

Türkiye Ham Çelik İstihsalinde Karbon Yoğunluğunun Seyri: Oksijenli ve Elektrikli Prosesler Bağlamında Zaman Serileri Analizi ve NARDL Yaklaşımı

Ümit Remzi Ergün¹

Özet

Bu bölümün amacı Türkiye’de 1978-2024 döneminde ham çelik üretiminde karbon emisyonlarının uzun dönemli seyrini oksijenli ve elektrikli proses ayrımı temelinde incelemek ve üretim kompozisyonundaki değişimlerin karbon yoğunluğu üzerindeki etkilerini doğrusal olmayan dinamikler çerçevesinde ampirik olarak ortaya koymaktır. Bu kapsamda karbon emisyonları ile üretim bileşenleri arasındaki ilişkiler eşbütünleşme ve asimetrik nedensellik yaklaşımları kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada serilerin durağanlık özellikleri ADF, KPSS, ZA ve KSS birim kök testleri ile sınanmıştır. Doğrusal olmayan yapı BDS testi ile değerlendirilmiştir. Uzun dönem ilişkiler ise NARDL modeli aracılığıyla tahmin edilmiş ve nedensellik ilişkileri Hatemi J asimetrik nedensellik testi yardımıyla analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular Türkiye’de ham çelik üretim kompozisyonu ile karbon emisyonları arasında uzun dönemli ve doğrusal olmayan bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Oksijenli ve elektrikli üretim artışlarının karbon emisyonlarını artırdığı tespit edilmekle birlikte bu etkinin şiddetinin şokların yönüne göre farklılaştığı belirlenmiştir. Asimetrik nedensellik sonuçları karbon dinamikleri üzerinde oksijenli proseslerin daha belirleyici bir rol oynadığını, elektrikli üretimin etkisinin ise büyük ölçüde enerji bileşiminin karbon yoğunluğuna bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak Türkiye’de çelik sektörüne ilişkin karbon azaltım politikalarının üretim hacminden ziyade üretim türü ve proses farklılıklarını dikkate alan bir çerçevede tasarlanması gerektiği değerlendirilmektedir.

1 MSc., Bağımsız Araştırmacı, umit.r.ergun@gmail.com, ORCID ID:0000-0002-8967-1892

1. Giriş

*The ancients used to like to sing about natural beauty:
Snow and flowers, moon and wind, mists, mountains and rivers.
Today we should make poems including iron and steel,
And the poet also should know to lead an attack²*

Ho Chi Minh'e³ ait bu şiirde de görüldüğü üzere modern çağda estetik tahayyül dahi doğadan sanayiye yönelmiştir. Demir ve çelik üretim ile birlikte çağın ruhunun da simgesi hâline gelmiştir. Şiirin özellikle son kıtasında demir ve çeliğin çağın mücadele sahasını, dönüşüm zorunluluğunu ve kolektif iradeyi temsil ettiğini değerlendirmek mümkündür. Mısradaki öncülük vurgusu sanayi dönüşümünün edilgen bir uyum süreci olmaktan ziyade veri esaslı ve tahlilî bir yaklaşım dâhilinde müteharrik bir yeniden yapılanma ihtiyacına delâlet etmektedir. Sanayi toplumunun inşasında merkezi bir rol üstlenen demir çelik sanayi ekonomik büyüme, altyapı yatırımları ve teknolojik ilerleme ile doğrudan irtibatlı bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte mezkûr üretim süreci yüksek enerji talebi ve karbon salımı nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik tartışmalarının da odağında yer almaktadır. Küresel ölçekte iklim değişikliği ile mücadele çerçevesinde ağır sanayi sektörleri bilhassa mercek altına alınırken demir çelik üretiminde karbon yoğunluğunun seyri hem iktisadî hem de çevresel politikalar bakımından belirleyici bir gösterge olarak temayüz etmektedir.

Sanayi devrimi kronolojik olarak üç ana evrede cereyan etmiştir. İlk safhada Batı'da başlamış ve o coğrafya ile mahdut kalmıştır. İkinci safhada olgunlaşarak Batı hudutlarını aşmış, üçüncü safhada ise bilfiil küresel bir hüviyet kazanmıştır (Stearns, 2021). Bu tarihî seyir üretim tarzındaki tahavvülün sadece teknik bir değişimden ibaret olmadığını enerji kaynaklarıyla kurulan münasebeti de kökten surette dönüştürdüğünü göstermektedir. Sanayi çağının başlangıcının en bariz alameti toprağın kömür istihsalı maksadıyla kazılmaya başlanmasıdır (Freyer, 2018). Enerji teminindeki bu esaslı kırılma ağır sanayinin ve bilhassa demir çelik imalatının yükselişine zemin teşkil etmiştir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra dünya ekonomisinde demir ve çelik ekseninde yeni bir sanayi hamlesi vuku bulmuştur. On dokuzuncu yüzyılın ortalarından itibaren demir ve çeliğe yönelik artan talep ekipman kalitesini, verimliliği, bakım süreçlerini ve proses kabiliyetini doğrudan etkilemiştir (Mahanta ve ark., 2023). Sanayinin bu tayin edici yapısı kalkınma tecrübelerinde de açıkça

2 Yazar çevirisi: Eskiler doğanın güzelliklerini anlatmayı severdi / Kar ve çiçekleri, ayı ve rüzgârı, sisleri, dağları ve nehirleri / Bugün şiirlerimize demir çeliği de katmalıyız / Ve şair gerektiğinde bir saldırıya öncülük etmeyi de bilmelidir.

3 Ho Amca olarak da bilinen Kuzey Vietnam Eski Cumhurbaşkanı (1890-1969).

müşahade olunmaktadır. Kalkınma mucizesi sergileyen ülkelerin başarısındaki temel hakikat üretim araçları sanayi yahut ağır makine sanayi olarak anılan ve dışa bağımlılığı azaltmada hareket noktası teşkil eden yatırım malı ve makine sektörlerini şuurlu biçimde tesis etmiş olmalarıdır (Erdoğan, 1976). Bu itibarla sanayileşme sermaye birikiminden ibaret değildir. Sanayileşme iktisadî istiklâlin tahkimi manasına da gelmektedir. Sanayileşme, sanayiciyi zorunlu olarak imtiyazlı bir zümre hâline getirmek de değildir. Bilakis millî gelirin artması, istihdam imkânlarının genişlemesi, ödemeler dengesinin iyileşmesi ve dışa bağımlılığın asgarî seviyeye indirilmesi bakımından bir zarurettir (Zeytinoglu, 1981). Bu noktada devletin iktisadî sahadaki sevk ve idare kudreti ayrıca ehemmiyet kesbetmektedir. Weiss ve Hobson (1999) güçlü bir devletin göstergesini piyasayı yönlendirme ve idare etme kapasitesinde görmektedir. Piyasa nizamının sıhhati ise rekabet esasına dayalı bir yapıyı zaruri kılmaktadır. Rekabet, serbest piyasa ekonomisinin asli şartıdır. Rekabete dayalı bir sistem kaynakların etkin kullanımını temin ettiği gibi fiyatların gerilemesine, kalite artışına ve yeni teknolojilerin üretime intibakına da imkân sağlamaktadır (Sabır, 2002). Sanayinin bu dinamik mahiyeti zamanla küresel bir veche kazanmıştır. Yalova ve Sarısu (2014) endüstriyel küreselleşmenin başlıca vasıflarını şu şekilde saymaktadırlar:

1. Ticarî sınırların ortadan kalkması,
2. Arz ve talep şoklarının süratle diğer pazarlara sirayet etmesi,
3. Dünya çelik ihracat pazarındaki aktör sayısının artması,
4. Sektörde uluslararası yatırımların çoğalması,
5. Arz talep dengelerindeki köklü değişimler,
6. Teknoloji transferinin hızlanması,
7. Özelleştirmeler neticesinde çok uluslu şirket yapılarının ortaya çıkması,
8. İnşaat sektörünün küresel ölçekte senkronize olması,

Bu küresel istihale Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin iktisadî seyrini de doğrudan etkilemiştir. Yeldan (2016), Türkiye'yi siyasal dengeleri hassas, Doğu ile Batı arasında konumlanan sosyal ve kültürel değerleri haiz ve ekonomisi inişli çıkışlı bir seyir izleyen bir ülke olarak değerlendirmektedir. Bu tarihî ve iktisadî zemin üzerinde çelik sektörü hususî bir mevki işgal etmektedir. Çeliğin yaygın kullanımının temelinde mukavemet, dayanıklılık, işlenebilirlik ve maliyet avantajının müstesna terkihi bulunmaktadır. Ne var ki dünyanın en büyük sanayilerinden biri olmasına rağmen çelik üretiminin çevre üzerinde kayda değer menfi tesirleri olduğu bilinmektedir (Teo ve ark., 2020). Bu hâl üretim hacmi ile çevresel maliyet arasındaki gerilimi daha

görünür kılmaktadır. Ulusal ekonominin mühim dayanaklarından biri olan çelik üretimi yüksek üretim hacmine ciddi miktarda enerji, su tüketimi ve karbon salımı refakatinde ulaşmaktadır. Küresel sanayileşmenin hızlanması çevresel meseleleri derinleştirmiş ve kaynak tüketimini artırmıştır. Bu sebeple sürdürülebilir kalkınma yaklaşımının geliştirilmesi ve tatbiki büyük önem arz etmektedir (Cui ve ark., 2026).

Sanayileşmenin çevresel neticeleri küresel ölçekte daha bariz bir surette tezahür etmiştir. Sanayileşmenin ilerlemesiyle birlikte bilhassa karbondioksit olmak üzere sera gazı emisyonları artış göstermiştir. Küresel ısınma bütün ülkeler için kaygı verici bir mesele hâline gelmiş, enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı kritik bir zaruret olarak belirmiştir (Zhang ve ark., 2021). Bu vaziyet doğal kaynakların muhafazası meselesini daha da mühim kılmaktadır. Dünyanın yaşamı sürdürme kapasitesinin zayıflaması, atıkların azaltılmasını ve yenilenemeyen kaynakların korunmasını acil bir ihtiyaç hâline getirmiştir (Teo ve ark., 2020). Mamafih çevresel sorunlar teknik bir mesele olmanın ötesinde siyâsî ve iktisadî bir mahiyet arz etmektedir. Günümüz çevre problemleri giderek küresel bir hüviyet kazanmaktadır. Devletler arasındaki çıkar çatışmaları iklimle mücadeleyi müşkül hâle getirmektedir. Ülkeler bir yandan büyüme gayretini sürdürürken diğer yandan gelecek nesillere tahrip edilmiş bir çevre bırakmama çabası içindedirler (Balaam ve Dillman, 2021). Bu ikili baskı uluslararası düzeyde daha sıkı tedbirlerin alınmasını beraberinde getirmektedir. Uluslararası toplulukların iklim değişikliğinin ciddiyetini daha açık biçimde kabul etmesiyle birlikte karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik baskı artmaktadır (Xu ve ark., 2016).

Yukarıda açıklanan umumî çerçeve içinde sanayi sektörünün payı ayrıca dikkat çekmektedir. Tüm sanayi kollarından kaynaklanan karbon emisyonları küresel toplamın yaklaşık %24'ünü teşkil etmektedir. Demir ve çelik ise sanayi emisyonlarının yaklaşık %20'sini oluşturarak çimento üretiminden sonra ikinci sırada yer almaktadır (Chen ve ark., 2022). Bu tablo üretim teknolojilerinin mahiyetinin tetkikini zaruri kılmaktadır. Dünya çelik üretiminde iki ana teknoloji temayüz etmektedir. Bunlar yüksek fırın ve bazik oksijen fırını (BF, BOF) ve elektrik ark fırını (EAF) olarak anılmaktadır. BF - BOF prosesi yüksek miktarda doğal kaynak ve fosil yakıt kullanmaktadır. Bu sebeple çevresel tesiri ağır olmaktadır. EAF ise doğrudan düşük fakat elektrik üretimine bağlı olarak yüksek dolaylı emisyon vasfı göstermektedir (Gajdzik ve ark., 2021). Bu itibarla gerçek emisyon seviyesinin enerji arzının niteliğiyle yakından alakalı olduğunu ifade etmek mümkündür. EAF yöntemiyle bir ton çelik üretiminde ortaya çıkan karbondioksit miktarı esasen elektrik şebekesinin emisyon yoğunluğu ve proseslerin enerji verimliliği tarafından tayin edilmektedir (Dock ve Kienberger, 2022). Ayrıca enerji girdisinin çeşitliliği hesaplamaları daha da

müşkül kılmaktadır. Elektrik ark ocağına giren toplam enerjinin tam olarak belirlenmesi enerjinin birden fazla kaynaktan temin edilmesi sebebiyle karmaşık bir süreç olarak yorumlanmaktadır (Kirschen ve ark., 2009).

Gelişmekte olan ülkelerde bu mesele farklı bir veche arz etmektedir. Zhu ve arkadaşları (2017), enerji yoğun sektörlerin kapasite yapısı ile mühim bir tasarruf potansiyelini birlikte barındırdığını belirtmektedir. Buna rağmen teknolojik terakki kesintisiz biçimde devam etmektedir. Son yıllarda demir metalürjisine dair teorik çalışmaların genişleme gösterdiği bilinmektedir. Bu konuda yeni yöntem ve teknolojiler geliştirildiği de görülmektedir. Bununla birlikte karbonun verimli kullanımına dayalı optimizasyon teknikleri azaltım sınırına yaklaşmakta sıfır yahut düşük karbonlu atılım teknolojileri henüz başlangıç safhasında bulunmaktadır (Sun ve ark., 2024). Bu teknik hudutlar üretim sürecindeki hassas parametrelerin ehemmiyetini artırmaktadır. Sıvı çeliğin sıcaklığı ile karbon muhtevasının doğru tahmini üretim sürecinde mühim bir rol icra etmektedir (Liu ve ark., 2022). Bunun yanı sıra üretim hacmi sınırlamaları ve geri dönüşüm politikaları da emisyon idaresinde belirleyici olmaktadır. Çelik sanayinde üretimin kısıtlanması buna bağlı enerji tüketimi ve kirletici emisyon miktarını doğrudan etkilemektedir. Geri dönüşüm ve yeniden kullanım uygulamaları ise kirlilik ve emisyon yönetiminde vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Bu sahadaki pek çok çalışma stok miktarı, talep projeksiyonu ve hurda geri dönüşümünün tahmini üzerinde yoğunlaşmaktadır (Xin ve ark., 2023).

Bu çalışma, 1978-2024 döneminde Türkiye ham çelik istihsalinde karbon emisyonlarının seyrini üretim proseslerinin terkiibi çerçevesinde zaman serisi yaklaşımıyla tahlil etmeyi amaçlamaktadır. Bağımlı değişken olarak karbon emisyonları esas alınırken bağımsız değişkenler oksijenli ve elektrikli çelik üretim miktarlarıdır. Analitik çerçevede serilerin durağanlık ve yapısal kırılma özellikleri ADE, KPSS, Zivot-Andrews ve KSS birim kök testleriyle incelenmekte ve doğrusal olmayan dinamiklerin varlığı BDS testiyle sınanmaktadır. Çalışmada uzun ve kısa dönem ilişkiler NARDL modeliyle tahmin edilmekte ve asimetric nedensellik bağları ise Hatemi-J testi aracılığıyla araştırılmaktadır. Bu suretle üretim kompozisyonu ile karbon emisyonları arasındaki münasebet doğrusal olmayan boyutlarıyla ele alınmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın amaçları şu şekilde ifade edilmektedir:

1. Türkiye’de ham çelik üretiminde karbon emisyonlarının uzun dönemli seyrini oksijenli ve elektrikli proses ayrımı temelinde eşbütünleşme ve asimetric dinamikler çerçevesinde ampirik olarak ortaya koymak.
2. Üretim kompozisyonunda meydana gelen pozitif ve negatif şokların karbon emisyonları üzerindeki farklılaşan etkilerini NARDL ve Hatemi-J

yöntemleri aracılığıyla analiz ederek karbon yoğunluğu ve üretim terkihi ilişkisini nedensellik boyutuyla değerlendirmek.

Alanyazında Türkiye’de ham çelik üretiminde karbon yoğunluğunu 1978-2024 dönemi için proses ayrımı temelinde zaman serisi yaklaşımıyla inceleyen çalışmaların sınırlı sayıda oldukları görülmektedir. Mevcut araştırmaların ekseriyeti teknik ve politika düzleminde temerküz etmiş, asimetrik dinamikler ile doğrusal olmayan yöntemler ise büyük ölçüde ihmal olunmuştur. Bu çalışma karbon emisyonları ile oksijenli ve elektrikli üretim arasındaki münasebeti NARDL ve Hatemi J çerçevesinde tahlil ederek söz konusu boşluğu doldurmayı ve alanyazına yönetsel bakımdan özgün bir katkı sunmayı hedeflemektedir. Çalışma şu suretle tertip edilmiştir; ilk bölümde karbon emisyonları ile çelik sektörü arasındaki münasebeti ele alan uluslararası çalışmalar incelenecek akabinde ulusal yazında çelik sektörü ve üretimine dair araştırmalar tetkik edilecektir. Müteakiben benimsenen yöneme mümasil metodolojik çerçeveye sahip ampirik çalışmalar değerlendirilerek alanyazındaki temayüller ve boşluklar ortaya konulacaktır. İzleyen bölümde veri setinin yapısı, değişkenlerin tanımları ve kullanılan ekonometrik yöntemler tafsilatlı biçimde takdim edilecektir. Devamında ampirik bulgular arz edilecek, uzun dönem katsayı tahminleri ile asimetrik nedensellik neticeleri sistematik surette değerlendirilecektir. Nihayet son bölümde elde edilen bulgular alanyazın ve politika çerçevesinde mütalaa edilecek, çalışmanın sınırlılıkları belirtilerek ileride yapılabilecek araştırmalara dair tekliflerde bulunulacaktır.

2. Alanyazın Değerlendirmesi

Bu bölümde evvela karbon ile çelik arasındaki münasebeti konu edinen çalışmalar ele alınacak ve akabinde ulusal yazında çelik sektörüne ve çelik üretimine dair araştırmalar tetkik edilecektir. Müteakiben bu çalışmada benimsenen yöneme benzer metodolojik çerçeveyi ihtiva eden araştırmalar değerlendirilerek mevcut alanyazın içerisindeki eğilimler ve boşluklar ortaya konulacaktır. Böylelikle konuya dair sosyo-teknik birikim sistematik bir tasnif dâhilinde mütalaa edilecek ve çalışmanın alanyazın içindeki konumu tayin edilmeye çalışılacaktır.

Lin ve Wang (2015), Çin demir çelik sanayinde toplam faktör karbon emisyon performansını ve emisyon azaltım potansiyelini tahmin etmeyi hedeflemişlerdir. Yazarlar, çelik sanayinin kayda değer bir azaltım potansiyeline sahip olduğunu ve bölgesel farklılıkların belirleyici mahiyet arz ettiği sonucuna ulaşmışlar ve teknik yenilik ile düşük karbon yatırımlarının ehemmiyetini vurgulamışlardır. Doğrudan inşaat sektörünü ele alan çalışmalarında Su ve Zhang (2016), çelik konstrüksiyon konut yapılarında enerji ve karbon emisyonlarını hibrit bir model

vasıtasıyla incelemişlerdir. Neticede çelik elemanların toplam enerji tüketiminde mühim bir paya sahip olduğu ve bina yüksekliğinin karbon yoğunluğu üzerinde hacimden daha belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Zhu ve arkadaşları (2017), Çin çelik sektöründe emisyon ticaret sisteminin muhtemel tesirlerini kısmi denge modeli ile simüle etmişlerdir. Çalışma serbest uygulamalarının rekabet bozucu neticeler doğurabileceğini ortaya koymuş ve çıktı temelli tahsis yaklaşımını daha muvafık bir politika aracı olarak önermiştir. Chen ve arkadaşları (2018), madde akış analizi ile enerji ve iktisadî değerlendirmeyi mezcederek farklı üretim senaryolarında karbon kullanımını tetkik etmişlerdir. Bulgular hidrojenasyon temelli senaryonun hem emisyon hem de maliyet bakımından rekabetçi olduğunu göstermiştir. Griffin ve Hammond (2019), Birleşik Krallık çelik sanayinde enerji talebi ve emisyon azaltım imkânlarını değerlendirmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında 2050 hedefleri için yakıt dönüşümü ve elektrik arzının karbonsuzlaştırılması gibi köklü tedbirlerin zarurî olduğu ifade etmişlerdir. Holappa (2020) küresel çelik sektörünün 2050 iklim hedefleri bağlamındaki görünümünü ele almıştır. Emisyonların düşürülmesi için enerji verimliliği ve hidrojen metalurjisi teknolojilerinin hayati rol oynayacağını belirtilmiştir. Çalışma modernizasyon ve yenilikçi teknolojiler sayesinde emisyonların üçte iki oranında azaltılabileceğini ileri sürmüştür. Zhang ve arkadaşları (2021), muhtelif ülkelerde tatbik olunan karbon azaltım teknolojilerini mukayeseli surette gözden geçirmişlerdir. Çalışmada hidrojen metalurjisi ve yüksek fırın dışı proseslerin istikbal için mühim bir inkişaf sahası teşkil ettiği sonucuna varılmıştır. Chen ve arkadaşları (2022), Su ve Zhang (2016) gibi yapısal ve inşaa konularına odaklanarak çelik yapı ürünlerinde karbon azaltım stratejilerini sistematik alanyazın taramasıyla tasnif etmişlerdir. Çalışma politika araçlarının ve çoklu stratejilerin müşterek tesirlerinin nicel olarak yeterince incelenmediğini ortaya koymuştur. Zhang ve arkadaşları (2023), Çin çelik sanayinin karbon nötrlüğe intikal yol haritasını tahlil etmişlerdir. Çalışmada karbon muhasebe standartlarının yeknesaklaştırılması ihtiyacına dikkat çekilmiştir. Durga ve arkadaşları (2024), ABD çelik sektörünün karbonsuzlaşma senaryolarını analiz etmişlerdir. Bulgular bu konuda alternatif olarak hidrojen bazlı üretimin ve hurda kullanımının belirleyici olacağını ortaya koymuştur. Guo ve arkadaşları (2024), çelik ve kimyasal üretim modelinin sera gazı azaltımı ve maliyet etkilerini optimizasyon çerçevesinde incelemişlerdir. Karbon fiyatlandırmasının mevcut olduğu senaryolarda hem emisyon hem de maliyet tasarrufunun mühim ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Sun ve arkadaşları (2024), karbon, elektrik ve hidrojen üçlü münasebeti bağlamında yeni bir gelişim yolu önermişlerdir. Çalışmada önerilen yöntemin klasik yöntemlere nazaran daha yüksek verim ve düşük emisyon potansiyeli taşıdığı belirtilmiştir. Song ve arkadaşları (2025), Çin çelik sanayinde yaşam döngüsü temelli bir karbon emisyon modeli tesis

etmişler ve bu model üzerinde duyarlılık analizi icra etmişlerdir. Çalışmada emisyon yoğunluğunun en kritik azaltım unsurunun fosil yakıt tüketimi olduğu ortaya konulmuştur. Wu ve arkadaşları (2026), demir çelik sanayinde karbon ayak izi hesaplama usullerini sistematik surette derlemişlerdir. Çalışmada elektrikli ark ocaklarının elektrik yoğunluğuna bağımlı emisyon yapısı ile yüksek fırın proseslerinin baskın payı açıkça gösterilmiştir. Konuya daha sosyal bir açıdan yaklaşan Parthasaraty ve arkadaşları (2026), belirsizlik altında karar destek amacıyla hibrit çok kriterli karar verme modeli ile konuyu incelemişlerdir. Yazarlar hukukî çerçeve ve karbon kullanım gelirlerinin karbon yakalama yatırımlarında en mühim belirleyiciler olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Cui ve arkadaşları (2026), çelik sektöründe su, enerji ve karbon bağıını tahlil eden bir çerçeve geliştirmişlerdir. Demir yapımı ve çelik üretimi safhalarında düşük sinerji ve yüksek tasarruf potansiyeli bulunduğu tespit edilerek sürdürülebilirlik politikalarına zemin hazırlanmıştır. Bu alanyazın yekûnu çelik sanayinde karbon yoğunluğunun teknik, iktisadî ve politik vechelerini müştereken ele almaktadır. Bu çalışmalara ek olarak bilhassa proses farklılıklarının emisyon yapısı üzerindeki tesirini inceleyen çalışmaların da değerlendirmeye alınması elzem olarak görülmektedir.

Mandova ve arkadaşları (2018), BF-BOF hattında karbon yoğunluğunun azaltılması amacıyla biyokütle ikamesinin potansiyelini optimizasyon modeliyle incelemişlerdir. Sonuçlar karbon fiyatının belirli bir eşik değerin üzerine çıkmadığı takdirde anlamlı bir ikame gerçekleşmeyeceğini göstermiş ve dolayısıyla BOF tabanlı üretimde karbon azaltımının iktisadî teşvik mekanizmalarına sıkı surette bağlı olduğu ifade edilmiştir. Han ve arkadaşları (2019) oksijen konvertörü çelik üretim sürecinde karbondioksit enjeksiyonunun teknik ve çevresel tesirlerini tetkik etmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada mevcut karbon yakalama teknolojileriyle bütünlük bir döngüsel karbondioksit kullanım modeli teklif edilmiştir. Wang ve arkadaşları (2020) ise BOF çelik üretiminde nihai karbon içeriğinin hassas tahmini üzerine geliştirilen modelleri sistematik surette gözden geçirmişlerdir. Yazarlar statik, dinamik ve akıllı tahmin safhalarını tasnif etmişler ve bilhassa yapay zekâ temelli yaklaşımların karbon kontrolünde yüksek kalite ve istikrar temin etme potansiyeline sahip olduğu vurgulamışlardır. Mahanta ve arkadaşları (2023), BOF prosesinde karbon, fosfor ve sıcaklık değişkenlerini eşanlı olarak modellemek maksadıyla evrimsel veri temelli algoritmalar kullanmışlardır. Wang ve arkadaşları (2025) ise BOF üretim verilerindeki dinamik değişimleri nazar-ı itibara alarak karbon ve sıcaklık tahmini için bir regresyon stratejisi geliştirmişlerdir. Gerçek saha verileri üzerinde yapılan simülasyonlarda karbon tahmininde %83'ü aşan doğruluk elde edilmiş ve böylelikle karbon içeriğinin anlık kontrolünde veri güdümlü yöntemlerin ehemmiyeti teyit edilmiştir. Bu çalışmalar yekûnen

değerlendirildiğinde BOF prosesinde karbonun hem proses parametresi hem de emisyon belirleyicisi olarak merkezî bir konuma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bir kısım araştırmalar karbonun anlık tahmini ve kontrolüne odaklanırken diğerleri karbonun proses içi geri kazanımı yahut ikame imkânlarını ele almaktadır. Böylelikle BOF ve karbon münasebeti teknik, çevresel ve iktisadî vecheleriyle çok katmanlı bir mahiyet arz etmektedir.

