sürekliliğini ve güvenilirliğini sağlamak için etkin bir ulusal hurda toplama, ayrıştırma ve sınıflandırma sistemi kurulmalıdır. Belediyeler, özel sektör ve STK'lar iş birliği içinde hurda kaynaklı bir konsept geliştirilmeli

ve vatandaşların hurda geri dönüşümüne katılımını teşvik eden kampanyalar yürütülmelidir.

- Türkiye'nin hurda çeliğe olan yüksek bağımlılığı düşünüldüğünde, ithalatta yaşanan aksaklıklar ve gümrük süreçleri üretimi doğrudan etkilemektedir. Hurda ithalatını kolaylaştıracak, bürokrasiyi azaltacak ve istikrarlı bir tedarik zinciri oluşturacak düzenlemeler yapılmalıdır. İthalat vergileri, çevresel faydalar göz önünde bulundurularak revize edilebilir.
- Hurda bazlı çelik üretim yapan tesisler, düşük karbon ayak izleri nedeniyle "yeşil çelik" üreticisi olarak kabul edilmeli ve bu kapsamda desteklenmelidir. Bu tesisler, yeşil tahvil, düşük faizli kredi ve vergi indirimi gibi finansal teşvik mekanizmalarından öncelikli olarak yararlanmalıdır. Yatırımlar, enerji verimliliğini daha da artıracak teknolojilere kaydırılmalıdır.
- Oluşturulması planlanan veya oluşturulacak bir karbon piyasasında veya karbon vergisi uygulamasında, hurda kullanım oranı yüksek olan tesislere yönelik istisnalar veya daha düşük karbon fiyatları getirilebilir. Bu, firmaları hurda kullanımını artırmaya doğrudan özendirecek bir politika aracı olacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma; hurda çelik geri dönüşümünün, Türkiye'nin enerji güvenliği, sanayi rekabeti ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine aynı anda hizmet edebilecek politika araçlarından biri olduğunu göstermiştir. Hurda, sadece ekonomik bir girdi değil, aynı zamanda güçlü bir karbon azaltım stratejisidir.

KAYNAKLAR

Baş, D. (2023). Türkiye çelik sektörünün karbonsuzlaşması: Mevcut durum. *İstanbul Politikalar Merkezi (İpm), Haziran*.

Çetin, B., ve Filiz, T. (2023). Küresel hurda demir ticareti ilişkilerinin sosyal ağ analizi yöntemiyle değerlendirilmesi. *Journal of Mehmet Akif Ersoy University Economics and Administrative Sciences Faculty,* 10(1), 158-182. https://doi.org/10.30798/makuiibf.1097376

Dyer, S. (2007). *Chip Recycling: Recycling of Chips from BZZ Conditioning Processes* (Doctoral dissertation, Faculty of WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE In partial fulfillment of the requirements for the Degree of Bachelor of Science Submitted by: Sean Dyer Bao Ngo Kurt Wivagg Submitted to: Project Advisor: Prof. Yiming (Kevin) Rong Project Liaison: Dr. Han Zhang, Saint-Gobain).

Ergün, Ü. R. (2024). Türkiye'de çelik üretimi, hurda malzeme ithalatı ve karbon emisyonları arasındaki ilişki: Yapısal kırılmalı zaman serileri analizi. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (2024), 313-338.

Ergün, Ü. R., ve Bulut, E. (2024). Türkiye'nin demir çelik ithalatının kümeleme analizi ile incelenmesi. *Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi,* 25(2), 370-393. https://doi.org/10.53443/anadoluibfd.1369434

Ergün, Ü. R., Yeşiltepe, S. A., ve Bulut, E. Üretim yöntemlerine göre demir çelik endüstrisinin hammadde bağımlılığı: Türkiye üzerine bir araştırma. *İzmir İktisat Dergisi*, *40*(2), 434-473.