Alanyazın incelemesinde EAF prosesi de kapsama alınmıştır. Kirschen ve arkadaşları (2009), modern EAF tesislerinde enerji bilançosunun bütüncül surette tespit edilmesini hedeflemişler ve enerji verimliliği ile karbon emisyonları arasındaki münasebeti incelemişlerdir. Bianco ve arkadaşları (2013), EAF prosesinde fosil kömür ve doğal gaz yerine alternatif materyallerin kullanım imkânını araştırmışlardır. Laboratuvar ve endüstriyel denemeler neticesinde teknik uygulanabilirlik teyit edilmiş ve çalışmada karbon emisyonlarının azaltılması bakımından biyokütle ikamesinin çevresel fayda sağladığı ve ayrıca iktisadî sürdürülebilirlik potansiyeli taşıdığı ifade edilmiştir. Teo ve arkadaşları (2020), EAF cürufunun geri dönüşüm alternatiflerini karbon ve çevresel etkiler bağlamında gözden geçirmişlerdir. Çalışmada cürufun kimyevî bileşimindeki değişkenliğin yüksek katma değerli geri kazanım uygulamalarını tahdit ettiği ve buna mukabil ayrıştırma tekniklerinin geliştirilmesiyle EAF kaynaklı karbon etkisinin dolaylı surette azaltılabileceği belirtilmiştir. Gajdzik ve arkadaşları (2021), Polonya'da EAF ile çelik üretiminin enerji yoğunluğunu yatırımlar çerçevesinde ekonometrik modellerle analiz etmişlerdir. Bulgular teknolojik yatırımlar arttıkça EAF prosesinde birim enerji tüketiminin azaldığını ve dolayısıyla dolaylı karbon yoğunluğunun gerilediğini göstermiştir. Ecterhof (2021), EAF prosesinde çeliğin karbürizasyonu ve köpük cüruf oluşumu için zaruri olan karbon girdisinin fosil kaynaklar yerine alternatif biyokütle veya geri dönüştürülmüş karbon kaynaklarıyla ikamesini ele almıştır. Çalışma karbon nötr yahut döngüsel karbon kaynaklarının EAF'de emisyon azaltımı bakımından stratejik bir rol üstlenebileceğini vurgulamıştır. Yang ve arkadaşları (2022), EAF'de çok aşamalı oksijen enjeksiyonunun nihai karbon tahminine tesirini yapay sinir ağları modeli ile incelemişlerdir. Dock ve Kienberger (2022) ise EAF tesislerinde enerji verimliliğini artırarak karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik proses tasarımlarını enerji sistemi modeli vasıtasıyla değerlendirmişlerdir. Zhang ve arkadaşları (2024), EAF çelik cürufunun karbonatlaştırılması suretiyle karbondioksit tutulmasını artırmayı hedeflemişlerdir. Bu çalışmalar değerlendirildiğinde EAF prosesinde karbon münasebetinin üç ana ekseninde tezahür ettiği görülmektedir:

1. Enerji girdisi ve elektrik yoğunluğu üzerinden dolaylı karbon emisyonları,
2. Proses içi karbon girdisinin (fosil yahut alternatif) ikamesi,

3. Yan ürünlerin karbon yakalama ve depolama potansiyeli.

Dolayısıyla alanyazın incelemesinde EAF ve karbon ilişkisinin doğrudan emisyonlarla sınırlı olmadığı enerji kompozisyonu, hammadde yapısı ve geri kazanım teknolojileriyle müterafik çok katmanlı bir yapı arz ettiği değerlendirilmektedir.

Türkiye ham çelik istihsalinde karbon yoğunluğunun seyri bilhassa oksijenli ve elektrikli proseslerin terkihi çerçevesinde son yıllarda hem iktisadî hem de çevresel vecheleriyle mühim bir tetkik sahası hâline geldiği görülmektedir. Bıyık ve Özkale (2017), Türkiye demir çelik sanayinde üretim yöntemlerinin dağılımını, hammadde bağımlılığı ve dış ticaret performansı bağlamında tahlil etmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada yüksek fırın oranındaki artışın ihracat ve endüstriyel kârlılık bakımından müspet bir itici güç teşkil ettiği buna mukabil karbon fiyatlama politikalarının belirli bir eşik değere kadar sektör hedeflerinde esaslı bir sapma yaratmayabileceği ifade edilmiştir. Bu yönüyle çalışma oksijenli proseslerin ekonomik getirisi ile karbon politikaları arasındaki dengeyi Türkiye özelinde tartışmaya açmaktadır. Demircioğlu ve Ever (2020), demir çelik sanayinde faaliyet gösteren bir işletme nezdinde karbon maliyetinin muhasebeleştirilmesini incelemişler ve karbon muhasebesi kavramını sektör pratiğiyle irtibatlandırmışlardır. Vaka analizi yöntemi kullanılarak çalışmada 2016-2017 yıllarına ait emisyon miktarları, karbon ayak izi ve toplam üretim maliyeti içerisindeki karbon payı hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular karbonun doğrudan maliyet yapısını etkileyen iktisadî bir değişken olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Uçak ve Villi (2021), Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde Türkiye'nin çelik ihracatını ve karbon temelli dönüşüm zarureti ele almışlardır. Çalışmada AB'ye yönelik ihracatın yüksek payı dikkate alınarak Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması'nın (SKDM) Türkiye çelik sektörü üzerinde ilave maliyet baskısı doğuracağı ve gerekli emisyon azaltım tedbirleri alınmadığı takdirde %8-19 aralığında ek vergi yüküyle karşılaşılacağı belirtilmiştir. Bu değerlendirme karbon yoğun üretim yapısının dış ticaret rekabeti bakımından stratejik bir risk teşkil ettiğini göstermektedir. Yılmaz ve Yılmaz (2025), ağır sanayide bilhassa çelik sektöründe karbonsuzlaştırma sürecinin iktisadî ve teknolojik boyutlarını tartışmayı amaçlamışlardır. Çalışmada sürdürülebilir enerji kaynakları ile dekarbonizasyonun yeni bir sanayi paradigması oluşturabileceği ve çelik üretiminde mevcut teknolojik altyapının dönüşümünde mühim güçlükler bulunduğu ifade edilmiştir. Bu çerçevede Türkiye çelik sanayinin küresel karbonsuzlaşma dalgası karşısında stratejik bir yeniden yapılanmaya muhtaç olduğu vurgulanmaktadır. Eryüzü ve Boran (2026), Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın Türkiye çelik sektörü üzerindeki muhtemel tesirlerini ele alarak karbon bazlı dönüşümün kaçınılmazlığını ortaya koymuşlardır. Avrupa Birliği pazarına erişimin sürdürülebilirliği için

üretim süreçlerinde emisyon azaltımının zarurî olduğu aksi takdirde sınırdaki karbon düzenlemeleri sebebiyle rekabet gücünün zayıflayacağı ifade edilmiştir. Böylelikle çalışma karbon yoğunluğunun dış ticaret ve sanayi politikası ile doğrudan irtibatını teyit etmektedir. Duran (2026) ise SKDM'nin demir çelik sanayi bakımından doğuracağı sonuçları ve muhtemel uyum stratejilerini değerlendirmiştir. Enerji ve malzeme verimliliği, doğrudan indirgenmiş demir kullanımı, elektrifikasyon, yenilenebilir enerji yatırımları ile karbon yakalama ve depolama gibi emisyon azaltım yöntemleri tafsilatlı surette çalışmada ele alınmıştır. Ayrıca yazar Türkiye'de kurulması planlanan Emisyon Ticaret Sistemi'nin Avrupa Birliği ile uyumlu tesis edilmesinin ilave karbon maliyetlerini bertaraf etmede mühim rol oynayacağı ifade etmiştir. Hülâsa alanyazındaki çalışmalar Türkiye demir çelik sanayinde karbon meselesini üretim yöntemi tercihi, maliyet muhasebesi, dış ticaret rekabeti ve uluslararası iklim rejimleri bağlamında mütalaa etmektedir. Aşağıda mezkûr alanyazın sistematik bir tasnif dâhilinde iki ana sütun altında derlenmiştir. Sol sütunda uluslararası alanyazında temayüz eden dinamikler sağ sütunda ise Türkiye merkezli ulusal alanyazında öne çıkan vecheler üçer madde hâlinde arz olunmuştur.

Tablo 1. Uluslararası ve Ulusal Alanyazının Mukayeseli Çerçevesi

| Uluslararası Alanyazın Dinamikleri | Ulusal Alanyazın Dinamikleri |
|--|---|
| Proses Temelli Emisyon Analizi ve Teknolojik Dönüşüm | Üretim Yöntemi Tercihi ve Rekabet İlişkisi |
| Karbon Fiyatlandırması ve Politika Simülasyonları | Karbon Maliyeti ve Muhasebe Yaklaşımı |
| Veri Tabanlı Modelleme ve Yaşam Döngüsü Analizi | Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve SKDM Odaklı Dönüşüm Tartışmaları |

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Bu mukayeseli tasnif göstermektedir ki uluslararası alanyazın daha ziyade teknik modelleme, senaryo analizi ve proses inovasyonları üzerinde teksif olurken ulusal alanyazın Türkiye demir çelik sanayinin üretim kompozisyonu, dış ticaret bağımlılığı ve Avrupa Birliği iklim politikaları karşısındaki kırılganlığına odaklanmaktadır. Müteakiben bu çalışmada benimsenen yöntem benzer metodolojik çerçeveyi ihtiva eden araştırmalar değerlendirilerek mevcut alanyazın içerisindeki eğilimler ve boşluklar ortaya konulacaktır.

NARDL yaklaşımını kullanan çalışmalar ekseriyetle makroekonomik büyüme, mali sürdürülebilirlik, enerji fiyatları ve reel sektör dinamikleri bağlamında asimetrik eşbütünleşme münasebetlerini araştırmışlardır. Finansal piyasalar ve belirsizlik etkileri (Camgöz, 2022), kamu maliyesi ve sürdürülebilirlik (Karaş, 2024), tüketici ve sektörel güven endeksleri (Tutumlu

ve Güler, 2025), enflasyon ve doğrudan yabancı yatırımlar ilişkisi (Doğan ve Çakmaköğlü, 2025), büyüme ve beşerî sermaye etkileşimi (Çelik ve Altıntaş, 2025), enerji fiyatları ve sektörel hasıla (Akşehirli, 2024), sanayi üretimi ve kapasite kullanımı (Demir ve Özcan, 2023), elektrik tüketimi ve büyüme (Bulut ve ark., 2022) gibi muhtelif sahalarda pozitif ve negatif şokların uzun ve kısa devrede farklı vecheler arz ettiği tespit edilmiştir. Bu yekûn, NARDL'in bilhassa uzun dönem asimetrik eşbütünleşme ilişkilerini tayin hususunda tercih edildiğini göstermektedir. Hatemi-J asimetrik yöntemini kullanan çalışmalar ise daha ziyade nedensellik istikametini şok bileşenleri üzerinden tahlil etmiştir. Döviz kuru ve fiyat geçişkenliği (Yetim ve Yamak, 2019), Covid-19 şokları ve sektör endeksleri (Özdemir, 2020), savunma harcamaları ve işsizlik (Duran, 2023), AR-GE, ihracat ve büyüme ilişkileri (Sungur ve ark., 2016), altın, petrol ve hisse senedi etkileşimi (Kaya, 2021), sağlık ve kalkınma münasebeti (Arslan ve ark., 2016), ihracat ve istihdam bağı (Gerçekler, 2021), dış ticaret ve makro değişkenler (Uslu, 2023), reel kur ve sektörel ihracat (Çelik, 2023) ile küresel ticaret göstergeleri (Eryüzlü, 2019) gibi sahalarda pozitif ve negatif bileşenler arasındaki nedensellik farklılıklarını ortaya koymuştur. Bu çerçevede Hatemi J testi simetrik yaklaşımların ihmal ettiği saklı ilişkileri izhar eden bir vasıta olarak temayüz etmektedir. Hülâsa yönetsel alanyazın NARDL'in asimetrik eşbütünleşme ve uzun dönem katsayı ayrıştırmasında, Hatemi J yaklaşımının ise şok bileşenleri arasındaki nedensellik istikametini tayinde mütemayız bir mevkie sahip olduğunu göstermektedir. Bu birikim zaman serilerinde doğrusal varsayımların kifayetsiz kaldığı hâllerde asimetrik modellemenin zaruretini teyit eder mahiyettedir. Mevcut alanyazın tetkik edildiğinde üç mühim boşluk temayüz etmektedir:

1. Türkiye ham çelik istihsalinde karbon yoğunluğunun uzun dönemli (1978-2024) seyrini proses ayrımı temelinde zaman serisi yaklaşımıyla inceleyen müstakil bir çalışma bulunmamaktadır.
2. Karbon yoğunluğu ile üretim kompozisyonu arasındaki münasebet çoğunlukla teknik ve politika düzleminde ele alınmış olup asimetrik dinamikler ve şok ayrıştırması ihmal edilmiştir.
3. Çelik sanayine ilişkin ampirik araştırmalarda NARDL ve Hatemi J gibi doğrusal olmayan yöntemlerin birlikte ve sanayi özelinde karbon göstergeleri üzerinde tatbikine rastlanmamaktadır.

Bu çalışma, 1978-2024 dönemini kapsayan uzun erimli veri setiyle Türkiye'de ham çelik üretiminde karbon yoğunluğunun oksijenli ve elektrikli prosesler bağlamındaki asimetrik dinamiklerini NARDL ve Hatemi-J çerçevesinde müştereken analiz ederek alanyazındaki söz konusu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Böylelikle karbon yoğunluğu üretim terkihi ilişkisini hem

eşbütünleşme hem de nedensellik boyutunda bütüncül surette ortaya koyarak alanyazına özgün ve yöntemsel bir katkı sunmaktadır.

3. Türkiye Çelik Sanayinin Yapısal Mahiyeti ve İstihsal Kompozisyonu

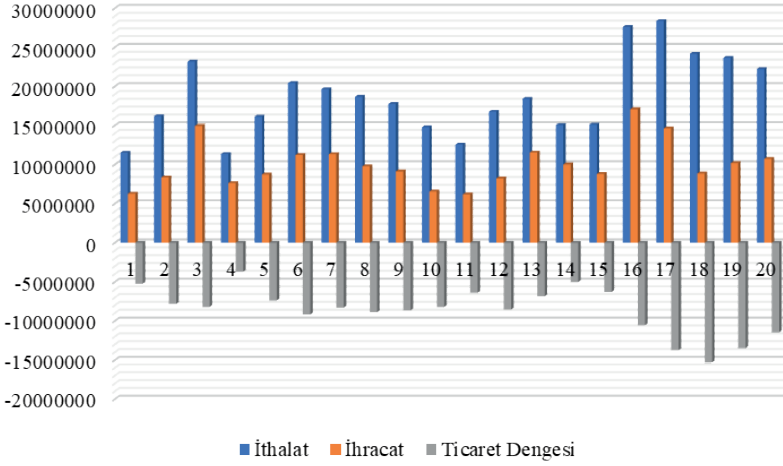
Sanayileşme sadece üretim ve iktisadî sahada müşahede olunan bir büyüme ve inkişaftan ibaret olmayıp aynı zamanda içtimaî ve kültürel bir tahavvül sürecini de ihtiva etmektedir (Tezeren ve ark., 1981). Sanayileşmenin ölçüsü bazı kaynaklarda demir çelik sanayinin inkişaf seviyesi yahut demir çelik istihsal ve istihlâk miktarları ile tarif olunmaktadır. Bu sanayi kolunu sair bütün sanayi şubelerinin girdisi olarak telâkki etmek ona dair tayin olunan hedef ve gayelerin bir memleketin umumî sanayileşme seyri üzerinde müessir olduğu kanaatini kuvvetlendirmektedir (Yıldırım, 1983). Bu itibarla demir çelik, sanayi nizamının temel direklerinden biri olarak addedilmektedir. Nitekim sanayileşme hamlelerinin mahiyeti ve istikameti çoğu kez bu sektörün kudret ve kapasitesiyle yakından alakalı görünmektedir. Demir çelik sanayinin kapsamı demir cevherinin artırılmasından başlayarak demir ve çeliğin muhtelif usullerle istihsalini, bunların sıcak ve soğuk şekillendirme suretiyle çeşitli mamul ve yarı mamul parçalar hâline getirilmesini, keza ısıl muamelelerden geçirilmesini ve muhtelif maddelerle kaplanması safhalarını ihtiva etmektedir (Tezeren ve ark., 1981). Bu geniş faaliyet alanı çelik sanayinin mamul mal zincirinin bütün halkalarına temas ettiğini göstermektedir. Dolayısıyla çelik modern iktisadî yapının hem başlangıç hem de tamamlayıcı unsurlarından biri olarak değerlendirilebilmektedir. Çelik bugün dünya ekonomisinde en çok geri dönüştürülen, fizikî ve kimyevî özellikleri itibarıyla pek çok sahada istifadeye elverişli bulunan mühim bir endüstriyel malzeme olarak kabul edilmektedir. Çelik sanayi çevreye asgarî zarar prensibini gözeterek hem gelişmiş hem de gelişmekte olan memleketlerde hayat standartlarının yükseltilmesine katkı sunmuştur. Ayrıca bu sanayi sürdürülebilir kalkınma sürecinde kayda değer bir rol de icra etmektedir (Barut ve ark., 2020). Tezeren ve arkadaşları (1981) demir çelik endüstrisinin dünya ekonomisindeki konumunu şu şekilde ifade etmektedirler:

1. Modern ekonominin icap ettirdiği temel malların nispeten düşük maliyetle istihsalı,
2. Çelik üretim değerinin gayrisafi millî hasıla içindeki nispetinin büyüklüğü,
3. Büyük miktarlarda hammadde ve mamul nakliyatını gerektirmesi,
4. Sermaye yoğun bir teknolojiye dayanması,
5. Know-how ve ileri teknolojiye yüksek derecede bağımlı bulunması,

6. Dünya ticaretinin mühim bir kısmının demir çelik sanayi ile doğrudan irtibatlı olması,
7. Büyük bir enerji tüketicisi olması,
8. Üst ve alt sanayi kollarının tesisine zemin hazırlaması yahut mevcut kolları harekete geçirmesi.

Bu hususlar birlikte değerlendirildiğinde demir çelik sanayinin iktisadî büyüklüğünün itibarına ek olarak diğer sektörlerle kurduğu kuvvetli irtibatlar bakımından da stratejik bir mahiyet arz ettiği değerlendirilmektedir. Demir çelik sanayi, yapısı itibarıyla memleket kalkınmasında itici bir vazife gören temel sektörlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bilhassa inşaat ve yatırım malları sahalarının esas girdilerini temin eden bu sanayi kolu gerek hammadde masrafları gerekse nihai mamulleri itibarıyla sektörler arasında geniş ölçekli bir mal transferine ve önemli bir ticaret hacmine vesile olmaktadır (Tezeren ve ark., 1981). Bu cihetle demir çelik sanayi iktisadî yapının bütününde tesir icra eden bir merkezî mevkie sahip görünmektedir. Sektörler arası münasebetlerin kuvveti arttıkça bu sanayinin tesir sahasının da genişlediği müşahade edilmektedir. Demir çelik sanayinin ekonomiyi etkileme potansiyeli ileri ve geri bağlantı katsayılarının büyüklüğüne ve üretim hacmine bağlı bulunduğundan bu sahada kaydedilecek bir gelişmenin iktisadın diğer kolları üzerinde de yüksek nispette akisler doğurabileceği değerlendirilmektedir. Diğer sektörlerle olan bağımlılığı sebebiyle çelik sanayi ekonomik kalkınma ve dışa açılma süreçlerinde itici ve sürükleyici tesirler gösterebilmekte ve bu yönüyle memleket ekonomileri için önem arz etmektedir (Tezeren, 1990). Bu karşılıklı tesir ve irtibat ağı demir çelik sanayini makro iktisadî dengeler üzerindeki yansımaları itibarıyla da ayrıcalıklı kılmaktadır. Nitekim dış ticaret kalemleri içerisinde bu sanayinin yeri ayrı bir dikkatle ele alınmaktadır. Demir çelik sanayinin mamul ve hammaddelerinin ithal ve ihraç durumları gelişmiş memleketler için mühim bir gelir kaynağı teşkil edebildiği gibi gelişmekte olan memleketlerin ödemeler dengelerinde kayda değer bir gider unsuru olarak da tezahür edebilmektedir (Tezeren ve ark., 1981). Bu itibarla sektörün dış ticaret yapısı ülkelerin iktisadî istikrarı bakımından ayrıca mütalaa edilmeye değer görünmektedir.

Şekil 1. Türkiye Çelik Sanayi Dış Ticaret Göstergeleri 2006-2025 (bin ABD Dolar)



Kaynak: ITC Trade Map (2026) üzerinden derlenen verilerle yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 1’de yer alan Harmonize Sistem 72 (H.S. 72) kapsamındaki veriler Türkiye’nin demir çelik ticaretinde uzun devreli ve mahiyeti itibarıyla yapısal bir dış ticaret açığı verdiğini göstermektedir.⁴ 2006-2025 dönemi bir bütün olarak dikkate alındığında aşağıdaki temayüller öne çıkmaktadır:

- *2006-2008 Süratli Artış ve Kriz Öncesi Zirve:* 2008 yılına kadar hem ithalat hem de ihracatta kuvvetli bir artış müşahade edilmektedir. Küresel talebin genişlemesi ve yurt içi inşaat ile altyapı yatırımlarındaki canlanma bu yükselişi desteklemiş görünmektedir. Bununla beraber, ticaret açığının da aynı istikamette genişlemesi dikkat çekici bir mahiyet arz etmektedir.
- *2009 Küresel Finans Krizinin Tesiri:* 2009 yılında kaydedilen keskin daralmanın küresel kriz kaynaklı talep ve fiyat düşüşleriyle izah edilmesi mümkündür. Açığın azalması ise yapısal bir tahkimden ziyade ticaret hacmindeki küçülmenin bir neticesi olarak değerlendirilmektedir.
- *2010-2014 Toparlanma ve Süreklilik Arz Eden Açık:* Bu devrede ithalatın yeniden 20 milyar dolar bandına yaklaştığı görülmektedir. İhracat artış kaydetmekle beraber açığı telafi edecek seviyeye ulaşamadığı grafiksel seyirde mündemiçtir. Bu keyfiyet sektörün hammaddeye olan bağımlılığı ile irtibatlı bir görünüm arz etmektedir.

4 Harmonize (Armonize) Sistem: Dünya Gümrük Örgütü tarafından geliştirilen nomanklatür olan bu sistem eşyalar için ekonomik bir dil ve kod oluşturarak uluslararası ticarete kullanılan bir sınıflandırma sistemi olarak tanımlanmaktadır (Yılmaz ve ark., 2017).

- *2015-2019 Görece Dengelenme Safhası:* Anılan dönemde dış ticaret açığı 5-8 aralığında dalgalanmıştır. 2019 yılında açığın gerilemesi nispi bir iyileşmeye işaret etmektedir. Bu durum döviz kuru hareketleri ve ihracat pazarlarının çeşitlendirilmesi gibi amillerle bağlantılı olarak mütalaa edilmektedir.
- *2021-2023 Olağanüstü Artış ve Açık:* Bu devrede bilhassa 2022-2023 yıllarında fiyat tesirinin miktar tesirine galebe çaldığı bir görünüm hâkimdir. Küresel emtia fiyatlarındaki artışın, enerji maliyetlerindeki sıçramanın, iç talep şartlarının ve yeniden yapılanma süreçlerinin söz konusu genişlemede müessir olduğu değerlendirilmektedir. Nitekim ticaret açığının tarihî zirvelere ulaşması bu dönemin ayırt edici vasfı olarak temayüz etmektedir.
- *2024-2025 Kısmi Düzeltme:* 2025 yılında gözlenen gerilemenin ithalat hacmindeki nispi azalış ve ihracattaki toparlanma ile irtibatlandırılması mümkündür. Bununla birlikte açığın tamamen ortadan kalkmadığı ve yapısal mahiyetini muhafaza ettiği de anlaşılmaktadır.

Netice itibarıyla Türkiye H.S. 72 kapsamında mütemadiyen net ithalatçı bir konum sergilemektedir. Dış ticaret açığı konjonktürel dalgalanmalara rağmen yapısal bir karakter göstermektedir. İhracat hacmi kayda değer olmakla birlikte ithalata olan bağımlılık dış ticaret dengesini menfi istikamette etkilemektedir. Bilhassa 2021 sonrası dönem fiyat şoklarının ticaret dengesi üzerindeki tesirini bariz surette ortaya koymaktadır. Bu manzara Türkiye çelik sanayinin üretim kapasitesi itibarıyla güçlü olmasına rağmen girdi bağımlılığı sebebiyle dış ticaret dengesi bakımından kırılğan bir yapı arz ettiğini düşündürmektedir.

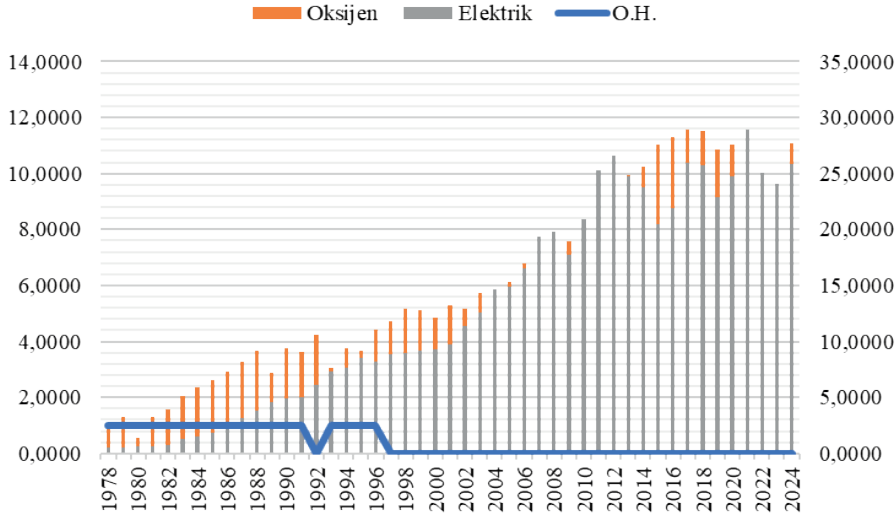
Kalkınma ve sosyal refah yarışında bulunan dünya memleketlerinin bu müsabakaya hakkıyla iştirak etmedikleri takdirde geri kalmışlığın iktisadî ve psikolojik müşküllerini yaşamaya devam edecekleri aşikârdır. Bu sebeple kalkınma ve refah yarışına gelişmiş memleketlerden dahi daha süratli bir surette iştirak ederek hiç olmazsa aradaki mesafeyi kısmen daraltmaya gayret edilmesi icap etmektedir (Oral, 1970). Bu çerçevede kalkınma hamlesi içerisinde demir çelik sanayinin müstesna bir mevkie sahip bulunduğu izahattan varestedir. Bu itibarla gerek gelişmiş gerekse gelişmekte olan memleketler sanayilerinin temel dayanağını teşkil eden çelik sanayini maliyet şartları ne olursa olsun tesis etmek ve inkişaf ettirmek mecburiyetinde kalmaktadırlar. İktisadî kalkınma hedefini sanayileşme stratejisi üzerine bina eden ve dinamik bir yapı arz eden Türkiye bakımından da çelik sanayinin taşıdığı ehemmiyet açıktır. Bununla beraber söz konusu sanayinin Türkiye'nin kalkınma hedefleriyle mütenasip bir biçimde işletilmesi ve yönlendirilmesi de zarurî bir keyfiyet olarak değerlendirilmektedir (Tezeren ve ark., 1981). Herhangi bir sektör bir

ülke ekonomisini doğrudan, dolaylı ve uyarılmış olmak üzere üç veche ile tesir altında bırakmaktadır. İlgili sektörün gayri safi yurt içi hasılaya sağladığı katkı ve temin ettiği istihdam imkânları gibi neticeler üretim faaliyetinden neşet eden doğrudan iktisadî tesirler olarak kabul edilmektedir. Buna mukabil sektörün mal ve hizmet üretimi esnasında kendisine girdi temin eden diğer sektörlerin üretimini harekete geçirmesiyle ortaya çıkan tesirler dolaylı etkiler şeklinde tezahür etmektedir. Uyarlanmış etkiler ise doğrudan ve dolaylı istihdamdan kaynaklanan gelirlerden mal ve hizmet harcamalarıyla ortaya çıkan katma değer olarak ifade edilmektedir (Başkol ve Bektaş, 2021). Bu suretle bir sektörün iktisadî yapı içindeki konumu diğer sektörlerle kurduğu münasebet ağı ve hâsıl ettiği çarpan tesirleriyle birlikte mütalaa edilmelidir. Bu durum çelik sanayinde daha bariz ve etkin biçimde karşılık bulmaktadır. Bu çerçevede içerisinde demir çelik istihsal sürecinin teknik mahiyetine kısaca temas etmek yerinde olacaktır. Çelik, ham demir bünyesinde yüksek nispette bulunan karbon, silisyum, fosfor ve kükürt gibi unsurların arıtılması ve lüzumu kadar alaşım elementlerinin ilâvesi suretiyle elde edilmektedir. Bu usul çerçevesinde çeliğin istihsalinde muhtelif metotlar tatbik olunmaktadır. Tercih edilen yöntem ise hammadde vasfı maliyet şartları ve teknik imkânlarla göre değişiklik gösterebilmektedir (Tezeren ve ark., 1981). Bu yöntemler;

1. Bessemer,
2. Thomas,
3. Siemens Martin,
4. Oksijen Konventörü,
5. Elektrikle Çelik Üretim Metotları,

olarak sayılmaktadır. Dünya Çelik Birliği (World Steel Association [WSA]) verilerine göre Türkiye çelik istihsalinin üretim yöntemlerine göre dağılımı Şekil 2'de yer almaktadır.

Şekil 2. Yöntemlere Göre Türkiye’de Ham Çelik İstihsalı 1978-2024 (Mmt)



Kaynak: WSA (t.y.) üzerinden derlenen verilerle yazar tarafından oluşturulmuştur.

Türkiye’de çelik üretiminin yöntemler itibarıyla seyri (1978-2024) sanayinin zaman içerisinde mühim bir yapısal tahavvül geçirdiğini göstermektedir. 1970’lerin sonlarında üretimin açık ocak (O.H.), oksijenli proses ve elektrikli proses arasında nispeten dengeli bir dağılım arz etmekte olduğu görülmektedir. Bu devrede oksijenli proses bir miktar önde görünmekle birlikte açık ocak üretimi de hâlen kayda değer bir seviyede bulunmaktadır. Ancak 1980’li yıllarla birlikte üretim kompozisyonunda belirgin bir değişim temayülü müşahade edilmektedir. Şekil 2’de oksijenli üretiminin istikrarlı biçimde arttığı, elektrik ark fırını üretiminin daha süratli bir yükseliş kaydettiği ve açık ocak yönteminin ise giderek ehemmiyetini kaybettiği görülmektedir. 1990’lı yılların başına gelindiğinde açık ocak usulünün fiilen terk edildiği ve üretim yapısının iki ana yöntemle yani oksijen ile elektrikle dayandığı anlaşılmaktadır. Bilhassa 1990’ların ortalarından itibaren elektrik ark fırını üretiminin oksijen yöntemini geride bıraktığı görülmektedir. Bu keyfiyet Türkiye çelik sanayinin hurda bazlı ve daha esnek bir üretim modeline yöneldiğini düşündürmektedir. Bu bağlamda elektrik yönteminin toplam üretim içindeki payının giderek arttığı ve 2000’li yıllarla birlikte sektörün ana karakterini tayin eder hâle geldiği ifade edilmektedir. 2000 sonrası dönemde her iki yöntemde de kapasite artışları gözlenmekle beraber artışın ağırlıklı olarak elektrik ark fırınlarında yoğunlaştığı görülmektedir. 2010’lu yıllarda elektrik yöntemi üretimi 20 milyon tonun üzerine çıkmış ve toplam üretimin ekseriyetini teşkil etmiştir. 2021 yılında

ulaşılan yüksek seviyeler sektörün küresel piyasalara entegrasyonunun ve iç talep dinamiklerinin bir tezahürü olarak değerlendirilmektedir. 2022 ve 2023 yıllarında her iki yöntemde de görece bir gerileme görülmüş ve 2024 itibarıyla ise kısmi bir toparlanma işaretleri ortaya çıkmıştır. Genel bir değerlendirme yapıldığında Türkiye çelik sektörünün üretim yapısının zamanla klasik ve entegre karakterden uzaklaşarak elektrik ark fırını merkezli bir hüviyete büründüğü anlaşılmaktadır. Bu yapı bir taraftan esneklik ve hızlı kapasite ayarlaması imkânı sağlamakta diğer taraftan hurda girdisine olan bağımlılık sebebiyle dış ticaret ve maliyet yapısı üzerinde belirleyici tesirler icra etmektedir. Bu itibarla üretim yöntemlerindeki dönüşüm çelik sanayinin iktisadî ve stratejik konumunu şekillendiren bir unsur olarak mütalaa edilmektedir.

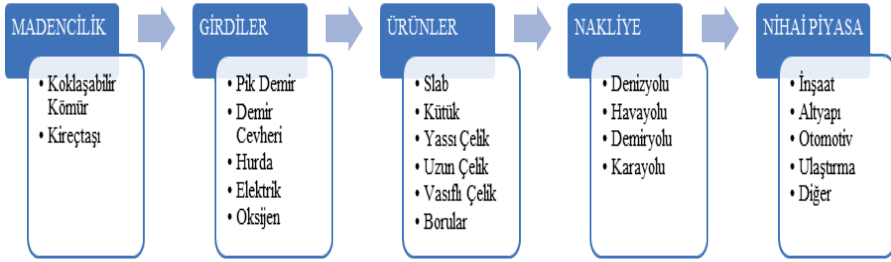
Günümüzde çelik istihsalı esas itibarıyla iki ana üretim modeline dayanmaktadır. Bunlardan ilki ana girdi olarak demir cevheri kullanan ve yüksek fırın (YF) ile bazık oksijen fırınına (BOF) müstenit entegre tesislerdir. Diğeri ise ana girdi olarak hurda metali esas alan elektrik ark ocaklı (EAF/EAO) yahut indüksiyon ocaklı (IF) tesislerdir. Avrupa Birliği memleketlerinde üretimin ekseriyetle BOF ve EAF yöntemleriyle icra edildiği ifade edilmektedir (Avinall ve ark., 2019). Bu suretle küresel çelik üretim yapısının cevher bazlı entegre model ile hurda bazlı elektrikli model arasında şekillendiği anlaşılmaktadır. Çelik istihsalı demir cevheri ve metalürjik kömür başta olmak üzere muhtelif hammaddelere istinat etmektedir. Bu girdilerin fiyatlarında vuku bulan dalgalanmalar çelik sanayinin maliyet yapısı ve kârlılığı üzerinde doğrudan tesir icra etmektedir. Nitekim küresel emtia piyasalarındaki oynaklıklar ve arz talep dengelerindeki değişimler bilhassa 2022 yılında Türkiye’de çelik sanayinin maliyet kompozisyonunu mühim ölçüde etkilemiştir. Bununla beraber sektörün performansı dışsal fiyat hareketleri ile birlikte inşaat faaliyetleri, altyapı yatırımları ve tüketici harcamaları gibi iç talep unsurlarına da sıkı surette bağlıdır. Makine, otomotiv, elektronik, kimya, savunma, havacılık, madencilik ve ulaştırma gibi birçok imalat kolunun talep seyri çelik istihsalinin hacim ve bileşimini tayin eden başlıca amiller arasında yer almaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023). Türkiye’de sanayinin üretim yapısı büyük ölçüde hurda bazlı EAF teknolojisine dayalıdır. Bu keyfiyet bir taraftan üretimde esneklik sağlamakta diğer taraftan hammadde temininde dışa bağımlılığı arttırmaktadır. Bununla birlikte tesislerin limanlara yakın bölgelerde kümelenmiş olması lojistik bakımdan mühim bir avantaj temin etmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024). Dünya genelinde en yaygın yöntem olan BOF teknolojisi Türkiye’de üç entegre tesiste tatbik edilmekte ve buna mukabil elektrik ark ocaklı tesislerde sıvı çelik üretimi hurda kullanımı suretiyle gerçekleştirilmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023). Demir cevheri temini bakımından Türkiye hem yerli yatlardan

istifade etmekte hem de ithalat yoluna müracaat etmektedir. Ancak yerli cevherin miktar ve kalite bakımından arzu edilen seviyede olmaması ve ithal cevher fiyatlarında görülen artışlar çelik sanayinin hurda demire yönelimini kuvvetlendirmektedir (Yaşar, 2009). Bu durum üretim kompozisyonunun hurda lehine şekillenmesinde müessir olmuştur. 2024 yılı verileri demir çelik sanayinin Türkiye ekonomisindeki stratejik konumunu ortaya koymaktadır. Çelik ihracatı 10,2 milyar dolar seviyesinde gerçekleşmiş ve Türkiye dünya ihracatından yaklaşık %2,3 pay almıştır. Ülke sathında 3.500'ün üzerinde teşebbüsün faaliyette bulunduğu demir çelik sanayinde istihdam 93 bin kişiyi aşmış ve toplam üretim değeri 1,5 trilyon TL seviyesine ulaşmıştır. Aynı dönemde Ar-Ge harcamalarının 2,2 milyar TL'ye yükselmesi üretim süreçlerinin modernizasyonuna, dijital tatbikatların yaygınlaşmasına ve enerji verimliliği odaklı teknolojilere yönelimin artmasına katkı sağlamıştır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2025).

Küresel ölçekte üretilen çeliğin takriben %70'i entegre tesislerde %30'u ise hurda bazlı elektrik ark ocaklarında istihsal edilmektedir. Türkiye'de ise bu nispet tersine dönmüştür (Serin ve Fidan, 2019). İlk yatırım maliyetlerinin nispeten düşük oluşu ve işletme prosesinin daha sade bir yapı arz etmesi sebebiyle EAF teknolojisi ile üretim Türkiye'de %75'in üzerine çıkmıştır (Tamsöz ve Elmas, 2021). Türkiye'nin 2024 yılı itibarıyla da üretim yapısının büyük ölçüde EAF'ye dayalı karakterini muhafaza ettiği ve ülkede hurda bazlı üretimin sektörün belirleyici vasfı olmaya devam ettiği görülmektedir. EAF teknolojisinin yaygın kullanımı enerji yönetimi ve emisyon azaltımı bakımından dönüşüm kapasitesini artıran bir unsur olarak temayüz etmektedir. Proses kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve verimlilik artırıcı uygulamalar tesislerin modernizasyon eğilimini kuvvetlendirmiştir. Üretim kompozisyonunda inşaat demiri gibi geleneksel mamullerin yanı sıra sıcak ve soğuk haddelenmiş yassı ürünler, galvanizli ve kaplamalı saclar ile yüksek mukavemetli çeliklerin payı korunmuştur. Bu çeşitlilik hem iç pazar talebinin karşılanmasına hem de otomotiv ve makine imalatı gibi sektörlerle yönelik üretim kabiliyetinin artmasına katkı sağlamıştır. Enerji verimliliği, dijital izleme sistemleri ve proses optimizasyonuna yönelik yatırımlar ise sektörün düşük karbonlu üretim hedefleriyle uyum sürecini tahkim etmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2025). Türkiye küresel çelik endüstrisinde mühim bir konuma sahip olup Avrupa'nın önde gelen üreticileri arasında yer almaktadır. Bu sanayi istihdam, ihracat ve sanayi büyümesi bakımından millî ekonomi için hayati bir rol icra etmektedir. Son yıllarda rekabet gücünü tahkim etmek maksadıyla üretim kapasitesinin artırılması ve tesislerin modernizasyonuna yönelik yatırımlar devam etmiştir. Nitekim 2022 yılında ham çelik üretim tesisi sayısı 40'tan 41'e yükselmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

Jeoekonomik bir nazarla bakıldığında demir çelik sanayinin ülkeler nezdinde üç farklı yaklaşımın tesiri altında şekillendiği değerlendirilmektedir. Bunlardan ilki belirli bir coğrafi sahadaki doğal kaynakların kullanımı ve denetimine dayanan politik yaklaşımdır (O'Hara ve Heffernan, 2006). İkincisi küresel ekonominin bağlı olduğu yaşamsal ekonomik söylem çerçevesinde geliştirilen perspektiftir (Smith, 2002). Üçüncüsü ise uluslararası düzlemde sermaye ve finans hareketlerinin siyasî saiklerine odaklanan yaklaşımdır (Mercielle, 2008). Her üç çerçeve bakımından da demir çelik sanayinin ülkelerin sanayileşme stratejileri ve uluslararasılaşma süreçleri açısından ehemmiyet arz ettiği ifade edilmektedir.

Şekil 3. Demir Çelik Sanayi Değer Zinciri



Kaynak: Avinal ve arkadaşları (2019).

Şekil 3'te demir çelik sanayine ait değer zinciri madencilik safhasından nihai piyasa aşamasına kadar uzanan bütüncül bir silsile hâlinde tasvir olunmaktadır. Buna göre süreç kömür, koklaşabilir kömür ve kireçtaşı gibi doğal kaynakların temin edildiği madencilik merhalesi ile başlamakta müteakiben pik demir, demir cevheri, hurda, elektrik ve oksijen gibi girdilerin üretim sürecine dâhil edilmesiyle devam etmektedir. İstihsal safhasında slab, kütük, yassı ve uzun mamuller ile vasıflı çelik ve boru gibi muhtelif ürünler elde edilmektedir. Akabinde bu mamuller denizyolu, havayolu, demiryolu ve karayolu vasıtasıyla sevk ve nakledilmektedir. Nihayetinde söz konusu ürünler inşaat, altyapı, otomotiv, ulaştırma ve sair sanayi kollarında istifadeye sunulmaktadır. Bu itibarla şekil demir çelik sanayinin hammadde temininden lojistiğe ve nihai tüketim alanlarına kadar uzanan geniş ve çok katmanlı bir iktisadî değer zinciri teşkil ettiğini göstermektedir.

Bu çalışmada Türkiye çelik sanayinin güncel meseleleri de mevzubahis edilmiştir. Bu minvalde son beş yıla ait aktüel yazından edilen veriler sektörün çeşitli zorluklarla karşı karşıya bulunduğunu göstermektedir. Bilhassa Rusya-Ukrayna harbinin tesiriyle demir çelik sanayinde ciddi sıkıntılar baş göstermiş olup fiyatlardaki artışların konut, makine, otomotiv ve beyaz eşya gibi sektörlerle

de intikal edeceği uzmanlar tarafından ifade edilmektedir (Eser, 2022). Türkiye çelik sanayinin son yıllardaki seyri genel ekonomik büyüme trendinden farklı bir mahiyet arz etmektedir. Ulusal ekonomi 2022 ve 2023 senelerinde müspet büyüme kaydederken demir çelik sanayi aynı dönemlerde küçülme göstermiştir. Bununla beraber küresel kapasite kullanım oranlarına nispetle Türkiye çelik müstahsillerinin kapasite kullanımını düşük seviyelerde seyretmiştir (SteelOrbis, 2022). Bunlara ilâveten Rusya menşeli kütük ithalatındaki artış demir çelik sanayine menfi yönde tesir etmiş (Yayan, 2021), Avrupa'daki liderlik mevki kaybedilmiş ve Rusya, Çin ve Hindistan gibi ülkelerin iç piyasada ağırlık kazanmaya başladığı müşahede edilmiştir (Duran, 2023). Nihayet enerji ve hammadde maliyetlerindeki artışlar, korumacı tedbirler ve döviz kurlarındaki istikrarsızlık neticesinde sektörün ihracat gelirleri kayda değer ölçüde azalmıştır (Ertan, 2024). Derlenen aktüel haberlerin ve haberlerde yer verilen görüşlerin Türkiye demir çelik sanayinin yapısal mahiyeti ve istihsal kompozisyonu ile uyumlu oldukları görülmektedir.

Tan (1983) demir çelik sanayini en çok mesele ile karşılaşan sanayi kolu olarak ifade etmektedir. Bu minvalde bilhassa güncel müzakerelerde çevresel sorunların ehemmiyeti giderek artmaktadır. Mevcut ticaret anlaşmalarında çevresel meseleler henüz yüzeysel kalmakta olup zengin memleketler çevre kanunlarının gevşek veya mevcut olmadığı fakir ülkelerdeki düşük maliyetli üretime nispetle dezavantajlı duruma düşmekten şikâyet ederken az gelişmiş memleketler ise çevresel düzenlemeleri kendi iktisadi inkişafı için tehdit olarak görmektedirler (Kotler ve ark., 2000). Bu ikilem çelik sanayinde hem ekonomik rekabet gücünü muhafaza etmek hem de çevresel sürdürülebilirliği temin etmek gibi müzmin bir meseleyi ortaya koymaktadır. Öte yandan nadir toprak elementleri ve çeşitli metal yatırımları ülkemizin dış ticaret açığını kapatma potansiyeli taşımakla beraber demir çelik ürün gamında daha nitelikli ve katma değeri yüksek mahsullere teveccüh gösterilmesi elzemdir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022). Bu bağlamda sürdürülebilirlik ve çevre düzenlemelerine artan vurgu uluslararası çelik sanayini daha temiz ve enerji verimli usuller benimsemeye sevk etmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023). Nitekim iklim tebeddülü ve çevresel bozulma Avrupa ve dünya için hayati bir tehlike teşkil etmekte olup Avrupa Birliği başta Çin olmak üzere birçok memleketin geniş teşvik tatbikatlarını ve çevreye hassas olmayan istihallerini tenkit etmektedir. Bu çerçevede sektörün dönüşüm vizyonu Türkiye'de Türkiye Çelik Sektörü Düşük Karbonlu Yol Haritası ile müessesleşmiş ve EAF'lerde verimlilik artışı, hidrojen istimali hazırlıkları ve döngüsel ekonomi tatbikatlarını ihtiva eden stratejik hedefler tayin edilmiştir. Bu süreç Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı arasında Şubat 2024 tarihinde akdedilen mutabakat zaptı ile başlatılan Çelik

Sektöründe Sera Gazı Azaltımının Teşvik Edilmesi Projesi ve Türkiye Endüstriyel Karbonsuzlaştırma Yatırım Platformu vasıtasıyla desteklenmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2025). Bu nedenlerden hareketle çalışmanın istihsal usullerine göre çelik endüstrisi ve karbon münasebetini ele almakta olduğu ifade edilmektedir. Bu ele alış biçimine ilişkin veri kümesi yapısı ve metotlar takip eden bölümde sunulmaktadır.

4. Veri Kümesinin Yapısı ve Metot

Bu bölümde ilk olarak çalışmada kullanılan veri kümesinin yapısı, kapsamı ve temel özellikleri açıklanmaktadır. Ardından araştırmada başvuru metot tanıtılmaktadır. Öncelikle veri kümesinin zaman aralığı, değişkenleri ve kaynakları ortaya konularak analizin tasarlandığı deneysel dayanak netleştirilmektedir. Devamında verilerin hangi usul ve esaslar doğrultusunda işlendiği ve hangi yöntemlerle analiz edildiği ele alınmaktadır. Böylelikle elde edilen bulguların hem istatistikî hem de iktisadî açıdan sağlıklı biçimde değerlendirilmesine zemin hazırlanması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın veri kümesi oluşturulurken çelik sanayine dair verilerin seçiminde Türkiye’de demir çelik sanayinin üretim terkihi dikkate alınmıştır. Türkiye’de çelik üretiminin ekseriyetle elektrikli ve oksijenli üretim proseslerine dayanması diğer usullerin ise açıklanan istatistikler muvacehesinde 1990’lı yıllardan itibaren terk edilmiş bulunması sebebiyle analiz elektrikli ve oksijenli üretim değerleri üzerinden kurgulanmıştır. Veriler her bir kaynaktan yazar tarafından münferiden derlenerek bir araya getirilmiştir. Bu itibarla çalışmanın kapsadığı dönem bakımından erişilebilen en geniş zaman aralığı 1978-2024 olup veri kümesi bu çerçevede hazırlanmıştır. Serilerin hazırlanmasında 2002 sonrası için World Steel Association [WSA] (t.y.) tarafından yayımlanan World Steel in Figures, 2002 öncesi için ise Steel Statistical Yearbook raporları esas alınmıştır. Anılan seriler çalışmanın bağımsız değişkenleri olarak belirlenmiştir. Araştırmanın Türkiye’de ham çelik üretiminde karbon yoğunluğunun tarihsel seyrini tetkik etmeyi hedeflemesi hasebiyle karbon emisyonları değişkeni bağımlı değişken olarak uygulamaya alınmıştır. Bu değişkene ait veriler Global Carbon Budget (2025) kaynağından temin edilmiştir. Böylelikle veri kümesinin yapısı alanyazındaki boşluklar da göz önünde bulundurularak tesis edilmiş ve söz konusu yapıya dair bilgiler aşağıdaki tabloda arz edilmiştir.

Tablo 2. Serilerin Tanıtımı

| Serinin Adı | Kısaltması | Birimi | Veri Kaynağı |
|--|------------|--------|----------------------|
| Elektrikli üretim prosesi üretim miktarı | <i>ELC</i> | Mmt | WSA |
| Oksijenli üretim prosesi üretim miktarı | <i>OXG</i> | Mmt | WSA |
| Yıllık CO ₂ emisyonları | <i>CRB</i> | Mt | Global Carbon Budget |

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 2’de yer alan *Mmt* kısaltması milyon metrik ton birimine tekabül etmektedir. WSA’nın 2000 yılına kadar verileri bin metrik ton, 2000 yılından sonra ise milyon metrik ton cinsinden açıklamış olması hasebiyle 2000 yılı öncesine ait veriler yazar tarafından milyon metrik tona tahvil edilmiştir. Benzer surette *CRB* serisine ilişkin verilerde de ondalıklı dönüşüm işlemi tatbik edilerek standart bir yapı temin edilmiştir. Bu itibarla çalışmada kullanılan zaman serisi analizleri uygulama türünden bağımsız olarak Eşitlik 1’de takdim edilen model üzerine kurgulanmıştır.

$$CRB_t = \beta_0 + \beta_1 ELC_t + \beta_2 OXG_t + \varepsilon_t \quad (4.1)$$

Ekonometrik denklemler modelleri değişkenler arasındaki neden sonuç ilişkisine dayalı olarak iktisadî teoriye muvafık biçimde belirli bir teorik varsayımı esas alan geleneksel modeller olarak telakki edilmektedir. Bununla birlikte özellikle son yıllarda teorik bir zemine dayanma zorunluluğu bulunmayan zaman serisi modellemelerinde kayda değer gelişmeler yaşandığı görülmektedir. Kurulan bir regresyon modelinde değişkenler arasındaki ilişkilerin geçmiş dönemlerde belirleyici olan unsurlar tarafından şekillendiği ve benzer etkilerin gelecekte de sürebileceği hususu dikkate alınarak yapılan tahmin uygulamaları önem kazanmıştır (Dikmen, 2018). Zaman serileri T örneklem büyüklüğünü göstermek üzere Z_t , $t = 1, 2, 3, \dots, T$ biçiminde ifade edilmektedir (Kıran, 2016). Zamana bağlı olarak tanımlanan değişkenlere ait gözlem değerlerinin kronolojik sırayla düzenlenmesiyle elde edilen seriler zaman serileri olarak adlandırılmaktadır (Dikmen, 2018). Bu çerçevede zaman serisi analizinde serilerin geçmiş değerlerinden hareketle belirli ölçüde öngörülebilir bulunmak mümkündür. Ancak gelecekte gerçekleşecek değerlerin de bir olasılık dağılımına tâbi olduğu göz ardı edilmemelidir. Bu sebeple zaman serisi analizlerinde tahminler çoğunlukla belirli bir güven bandı dâhilinde sunulmaktadır (Akgül, 1994). Zaman serileriyle yapılan çözümlemelerde verilerin deterministik ve rassal hususiyetlerinin birlikte dikkate alınması önem

arz etmektedir. Deterministik unsurlar arasında sabit, trend ve mevsimsellik bileşenleri sayılmaktadır. Rassal özellikler ise serilerin durağanlık yapısıyla ilişkilendirilmektedir (Dikmen, 2018). Bir zaman serisine ait veriler olayın mahiyetine göre iktisadî, sosyal ve benzeri pek çok faktörün tesiri altındadır. Bu faktörlerin zaman içerisinde farklı yön ve şiddette tezahür eden etkileri serilerde muhtelif dalgalanmalara yol açmaktadır. Nitekim zaman serileri analizlerinin temel gayelerinden biri de bu unsurları ayırıştırmak suretiyle serinin gerçek yapısını ortaya koymak ve ileriki dönemlere ilişkin muhtemel gelişmeler hakkında tahminde bulunmaktır (Özoğuz, 1986). Eşitlik 4.1'de yer alan β_0 ve β_1 gibi parametreler kitle regresyon katsayıları olarak anılmaktadır. β_0 parametresi aynı zamanda sabit terim olarak ifade edilmekte ve doğrunun Y eksenini kestiği noktayı göstermektedir (Dikmen, 2018). Bu bağlamda sabit terimin bağımlı değişken için bir temel seviye teşkil ettiği ve diğer değişkenlerin etkileri değerlendirilmeden önce başlangıç noktasını tayin ettiği ifade edilmektedir. Özoğuz (1986) ise zaman serisi olgusunun belirli bir dönem içerisindeki yapısal eğilimini özetleyen trend bileşeninin tespit edilmesini diğer unsurların hesaplanmasına imkân tanınması bakımından en mühim unsur olarak değerlendirmektedir. Bu mülahazalardan hareketle çalışmada öncelikle serilerin sabitli ve trendli yapıları ortaya konulmakta akabinde ise diğer bileşenler bu temel üzerinden incelenmektedir.