Genaidy, A. M., Sequeira, R., Tolaymat, T., Kohler, J., & Rinder, M. (2009). Evidence-based integrated environmental solutions for secondary lead smelters: pollution prevention and waste minimization technologies and practices. *Science of the total environment*, *407*(10), 3239-3268.

Gökcecik, G., & Dulkadiroğlu, H. (2021). Elektrik ark ocağı ile üretim yapan bir demir-çelik tesisinin mevcut en iyi

teknikler kapsamında değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *10*(2), 465-471.

Granger, C. W. J. (1969). Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica*, 37(3), 424–438.

Han, A. (2024). BRICS-T ülkelerinde çevresel sürdürülebilirlik: karbon emisyonları, yenilenebilir enerji ve ekonomik büyüme ilişkileri. *Abant Sosyal Bilimler Dergisi,* 24(1), 136-151. https://doi.org/10.11616/asbi.1391917

https://metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/86/demir-ve-celik-uretiminin-kisa-bir-tarihcesi.html (Erişim: 10.06.2025)

International Recycling Bureau [BIR]. (2021). World steel recycling in figures 2021. Retrieved from https://www.bir.org

Kwiatkowski, D., Phillips, P. C. B., Schmidt, P., & Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? Journal of Econometrics, 54(1–3), 159–178. https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90104-Y

Lütkepohl, H. (2005). New introduction to multiple time series analysis. Springer Science & Business Media.

Miçooğulları, S. A. (2023). The nexus between carbon emissions and economic growth in Türkiye at the 100th Anniversary of the Republic: Rolling window causality analysis with historical data. *Kent Akademisi,* 16 (Türkiye Cumhuriyetinin 100. Yılı Özel Sayısı | Special Issue for the 100th Anniversary of the Republic of Türkiye), 175-188. https://doi.org/10.35674/kent.1352619

OECD. (2022). Global trade and recycling trends in scrap steel. Retrieved from https://www.oecd.org

Pauliuk, S., Milford, R. L., Muller, D. B., & Allwood, J. M. (2013). The steel scrap age. *Environmental science & technology*, *47*(7), 3448-3454.

Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of applied econometrics*, *16*(3), 289-326.

Turkish Steel Producers Association [TÇÜD]. (2023). Türkiye çelik sektörü raporu 2022. Retrieved from https://www.tcud.org.tr

https://worldsteel.org/about-steel/facts/steelfacts/#climate-action (Erişim: 12.06.2025)

Uçak, S., ve Villi, B. (2021). Avrupa yeşil mutabakatının çelik sektörüne olası etkileri. Uygulamalı Ekonomi ve Sosyal Bilimler Dergisi, 3(2), 94-113.https://doi.org/10.46959/jeess.987971

World Steel Association. (2022). Steel recycling and sustainability. Retrieved from https://www.worldsteel.org

FİNANS: Bu çalışmanın yürütülmesinde herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI: Yazar, bu çalışmayı etkileyebilecek finansal çıkarlar veya kişisel ilişkiler olmadığını beyan eder.

YAZAR KATKILARI: Yazar, makalenin tümünü katkılarıyla oluşturmuştur.

ETİK ONAY BEYANI: Bu çalışmada Yerel Etik Kurul Onayına gerek duyulmamıştır. Yazar, bu üründe derginin Yapay Zekâ politikasına uymayı taahhüt etmiştir.

VERİ KULLANILABİLİRLİK BEYANI: Bu çalışmada kullanılan verilere yazardan talep üzerine erişilebilir.

FINANCE: No financial support was received for the conduct of this study.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT: The author declare that there are no financial interests or personal relationships that may influence this study.

AUTHOR CONTRIBUTIONS: The author has contributed to the manuscript in its entirety.

ETHICAL APPROVAL STATEMENT: Local Ethics Committee Approval was not required for this study. The author has committed to complying with the journal's Artificial Intelligence policy in this product.

DATA AVAILABILITY STATEMENT: The data used in this study are available upon request from the author.

Bu eser Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.
(This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License)