Zaman serisi verilerine dayalı ekonometrik tahlillerde karşılaşılan mühim meselelerden biri ele alınan serilerin durağan olmamasıdır. Değişkenler arasında iktisadî bakımdan anlamlı ve sahih ilişkiler tesis edilebilmesi için analiz edilen serilerin kuvvetli bir trend ihtiva etmemesi icap etmektedir. Şayet zaman serilerinde belirgin bir eğilim mevcut ise elde edilen ilişki gerçek olmaktan ziyade sahte regresyon mahiyetinde tezahür edebilmektedir. Nitekim birçok uygulamada her iki serinin de güçlü bir trend taşıması sebebiyle aralarında gerçek bir bağ bulunmasa dahi yüksek bir R^2 değeri elde edilebilmektedir. Bu durumda gözlenen yüksek açıklama gücü değişkenler arasındaki gerçek ilişkiden ziyade müşterek eğilimden kaynaklanmaktadır. Ekonometrik çalışmalarda kurulan regresyonun gerçek bir ilişkiyi mi yoksa yanıltıcı bir ilişkiyi mi ifade ettiği ilgili zaman serisinin durağanlık vasfına bağlı olarak değişmektedir. Değişkenler arası ilişkilerin istatistiksel bakımdan anlamlı addedilebilmesi için serilerin durağan özellik göstermesi gerekmektedir. Durağan olmayan serilerin mevcudiyeti pek çok standart hipotez testini geçersiz kılabilir (Dikmen, 2018; Granger ve Newbold, 1974; Gujarati, 2006; Tarı, 1999; Uzgören ve Uzgören, 2005). Dikmen (2018) durağanlık kavramını zaman serisi verilerinin sabit bir ortalama etrafında dalgalanması ve bu dalgalanmanın varyansının zaman boyunca değişmemesi hâli olarak tarif etmektedir. Bir serinin uzun dönemdeki vasfı, değişkenin evvelki dönemde aldığı değer

cari dönemi ne suretle etkilediğinin tespitiyle anlaşılabilir. Bu sebeple serinin nasıl bir süreçten geldiğini kavrayabilmek için her dönemdeki değerinin önceki dönem değerleriyle regresyon ilişkisinin kurulması icap etmektedir (Uzgören ve Uzgören, 2005). Bu çerçevede herhangi bir serinin durağan olup olmadığının tayininde korelogram incelemeleri yahut birim kök testlerinden istifade edilmektedir. Korelogram testleri araştırmacının tercihine daha açık bir mahiyet arz ettiğinden belirli ölçüde takdir unsuru içermektedir. Buna mukabil Y_t ile Y_{t-1} arasındaki ilişkinin sınanması hususu alanyazında yaygın kabul gören birim kök testleri vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir (Dikmen, 2018). Bu itibarla çalışmada Augmented Dickey-Fuller (ADF), Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS), Zivot-Andrews (ZA) ve Kapetanios-Shin-Snell (KSS) birim kök testleri tatbik edilmiştir. KSS testinin doğrusal olmayan yapısı mucibince söz konusu test uygulanmadan evvel seriler Brock-Dechert-Scheinkman (BDS) testi ile de ayrıca tetkik edilmiştir (Brock ve ark., 1996; Dickey ve Fuller, 1981; Kapetanios ve ark., 2003; Kwiatkowski ve ark., 1992; Zivot ve Andrews, 1992).

Geleneksel birim kök testleri arasında yer alan Dickey-Fuller (DF) testi serideki hata terimlerinin otokorelasyon ihtiva etmesi hâlinde tatbik edilememektedir. Bu gibi durumlarda zaman serisi analizlerinde gecikmeli ifadelerden istifade edilmek suretiyle hata terimlerinde zuhur eden otokorelasyon hâli bertaraf edilebilmektedir. Bu sebeple Dickey ve Fuller (1981) bağımlı değişkenin gecikmeli değerlerinin bağımsız değişken olarak modele dâhil edilmesi suretiyle ADF olarak bilinen ve DF testi ile mukayesede aynı kritik değerleri kullanan birim kök testini geliştirmişlerdir (Atasert, 2022; Tarı, 2010). ADF birim kök testine ilişkin notasyon gösterimleri sabitli, trendli ve son olarak olarak sabitli ve trendli olmak üzere Eşitlik 4.2, Eşitlik 4.3 ve Eşitlik 4.4'te sunulmaktadır.

$$\Delta y_t = \alpha_1 y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_i \Delta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.2)$$

$$\Delta y_t = \alpha_0 + \alpha_1 y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_i \Delta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.3)$$

$$\Delta y_t = \alpha_0 + \alpha_1 y_{t-1} + \alpha_2 Trend + \sum_{i=1}^p \beta_i \Delta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.4)$$

Serilerin durağan olarak kabul edilmesi α_1 katsayısının negatif ve istatistiksel bakımdan anlamlı bulunup bulunmamasıyla irtibatlıdır (Koç, 2023). Bu testte farklı anlamlılık düzeylerine ait kabul ve ret sınırlarının tayininde Monte Carlo simülasyonuna göre hesaplanan MacKinnon kritik değerlerinden istifade

edilmektedir. Bu çerçevede hesaplanan test istatistiğinin mutlak değer itibarıyla MacKinnon kritik değerlerinden küçük olması serinin durağan olmadığına delalet etmektedir.⁵ ADF birim kök testine ilişkin hipotezlerin notasyon gösterimleri ise Eşitlik 4.5 ve Eşitlik 4.6'da yer almaktadır.

$$H_0 : \alpha_1 = 0 \quad (4.5)$$

$$H_1 : \alpha_1 < 0 \quad (4.6)$$

Bu çalışmada birim kök testlerine geçilmeden evvel model seçim kriterlerine ilişkin regresyon denklemleri çözümlenmiştir. Bu suretle uygulamaya esas alınan modelin Eşitlik 4.4'te yer alan model olduğu tespit edilmiştir. ADF birim kök testinde sıfır hipotezi serinin birim kök ihtiva ettiği şeklindedir. Bu çerçevede çalışmada yalnızca ADF testi ile iktifa edilmemiştir. Sıfır hipotezi seri durağandır biçiminde kurulan ve alanyazına Kwiatkowski ve arkadaşları (1992) tarafından kazandırılan KPSS birim kök testi de tatbik edilmiştir. KPSS testi birim kök testleri ile durağanlık testlerinin birbirini tamamlayıcı mahiyette ele alınması bakımından temayüz etmektedir (Yavuz, 2004). KPSS testinde serinin durağan olmadığı alternatif hipotezine mukabil serinin durağan olduğunu savunan temel hipotez Lagrange Multiplier (LM) istatistiği vasıtasıyla sınanmaktadır. Çağlayan ve Saçaklı (2006) KPSS test istatistiğine ilişkin notasyon adımlarını aşağıdaki şekilde sıralamaktadırlar:

$$y_t = x_t' \delta + u_t \quad (4.7)$$

$$LM = T^{-2} \sum_{t=1}^T S_t^2 / f_0 \quad (4.8)$$

$$S(t) = \sum_{r=1}^t \hat{u}_r \quad (4.9)$$

$$\hat{f}_0 = \hat{\gamma}_0 + 2 \sum_{j=1}^{T-1} K \left(\frac{q}{j} \right) \hat{\gamma}_j \quad (4.10)$$

5 DF testlerinde geleneksel yöntemlerle hesaplanan $\hat{\tau}$ istatistiği yerine τ testinin sıfır etrafında dağılmıyor olması nedeniyle τ (tau) istatistiği kullanılmaktadır bir başka ifadeyle DF testinde hesaplanan $\hat{\tau}$ istatistikleri bu teste ait hipotezlerin sınanmasında τ (tau) istatistiği olarak ifade edilmektedir. Alanyazında τ (tau) istatistiği DF test istatistiği olarak da anılmaktadır (Dikmen, 2018).

$$\gamma_j = T^{-1} \sum_{t=j+1}^T e_t e_{t-j} \quad (4.11)$$

Artıkların uzun dönem varyansının nonparametrik tahmincisine dayanan KPSS testi denklemi Eşitlik 4.7'de takdim edilmektedir. Eşitlikte yer alan x_t sabit veya sabit ve trendi ifade eden deterministik bileşene tekabül etmektedir. KPSS testinde test istatistiği, Eşitlik 4.8'in tatbiki neticesinde elde edilmektedir. Bu notasyonda T gözlem sayısını, S_t birikimli artık fonksiyonu göstermektedir. Mezkûr fonksiyon Eşitlik 4.9'da sunulan model ile hesaplanmaktadır. Sıfır frekansta artık spektrumun tahmincisi olan f_0 Eşitlik 4.10 aracılığıyla elde edilmekte ve Eşitlik 4.11 ile ifade edilmektedir. Eşitlik 4.10 notasyonunda yer alan K Kernel fonksiyonuna ve q ise bant genişliğine karşılık gelmektedir. KPSS testinde trendden arındırılan seride birim kökün bulunmaması serinin trend durağanlığını göstermektedir. KPSS testinin en mühim hususiyetlerinden biri de bir veya daha büyük bir hareketli ortalama süreci yapıyı ihtiva eden serilerde ADF testinin aksine gücünün zayıflamamasıdır (Schwert, 1989; Torun, 2015). KPSS testinde LM test istatistikleri kritik değerlerle mukayese edilerek yorumlanmakta ve bu çerçevede sınaması yapılan hipotezler Eşitlik 4.12 ve 4.13'te yer almaktadır (Çağlayan ve Saçaklı, 2006).

$$H_0 : p < 1 \quad (4.12)$$

$$H_1 : p = 1 \quad (4.13)$$

Perron (1989) geleneksel birim kök testlerinden istifade ederek gerçekleştirdiği çalışmalarda tüm serilerin birim köklü bir yapı arz etmediği neticesine ulaşmıştır. Serilerin birim köklü olarak telakki edilmesinin başlıca sebepleri arasında makroekonomik değişkenlere ait zaman serilerinde zuhur eden fiyat şokları, iktisadî buhranlar yahut politika değişiklikleri gösterilmektedir. Son dönemde yapılan araştırmalarda ise yapısal kırılmaların mevcudiyetini ve konumunu tespit etmeye matuf çalışmalara daha fazla ağırlık verildiği müşahade edilmektedir (Allaro ve ark., 2011). Ekonometrik bir tahlilde yapısal kırılmaların nazar-ı dikkate alınmaması mühim istatistikî meselelere ve sistematik surette sapmalı neticelere sebebiyet verebilmektedir. Bu çerçevede alanyazında muhtelif yapısal kırılmalı birim kök testleri teklif edilmiştir. Bu çalışmada ise yapısal kırılmalı birim kök testleri arasında yer alan ZA birim kök testi uygulamaya alınmıştır.

ZA birim kök testi, Perron (1989)'un dışsal kırılma noktası varsayımına yöneltlen bir tenkit mahiyetinde alternatif hipotez altında trend fonksiyonunda tahmini bir kırılmaya müsaade eden bir prosedür olarak geliştirilmiştir

(Tıraşoğlu Yıldırım, 2014). ZA birim kök testi, yapısal değişikliklerin vuku bulduğu dönemlere ilişkin önceden herhangi bir bilgiye sahip olunmadığı hâllerde başvurulan yöntemler arasında zikredilmektedir. Bu testin iki mühim açıklaması şu şekilde ifade edilmektedir (Yurdakul, 2000): (1) Kırılma noktası içsel olarak tahmin edilmektedir. (2) Dışsal ve önceden belirlenmiş sabit bir zaman kırılma kukla değişkeni bulunmamaktadır.⁶ ZA yapısal kırılmalı birim kök testine ilişkin notasyon gösterimlerini aşağıda yer almaktadır (Çemrek ve Şeker, 2020):

$$y_t = \hat{\mu}^A + \hat{\alpha}^A y_{t-1} + \hat{\beta}^A t + \hat{\theta}^A DU_t(\hat{\lambda}) + \sum_{j=1}^k \hat{c}_j^A \Delta y_{t-j} + \hat{e}_t \quad (4.14)$$

$$y_t = \hat{\mu}^B + \hat{\alpha}^B y_{t-1} + \hat{\beta}^B t + \hat{\gamma}^B DT_t^*(\hat{\lambda}) + \sum_{j=1}^k \hat{c}_j^B \Delta y_{t-j} + \hat{e}_t \quad (4.15)$$

$$y_t = \hat{\mu}^C + \hat{\alpha}^C y_{t-1} + \hat{\beta}^C t + \hat{\theta}^C DU_t(\hat{\lambda}) + \hat{\gamma}^C DT_t^*(\hat{\lambda}) + \sum_{j=1}^k \hat{c}_j^C \Delta y_{t-j} + \hat{e}_t \quad (4.16)$$

Yukarıdaki eşitliklerde yalnızca sabitte kırılmaya izin veren model Eşitlik 4.14, yalnızca trendde kırılmaya izin veren model Eşitlik 4.15 ve hem sabitte hem de trendde kırılmaya izin veren model ise Eşitlik 4.16 olarak gösterilmektedir. Kukla değişkenlere ilişkin notasyonlar aşağıda yer almaktadır (Çemrek ve Şeker, 2020):

$$DU_t(\lambda) = \begin{cases} 1 & t > T\lambda \\ 0 & d.d. \end{cases} \quad (4.17)$$

$$DT_t^*(\lambda) = \begin{cases} t - TB & t > T\lambda \\ 0 & d.d. \end{cases} \quad (4.18)$$

Notasyonlarda $t = 1, 2, \dots, T$ zamanı, TB kırılma tarihini, λ kırılma noktasını DU_t sabitte kırılmayı ve DT_t^* eğimde kırılmayı göstermektedir. ZA birim kök testine göre birim kökün mevcudiyeti y_{t-1} 'in katsayısının istatistiksel açıdan anlamlılığı ile test edilmektedir. katsayısının istatistiksel bakımdan anlamlılığı ile sınıanmaktadır. Şayet t-istatistiği ZA kritik değerlerinden mutlak değer itibarıyla daha büyük ise ilgili değişkenin durağan olmadığı temel hipotezi reddedilmektedir (Yavuz, 2006; Yılancı, 2009).

Serilerin durağanlık özellikleri doğrusal birim kök testleri vasıtasıyla incelenmiş olmakla birlikte zaman serilerinin her hâlükârda doğrusal bir yapı arz ettiği varsayımı mutlak surette kabul edilememektedir. Zira iktisadî ve

6 Bu ifade orijinal çalışmada “bir zaman kukla değişkeni yoktur” şeklinde yer almaktadır. Bu çalışmaya uygulanması sırasında bu ifade metin içerisinde yer verildiği şekliyle genişletilmiştir.

finansal serilerde rejim değişimleri, ani şoklar yahut asimetrik tepkiler gibi unsurlar doğrusal olmayan dinamiklerin mevcudiyetine işaret edebilmektedir. Bu itibarla serilerde doğrusal olmayan bir yapının bulunup bulunmadığının ayrıca tahkik edilmesi icap etmektedir. Bu maksatla çalışmada doğrusal olmayan bağımlılık yapısının sınanmasına imkân veren BDS testine de yer verilmektedir. BDS testi doğrusal bağımlılık, doğrusal olmayan bağımlılık ve kaos da dahil olmak üzere bağımsızlıklardan olası sapmaları sınamak için tercih edilmektedir. BDS testi olarak aşağıda gösterilen notasyonlar aracılığıyla uygulanmaktadır (Sülkü ve Ülkmez, 2018).

$$C_{m,n}(\varepsilon) = \frac{1}{\binom{n}{2}} \sum_{1 \leq s < t} \sum_{s < t \leq n} I_n \left(\|x_s^m - x_t^m\| \right) \quad (4.19)$$

$$I_\varepsilon = \begin{cases} 1, & |x_s - x_t| < \varepsilon \\ 0, & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.20)$$

Yukarıda gösterilen notasyonlarda m yerleştirme boyutu, n gözlem sayısı, ε gözlem çiftleri arasındaki fark, x filtrelenmiş modelin artıklarını yahut veri serisini ifade etmektedir. I_ε fonksiyonu ise gösterge fonksiyonu olarak tarif olunmaktadır. BDS testinde seçilen ε değeri gösterge fonksiyonundan daha küçük ise bir değerini sair hallerde ise sıfır değerini alacak surette tanımlanmaktadır (Sülkü ve Ülkmez, 2018).

Bu çalışmanın metot safhalarına doğrusal olmayan birim kök testleri arasında zikredilen KSS testi ile devam edilmektedir. KSS testinde bir zaman serisinin birim kök süreci izlemesine karşılık doğrusal olmayan durağan üssel yumuşak geçişli otoregresif süreç izlediği varsayılmaktadır. Testin uygulama adımlarının notasyon gösterimleri aşağıda sıralanmaktadır (Hepsağ ve Akçalı, 2015).

$$y_t = \beta y_{t-1} + \gamma y_{t-1} \left[1 - \exp(-\theta y_{t-1}^2) \right] + \varepsilon_t \quad (4.21)$$

$$\Delta y_t = \phi y_{t-1} + \gamma y_{t-1} \left[1 - \exp(-\theta y_{t-1}^2) \right] + \varepsilon_t \quad (4.22)$$

$$\Delta y_t = \gamma y_{t-1} \left[1 - \exp(-\theta y_{t-1}^2) \right] + \varepsilon_t \quad (4.23)$$

$$\Delta y_t = \delta y_{t-1}^3 + \varepsilon_t \quad (4.24)$$

$$t_{NL} = \frac{\hat{\delta}}{s_{\hat{\delta}}} \quad (4.25)$$

Eşitlik 4.21'de y_{t-1}^2 geçiş değişkenine θ ise geçiş parametresine karşılık gelmektedir. Bu notasyonda $\phi = \beta - 1$ uygulaması yapıldığında Eşitlik 4.22'de gösterilen model elde edilmektedir. Bu modele $\phi = 0$ kısıtının getirilmesiyle elde edilen Eşitlik 4.23'teki modelde $\theta = 0$ hipotezini tanımlayabilecek kabiliyette γ bulunmadığından Kapetanios ve ark. (2003) Taylor açılımını kullanan Eşitlik 4.24'te sunulan yardımcı regresyon modelinden istifade etmişlerdir. Bu modelin test istatistiği ise 4.25'te sunulan notasyon vasıtasıyla elde edilmektedir. Eşitlik 4.24'te yer alan kübik değişken ESTAR doğrusal olmama durumuna tekabül etmektedir (Hepsağ ve Akçalı, 2015). Bu bağlamda mezkûr birim kök testinde $\theta = 0$ hipotezi alternatif hipotez olan $\delta < 0$ hipotezine karşı sınanmakta ve test istatistiğinin Kapetanios ve ark. (2003) tarafından elde edilen kritik değerlerden küçük olması durumunda birim kökün varlığını ifade eden sıfır hipotezi reddedilememektedir. t_{NL} test istatistiğinin daha büyük hesaplanması durumunda seri özelinde ESTAR durağanlık hipotezi geçerli olmaktadır (Hepsağ ve Akçalı, 2015).

Bu noktaya kadar aktarılan bilgilerde çalışmada kullanılan birim kök testleri ve diğer destekleyici ön testler tanıtılmıştır. Aşağıda çalışma bakımından ADF, KPSS, ZA, BDS ve KSS testlerinin neden mühim addedildiği maddeler hâlinde izah olunmaktadır:

1. *ADF Birim Kök Testi*: Serilerin birim kök ihtiva edip etmediğinin tespiti suretiyle durağanlık derecelerinin belirlenmesini temin etmektedir. Karbon yoğunluğu, üretim miktarı ve proses türlerini kapsayan değişkenlerin seviyede mi yoksa farkta mı durağan olduklarının ortaya konulmasına hizmet etmektedir.
2. *KPSS Durağanlık Testi*: ADF testini tamamlayıcı mahiyette olup sıfır hipotezini seri durağandır şeklinde tesis etmesi itibarıyla mukayeseli bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Özellikle yapısal dönüşümlerin yaşandığı sektörlerde yanlış birim kök kararlarının önüne geçilmesine katkı sağlamaktadır. Elde edilen durağanlık bulgularının sağlamlasının yapılmasına vesile olmaktadır.
3. *Zivot Andrews Yapısal Kırılmalı Birim Kök Testi*: Çelik sektöründe teknoloji değişimi, çevresel dönüşümler ve küresel krizler gibi yapısal kırılmaların vuku bulmuş olması ihtimalini nazar-ı dikkate almaktadır. Kırılma noktasını içsel olarak tahmin etmek suretiyle karbon yoğunluğu serisindeki muhtemel rejim değişimlerini tespit etmeye

imkân vermektedir. Yapısal kırılmaların ihmal edilmesi hâlinde ortaya çıkabilecek sapmalı sonuçların önüne geçmektedir.

4. *BDS Testi*: Serilerde doğrusal olmayan bağımlılık yapısının bulunup bulunmadığını sınıamaktadır. Oksijenli ve elektrikli proseslerin karbon yoğunluğu üzerindeki etkilerinin doğrusal bir yapı arz edip etmediğinin tahkikine imkân vermektedir. Doğrusal olmayan birim kök testlerine geçiş için metodolojik bir dayanak teşkil etmektedir.
5. *KSS Doğrusal Olmayan Birim Kök Testi*: Serilerde doğrusal olmayan uyum mekanizmalarının varlığı ihtimalini dikkate almaktadır. Karbon yoğunluğunun çevresel baskılar yahut maliyet unsurlarına asimetric tepkiler verebilmesi ihtimalini sınıamaktadır. Doğrusal testlerin yetersiz kalabileceği hâllerde daha isabetli durağanlık sonuçları elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu suretle söz konusu testler birlikte ele alındığında karbon yoğunluğunun zaman içerisindeki seyrinin hem doğrusal hem de doğrusal olmayan dinamikler çerçevesinde ve ayrıca yapısal kırılmalar dikkate alınarak tahlil edilmesine imkân vermektedir. Zaman serisi analizlerinde hangi yöntem, hesaplama ve testlerin tercih edileceğinin tayini muhtelif tespit usulleri vasıtasıyla gerçekleştirilebilmekte olup ekseriyetle verilerin durağan olup olmama hâline göre belirlenmektedir. Eşbütünleşme yaklaşımı ise zaman serilerinin durağan olmaması durumunda fark alma işlemi ile durağanlaştırılan serilerin değişkenleri etkileyen dışsal şoklara rağmen aralarında uzun dönemli bir denge ilişkisinin mevcut olabileceğini ifade etmektedir (Dikmen, 2018).

Alanyazında yaygın surette yer bulan eşbütünleşme testlerinin, hata terimine dayalı iki aşamalı Engle ve Granger (1987) yöntemi ile sistem yaklaşımına dayalı Johansen (1988) ve Johansen ve Juselius (1990) yöntemleri olduğu görülmektedir (Alaskar and AlAli, 2024; Alsabhan and Alabdulrazag, 2024; Tang and Wang, 2025). Bu yöntemlerin tatbik edilebilmesi için modeldeki değişkenlerin düzeyde durağan olmaması ve birinci farkları alındığında durağan hâle gelmesi icap etmektedir (Pesaran et al., 2001). Eşbütünleşme dereceleri farklı serilere ilişkin ortaya çıkan müşkülleri Pesaran and Shin (1999) ile Pesaran et al. (2001) tarafından alanyazına teklif edilen Gecikmesi Dağıtılmış Otogresif Sınır Testi (Autoregressive Distributed Lag Bound Test [ARDL]) yaklaşımı gidermektedir. Mezkûr yaklaşım değişkenlerin bütünleşme derecelerine bakılmaksızın eşbütünleşme ilişkisinin araştırılmasına imkân tanımaktadır. ARDL modeli serilerin $I(2)$ olmaması şartıyla $I(0)$ ve $I(1)$ düzeyinde bulunabilmesine cevaz vermektedir (Abbas et al., 2024; Shahbaz et al., 2023; Qu et al., 2024). Bilâhare Shin et al. (2014) tarafından bu model asimetric ilişkileri de ihtiva edecek surette geliştirilmiş ve Doğrusal Olmayan

Gecikmesi Dağıtılmış Otoresif Sınır Testi (Nonlinear Autoregressive Distributed Lag [NARDL]) modeli alanyazına kazandırılmıştır (Ahmed et al., 2023; Quan et al., 2024). NARDL yöntemine ilişkin notasyon gösterimleri aşağıda sıralanmaktadır (Göksu ve Balkı, 2023).

$$Y = f(X_{1t} + \varepsilon_t) \quad (4.26)$$

$$Y = f(X_{1t}^+, X_{1t}^-) \quad (4.27)$$

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_{1t}^+ + \beta_2 X_{1t}^- + \mu_t \quad (4.28)$$

$$X_{1t}^+ = \sum_{i=1}^t \Delta X_{1i}^+ = \sum_{i=1}^t \max(\Delta X_{1i}, 0) \quad (4.29)$$

$$X_{1t}^- = \sum_{i=1}^t \Delta X_{1i}^- = \sum_{i=1}^t \min(\Delta X_{1i}, 0) \quad (4.30)$$

$$\Delta Y_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{1i} \Delta Y_{t-i} + \sum_{i=0}^l \beta_{2i} \Delta X_{1t-i}^+ + \sum_{i=0}^m \beta_{3i} \Delta X_{1t-i}^- + \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 X_{1t-1}^+ + \alpha_3 X_{1t-1}^- + \mu_t \quad (4.31)$$

NARDL yönteminin tatbikine bağımsız değişkenlerin (+) ve (−) formda iki ayrı değişken hâline ayrıştırılması suretiyle başlanmaktadır. Eşitlik 4.26’da modelin simetrik form yapısı gösterilmektedir. Bunu müteakiben Eşitlik 4.27 ve Eşitlik 4.28’de modelin asimetrik yapıları yer almaktadır. Bu çerçevede Eşitlik 4.29 ve 4.30 ise modeldeki verilerin ayrışma sürecine işaret etmektedir. Mezkûr eşitliklerden hareketle Eşitlik 4.31’de Shin ve arkadaşlarının (2014) geliştirmiş oldukları spesifikasyona dayalı olarak tahmin edilecek doğrusal olmayan model ortaya konulmaktadır. Yukarıdaki notasyonlarda Δ simgesi fark operatörünü, μ_t simgesi hata terimlerini, β_0 sabit terimi, β_1 , β_2 ve β_3 kısa dönem katsayılarını, α_1 , α_2 ve α_3 uzun dönem katsayılarını k , l ve m ise gecikme uzunluklarını ifade etmektedir (Göksu ve Balkı, 2023). Belirtmek gerekir ki NARDL yaklaşımı, asimetrik eşbütünleşmeyi modellemek suretiyle uzun ve kısa vadede asimetrik etkilerin incelenmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca doğrusal olmama ile durağan olmama hâlinin müşterek analizi sınırsız bir hata düzeltme modeli aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir (Karaçayır ve Bezgin, 2021). NARDL yönteminde eşbütünleşmenin sınanmasında *F – Bounds* ve *t – Bounds* sınır testlerinden istifade edilmektedir. İlâveten, uzun ve kısa dönem asimetrik ilişkilerin mevcudiyetinin tespitinde Wald testi kullanılmaktadır. Bu çalışmada uzun dönem ilişkiler sınanıldığından Wald testine

ilişkin uzun dönem sıfır ve alternatif hipotezler aşağıda takdim edilmektedir (Göksu ve Balkı, 2023).

$$H_0 = \frac{\alpha_2}{-\alpha_1} = \frac{\alpha_3}{-\alpha_1} \quad (4.32)$$

$$H_A = \frac{\alpha_2}{-\alpha_1} \neq \frac{\alpha_3}{-\alpha_1} \quad (4.33)$$

Bu çalışmada NARDL yaklaşımının seçilmesinde belirlenen amaçlar aşağıda numaralandırılarak gösterilmektedir.

1. Yöntemin elektrikli üretim ile oksijenli üretimde meydana gelen artış ve azalışların karbon emisyonu üzerindeki uzun dönem etkilerini ayrı ayrı tahmin etmeye imkân vermesi,
2. Üretim kompozisyonundaki değişimlerin karbon emisyonu üzerinde simetrik mi yoksa asimetrik mi tesir icra ettiği tespit edilebilmesi,
3. Üretim süreçlerindeki yapısal dönüşümün karbon emisyonu üzerindeki kalıcı tesirleri iktisadî bakımdan daha sağlıklı şekilde değerlendirilebilmesidir.

İktisatta ve ekonometride nedensellik değişkenler arasındaki ilişkinin bir değişkendeki değişimin diğerini hangi istikamette ve ne ölçüde etkilediğini ortaya koymak bakımından mühim addedilmektedir. Bu ayrım politika önerilerinin isabetli surette tesis edilmesi ve hatalı çıkarımlardan içtinap edilmesi açısından belirleyici bir mahiyet arz etmektedir. Zira korelasyonun mevcudiyeti tek başına iktisadî bir müdahaleyi meşru kılmamaktadır. Esas olan sebep sonuç bağının teknik surette teyit edilmesidir. Granger (1969) nedensellik testlerine ilişkin ilk sistematik analizler arasında yer almaktadır. Diğer yöntemlerde olduğu üzere nedensellik testleri de zaman içerisinde muhtelif alternatiflerle gelişim göstermiştir. Toda-Yamamoto (1995) ve sair nedensellik testlerinde pozitif değişmelerin nedensellik etkileri negatif değişmeler ile aynı kabul edilerek analizler icra edilmektedir. Ne var ki günümüz şartlarında karar vericilerin değişkenlerdeki pozitif ve negatif şoklara verdikleri tepkilerin yeknesak olmadığı izahıtan varestedir. Hatemi J (2012) çalışmasında değişkenlerdeki pozitif ve negatif şokları birbirinden tefrik ederek bu şokların muhtemel etkilerini ayrı ayrı nazar-ı dikkate alan bir nedensellik testi geliştirmiştir (Emeç ve Yarbaşı, 2018). Pozitif ve negatif şoklar arasındaki ilişkinin değişkenlerin genel ilişkilerinden farklı olabileceğini ileri süren Granger ve Yoon (2002) ise veriyi birikimli pozitif ve negatif değişmelere ayırarak söz konusu bileşenler arasındaki uzun

dönemli ilişkiyi sınımlıdır. Hatemi J (2012), Granger ve Yoon'un (2002) yaklaşımını nedensellik ilişkisi çerçevesinde geliştirerek asimetrik nedensellik testini alanyazına kazandırmıştır. Hatemi J (2012) asimetrik nedensellik testinde pozitif ve negatif şokların kümülatif toplamları aracılığıyla asimetriye izin verilmektedir (Dineri ve Işık, 2021; Hatemi J, 2012). Testin notasyon gösterimleri Şak (2021) çalışması esas alınarak aşağıda sıralanmaktadır.

$$X_{1t} = X_{1t-1} + e_{1t} = X_{10} + \sum_{i=1}^t e_{1i} \quad (4.34)$$

$$X_{2t} = X_{2t-1} + e_{2t} = X_{20} + \sum_{i=1}^t e_{2i} \quad (4.35)$$

$$e_{1i} = e_{1i}^+ + e_{1i}^- \quad (4.36)$$

$$e_{2i} = e_{2i}^+ + e_{2i}^- \quad (4.37)$$

$$X_{1t} = X_{1t-1} + e_{1t} = X_{10} + \sum_{i=1}^t e_{1i}^+ + \sum_{i=1}^t e_{1i}^- \quad (4.38)$$

$$X_{2t} = X_{2t-1} + e_{2t} = X_{20} + \sum_{i=1}^t e_{2i}^+ + \sum_{i=1}^t e_{2i}^- \quad (4.39)$$

$$X_{1t}^+ = \sum_{i=1}^t e_{1i}^+ \quad (4.40)$$

$$X_{1t}^- = \sum_{i=1}^t e_{1i}^- \quad (4.41)$$

$$X_{2t}^+ = \sum_{i=1}^t e_{2i}^+ \quad (4.42)$$

$$X_{2t}^- = \sum_{i=1}^t e_{2i}^- \quad (4.43)$$

$$X_t^+ = X_{1t}^+, X_{2t}^+ \quad (4.44)$$

$$X_t^- = X_{1t}^-, X_{2t}^- \quad (4.45)$$

$$X_t^+ = \mu + A_1 X_{t-1}^+ + \dots + A_p X_{t-p}^+ + w_t^+ \quad (4.46)$$

$$X_t^- = \mu + A_1 X_{t-1}^- + \dots + A_p X_{t-p}^- + w_t^- \quad (4.47)$$

Eşitlik 4.34 ve Eşitlik 4.35'te yer alan X_{10} ve X_{20} ifadeleri değişkenlerin başlangıç değerlerini göstermektedir. Hatemi J (2012) tarafından şok olarak tanımlanan hata terimleri ise pozitif ve negatif bileşenlerine ayrıştırılmakta ve bu ayrım Eşitlik 4.36 ve Eşitlik 4.37'de pozitif ve negatif şoklar şeklinde ifade edilmektedir. Söz konusu ayrıştırılmış hata terimleri Eşitlik 4.34 ve Eşitlik 4.35'te ilgili yerlere ikame edildiğinde, Eşitlik 4.38 ve Eşitlik 4.39'da yer alan yeni notasyonlara ulaşılmaktadır. Eşitlik 4.40-4.43'te ise pozitif ve negatif hata terimlerinin kümülatif toplamları esas alınarak tanımlanan değişkenler gösterilmektedir. Bu kümülatif bileşenler arasındaki nedensellik ilişkisi VAR yapısı çerçevesinde kurulan denklemler aracılığıyla incelenmektedir. Bu bağlamda Eşitlik 4.46 ve Eşitlik 4.47'de yer alan modeller pozitif ve negatif kümülatif şoklar arasındaki nedensellik ilişkilerini temsil etmektedir. Söz konusu modellerde A katsayılar matrisini, w_t ise hata terimleri vektörünü ifade etmektedir. Nedenselliğin bulunmadığını ileri süren sıfır hipotezini sınamak amacıyla serbestlik derecesi kısıt sayısına (p) ve χ_p^2 dağılımına sahip Wald test istatistiği hesaplanmaktadır. Elde edilen test istatistiği bootstrap simülasyonu yoluyla belirlenen kritik değerlerle karşılaştırılarak değerlendirilmektedir. Böylece değişkenler arasında asimetric nedensellik ilişkisinin var olup olmadığı tespit edilmektedir (Hatemi J, 2012; Şak, 2021). Bu çalışmada Hatemi J asimetric nedensellik testinin kullanılmasının amaçları şu şekilde özetlenmektedir:

1. Elektrikli üretimde üretilen çelik ile oksijenli üretimde üretilen çelikte meydana gelen artış ve azalışların karbon yoğunluğu üzerindeki nedensel etkilerini pozitif ve negatif şoklar itibarıyla ayrı ayrı tespit etmek ve böylelikle üretim kompozisyonundaki değişimlerin karbon yoğunluğunu simetric mi yoksa asimetric mi etkilediğini ortaya koymak,
2. Üretim türleri ile karbon yoğunluğu arasındaki nedensel ilişkinin yönünü şok ayrıştırması çerçevesinde belirleyerek özellikle düşük karbonlu üretim stratejilerinin uzun vadeli çevresel etkilerine dair daha isabetli politika çıkarımlarında bulunmak.

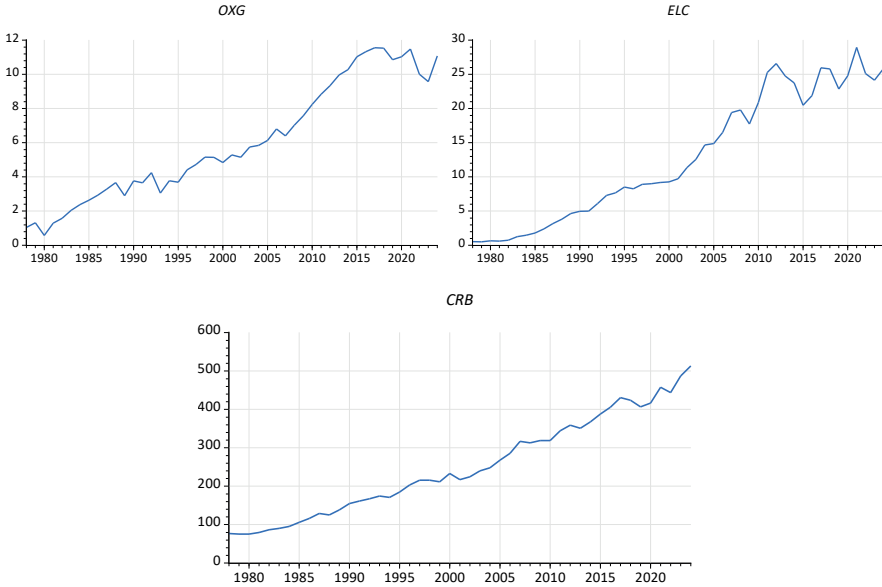
Bu çalışmada veri setinin düzenlenmesinde ve birim dönüştürme işlemlerinde Microsoft Excel 16.0 (Microsoft, 2016), Birim kök testleri ve NARDL uygulamasında Eviews ve NonStat (Eviews, 2022; NonStat, t.y.) ve Hatemi J nedensellik testlerinde ise Gauss 14.0 (Aptech, t.y.) paket programları ve yazılımlarından istifade edilmiştir. Yukarıda tafsil edilen yöntem

ve testler çerçevesinde gerçekleştirilen analizler neticesinde elde edilen bulgular, müteakip bölümde ayrıntılı olarak takdim edilmekte ve iktisadî bakımdan yorumlanmaktadır.

5. Bulgular

Bu başlık altında veri seti ve yöntem bölümünde ayrıntılarıyla izah edilen ekonometrik analiz süreçlerinin tatbiki neticesinde elde edilen bulgular ilgili alanyazından gelen dayanaklarla birlikte mukayeseli bir biçimde ortaya konulmaktadır. Bu bağlamda ilk olarak serilerin zaman yolu grafikleri Şekil 4'te sunulmaktadır.

Şekil 4. Serilerin Zaman Yolu Grafikleri



Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 4'te yer alan *ELC* serisi incelendiğinde 1980'li yılların ilk dönemlerinden itibaren serinin genel olarak yukarı yönlü bir seyir izlediği görülmektedir. Bu seyrin muntazam ve doğrusal olmaması dikkat çekmektedir. Bilhassa 2000'li yılların orta döneminden itibaren yükseliş ivmesinin arttığı dönemsel iniş çıkışlara rağmen serinin uzun vadeli eğiliminin müspet kaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum elektrikli üretim prosesinin zaman içerisinde önem kazandığına işaret etmektedir. *OXG* serisi ise benzer şekilde artış yönlü bir seyir takip etmekle birlikte seride 2000'li yılların ortalarına kadar ılımlı bir yükseliş söz konusu iken müteakip dönemlerde seviyelerin yüksek kalmasına rağmen dönemsel gerilemeler barındırdığı görülmektedir. Bu vaziyet görece daha az

ivmeli de olsa oksijenli proses üretiminin genel büyüme trendini muhafaza ettiği ancak kısa vadede oynak bir yapı sergilediği şeklinde yorumlanmaktadır. *CRB* serisi dikkate alındığında serinin daha düzenli ve istikrarlı bir artış patikası arz ettiği görülmektedir. 1980'lerden 2000'lere kadar kademeli bir yükseliş gösteren *CRB* serisinin 2005 sonrası dönemde yapısal bir genişleme yaşadığını ifade etmek mümkündür.

1980'li yılların ikinci yarısında başlangıçta yalnızca haddehane olarak faaliyet gösteren tesislerin müteakiben EAF dönüşümlerini ikmal ederek üretime başlamaları *ELC* serisindeki artışla izah edilmektedir. Keza Türkiye'nin üretim yapısının büyük ölçüde EAF'li tesislere müstenit olması keyfiyetinin de söz konusu serinin zaman yolu grafiğine açıkça aksettği değerlendirilmektedir (Bıyık ve Özkale, 2017; Yaşar, 2009). *OXG* serisinde müşahede edilen dönemsel gerilemelerin ise esasen birkaç yapısal ve konjonktürel saikle irtibatlandırılması mümkündür. Bunlar 2008 küresel finans krizi kaynaklı talep şokları, enerji maliyetlerindeki artış ve Türkiye çelik sanayinin zaman içerisindeki elektrikli prosese doğru tedricî bir temayüle sahip olması olarak sayılmaktadır (Tamsöz ve Elmas, 2021; Taşdelen ve Çetiner, 2022; The Carbon Compass, t.y.). *CRB* serisinin zaman yolu grafiği tahmin edildiği üzere nüfus ve üretim dinamikleriyle mütenasip biçimde bir artış sergilemektedir. Serilerin özet istatistiklerine ilişkin değerler Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. Özet İstatistikler

| İstatistik | <i>CRB</i> | <i>ELC</i> | <i>OXG</i> |
|-----------------|------------|------------|------------|
| Ortalama | 251,5553 | 12,9878 | 6,0431 |
| Ortanca | 224,3198 | 9,7200 | 5,1520 |
| En yüksek değer | 513,0346 | 28,9264 | 11,5500 |
| En düşük değer | 75,1393 | 0,5040 | 0,5720 |
| Standart sapma | 128,0624 | 9,3845 | 3,4300 |
| Çarpıklık | 0,3019 | 0,1705 | 0,2745 |
| Basıklık | 1,9087 | 1,5411 | 1,7728 |
| Jarque-Bera | 3,0463 | 4,3956 | 3,5393 |
| Olasılık değeri | 0,2180 | 0,1110 | 0,1704 |
| Gözlem sayısı | | 47 | |

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 3 incelendiğinde *CRB* serisinin ortalamasının *ELC* ve *OXG* serilerine kıyasla belirgin biçimde daha yüksek olduğu görülmektedir. Her üç seride de medyan değerlerinin ortalamasının altında kalması dağılımın sağa

doğru hafifçe çarpık olduğuna işaret etmektedir. Keza alanyazında çarpıklık katsayısının -1 ile +1 arasında vâki olması durumunda basıklık katsayısının da -2 ile +2 sınırları içinde kalmasının lüzumu ifade olunmaktadır (Uysal ve Kılıç, 2021). Bu ifadeye uygun biçimde çarpıklık ve basıklık katsayıları ise her üç serinin de aşırı sapma göstermediğine delalet etmektedir. Standart sapma değerleri özellikle *CRB* serisinde değişkenliğin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum *CRB* serisindeki dalgalanmaların görece daha fazla olduğunu düşündürmektedir. Normal dağılım kaideleri mucibince Jarque-Bera değerinin beşten küçük ve olasılık değerinin ise 0,05'ten yüksek olması beklenmektedir. Olasılık değerinin 0,05'ten yüksek olması durumu hataların normal dağıldığı şeklinde yorumlanmaktadır (Dereli, 2014; Teyyare, 2018) Jarque-Bera testinin olasılık değerlerinin %5 anlamlılık düzeyinin üzerinde olması serilerin normal dağılım varsayımını reddetmeyi gerektirecek bir kanıt sunmamaktadır. Bu itibarla verilerin genel yapısının istikrarlı ve analize elverişli olduğu değerlendirilmektedir. Birim kök testlerinin tatbikinden evvel serilerin model seçim esaslarının belirlenmesi amacıyla uygulanan regresyon sonuçları aşağıda yer almaktadır.

Tablo 4. Birim Kök Testi Model Seçim Sonuçları

| Model | <i>CRB</i> | <i>ELC</i> | <i>OXG</i> |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Sabitli | 7,3843 [0,0000] | -3,7628 [0,0000] | 1,9169 [0,0616] |
| Trendli | 46,8582 [0,0000] | 28,3435 [0,0000] | 27,2732 [0,0000] |

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 4'te yer alan değerlerde parantez içlerindeki sayılar olasılık değerlerini ifade etmektedir. Diğer nicel bulgular ise serilerde uygulanan regresyonun t-istatistik değerlerine karşılık gelmektedir. Bu bilgilerden hareketle *CRB* ve *ELC* serilerinde sabitli ve trendli modeller için test istatistiklerinin anlamlı oldukları görülmektedir ($p < 0,05$). *OXG* serisinde ise sabitli modelin olasılık değeri 0,0616 olarak elde edilmiş olmasına rağmen olasılık değerine yakınlığı nedeniyle de bu seri için sabitli ve trendli model kullanımı tercih edilmektedir. Bu bağlamda serilerin birim kök testlerinde hem sabitli hem de trendli modellerin tatbik olunabileceği anlaşılmaktadır. Serilere uygulanan geleneksel birim kök testi sonuçları aşağıda yer almaktadır. Öncelikle uygulanan ADF birim kök testine ilişkin bulgular Tablo 5'te sunulmaktadır.

Tablo 5. ADF Birim Kök Testi Sonuçları

| Seriler | t-istatistiği | Kritik Değerler | | | Olasılık |
|--------------|---------------|-----------------|---------|---------|----------|
| | | %1 | %5 | %10 | |
| <i>CRB</i> | -2,2955 | -4,1705 | -3,5107 | -3,1855 | 0,4278 |
| <i>ELC</i> | -2,8773 | -4,1705 | -3,5107 | -3,1855 | 0,1790 |
| <i>OXG</i> | -2,3513 | -4,1705 | -3,5107 | -3,1855 | 0,3991 |
| ΔCRB | -4,8583 | -2,6173 | -1,9483 | -1,6122 | 0,0000 |
| ΔELC | -5,6668 | -2,6173 | -1,9483 | -1,6122 | 0,0000 |
| ΔOXG | -6,6631 | -2,6173 | -1,9483 | -1,6122 | 0,0000 |

Δ simgesi serilerin birinci farkına karşılık gelmektedir.

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

ADF birim kök testinin Dickey-Fuller tabanlı olması ve Dickey-Fuller birim kök testinin ise otokorelasyonsuzluk varsayımı sebebiyle Eviews programında gecikme uzunluğu ayarları “*user specified*” sekmesine “0” olarak girilmiştir (Dikmen, 2018). *CRB*, *ELC*, *OXG*’ye mahsus t-istatistik değerlerinin sırasıyla 2,2955, 2,8773, 2,3513 oldukları ve bunların tümünün tüm kritik değerlerden mutlak değerce küçük oldukları nazara alındığında serilerin düzey değerlerinde birim kök içerdikleri sonucuna ulaşılmaktadır. Serilerin birinci farkları alındığında ise tüm t-istatistik değerlerinin mutlak değerce tüm kritik değerlerden büyük oldukları görülmektedir. Bu durumda ise H_0 hipotezi reddedilerek serilerin birim köke sahip olmadıkları ve tüm anlamlılık düzeylerinde $I(1)$ oldukları ifade edilmektedir. ADF birim kök testinin sınaması olarak da ifade edilen KPSS durağanlık testi sonuçlarına Tablo 6’da yer verilmiştir.

Tablo 6. KPSS Durağanlık Testi Sonuçları

| Seriler | LM | Asm. Kritik Değerler | | |
|---------------------|--------|----------------------|--------|--------|
| | | %1 | %5 | %10 |
| <i>CRB</i> | 0,1716 | 0,2160 | 0,1460 | 0,1190 |
| <i>ELC</i> | 0,0920 | 0,2160 | 0,1460 | 0,1190 |
| <i>OXG</i> | 0,0977 | 0,2160 | 0,1460 | 0,1190 |
| Δ <i>CRB</i> | 0,3312 | 0,7390 | 0,4630 | 0,3470 |
| Δ <i>ELC</i> | 0,0561 | 0,7390 | 0,4630 | 0,3470 |
| Δ <i>OXG</i> | 0,0781 | 0,7390 | 0,4630 | 0,3470 |

Δ simgesi serilerin birinci farkına karşılık gelmektedir. Bant genişliği olarak Andrews kullanılmıştır.

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 6'ya göre serilerin düzey değerleri itibarıyla *ELC* ve *OXG* serilerine ait LM istatistiklerinin %5 anlamlılık seviyesi için kritik değerden küçük oldukları görülmektedir. Bu durumda bu seriler özelinde H_0 hipotezinin kabul edilerek serilerin durağan olduğunu ifade etmek mümkündür. *CRB* serisinin ise %5 anlamlılık seviyesi için durağan olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Fark serileri incelendiğinde (Δ *CRB* = 0,3312, Δ *ELC* = 0,0561 ve Δ *OXG* = 0,0781) değerlerinin tüm anlamlılık seviyelerinde kritik değerlerin altında kaldıkları ve bu durumda serilerin durağan oldukları bulgusuna ulaşılmaktadır. ADF birim kök testine ilişkin sonuçlar *CRB*, *ELC* ve *OXG* serilerinin önceki dönemlerde ortaya çıkan şokların etkisi altında kaldıklarını göstermektedir. KPSS durağanlık testi sonuçlarına göre ise *CRB* serisi hariç olmak üzere *ELC* ve *OXG* serilerinin önceki dönem şokları etkisinde kaldıklarını ifade etmek mümkündür. ADF birim kök ve KPSS durağanlık testlerinin muhtelif neticeler vermesi sebebiyle yapısal kırılmaları dikkate alan birim kök sınamaları ile analizlere devam edilmektedir.

Tablo 7. ZA Sonuçları

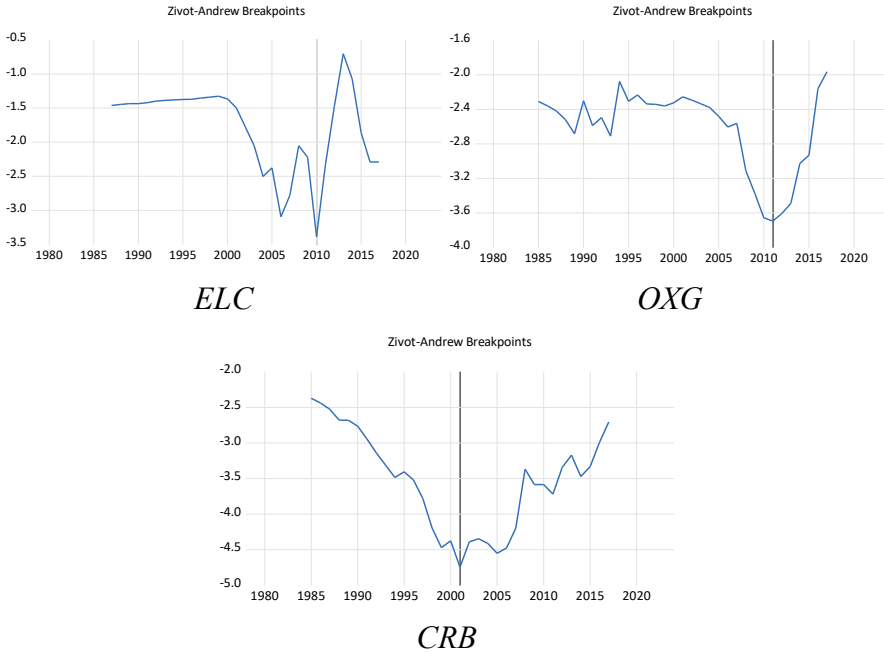
| Seriler | t-istatistiği | Kritik Değerler | | | Olasılık |
|--------------|---------------|-----------------|-------|-------|----------|
| | | %1 | %5 | %10 | |
| CRB | -4,7443 | -5,57 | -5,08 | -4,82 | 0,0531 |
| ELC | -3,3862 | -5,57 | -5,08 | -4,82 | 0,0089 |
| OXG | -3,6949 | -5,57 | -5,08 | -4,82 | 0,0096 |
| Δ CRB | -5,8075 | -5,34 | -4,93 | -4,58 | 0,2654 |
| Δ ELC | -10,0881 | -5,34 | -4,93 | -4,58 | 0,0025 |
| Δ OXG | -8,4847 | -5,34 | -4,93 | -4,58 | 0,0211 |

Δ simgesi serilerin birinci farkına karşılık gelmektedir. Tüm düzeylerde gecikme uzunluğu 2 olarak belirlenmiş ve farkı alınmış serilerde trendli yaklaşım benimsenmemiştir.

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

ZA yapısal kırılmalı birim kök testi sonuçlarının düzey değerlerinden elde edilen yapısal kırılma tarihleri Şekil 5'te yer almaktadır.

Şekil 5. ZA Yapısal Kırılma Dönemleri



Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 7 incelendiğinde *ELC* ve *OXG* serilerinin t-istatistik değerlerinin kritik değerlerden mutlak değerce küçük oldukları görüldüğünden bu serilerin yapısal kırılmalarla birlikte birim köke sahip oldukları ifade edilmektedir. *CRB* serisinde istatistik değerleri diğer değerlere göre daha sınırdan da olsa benzer bir durum gözlemlenmektedir. Serilerin birinci farkları alındığında elde edilen t-istatistiği değerlerinin kritik değer mertebelerinin üzerinde kaldıkları görülmektedir. Şekil 5'e göre yapısal kırılmalar *ELC* serisi için 2010, *OXG* serisi için 2011 ve *CRB* serisi için 2001 senelerinde vuku bulmaktadır.

2010 dönemi 2008 krizinin son etkilerinin görüldüğü bir döneme karşılık gelmektedir. Bu bağlamda işletmelerin özellikle 2005-2007 döneminde genel olarak kâr, ciro, üretim ve iç satış gibi oranlarını arttırdığı bilinmekte ve krizle birlikte de bu oranların sert düşüşler kaydettiği ifade edilmektedir (Çetin ve ark. 2011). 2011 yılında ise yassı ürün ithalatında büyük ölçüde devlet sübvansiyonlarıyla üretim yapan ülkelerden 6,4 milyon tonluk yassı ürün alımının gerçekleşmesi sektör açısından olumsuz bir gelişme olarak telakki edilmektedir. Bu durum aynı zamanda yassı ürünlerdeki kapasitenin sadece %30'unun kullanılmasıyla yani tam olarak kullanılamamasıyla ilişkilendirilmektedir (Arolat, 2011). Hülâsa *ELC* ve *OXG* serilerinde tespit edilen yapısal kırılma dönemlerinde Türkiye'de elektrikli üretim proseslerinde gözlenen kapasite artışlarının, 2008 küresel finans krizini müteakip hız kazanan toparlanma çabalarının, küresel çelik fiyatlarındaki yükselişin, dünya genelindeki çelik arz fazlalığının ve haksız rekabet uygulamalarının müşterek etkisiyle şekillendiği değerlendirilmektedir. Bununla beraber söz konusu dönemlerde Türkiye çelik sanayinin ham çelik üretiminin 2010 yılında 29,14 milyon ton seviyesinde iken 2011 yılında yüzde 17'lik bir artış göstererek 34,1 milyon tona balığ olduğu müşahede edilmektedir. Aynı vakitte hurda cephesinde yurt içinden temin edilen hurdanın toplam tüketim içerisindeki payının yüzde 24'ten yüzde 30'a yükseldiği bildirilmektedir. 2010 yılında elektrik ark ocaklarında gerçekleştirilen ham çelik üretimi yüzde 17,8 nispetinde artarak 17,74 milyon tondan 20,9 milyon tona çıkmıştır. Buna mukabil entegre tesislerdeki üretim artışı yüzde 8,9 ile sınırlı kalmış ve üretim 7,56 milyon tondan 8,24 milyon tona ulaşmıştır (Demir Çelik Store, 2012). Mezkûr kırılma dönemlerinin hem yükselişleri hem de düşüşleri ihtiva etmesi hasebiyle bu çalışmanın yazarı doğrusal olmayan testlerden de istifade etmeyi zarurî görmektedir. Bu uygulama öncesinde serilere uygulanan BDS testi sonuçları Tablo 8'de yer almaktadır.

Tablo 8. BDS Testi Sonuçları

| Boyut (m) | BDS | St. Hata | z-istatistiği | Olasılık |
|-----------|--------|----------|---------------|----------|
| 2 | 0,0825 | 0,0192 | 4,2756 | 0,0000 |
| 3 | 0,0897 | 0,0313 | 2,8636 | 0,0042 |
| 4 | 0,0626 | 0,0381 | 1,6389 | 0,1012 |
| 5 | 0,0841 | 0,0407 | 2,0645 | 0,0390 |
| 6 | 0,0960 | 0,0402 | 2,3860 | 0,0170 |

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

BDS testi sonuçları *Resid01* artıklarının bağımsız ve özdeş dağılımlı olmadığına delalet etmektedir. Bu durum söz konusu serilerde doğrusal olmayan dinamiklerin mevcudiyetini aşikâr kılmaktadır. Bu hâl yalnızca doğrusal modeller vasıtasıyla yapılan analizlerin kifayetsiz kalabileceğini göstermekte ve doğrusal olmayan yöntemlerin de uygulamaya alınması gerektiğini düşündürmektedir. Bu bağlamda KSS testinden elde edilen bulgular Tablo 9'da sunulmaktadır.

Tablo 9. KSS Testi Sonuçları

| Seriler | t-istatistik | Olasılık | Kritik Değerler | | |
|------------|--------------|----------|-----------------|-------|-------|
| | | | %1 | %5 | %10 |
| <i>CRB</i> | -1,715 | 0,094 | -3,48 | -2,93 | -2,66 |
| <i>ELC</i> | -3,762 | 0,001 | -3,48 | -2,93 | -2,66 |
| <i>OXG</i> | -2,447 | 0,019 | -3,48 | -2,93 | -2,66 |

Kaynak: NonStat programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 9'da yer alan KSS 2003 doğrusal olmayan birim kök testi sonuçları değerlendirildiğinde *CRB*, *ELC* ve *OXG* serilerine ilişkin t-istatistiklerinin KSS kritik değerleriyle mukayesesi suretiyle durağanlık sınaması gerçekleştirilmiştir. Buna göre *CRB* serisinin t-istatistiği mutlak değer itibarıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeylerine tekabül eden kritik değerlerin üzerinde kalmadığından doğrusal olmayan birim kök hipotezi reddedilememiştir. Bu hâl *CRB* serisinin KSS çerçevesinde doğrusal olmayan durağanlık göstermediğine işaret etmektedir. Buna mukabil *ELC* serisine ait t-istatistiği %1 anlamlılık düzeyindeki kritik değerın ötesine geçmekte olup sıfır hipotezinin kuvvetle reddini gerektirmektedir. Dolayısıyla *ELC* serisinin doğrusal olmayan birim kökten arı olduğu ve KSS anlamında durağan bir yapı arz ettiği sonucuna varılmaktadır. *OXG* serisi bakımından ise

t-istatistiği %5 kritik değerinin mutlak değerini aşmamakla birlikte %10 kritik değerine yakın bir mertebede bulunmaktadır. Bu itibarla birim kök hipotezi yalnızca daha esnek anlamlılık düzeylerinde reddedilebilmektedir. Bu durum *OXG* serisinin kısmi ve zayıf bir doğrusal olmayan durağanlık sergilediğini göstermektedir. Hülasa, KSS testi bulguları *ELC* serisinin belirgin biçimde durağan, *CRB* serisinin durağan olmayan, *OXG* serisinin ise sınırda bir durağanlık niteliği taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu farklılık ilgili değişkenlerin dinamik yapılarının birbirinden ayrıştığını ve sonraki aşamada asimetrik ya da değişimli modellerin tercih edilmesinin yerinde olacağını göstermektedir. Bu çerçevede geleneksel birim kök sınamalarından elde edilen neticelerin ihtilaflı mahiyet arz etmesi ve farklı seviyelerde durağanlık bulguları ihtiva etmesi, keza yapısal kırılmalı birim kök testlerinin de söz konusu kırılmaların tesirini zımnen kabul etmesi hasebiyle öncelikle ARDL yönteminin kullanılmasının münasip olacağı mütalaa edilmektedir. Ne var ki durağan olmayan birim kök testlerinden elde edilen bulgular da dikkate alındığında çalışmanın devamında asimetrik yapıyı gözeten NARDL yönteminin tatbik edilmesinin daha isabetli olacağı öngörülmektedir.

Tablo 10. NARDL Eşbütünleşme Testi Sonuçları

$$f(CRB | ELC^+, ELC^-, OXG^+, OXG^-)$$

| <i>NARDL</i> (1,0,1,0,0) | | | | n=1000 | | n=45 | | t-Bounds | | |
|--------------------------|---------|---------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|
| k | Gecikme | F-ist. | | <i>I</i> (0) | <i>I</i> (1) | <i>I</i> (0) | <i>I</i> (1) | <i>I</i> (0) | <i>I</i> (1) | |
| 4 | 2 | 7,3506 | %10 | 2,45 | 3,52 | 2,638 | 3,772 | -2,57 | -3,66 | |
| | | | t-ist. | %5 | 2,86 | 4,01 | 3,178 | 4,450 | -2,86 | -3,99 |
| | | -4,6497 | %2,5 | 3,25 | 4,49 | | | -3,13 | -4,26 | |
| | | | %1 | 3,74 | 5,06 | 4,394 | 5,914 | -3,43 | -4,6 | |

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 10 incelendiğinde F_{PSS} ve t_{BDM} sınır test sonuçlarına göre oluşturulan modelde %1 anlamlılık seviyesinde asimetrik ya da doğrusal olmayan eşbütünleşme ilişkisi olduğu görülmektedir. Test istatistik değerlerinin $I(1)$ için hesaplanan üst sınır değerinden mutlak değer olarak büyük olması dikkate alınmaktadır. Dolayısıyla değişkenlerin doğrusal olmayan biçimlerinin denge noktasına yakınsadığı ve uzun dönemde asimetrik olarak hareket ettiği değerlendirilmektedir. Tablo 11'de NARDL uzun dönem katsayı sonuçları yer almaktadır.

Tablo 11. NARDL Uzun Dönem Tahmin Sonuçları

| Değişkenler | Katsayılar | t-istatistik | Olasılık |
|-------------|------------|--------------|----------|
| $LELC^+$ | 4,1019 | 3,1780 | 0,0030 |
| $LELC^-$ | -0,4696 | -0,3685 | 0,7146 |
| $LOXG^+$ | 13,0625 | 4,0368 | 0,0003 |
| $LOXG^-$ | -9,7507 | -2,5026 | 0,0169 |

$$EC = CRB - (4,1019 * ELC_{POS} - 0,4696 * ELC_{NEG} + 13,0626 * OXG_{POS} - 9,7507 * OXG_{NEG})$$

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 11’de yer alan ifadelerde değişkenlerin önünde bulunan “L” simgesi uzun döneme (long-run) karşılık gelmektedir. Uzun dönem katsayı sonuçlarına göre $LELC^+$ değişkeninin uzun dönem katsayısının pozitif ve katsayı değerinin 4,1019 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bu sonuca göre ELC değişkeninde meydana gelecek bir birimlik artışın CRB değişkenini 4,1 birim arttıracığı ifade edilmektedir. Bu sonucun da %5 önem seviyesi özelinde anlamlı olduğu görülmektedir. $LOXG^+$ değişkeni incelendiğinde de uzun dönem katsayısının 13,0625 olduğu ve %5 önem seviyesine göre bu sonucun anlamlı bulunduğu görülmektedir. Bu bağlamda OXG değişkeninde meydana gelen 1 birimlik artışın CRB değişkenini yaklaşık 13 birim arttıracığı değerlendirilmektedir. Yine anlamlı sonuçlar üzerinden $LOXG^-$ değişkeninin uzun dönem katsayısının negatif olduğu ve katsayı değeri -9,7507 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bu sonuca göre OXG değişkeninin bir birimlik azalması karşısında CRB değişkenin yaklaşık 9,75 oranında artacağı yorumu yapılmaktadır. Bu değişkenin de olasılık değerinin %5 önem seviyesi özelinde anlamlı olduğu görülmektedir.

Elde edilen bulguların alanyazındaki karşılıkları tetkik edildiğinde oksijenli üretim prosesinin elektrikli üretim prosesine nazaran daha yoğun bir karbon sürecine sahip olduğu ifade edilmektedir. Nitekim bu çalışmada ulaşılan katsayılar da söz konusu tespiti teyit eder mahiyettedir (Cavaliere, 2019; Jiang ve ark., 2026; Yang ve ark., 2023). Bununla birlikte BF-BOF ve EAF süreçlerinin haiz oldukları farklı teknolojik yapılar ile enerji tüketim profilleri birbirinden farklı karbon azaltım stratejilerinin dikkate alınmasını zaruri kılmaktadır (Zang ve ark., 2023). Oksijenli üretim proseslerinde meydana gelen bir birimlik azalmanın karbon emisyonlarını artıracığı yönündeki bulgu ise ilk nazarda beklentinin hilafına bir netice olarak değerlendirilebilir. Ancak

bu durumun Türkiye'nin özgün üretim yapısına mahsus faktörler çerçevesinde izah edilmesinin hem anlatıma hem de bulguların teyidine açıklık kazandıracığı düşünülmektedir. Bilhassa 2010 sonrası dönemde Türkiye'de oksijenli üretimin daralmasına mukabil hurdaya dayalı elektrik ark ocaklarında kapasite ve üretim artışlarının vuku bulduğu görülmektedir. Dikkatle bu tesislerin mühim bir kısmında enerji girdisinin büyük ölçüde fosil yakıtlara dayanması ve elektrik üretim karmasının hâlen yüksek oranda kömür ihtiva etmesi elektrikli üretimdeki genişlemenin toplam karbon emisyonlarını azaltmak yerine artırma ihtimalini de beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda Hu ve arkadaşları (2025) EAF süreçlerinde malzeme, enerji, tüketim ve dönüşüm ilişkilerinin henüz tam manasıyla vuzuha kavuşmadığını vurgulamaktadır. Çalışmada uzun dönem asimetrik ilişkilerin test edilmesi amacıyla uygulana Wald Testi bulguları aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 12. Uzun Dönem Wald Testi Sonuçları

| Test İst. | Değer | df | Olasılık |
|--------------|----------|---------|----------|
| t-istatistik | 4,1373 | 38 | 0,0002 |
| F-istatistik | 17,11671 | (1, 38) | 0,0002 |
| Ki-kare | 17,11671 | 1 | 0,0000 |

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

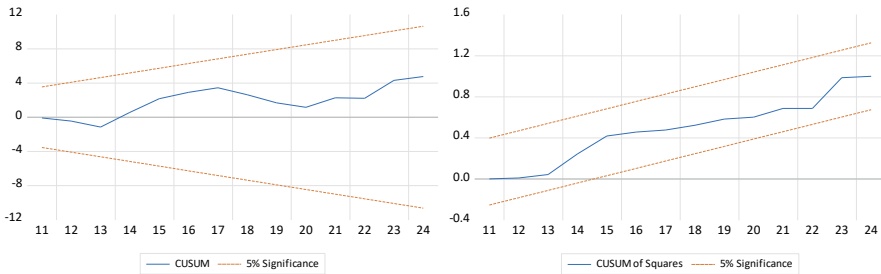
Tablo 12'ye göre Wald testi uzun dönemde H_0 hipotezi %1 anlamlılık seviyesinde reddedilmesi gerektiğini ifade etmektedir. Zira elde edilen olasılık değeri 0,01'den küçük bulunmaktadır. Bu bulgu bağımsız değişkende meydana gelen artışlar ile azalışlar arasında uzun dönemde asimetrik bir ilişkinin mevcudiyetine delalet etmektedir. Dolayısıyla söz konusu sonuç bağımsız değişkendeki artışların bağımlı değişken üzerindeki tesiri ile bağımsız değişkendeki azalışların bağımlı değişken üzerindeki tesirinin uzun dönemde birbirine müsavi olmadığı savını teyit etmektedir. Tahmin edilen model sonucunda bulguların sağlamlığının kontrolü tanısal testler aracılığıyla sağlanmaktadır.

Tablo 13. Tanısal Testlere Dair Sonuçlar

| Tanısal Testler | Test Değeri | Olasılık |
|---------------------|-------------|----------|
| χ^2 NORM | 0,1629 | 0,9217 |
| LM test χ^2 SC | 3,6138 | 0,1642 |
| χ^2 HET (BPG) | 6,6976 | 0,4610 |
| χ^2 HET (ARCH) | 0,8090 | 0,3684 |
| χ^2 FF | 0,0521 | 0,9587 |

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Normallik sınaması neticelerine göre Jarque-Bera test istatistiğinin 0,1629 olduğu görülmektedir. Buna mukabil olasılık değeri 0,9217 olarak hesaplanmıştır. Bu durum 0,05 eşik değeri esas alındığında kurulan model artıklarının normal dağılıma uygunluk arz ettiğini göstermektedir. Keza Breusch Godfrey otokorelasyon sınaması neticeleri 3,6138 ve 0,1642 olarak elde edilmiş olup modelde herhangi bir otokorelasyon sorununun bulunmadığına işaret etmektedir. Uygulamada farklı yayılımın mevcudiyetini sınamak maksadıyla Breusch Pagan Godfrey ile ARCH testleri tatbik edilmiş ve söz konusu testlere ilişkin istatistik ve olasılık değerleri sırasıyla 6,6976 - 0,4610 ile 0,8090 - 0,3684 olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular modelde farklı yayılım probleminin bulunmadığını göstermektedir. Modelin fonksiyonel biçiminin doğruluğunu sınamak üzere Ramsey RESET testi dikkate alınmış ve test katsayısı 0,0521 ve olasılık değeri 0,9587 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar model kurma hatasının mevcut olmadığına delalet etmektedir.

Şekil 6. CUSUM ve CUSUM² Grafikleri

Kaynak: Eviews programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 6'da yer alan grafikler tetkik edildiğinde CUSUM testinin hata terimlerinin %95 güven aralığı dâhilinde arzu edilen sınırlar içerisinde seyrettiğini göstermektedir. Keza kümülatif hata terimlerinin kareleri için aynı sınamayı icra eden CUSUM² grafiğinin de %95 güven aralığı içerisinde kaldığı görülmekte olup bu durum kurulan modelin istikrarlı olduğu kanaatini mümkün kalmaktadır. Bununla birlikte modele yapısal kırılma yılları esas alınarak dâhil edilen kukla değişkenlerin katsayılarının negatif bulunması başlangıçtaki beklentilerle uyum arz etmekle beraber söz konusu katsayıların istatistiksel bakımdan anlamsız olması sebebiyle bu etkinin güvenilir addedilemeyeceği değerlendirilmektedir. Diğer bir ifadeyle ilgili dönemde karbon emisyonlarında görece bir düşüşe işaret edebilecek bir yönelimin varlığı ihtimal dâhilinde olmakla birlikte bu etkinin ampirik açıdan sağlam bir dayanak teşkil etmediği anlaşılmaktadır. Hatemi J asimetrik nedensellik testlerinin uygulanmasından elde edilen bulgular Tablo 14'te sunulmaktadır.

Tablo 14. Hatemi J Asimetrik Nedensellik Testi Sonuçları

| Nedensellik | Test İstatistiği | Kritik Değerler | | |
|---------------------------|------------------|-----------------|-------|-------|
| | | %1 | %5 | %10 |
| $ELC^+ \rightarrow CRB^+$ | 0,155 | 9,223 | 4,551 | 3,079 |
| $ELC^+ \rightarrow CRB^-$ | 0,755 | 8,480 | 4,382 | 3,292 |
| $ELC^- \rightarrow CRB^-$ | 0,107 | 10,395 | 5,120 | 3,085 |
| $ELC^- \rightarrow CRB^+$ | 0,059 | 8,602 | 4,706 | 3,433 |
| $OXG^+ \rightarrow CRB^+$ | 0,708 | 11,318 | 5,390 | 3,434 |
| $OXG^+ \rightarrow CRB^-$ | 0,954 | 8,575 | 4,930 | 3,273 |
| $OXG^- \rightarrow CRB^-$ | 3,226 | 14,321 | 6,076 | 3,048 |
| $OXG^- \rightarrow CRB^+$ | 0,062 | 7,898 | 4,437 | 3,353 |
| $CRB^+ \rightarrow ELC^+$ | 0,157 | 10,269 | 5,088 | 3,420 |
| $CRB^+ \rightarrow ELC^-$ | 0,013 | 9,130 | 4,811 | 3,124 |
| $CRB^- \rightarrow ELC^-$ | 0,155 | 19,641 | 6,251 | 3,426 |
| $CRB^- \rightarrow ELC^+$ | 0,678 | 9,233 | 4,718 | 3,073 |
| $CRB^+ \rightarrow OXG^+$ | 20,601 | 8,290 | 4,681 | 3,020 |

| | | | | |
|---------------------------|-------|--------|-------|-------|
| $CRB^+ \rightarrow OXG^-$ | 0,009 | 9,863 | 5,334 | 3,508 |
| $CRB^- \rightarrow OXG^-$ | 3,259 | 10,989 | 5,057 | 3,192 |
| $CRB^- \rightarrow OXG^+$ | 5,506 | 7,606 | 4,067 | 2,766 |

Kaynak: Gauss programı aracılığıyla yazar tarafından oluşturulmuştur

Hatemi J asimetrik nedensellik testlerinde gecikme uzunlukları VAR modeli çerçevesinde AIC ölçütü gözetilerek tayin edilmiş ve bu değerler bir olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular elektrikli çelik üretim süreçlerindeki artış ve eksilişlerin karbon emisyonlarının müspet ve menfi bileşenlerini nedensellik bağı içerisinde izah etme kudretinin sınırlı kalabileceğini göstermektedir. Bu durum EAF rotasının çevresel tesirinin üretim hacminden ziyade istimal olunan elektrik kaynağının karbon yoğunluğuna bağlı olabilmesiyle ilişkilendirilmektedir. Oksijenli üretim prosesine ilişkin nedensellik ilişkileri incelendiğinde ise bulgular oksijenli çelik üretimindeki daralmaların karbon emisyonlarını azaltma yönünde sınırlı ve zayıf bir nedensel etkisi olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte karbon emisyonlarındaki müspet şokların oksijenli çelik üretimindeki genişlemeyle birlikte seyredabiliyor olması yüksek karbon yoğunluklu BOF teknolojisinin üretim dinamikleriyle yakın bir münasebet içerisinde değerlendirilebileceğini göstermektedir. Keza emisyonların azaldığı dönemlerde dahi oksijenli çelik üretiminde artışların müşahade edilebilmesi sektörde teknolojik iyileşme yahut süreç optimizasyonu ihtimalini akla getirmektedir. Umumî surette karbon emisyonlarındaki tahavvüllerin elektrikli çelik üretimini doğrudan tayin eden asli bir unsur olmaktan ziyade üretim şartlarına tâbi ikincil bir değişken hüviyeti taşıdığı ve buna mukabil oksijenli çelik üretiminin karbon dinamiklerine daha hassas bir yapı gösterdiği mütalaa olunmaktadır.

Hatemi J nedensellik testlerinden elde edilen bulguların Hu ve arkadaşlarının (2025) çalışmasıyla genel itibarıyla uyum arz ettiği ifade edilmektedir. Yazarlar elektrikli çelik üretim prosesinde malzeme ve enerji tüketimi ile karbon emisyonlarının metal yük yapısına bağlı olarak kayda değer ölçüde değişiklik gösterdiğini ve bu durumun ise karbon muhasebesini güçleştirerek düşük karbonlu teknolojilerin etkililiğini zayıflattığını ileri sürmektedirler. Alanyazında demir cevheri temelli çelik üretim süreci ile mukayese edildiğinde hurda bazlı çelik üretim sürecinin daha yüksek enerji tasarrufu ve emisyon azaltım kabiliyetine sahip olduğu vurgulanmaktadır (Wang ve ark., 2013; Xuan ve Yue, 2017; An ve ark., 2018; Tian ve ark., 2022). Bu noktada yalnızca çelik üretiminin süreç kaynaklı emisyonlarını dikkate almanın kâfi olmadığı hammadde ve enerji üretiminden doğan dolaylı çevresel etkilerin

de değerlendirmeye dâhil edilmesi gerektiği belirtilmektedir (Yang ve ark., 2023). Bu minvalde mevcut çalışmanın bulguları karbon emisyonlarındaki dalgalanmaların elektrikli çelik üretimi üzerinde doğrudan tayin edici bir rol üstlenmediğini bilakis üretim koşullarına tâbi ikincil bir değişken mahiyetinde olduğunu göstermektedir. Netice itibarıyla ampirik bulgular yüksek karbon yoğunluklu BOF rotasının emisyon dinamiklerine daha hassas olduğu ve buna mukabil EAF rotasının görece daha müstakil bir seyir izlediği sonucunu ortaya koymaktadır. Bu durum karbon azaltım politikalarının bilhassa oksijenli çelik teknolojilerini hedef alması gerektiğine işaret etmektedir.

6. Sonuç

Bu çalışmada Türkiye’de 1978-2024 döneminde ham çelik üretiminin karbon emisyonları üzerindeki etkisi üretim kompozisyonu ve doğrusal olmayan dinamikler çerçevesinde incelenmiştir. Oksijenli ve elektrikli proseslerin emisyonlar üzerindeki tesiri uzun dönemli eşbütünleşme ve asimetrik nedensellik analizleri vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Böylelikle üretim terkihi ile karbon yoğunluğu arasındaki münasebet ele alınmıştır. Bu bölümde elde edilen ampirik bulgular ana hatlarıyla mütalaa edilmekte ve çalışmanın temel çıkarımları ortaya konulmaktadır.

Türkiye’de ham çelik istihsalinin kompozisyonu ile karbon emisyonları arasında uzun dönemli ve doğrusal olmayan bir münasebetin mevcut olduğu anlaşılmaktadır. Serilerin yapısal kırılmalar ve doğrusal olmayan dinamikler ihtiva ettiği tespit edilmiş ve bu keyfiyet doğrusal modellerle yetinilmesinin kifayetsiz kalacağını göstermiştir. Uzun dönem tahmin neticeleri gerek oksijenli gerekse elektrikli üretim artışlarının karbon emisyonları üzerinde artırıcı tesire sahip olduğunu göstermektedir. Bu tesirin şiddeti ve yönünün pozitif ve negatif şoklara göre farklılaştığı da ortaya konulmaktadır. Wald sınaması üretim artış ve azalışlarının karbon emisyonları üzerindeki etkilerinin simetrik olmadığını teyit etmektedir. Nedensellik bulguları ise elektrikli üretimin karbon dinamikleri üzerindeki tesirinin sınırlı kaldığını buna mukabil oksijenli üretimin emisyonlarla daha kuvvetli ve hassas bir ilişki sergilediğini göstermektedir. Hülasa Türkiye’de karbon emisyonlarının seyri çelik sanayinin üretim hacminden ziyade üretim terkihi ve özellikle oksijenli proseslerin dinamikleriyle daha yakından irtibatlı görünmekte ve elektrikli üretimin çevresel tesiri ise büyük ölçüde enerji bileşiminin karbon yoğunluğuna bağlı bir mahiyet arz etmektedir.

Bu çalışmanın uluslararası alanyazındaki teknik ve çevresel değerlendirmelerle mütenasip bir görünüm arz ettiği değerlendirilmektedir. Nitekim Li ve arkadaşları (2018), çelik üretiminde en yaygın iki yöntem olan BF-BOF ve

EAF proseslerini mukayese etmişlerdir. Yazarlar BF-BOF yönteminin hem enerji hem de emisyon yoğunluğu bakımından EAF'a nazaran yüksek değerlere sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu bulgu çalışmada oksijenli üretim artışlarının karbon göstergeleri üzerinde daha kuvvetli ve asimetrik etkiler doğurduğuna dair neticelerle örtüşmektedir. Benzer biçimde hurda temelli üretimin çevresel avantajlarına işaret eden çalışmalar da üretim terkinin önemini vurgulamaktadır. Avinal ve Ergenekon (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışma elektrik ark ve indüksiyon fırını teknolojilerini karşılaştırmakta ve özellikle elektrik arzının karbon yoğunluğunun nihai emisyon performansı üzerinde tayin edici olduğunu göstermektedir. Bu çerçevede bu çalışmada elektrikli üretimin karbon üzerindeki tesirinin sınırlı ve şartlı bir mahiyet arz etmesi enerji bileşiminin belirleyici rolüne işaret eden söz konusu değerlendirmelerle paralellik arz etmektedir. Bununla birlikte enerji verimliliği ve üretim yönetimi boyutu da alanyazında mühim bir yer tutmaktadır. Gajdzik ve arkadaşları (2021), enerji verimliliğinin münferit tedbirler yerine üretim süreçlerinin bütünü ve tedarik zincirini ihtiva eden sistematik stratejilerle iyileştirilebileceğini belirtmektedirler. Bu çalışmada tespit edilen asimetrik dinamikler de üretim artış ve azalışlarının karbon üzerindeki etkilerinin farklılaştığını göstermektedir. Bu durum enerji ve üretim politikalarının yeknesaklık yerine süreç temelli ve kompozisyon hassasiyetine sahip biçimde tasarlanması gerektiğini düşündürmektedir. Türkiye bağlamında ise sanayiye dair yapısal kısıtlar da alanyazında vurgulanmaktadır. Özdamar ve arkadaşları (2026), Türkiye çelik sanayinin hurda temelli ve ihracata müteveccih yapısının Avrupa Birliği'nin karbon düzenlemeleri çerçevesinde ilave baskılar doğurduğunu ve sektörün Paris Anlaşması ve "fit for 55" hedefleriyle uyumlu olarak 2030'a kadar kayda değer emisyon azaltımı taahhüdü altında bulunduğunu ifade etmektedirler. Bununla birlikte sektörün yüksek emisyon yoğunluğu ve fosil yakıtı bilhassa kömüre bağımlılığı dönüşüm sürecini müşkül kılmaktadır. Bu çalışmada da oksijenli proseslerin karbon dinamikleri üzerindeki daha belirgin etkisi bu yapısal bağımlılıkların ampirik düzlemdeki tezahürü olarak değerlendirilmektedir.

Alanyazında rekabetçilik ile karbon yoğunluğu arasındaki irtibatın iktisadî ve jeopolitik bir çerçevede ele alınmakta olduğu da görülmektedir. Tekin-Koru ve Dinçer (2025), küresel ticaret düzeninde karbon şartlılığının ve çevresel dışsallıkların rekabet avantajının aslı unsurlarından biri hâline geldiğini ileri sürmektedirler. Bu yaklaşım bu çalışmanın bulgularını daha geniş bir bağlama yerleştirmektedir. Üretim kompozisyonunun dış ticaret ve piyasa erişimi bakımından da stratejik bir değişken olduğu düşünülmektedir. Modern çelik üretiminde maliyet etkinliği hedefinin merkezi konumuna dikkat çeken Kubat ve arkadaşları (2004), daha düşük maliyetle daha yüksek çıktı sağlama amacını

vurgulamaktadır. Bu çalışmanın yazarı ise bu konuda günümüz koşullarında bu hedefin karbon yoğunluğunun azaltılmasıyla birlikte düşünülmesinin mühim olduğunu değerlendirmektedir. Bu itibarla çalışma üretim hacmi ile birlikte üretim terkininin ve şoklara verilen asimetrik tepkilerin dikkate alınmasının hem çevresel sürdürülebilirlik hem de uzun dönemli rekabet gücü bakımından elzem olduğunu göstermektedir.

Netice itibarıyla bu çalışmadan elde edilen bulgular Türkiye’de ham çelik üretiminde karbon emisyonlarının üretim hacminden ziyade üretim kompozisyonu ve bilhassa oksijenli proseslerin dinamikleriyle daha yakından irtibatlı olduğunu göstermektedir. Bu cihetle çelik sanayine ait karbon azaltım politikalarının yeknesak üretim kısıtları yerine proses temelli ve farklılaştırılmış araçlarla tasarlanması icap etmektedir. Oksijenli tesislerde karbon fiyatlandırmasının güçlendirilmesi, karbon yakalama teknolojilerine yönelik teşviklerin artırılması ve hurda temelli üretimin yaygınlaştırılması bu çerçevede öncelikli alanlar olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli üretimde ise karbon performansının büyük ölçüde enerji bileşimine bağlı olması sebebiyle yenilenebilir enerji kullanımının teşviki ve şebeke karbon yoğunluğunun azaltılması belirleyici mahiyet arz etmektedir. Bu noktada bu çalışmanın yazarı entegre tesislerden feragat eden bir yaklaşımdan katî suretle uzaktır. Elde edilen bulgular oksijenli proseslerin karbon yoğunluğu bakımından daha problemlî bir görünüm arz ettiğini ortaya koymakla birlikte sektörün yapısal ihtiyaçları göz ardı edilerek entegre tesislerin bütünüyle tali konuma itilmesi de isabetli bir yaklaşım olmayacaktır. Zira Türkiye’de özellikle otomotiv, beyaz eşya, savunma ve makine imalatı gibi katma değeri yüksek sektörlerin talep ettiği yassı ürün arzı büyük ölçüde entegre tesisler tarafından karşılanmaktadır. Hurda temelli elektrikli üretim uzun mamul tarafında güçlü bir rekabet üstünlüğü sağlamakla birlikte yüksek kalite özellikli yapı gerektiren yassı çelik üretiminde entegre tesislerin teknolojik ve metalurjik kabiliyetleri stratejik bir mahiyet arz etmektedir. Bu bağlamda Türkiye özelinde karbon azaltım politikalarının üretim kompozisyonunu dönüştürmeye matuf olması kadar yurt içi sanayinin ara malî ihtiyacını ve arz güvenliğini de dikkate alan dengeli bir çerçeveye oturtulması elzemdir. Dolayısıyla yazar Türkiye’nin yassı ürün ihtiyacı ve stratejik sanayi politikası hedefleri nazar-ı dikkate alındığında entegre tesislerin ihmal edilmemesi bilakis karbon yoğunluklarını azaltacak teknolojik modernizasyon programlarıyla desteklenmesinin gerektiğini savunmaktadır. Bu yaklaşım hem emisyon azaltım hedefleriyle uyumlu bir dönüşümü mümkün kılacak hem de dışa bağımlılığı artırmadan sanayi değer zincirinin bütünlüğünü muhafaza edecektir.

Gelecek çalışmalara ilişkin olarak her şeyden evvel 1980-1990 döneminde Millî Prodüktivite Merkezi tarafından demir çelik sanayine dair yürütülen

araştırmaların güncellenmiş ve günümüz veri altyapısıyla zenginleştirilmiş yeni versiyonlarına ihtiyaç bulunduğu kanaati hâsıl olmaktadır. Söz konusu çalışmaların yeniden ele alınması karbon yoğunluğu, üretim yapısı ve dış ticaret performansı arasındaki müşterek münasebetin daha sağlıklı biçimde tahliline de imkân verecektir. Zira verimlilik mefhumu üretim verimliliği, karbon verimliliği, kaynak tahsisi etkinliği ve ticari rekabet gücü ile birlikte mütalaa edilmelidir. Bu çerçevede verimlilik eksenli bir yaklaşımın karbon azaltım hedefleri ile üretim kapasitesi ve dış ticaret gereklilikleri arasında denge kurabilecek bir üçlü yapı tesis edebileceği düşünülmektedir. Böyle bir perspektifin sosyo-teknik, eko-politik ve politik-ekoloji arasında daha mütecanis bir denge kurulmasına zemin hazırlayabilme potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte demir çelik sanayinin ileri ve geri bağlantı katsayılarının karbon emisyonları üzerindeki etkisinin incelenmesi de gelecek araştırmalar için mühim bir ufuk sunmaktadır. Bu doğrultuda yapılacak çalışmalar sektörel karbon politikalarının bütüncül ve sistem temelli biçimde tasarlanmasına katkı sağlayacaktır.

Teşekkür, Beyan ve Diğer Açıklamalar

Bu çalışmada uygulanan yöntemlerin analiz sonuçlarının elde edilmesi sürecinde ihtiyaç duyulan teknik hususlarda yönlendirici açıklamaları ve literatüre kazandırdığı çalışmalarıyla araştırmacılar üzerinde ilham uyandırdığına inandığım ve ayrıca NonStat arayüzünün kullanılmasına müsaade eden Prof. Dr. Tolga Omay'a teşekkür ederim. Kaleme aldıkları eserlerinde ARDL ve NARDL yöntemlerini okuyucu dostu bir yaklaşımla ve adım adım açıklamış olmalarının yanı sıra yöneltilen sorulara gecikmeksizin ve akademik nezaket çerçevesinde yanıt vermesi nedeniyle Doç. Dr. Serkan Göksu'ya şükranlarımı sunarım. Çalışmanın ilk gönderim sürecinde sergilediği yapıcı ve yol gösterici tavrı ile sonraki çalışmalar için teşvik edici yaklaşımı dolayısıyla Doç. Dr. Fatih Çemrek'e de teşekkürlerimi iletirim.

Bu çalışma kapsamında insan katılımcı veya deneysel uygulama yer almamaktadır. Çalışmada kullanılan veriler kamuya açık kaynaklardan temin edilmiş olup ilgili veri tabanları ve istatistik programları doğrultusunda analiz edilmiştir. Yararlanılan tüm veri setleri, yazılımlar ve akademik kaynaklar kaynakça bölümünde usulüne uygun biçimde atıf gösterilerek belirtilmiştir. Yazarın herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Bu çalışmada klasik anlatım üslubu bilinçli ve kasten tercih edilmiştir. Metin içerisinde kullanılan kavram ve ifadeler Türk Dil Kurumu Sözlüğü ile Türk Dil Kurumu Bilim ve Sanat Terimleri Sözlüğü esas alınarak ve mevcut akademik yayınlarla karşılaştırılarak titizlikle seçilmiştir.

Bu üslup tercihi yazarın özellikle 1980-1990 döneminde Millî Prodüktivite Merkezi tarafından yayımlanan çalışmalar ile Bilimsel Madencilik Dergisi'nin erken dönem sayılarında yer alan metinlerin içerik derinliğine, kavramsal berraklığına ve ifade disiplinine duyduğu takdir ve özlemle ilişkilidir. Anılan dönem yayınlarında gözlemlenen metodolojik ciddiyet ve terminolojik özen bu eserde benimsenen dil ve ifade yapısının da ilham kaynağını teşkil etmiştir. Bu çalışmanın yazarı sadece kelimeleri klasik bir üslupla kullanmakla ve biçimsel bir yaklaşım benimsemekle söz konusu düzeyin ve ilham kaynağının tesis edilemeyeceğinin elbette farkındadır. Nitekim ilgili dönemin çalışmalarında görülen metodolojik titizlik ve kavram kullanımındaki hassasiyet hem saha deneyimini hem de güçlü bir kuramsal ve yazınsal birikimi gerektirmektedir. Yazar açısından bu tercih nostaljik bir yönelimden ziyade düşünsel disiplin, kavramsal netlik ve metinsel tutarlılığı güçlendirme ve içsel motivasyonu artırma amacı taşımaktadır. Bu doğrultuda tercih edilen anlatım biçiminin yazarın akademik motivasyonunu olumlu yönde etkilediği ifade edilmektedir. Bu vesileyle Veli Aytakin, Ömer H. Barutoğlu, M. Hayri Erten, Atilla Tezeren ve Serdar Tan başta olmak üzere ilgili dönemde emek vermiş araştırmacıların çalışmalarına duyulan saygı ifade edilmektedir. Söz konusu eserleri tekrar tekrar okumanın ve incelemenin sağladığı entelektüel tatminin ötesinde günümüz literatürünün de nicel derinlik ve söylem disiplini bakımından bu çalışmaların konuya yaklaşım biçiminden istifade edebileceği kanaati taşınmaktadır.

Bu değerlendirmeler bütünüyle yazara ait şahsi görüş mahiyetindedir.

Kaynakça

- Abbas, Q., Hongxing, Y., Shahbaz, M., Ramzan, M. ve Fatima, S. (2024). Metallic minerals production and environmental sustainability in China: Insights using ARDL bounds testing and wavelet coherence approaches. *Resources Policy*, 92, 105037. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105037>
- Ahmed, M., Huan, W., Ali, N., Shafi, A., Ehsan, M., Abdelrahman, K., Khan, A. A., Abbasi, S. S. ve Fnais, M. S. (2023). The effect of energy consumption, income, and population growth on CO2 emissions: evidence from NARDL and machine learning models. *Sustainability*, 15(15), 11956. <https://doi.org/10.3390/su151511956>
- Akgül, I. (1994). Zaman serisi analizi ve öngörü modelleri. *Öneri Dergisi*, 1(1), 52-69. <https://doi.org/10.14783/maruoneri.698511>
- Akşehirli, N. (2024). Enerji ithalatçısı bir ülke için enerji fiyatlarının toplam ve sektörel büyümeye asimetrik etkileri: Türkiye örneği. *Nişantaşı Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(Özel Sayı), 13-30. <https://doi.org/10.52122/nisantasisbd.1448152>
- Alaskar, I. ve AlAli, M. S. (2024). Macroeconomic forces shaping Kuwait's stock market: A time series analysis of an oil-dependent economy. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 22, 9145-9156. <https://doi.org/10.57239/PJLSS-2024-22.2.00692>
- Allaro, H. B., Kassa, B. ve Hundie, B. (2011). A time series analysis of structural break time in the macroeconomic variables in Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 6(2), 392-400. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.016>
- Alsabhan, T. H. ve Alabdulrazag, B. (2025). How does energy consumption effect economic growth in Saudi Arabia? A cointegration approach. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 15(1), 309-316. <https://doi.org/10.32479/ijecp.17969>
- An R., Yu, B., Li, R. ve Wei, Y-M. (2018). Potential of energy savings and CO2 emission reduction in China's iron and steel industry. *Applied Energy*, 226, 862-880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.044>
- Aptech (t.y.). *GAUSS (Sürüm 14.0)* [Bilgisayar Yazılımı]. Aptech Systems Inc.
- Arolat, O. (2011). *Demir çelik sektörünün 2011 resmi*. Şu adresten erişildi: <https://www.dunya.com/kose-yazisi/demir-celik-sektorunun-2011-resmi/12686> (Erişim Tarihi: 11.02.2026).
- Arslan, İ., Eren, M. V. ve Kaynak, S. (2016). Sağlık ile kalkınma arasındaki ilişkinin asimetrik nedensellik analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 31(2), 287-310. <https://doi.org/10.24988/deuifb.2016312535>
- Atasert, G. (2022). Türkiye'de dış borç ve ekonomik büyüme bağlantısı: Bir zaman serisi analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü. İzmir.

- Avinal, A. ve Ergenekon, P. (2022). Life cycle impacts of induction furnace technology for crude steel production: case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(4), 9974-9987. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2143946>
- Avinal, A., Tosun, C., Dağlı, S., Budak Duhbacı, T. ve Şık, E. (2019). *Ana demir ve çelik ürünleri ile ferro alaşımların imalatı kaynak verimliliği rehberi*. Ankara: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Yayınları.
- Balaam, D. N. ve Dillman, B. (2021). *Uluslararası ekonomi politişe giriş* (Çev. N. Uslu). Ankara: Adres Yayınları.
- Barut, A., Görgün, M. R. ve Erdoğan, A. (2020). Baltık Kuru Yük Endeksi ve Dow Jones Demir Çelik endeksi arasındaki ilişki. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 9(3), 3019-3033. <https://doi.org/10.15869/itobiad.700223>
- Başkol, M. O. ve Bektaş, S. (2021). Türkiye demir çelik sektörünün ürün haritalaması: Widodo yöntemiyle bir analiz. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 19(Özel Sayı), 57-87. <https://doi.org/10.35408/comuybd.973529>
- Bıyık, Y. ve Özkale, L. (2017). Demir çelik endüstrisi üretim yöntemleri ile ihracat, katma değer ve karbon emisyonu azaltma politikaları arasındaki ilişki. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 13(13), 718-735. <https://izlik.org/JA92WA32SB>
- Bianco, L., Baracchini, G., Cirilli, F., Di Sante, L., Moriconi, A., Moriconi, E., Agorio, M. M., Pfeifer, H., Ecterhof, T., Demus, T., Jung, H. P., Beiler, C. ve Krassnig, H. J. (2013). Sustainable Electric Arc Furnace Steel Production: GREENEAF. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 158, 17-23. <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0101-0>
- Broock, W. A., Scheinkman, J. A., Dechert, W. D. ve LeBaron, B. (1996). A test for independence based on the correlation dimension. *Econometric Reviews*, 15(3), 197-235. <https://doi.org/10.1080/07474939608800353>
- Bulut, Ö. U., Aykırı, M. ve Balcı, Ö. (2022). Elektrik tüketiminin ekonomik büyüme üzerindeki asimetrik etkisi: NARDL ve Toda-Yamamoto yöntemlerinden kanıtlar. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, 8(2), 99-119. <https://doi.org/10.20979/ueyd.1060167>
- Camgöz, M. (2022). Global belirsizlik faktörlerinin BIST hisse senedi fiyatlarına asimetrik etkilerinin NARDL modeliyle analizi. *Maliye ve Finans Yazıları*, 118, 71-100. <https://doi.org/10.33203/mfy.1103403>
- Cavaliere, P. (2019). Electric arc furnace: Most efficient technologies for greenhouse emissions abatement. İç. P. Cavaliere (Ed.), *Clean iron-making and steelmaking processes*, Springer, ss. 303-375. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4_6
- Chen, Q., Gu, Y., Tang, Z. Wei, W. ve Sun, Y. (2018). Assessment of low-carbon iron and steel production with CO2 recycling and utilization techno-

- logies: A case study in China. *Applied Energy*, 220, 192-207. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.043>
- Chen, Y., Fang, Y., Feng, W., Zhang, Y. ve Zhao, G. X. (2022). How to minimise the carbon emission of steel building products from a cradle-to-site perspective: A systematic review of recent global research. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133156>
- Cui, J., Tong, Y., Ma, W., Zhang, J. ve Zhou, B. (2026). Research on water-energy-carbon consumption and emission situation and nexus in iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 538, 147241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147241>
- Çağlayan, E. ve Saçaklı, İ. (2006). Satın alma gücü paritesinin geçerliliğinin sıfır frekansta spektrum tahmincisine dayanan birim kök testleri ile incelenmesi. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 20(1), 121-137. <https://izlik.org/JA56XD35KF>
- Çelik, A. (2023). Döviz kurundaki değişimlerin Türkiye'nin sektörel ve faktör donatımı temelindeki ihracatına etkileri: Yeni dış ticaret politikasının değerlendirilmesi. *Öneri Dergisi*, 18(59), 40-67. <https://doi.org/10.14783/maruoneri.1166424>
- Çelik, M. ve Altıntaş, H. (2025). Ekonomik büyüme ve beşeri sermaye ilişkisi: ARDL, NARDL ve nedensellik analizi. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 47(3), 348-374. <https://doi.org/10.14780/muiibd.1685421>
- Çemrek, F. ve Şeker, T. (2020). Türkiye'de kadın işsizlik oranlarının yapısal kırılmalı birim kök testleri ile incelenmesi. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Özel Sayı(2020)*, 117-132. <https://izlik.org/JA68KK89EY>
- Çetin, A. C., Akyüz, Y. ve Genç, E. (2011). Küresel kriz sürecinde imalat sanayi işletmelerinin finansal sorunlarının değerlendirilmesi (Uşak ili örneği). *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 13, 101-118. <https://izlik.org/JA79KW56YP>
- Demir, C. ve Özcan, S. E. (2023). Türkiye'de sanayi üretimi, kapasite kullanım oranı ve üretici fiyatları arasındaki asimetric ilişki doğrusal olmayan ARDL modeli yaklaşımı. *İktisat Politikası Araştırmaları Dergisi*, 10(2), 525-543. <https://doi.org/10.26650/JEPR1247326>
- Demir Çelik Store (2012). 2010 yılında Türkiye 29,1 milyon ton ham çelik üretti. Şu adresten erişildi: <https://demircelikstore.com/haber/2010-yilinda-turkiye-29-1-milyon-ton-ham-celik-uretti-3367> (Erişim Tarihi: 11.02.2026).
- Demircioğlu, E. ve Ever, D. (2021). Karbon maliyetlerinin belirlenmesine ilişkin demir çelik işletmesinde uygulama. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 12(1), 649-662. <https://doi.org/10.20491/isarder.2020.868>

- Dereli, D. D. (2014). E-Gümrük uygulamasının Türkiye ile Avrupa Birliği arasındaki ticarete etkisi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 12(24), 250-261. <https://doi.org/10.11611/JMER475>
- Dickey, D. A. ve Fuller, W. A. (1981). Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 49(4), 1057-1072. <https://doi.org/10.2307/1912517>
- Dikmen, N. (2018). *Ekonometriye giriş temel kavramlar ve uygulamalar*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Dineri, E. ve Işık, N. (2021). İthalat bağımlılığı ve Türkiye ekonomisinde imalat sanayi: Hatemi-J asimetrik nedensellik testi. *Gazi İktisat ve İşletme Dergisi*, 7(1), 68-82. <https://doi.org/10.30855/gjeb.2021.7.1.005>
- Dock, J. ve Kienberger, T. (2022). echno-economic case study on Oxyfuel technology implementation in EAF steel mills - Concepts for waste heat recovery and carbon dioxide utilization. *Cleaner Engineering and Technology*, 9, 100525. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100525>
- Doğan, O. ve Çakmakoglu, A. (2025). Enflasyonun doğrudan yabancı yatırımlar üzerindeki asimetrik etkisi: Türkiye ekonomisi için bir Nardl analizi. *JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy*, 10(1), 64-79. <https://izlik.org/JA93LY38CP>
- Duran, A. E. (2023). *Çelik üreticilerini ithalat korkusu sardı*. Şu adresten erişildi: <https://www.dw.com/tr/%C3%A7elik-%C3%BCreticilerini-ithalat-korkusu-sard%C4%B1/a-64541435> (Erişim tarihi: 16.02.2026).
- Duran, M. S. (2023). Savunma harcaması, işsizlik ve ekonomik büyüme ilişkisinin hatemi-J asimetrik panel nedensellik testi ile incelenmesi. *Finans Politik & Ekonomik Yorumlar*, 60(663), 79-104.
- Duran, Ö. (2026). Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) kapsamında demir çelik sektöründe sürdürülebilirlik stratejileri ve emisyon azaltım yöntemlerinin değerlendirilmesi. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 2026, 1-9. <https://izlik.org/JA28DH78TY>
- Durga, S., Speizer, S. ve Edmonds, J. (2024). The role of the iron and steel sector in achieving net zero U.S. CO2 emissions by 2050. *Energy and Climate Change*, 5, 100152. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100152>
- Echterhof, T. (2021). Review on the use of alternative carbon sources in EAF steelmaking. *Metals*, 11(2), 222. <https://doi.org/10.3390/met11020222>
- Emeç, A. S. ve Yarbaşı, İ. Y. (2018). Ticari dışa açıklık ile enerji tüketimi arasındaki simetrik ve asimetrik nedensellik ilişkisi: Türkiye örneği. *Erzurum Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(6), 193-206. <https://izlik.org/JA57WP87ZF>
- Engle, R. F. ve Granger, C. W. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 55(2), 251-276. <https://doi.org/10.2307/1913236>

- Erdoğan, A. (1976). *Türkiye'nin hızlı kalkınması*. Ankara: ÜMİD-BİR Ülkücü Maliyeciler ve İktisatçılar Derneği Yayınları.
- Ertan, Y. (2024). *Ege çelik sektöründen çağrı: Rekabetin önündeki etkenler kaldırılmalı*. Şu adresten erişildi: <https://www.egedesonsoz.com/ege-celik-sektorunden-cagri-rekabetin-onundeki-etkenler-kaldirilsin> (Erişim Tarihi: 16.02.2026).
- Eryüzü, H. (2019). Dünya deniz ticareti ve Türkiye dış ticareti ilişkileri: Ekonometrik bir analiz. *The Journal of Social Science*, 3(5), 152-162. <https://doi.org/10.30520/tjsosci.524826>
- Eryüzü, H. ve Boran, C. (2026). Türkiye'de hurda çelik geri dönüşümü ve çevresel etkileri. *UFÜ Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi*, 2(3), 103-125. <https://doi.org/10.29329/ufusobed.2026.1410.4>
- Eser, E. (2022). *Demir çelik fiyatları tüm sektörleri zorluyor*. Şu adresten erişildi: <https://www.dw.com/tr/demir-%C3%A7elik-fiyatlar%C4%B1-r%C3%BCm-sekt%C3%B6rleri-zorluyor/a-61264422> (Erişim Tarihi: 16.02.2026).
- Eviews (2022). *Eviews (Sürüm 12.0)* [Bilgisayar Yazılımı]. Eviews Corp. & IHS.
- Freyer, H. (2018). *Sanayi çağı* (Çev. B. Akarsu ve H. Batuhan). Ankara: Doğu Batı Yayınları.
- Gerçeker, M. (2021). Sanayi sektöründe ihracatın istihdama etkisi: Türkiye için asimetrik nedensellik testi. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(3), 127-136. <https://doi.org/10.52791/aksarayiibd.941020>
- Gajdzik, B., Sroka, W. ve Vveinhardt, J. (2021). Energy intensity of steel manufactured utilising EAF technology as a function of investments made: The case of the steel industry in Poland. *Energies*, 14(16), 5152. <https://doi.org/10.3390/en14165152>
- Global Carbon Budget (2025). *The latest GCB data*. Şu adresten erişildi: <https://globalcarbonbudget.org/datahub/the-latest-gcb-data-2025/> (Erişim Tarihi: 10.06.2026).
- Göksu, S. ve Balkı, A. (2023). *ARDL ve NARDL eşbütünleşme analizleri: Adım adım Eviews uygulaması*. Ankara: Serüven Yayınları.
- Granger, C. W. (1969). Investigating causal relations by econometric models and cross spectral methods. *Econometrica*, 37(3), 424-438. <https://doi.org/10.2307/1912791>
- Granger, C. W. ve Newbold, P. (1974). Spurious regressions in econometrics. *Journal of Econometrics*, 2(2), 111-120. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(74\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0304-4076(74)90034-7)
- Granger, C. W. ve Yoon, G. (2002). *Hidden cointegration department of economics working paper*. University of California, No:2002-02.

- Griffin, P. W. ve Hammond, G. P. (2019). Industrial energy use and carbon emissions reduction in the iron and steel sector: A UK perspective. *Applied Energy*, 249, 109-125. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.148>
- Gujarati, D. N. (2006). *Temel ekonometri* (Çev. Ü. Şenesen ve G. G. Şenesen). İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Guo, Y., Lu, J., Zhang, Q., Cao, Y., Chen, L. ve Mauzerall, D. L. (2024). Co-production of steel and chemicals to mitigate hard-to-abate carbon emissions. *Nature Chemical Engineering*, 1, 365-375. <https://doi.org/10.1038/s44286-024-00061-1>
- Han, B., Wei, G., Zhu, R., Wu, W., Jiang, J. J. Feng, C., Dong, J. F., Hu, S. Y. ve Liu, R. Z. (2019). Utilization of carbon dioxide injection in BOF-RH steelmaking process. *Journal of CO2 Utilization*, 34, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.038>
- Hatemi, J. A. (2012). Asymmetric causality tests with an application. *Empirical Economics*, 43, 447-456. <https://doi.org/10.1007/s00181-011-0484-x>
- Hepsağ, A. ve Yaşar Akçalı, B. (2015). Zayıf formda piyasa etkinliğinin asimetric doğrusal olmayan birim kök testi ile analizi: G-7 ve E-7 ülkeleri örneği. *BDDK Bankacılık ve Finansal Piyasalar Dergisi*, 9(2), 73-90. <https://izlik.org/JA23MS77EJ>
- Holappa, L. (2020). A general vision for reduction of energy consumption and CO2 emissions from the steel industry. *Metals*, 10(9), 1117. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
- Hu, H., Yang, L., Wei, G., Xue, B., Yang, S., Zou, Y., Wang, S., Chen, F., Guo, Y. ve Jiang, T. (2025). Carbon-material-energy flows nexus analysis of electric arc furnace steelmaking processes in China. *Journal of Cleaner Production*, 486, 144377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144377>
- ITC Trade Map (2026). *Yearly time series*. Şu adresten erişildi: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_TS.aspx (Erişim Tarihi: 15.02.2026).
- Jiang, F., Liu, X., Huang, Y., Liu, Y. ve Zhu, T. (2026). A life-cycle view of carbon emissions in mixed-feedstock electric arc furnace steelmaking. *Fuel*, 408, 137690. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.137690>
- Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 12(2-3), 231-254. [https://doi.org/10.1016/0165-1889\(88\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0165-1889(88)90041-3)
- Johansen, S. ve Juselius, K. (1990). Maximum likelihood estimation and inference on cointegration-with appucations to the demand for money. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 52(2), 169-210. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.1990.mp52002003.x>

- Kapetanios, G., Shin, Y. ve Snell, A. (2003). Testing for a unit root in the nonlinear STAR framework. *Journal of Econometrics*, 112(2), 359-379. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(02\)00202-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(02)00202-6)
- Karaçayır, E. ve Bezgin, M. S. (2021). Döviz kuru ve makroekonomik değişkenler arasındaki ilişkinin NARDL model yaklaşımıyla incelenmesi. *Ufuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10(19), 107-123. <https://izlik.org/JA74JT72CP>
- Karaş, E. (2024). Türkiye’de mali sürdürülebilirliğin analizi: NARDL yöntemi. *Maliye Çalışmaları Dergisi*, 72, 64-78. <https://doi.org/10.26650/mcd2024-1559287>
- Kaya, E. (2021). Seçilmiş makroekonomik değişkenler ile havayolu hisse senetleri arasındaki ilişki: Hatemi-J asimetrik nedensellik testi. *Malatya Turgut Özal Üniversitesi İşletme ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 2(1), 61-78. <https://izlik.org/JA75BR54JA>
- Kıran, B. (2016). *Zaman serileri analizi ders notları*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi Yayınları.
- Kirschen, M., Risonarta, V. ve Pfeifer, H. (2009). Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry. *Energy*, 34(9), 1065-1072. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.015>
- Koç, Ö. (2023). Türkiye’nin yüksek teknoloji ürün ihracatının doğrusal ve doğrusal olmayan zaman serileri yöntemleriyle karşılaştırmalı analizi. *Doktora Tezi*. Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Kotler, P., Jatusripitak, S. ve Maesincee, S. (2000). *Ulusların pazarlanması* (Çev. A. Buğdaycı). İstanbul: Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.
- Kubat, C., Taşkın, H., Artır, R. ve Yılmaz, A. (2004). Bofy-fuzzy logic control for the basic oxygen furnace (BOF). *Robotics and Autonomous Systems*, 49(3-4), 193-205. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2004.09.007>
- Kwiatkowski, D., Phillips, P. C., Schmidt, P. ve 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](https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90104-Y)
- Li, X., Sun, W., Zhao, L. ve Cai, J. (2018). Material metabolism and environmental emissions of BF-BOF and EAF steel production routes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 39(1), 50-58. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1324440>
- Lin, B. ve Wang, X. (2015). Carbon emissions from energy intensive industry in China: Evidence from the iron & steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 746-754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.056>

- Liu, M., Ma, G., Zhang, X. ve Zheng, D. (2022). Numerical simulation on the melting kinetics of steel scrap in iron-carbon bath. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34, 101995. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101995>
- Mahanta, B. K., Gupta, P., Mohanty, I., Roy, T. K. ve Chakraborti, N. (2023). Evolutionary data driven modeling and tri-objective optimization for noisy BOF steel making data. *Digital Chemical Engineering*, 7, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100094>
- Mandova, H., Leduc, S., Wang, C., Wetterlund, E., Patrizio, P., Gale, W. ve Kraxner, F. (2018). Possibilities for CO2 emission reduction using biomass in European integrated steel plants. *Biomass and Bioenergy*, 115, 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.021>
- Mercielle, J. (2008). The radical geopolitics of US foreign policy: Geopolitical and geoeconomics logics of power. *Political Geography*, 27(5), 570-586. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2008.06.002>
- Microsoft (2016). *Excel (Sürüm 16.0)* [Bilgisayar Yazılımı]. Microsoft Corp.
- NonStat (t.y.). *NonStat*. Şu adresten erişildi: <http://easyfinancetechnology.com> (Erişim Tarihi: 12.02.2026).
- O'Hara, S. ve Heffernan, M. (2006). From geo-strategy to geo-economics: The Heartland and British imperialism before and after MacKinder. *Geopolitics*, 11(1), 54-73. <https://doi.org/10.1080/14650040500524079>
- Oral, K. (1970). Türkiye demir-çelik sanayii ve sorunları. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 9(5), 70-85. <https://izlik.org/JA92HH87GS>
- Özdamar, A. B., Kaya, M., Bektaş, A., Bhattacharyya, S., Şahindoğan, M., Birat, J.-P. ve Dutta, A. (2026). A study of the environmental challenges en marche towards net-zero: Case study of Turkish steel industry. *Processes*, 14(1), 178. <https://doi.org/10.3390/pr14010178>.
- Özdemir, L. (2020). Covid-19 pandemisinin BİST sektör endeksleri üzerine asimetric etkisi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 5(3), 546-556. <https://doi.org/10.29106/fesa.797658>
- Özoğuz, K. (1986). Zaman serilerinde trend fonksiyon tipinin belirlenmesi ve yorumu. *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Mecmuası*, 42(1-4), 73-91. <https://izlik.org/JA99BT88EN>
- Parthasarathy, T. N., Nagarajan, D. ve Pamucar, D. (2026). An advanced fuzzy based multi-layered decision-making system for sustainable carbon emission reduction strategy selection in steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 539, 147458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147458>
- Perron, P. (1989). The great crash the oil price shock and the unit root hypothesis. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 57(6), 1361-1401. <https://doi.org/10.2307/1913712>
- Pesaran, M. H. ve Shin, Y. (1999). An autoregressive distributed lag modelling approach to cointegration analysis. İç. S. Strom (ed.), *Paper presented at*

econometrics and economics theory in the 20th century: The ragnar frisch centennial symposium. Cambridge University Press, Cambridge.

- Pesaran, M. H., Shin, Y. ve Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289-326. <https://doi.org/10.1002/jae.616>
- Qu, B., Huang, Y., She, J., Liao, P. ve Lai, X. (2024). Forecasting and early warning of bridge monitoring information based on a multivariate time series ARDL model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 133, 103533. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103533>
- Quan, Z., Xu, X., Wang, W., Jiang, J. ve Gao, S. (2024). Do industrial solid waste recycling and technological innovation promote low-carbon development in China? New insights from NARDL approach. *Science of The Total Environment*, 916, 170446. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170446>
- Sabır, H. (2002). *Dünya siyasetinde küresel rekabet sistemi ve politikaları*. İstanbul: Derin Yayınları.
- Schwert, G. W. (2002). Tests for unit roots: A Monte Carlo investigation. *Journal of Business & Economic Statistics*, 20(1), 5-17. <https://doi.org/10.1198/073500102753410354>
- Serin, Z. V. ve Fidan, O. (2020). Turkey iron and steel industry competitiveness and industry 4.0. *Journal of Transportation and Logistics*, 4(2), 91-106. <https://doi.org/10.26650/JTL.2019.04.02.04>
- Shahbaz, M. ve Mubarak, M. S. (2023). Rolling-window bounds testing approach to analyze the relationship between oil prices and metal prices. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 87, 388-395. <https://doi.org/10.1016/j.qref.2022.01.015>
- Shin, Y., Yu, B. ve Greenwood-Nimmo, M. (2014). Modelling asymmetric cointegration and dynamic multipliers in a nonlinear ARDL framework. İç. R. C. Sickles ve W. C. Horrace (ed.), *Festschrift in honor of Peter Schmidt: Econometric methods and applications*, pp. 281-314. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8008-3>
- Smith, A. (2002). Imagining geographies of the new Europe: Geo-economic power and the new European architecture of integration. *Political Geography*, 21(5), 647-670. [https://doi.org/10.1016/S0962-6298\(02\)00011](https://doi.org/10.1016/S0962-6298(02)00011)
- Song, X., Du, S., Deng, C., Shen, P., Xie, M., Zhao, C., Chen, C. ve Liu, X. (2025). Carbon emissions in China's steel industry from a life cycle perspective: Carbon footprint insights. *Journal of Environmental Sciences*, 148, 650-664. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.04.027>
- Stearns, P. N. (2021). *Dünya tarihinde sanayi devrimi* (Çev. N. Soysal). Ankara: Say Yayınları.
- SteelOrbis (2022). *Türkiye çelik sektörü 2024 yılında toparlanma gösteriyor*. Şu adresten erişildi: <https://tr.steelorbis.com/celik-haberleri/guncel-haberler/>

- türkiye-çelik-sektörü-yeni-kosullara-kismen-uyum-sağladı-beklentiler-belirsiz-1340808.htm (Erişim Tarihi: 15.02.2026).
- Su, X. ve Zhang, X. (2016). A detailed analysis of the embodied energy and carbon emissions of steel-construction residential buildings in China. *Energy and Buildings*, 119, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.070>
- Sun, C., Wang, J., Zhou, M., Hong, L., Ai, L. ve Wen, L. (2024). Process path for reducing carbon emissions from steel industry-combined electrification and hydrogen reduction. *Processes*, 12(1), 108. <https://doi.org/10.3390/pr12010108>
- Sungur, O., Aydın, H. ve Eren, M. (2016). Türkiye’de Ar-Ge, inovasyon, ihracat ve ekonomik büyüme arasındaki ilişki: Asimetrik nedensellik analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(1), 173-192. <https://izlik.org/JA33YR52CX>
- Sülkü, S. N. ve Ülkmez, E. (2018). Hisse senedi getirilerinde doğrusal olmayan dinamikler: Türkiye’den kanıtlar. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 2018(18. EYI Özel Sayısı), 473-484. <https://doi.org/10.18092/ulikidince.349846>
- Şak, N. (2021). Kripto paralar arasındaki ilişkinin incelenmesi: Hatemi-J asimetrik nedensellik analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 12(29), 149-175. <https://doi.org/10.21076/vizyoner.753201>
- T. C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2022). *Demir çelik sektör raporu 2021*. Ankara: Sanayi Genel Müdürlüğü Yayını.
- T. C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2023). *Demir çelik sektör raporu 2022*. Ankara: Sanayi Genel Müdürlüğü Yayını.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2024). *Demir çelik sektör raporu 2023*. Ankara: Sanayi Genel Müdürlüğü Yayını.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2025). *Demir çelik sektör raporu 2024*. Ankara: Sanayi Genel Müdürlüğü Yayını.
- Tamsöz, H. ve Elmas, E. T. (2021). Çelik üretiminde elektrik ark ocaklarında enerji maliyetlerinin ve enerji verimlilik faktörlerinin araştırılması. *Tasarım Mimarlık ve Mühendislik Dergisi*, 1(3), 163-180. <https://izlik.org/JA77BS57CW>
- Tan, S. (1983). *Demir çelik sanayiinde verimlilik - 1982*. Ankara: Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları.
- Tang, C. F. ve Wang, J. (2025). Bridging growth and investment: The interaction of FDI, institutions and financial development in China. *Global Business Review*, 0(0). <https://doi.org/10.1177/09721509241295836>
- Tarı, R. (1999). *Ekonometri*. İstanbul: Alfa Yayınları.
- Tarı, R. (2010). *Ekonometri*. Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Yayınları.

- Taşdelen, S. ve Çetiner, E. M. (2022). 2008 küresel finansal krizinin Türkiye, Japonya ve Çin’de demir çelik sektörüne etkileri üzerine ekonometrik bir uygulama. *Finans Politik & Ekonomik Yorumlar*, 59(659), 39-70.
- Tekin-Koru, A. ve Dinçer, N. N. (2025). Küresel şoklar, yeşil politika ve Türkiye çelik ticaretinin refah mantığı. *ODTÜ Gelişme Dergisi*, 52(2), 339-373. <https://doi.org/10.60165/metusd.v52i2.4>
- Teo, P. T., Zakaria, S. K., Salleh, S. Z., Taib, M. A. A., Mohd Sharif, N., Abu Seman, A., Mohamed, J. J., Yusoff, M., Yusoff, A. H., Mohamad, M., Masri, M. N. ve Mamat, S. (2020). Assessment of electric arc furnace (EAF) steel slag waste’s recycling options into value added green products: A review. *Metals*, 10(10), 1347. <https://doi.org/10.3390/met10101347>
- Teyyare, E. (2018). Tasarruf - yatırım - kurumsal kalite ilişkisine yönelik bir analiz: Türkiye örneği. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18(1), 119-139. <https://doi.org/10.11616/asbed.v18i38800.459486>
- Tezeren, A. (1990). *Demir çelik sanayiinde verimlilik rapor sistemi*. Ankara: Millî Prodüktivite Merkezi Yayınları.
- Tezeren, A., Tan, S., Özdeş, N., Yücel, E. ve Aykın, N. (1983). *Özel sektör demir çelik tesislerinde envanter ve kapasite çalışmaları entegre tesislerde verimlilik ölçümleri*. Ankara: Millî Prodüktivite Merkezi Yayınları.
- The Carbon Compass (t.y.). *Steel’s global decarbonization drive: Pathways, ambitions and realities*. Şu adresten erişildi <https://the-carbon-compass.com/steels-global-decarbonization-drive-pathways-ambitions-and-realities/> (Erişim Tarihi: 11.02.2026).
- Tıraşoğlu Yıldırım, B. (2014). Yapısal kırılmalı birim kök testleri ile OECD ülkelerinde satın alma gücü paritesi geçerliliğinin testi. *Istanbul University Econometrics and Statistics E-Journal*, 20, 68-87. <https://izlik.org/JA23YR72MS>,
- Tian, B., Wei, G., Li, X., Zhu, R., Bai, H., Tian, W. ve Dong, K. (2022). Effect of hot metal charging on economic and environmental indices of electric arc furnace steelmaking in China. *Journal of Cleaner Production*, 379(1), 134597. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134597>
- Toda, H. Y. ve Yamamoto, T. (1995). Statistical inference in vector autoregressions with possibly integrated processes. *Journal of Econometrics*. 66(1-2), 225-250. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(94\)01616-8](https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)01616-8)
- Torun, N. (2015). Birim kök testlerinin performanslarının karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Tutumlu, Ö. ve Güler, N. (2025). Tüketici Güven Endeksi ile Sektörel Güven Endeksleri arasındaki ilişkinin doğrusal ve doğrusal olmayan zaman serisi analizi. *Journal of Emerging Economies and Policy*, 10(1), 155-180. <https://izlik.org/JA23NW42XG>

- 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/jecss.987971>
- Uslu, H. (2023). Türkiye’de reel döviz kuru, enflasyon ve faiz oranlarının dış ticaret üzerindeki etkisi: Simetrik ve asimetrik yöntemlerle analiz. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 12(2), 524-556. <https://doi.org/10.33206/mjss.1186057>
- Uysal, İ. ve Kılıç, A. F. (2021). Normal dağılım ikilemi. *Anadolu Journal of Educational Sciences International*, 12(1), 220-248. <https://doi.org/10.18039/ajesi.962653>
- Uzgören, N. ve Uzgören, E. (2005). Zaman serilerinde sahte regresyon sorunu ve reel kamu harcamalarına yönelik bir ekonometrik model uygulaması. *Akademik Bakış Dergisi*, 5, 1-14.
- Wang, H., Liu, H., Chen, F. G., Li, H. ve Xue, X. J. (2025). Endpoint carbon content and temperature prediction model in BOF steel-making based on dynamic feature partitioning - weighted ensemble learning. *Metallurgical Research & Technology*, 122(3), 312. <https://doi.org/10.1051/metal/2025026>
- Wang, P., Jiang, Z., Geng, X., Hao, S. ve Zhang, X. (2013). Quantification of Chinese steel cycle flow: Historical status and future options. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 191-199. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.04.003>
- Wang, Z., Liu, Q., Liu, H. & Wei, S. (2020). A review of end-point carbon prediction for BOF steelmaking process. *High Temperature Materials and Processes*, 39(1), 653-662. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0098>
- Weiss, L. ve Hobson, J. M. (1999). *Devletler ve ekonomik kalkınma karşılaştırmalı tarihsel bir analiz* (Çev. K. Dündar). Ankara: Dost Yayınları.
- World Steel Association [WSA] (t.y.). *Data*. Şu adresten erişildi: <https://worldsteel.org/data/> (Erişim Tarihi: 10.02.2026).
- Wu, F., Gao, J., Tong, Y., Fang, H., Li, G. ve Yuo, T. (2026). Carbon footprint characteristics and reduction strategies of the iron and steel industry: an LCA-based study of source, process, end-use and cleaner production applications. *Environmental Research*, 239, 123769. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.123769>
- Xin, H., Wang, S., Chun, T., Xue, X., Long, W., Xue, R. ve Zhang, R. (2023). Effective pathways for energy conservation and emission reduction in iron and steel industry towards peaking carbon emissions in China: Case study of Henan. *Journal of Cleaner Production*, 399, 136637. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136637>

- Xu, W., Wan, B., Zhu, T. ve Shao, M. (2016). CO2 emissions from China's iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 139, 1504-1511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.107>
- Xuan, Y. ve Yue, Q. (2017). Scenario analysis on resource and environmental benefits of imported steel scrap for China's steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 186-198. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.011>
- Yalova, Y. ve Sarısu, A. (2014). *Türkiye örneğinde demir çelik sektöründe dönüşüm ve İSDEMİR uygulaması*. İstanbul: YeniYüzyıl Yayınları.
- Yang, L., Hu, H., Yang, S., Wang, S., Chen, F. ve Gou, Y. (2023). Life cycle carbon footprint of electric arc furnace steelmaking processes under different smelting modes in China. *Sustainable Materials and Technologies*, 35, e00564. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00564>
- Yang, L., Li, B., Guo, Y., Wang, S., Xue, B. ve Hu, S. (2022). Influence factor analysis and prediction model of end-point carbon content based on artificial neural network in electric arc furnace steelmaking process. *Coatings*, 12(10), 1508. <https://doi.org/10.3390/coatings12101508>
- Yaşar, O. (2009). Türk imalat sanayinde lokomotif bir sektör: Demir çelik sanayi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 20, 42-78. <https://izlik.org/JA62ML24KM>
- Yavuz, N. Ç. (2004). Duraganlığın belirlenmesinde KPSS ve ADF testleri: İMKB Ulusal-100 Endeksi ile bir uygulama. *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Mecmuası*, 54(1), 239-247. <https://izlik.org/JA57PA35JW>
- Yavuz, N. Ç. (2006). Türkiye'de turizm gelirlerinin ekonomik büyümeye etkisinin testi: Yapısal kırılma ve nedensellik analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 7(2), 162-171. <https://izlik.org/JA36CM72AT>
- Yayan, V. (2021). *Türkiye'nin ham çelik üretimi yılın ilk yarısında yüzde 4,6 azaldı*. Şu adresten erişildi: <https://www.memurlar.net/haber/1036739/turkiye-nin-ham-celik-uretimi-yilin-ilk-yarisinda-yuzde-4-6-azaldi.html> (Erişim Tarihi: 16.02.2026).
- Yeldan, E. (2016). *Küreselleşme sürecinde Türkiye ekonomisi*. İstanbul: İletişim Yayınları.
- Yetim, M. ve Yamak, R. (2019). Türkiye'de döviz kurundan fiyatlara geçişkenlik etkisi: Hatemi-J asimetrik nedensellik testi. *Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 21(1), 203-221. <https://doi.org/10.26468/trakyasobed.466936>
- Yılcı, V. (2009). Yapısal kırılmalar altında Türkiye için işsizlik histerisinin sınanması. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 10(2), 234-335. <https://izlik.org/JA94DJ68MB>
- Yıldırım, E. O. (1983). Cumhuriyetten günümüze demir çelik sanayii. İç. *Demir çelik semineri*, ss. 37-50, Ankara: Millî Prodüktivite Merkezi Yayınları.
- Yılmaz, M., Kırbıyık, M. ve Çiftçi, Y. (2017). Armonize Sistem neden, nasıl ve ne zaman güncellenir? Durum çalışması: Biyodizel ve gümrük laboratu-

- varlarında yapılan analizler. *Gümrük ve Ticaret Dergisi*, 10, 99-105. <https://izlik.org/JA98ZL37BD>
- Yılmaz, M. S. ve Yılmaz, F. (2025). Ağır sanayii karbonsuzlaştırma ve yeşil çelikler. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 30(1), 293-304. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1524063>
- Yurdakul, F. (2000). Yapısal kırılmaların varlığı durumunda geliştirilen birim kök testleri. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2(2), 21-34. <https://izlik.org/JA57CG48ST>
- Zang, G., Sun, P., Elgowainy, A., Bobba, P., McMillan, C., Ma, O., Podkaminer, K., Rustagi, N., Melaina, M. ve Koleva, M. (2023). Cost and life cycle analysis for deep CO2 emissions reduction of steelmaking: Blast furnace-basic oxygen furnace and electric arc furnace technologies. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 128, 103958. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103958>
- Zeytinoglu, M. (1981). *Ulusal sanayi*. İstanbul: Çağdaş Yayınları.
- Zhang, J., Shen, J. Xu, L. ve Zhang, Q. (2023). The CO2 emission reduction path towards carbon neutrality in the Chinese steel industry: A review. *Environmental Impact Assessment Review*, 99, 107017. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107017>
- Zhang, T., Wang, L., Zhu, W., Guo, Y., Chen, Z. Li, J., Wei, J. ve Yu, Q. (2024). Preparation of high strength carbon negative building material by CO2 curing biochar- EAF steel slag compacts. *Construction and Building Materials*, 441, 137456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137456>
- Zhang, X., Jiao, K., Zhang, J. ve Guo, Z. (2021). A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127259>
- Zhu, L., Zhang, X-B., Li, Y., Wang, X. ve Guo, J. (2017). Can an emission trading scheme promote the withdrawal of outdated capacity in energy-intensive sectors? A case study on China's iron and steel industry. *Energy Economics*, 63, 332-347. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.02.004>
- Zivot, E. ve Andrews, D. W. K. (1992). Further evidence on the great crash, the oil-price shock, and the unit-root hypothesis. *Journal of Business & Economic Statistics*, 10(3), 251-270. <https://doi.org/10.1080/07350015.1992.10509904>

