

ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

DOI: 10.52122/nisantasisbd.1544966

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE FİNANSAL PİYASALAR: BITCOİN'İN KARBON EMİSYONU ÜZERİNDEKİ ETKİSİ¹

Bahar ÖZBEK

Tarsus Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler
Fakültesi, Finans ve Bankacılık Bölümü

e-posta: baharogul@yahoo.com

ORCID 0000-0002-4335-9086

Doç. Dr. Sefa ÖZBEK

Tarsus Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler
Fakültesi, Gümrük İşletme Bölümü

e-posta: sefaozbek@yahoo.com

ORCID 0000-0002-1043-2056

ÖZ

Modern çağın en önemli yeniliklerinden biri paranın dijitalleşmesidir. Günümüzde birçok dijital para birimi bulunmaktadır. İşlem hacmi ve piyasa değeri açısından Bitcoin öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, kripto para birimleri içinde önemli bir yere sahip olan Bitcoin'in çevre ile ilişkisi incelenmektedir. 2010 Ağustos-2024 Mart dönemine ait aylık veriler kullanılarak, Bitcoin ile karbon emisyonu arasındaki ilişki ampirik olarak test edilmiştir. Ekonometrik analizde öncelikle durağanlık mertebelerini belirlemek amacıyla geleneksel ve güncel ampirik metotlardan yararlanılmaktadır. Diğer yandan geleneksel eşbütünleşme yaklaşımlarının yanı sıra doğrusal olmayan ve güncel teknikler arasında yer alan Hepsağ (2021) eşbütünleşme testi kullanılmaktadır. Son olarak değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisi incelenmiştir. Ampirik bulgular, Bitcoin ile karbon emisyonları arasında uzun dönemli bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca Bitcoin'den karbon emisyonlarına doğru Granger nedensellik ilişkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Bitcoin üretiminde çevresel kaliteyi artırıcı önlemler alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çevresel bozulma, doğrusal olmayan eşbütünleşme, kripto para

Jel Kodları: C22, G23, Q50

SUSTAINABILITY AND FINANCIAL MARKETS: THE IMPACT OF BITCOIN ON CARBON EMISSIONS

ABSTRACT

One of the most important innovations of the modern age is the digitalization of money. Today, there are many digital currencies. Bitcoin stands out in terms of trading volume and market capitalization. In this study, the relationship between Bitcoin, which has an important place among cryptocurrencies, and the environment is examined. Using monthly data for the period August 2010 - March 2024, the relationship between Bitcoin and carbon emissions was empirically tested. In econometric analysis, traditional and current empirical methods are used to determine the stationarity level. On the other hand, in addition to traditional cointegration approaches, Hepsağ (2021) cointegration test, which is among the non-linear and up-to-date techniques, is used. Finally, the causality relationship between the variables was examined. Empirical evidence shows a long-term relationship between Bitcoin and carbon emissions. It is also concluded that there is a Granger causality relationship from Bitcoin to carbon emissions. The results obtained reveal the necessity of taking measures to increase environmental quality in Bitcoin production.

Keywords: Environmental Degradation, Nonlinear Cointegration Test, Cryptocurrency

Jel Codes: C22, G23, Q50,

Geliş Tarihi/Received: 07.10.2024

Kabul Tarihi/Accepted: 12.12.2024

Yayın Tarihi/Printed Date: 31.12.2024

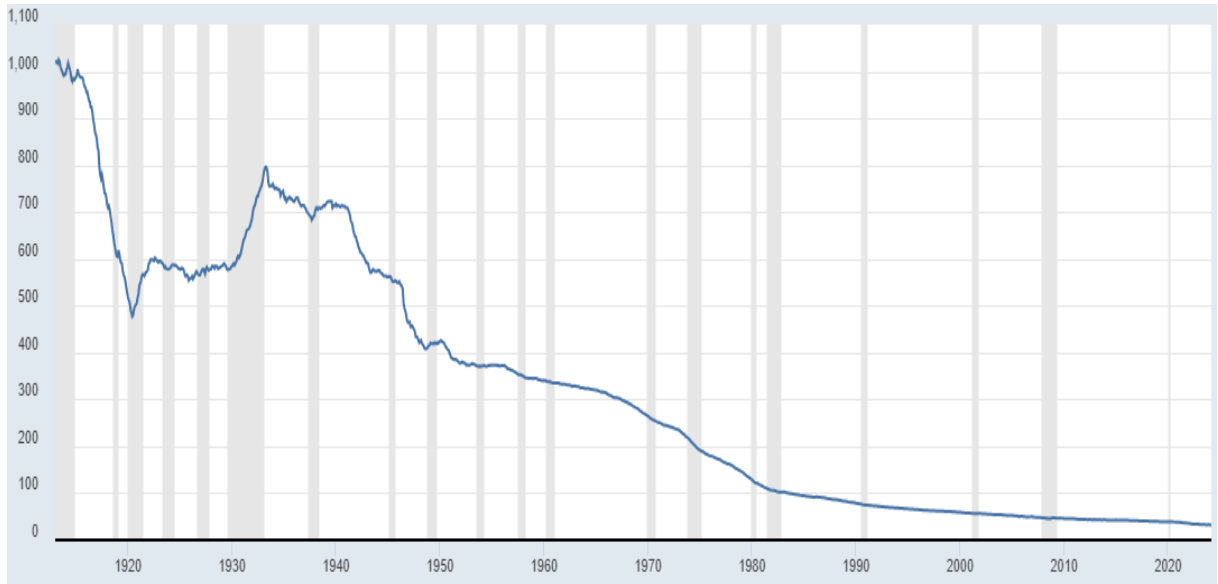
Kaynak Gösterme: Özbek, B. ve Özbek, S. (2024). "Sürdürülebilirlik ve Finansal Piyasalar: Bitcoin'in Karbon Emisyonu Üzerindeki Etkisi". *İstanbul Nişantaşı Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 12 (Özel Sayı) 183-203.

¹ Bu çalışma 9-11 Mayıs 2024 tarihinde IERFM adlı kongrede sunulan bildirinin gözden geçirilmiş, genişletilmiş ve yeniden düzenlenmiş halidir.

GİRİŞ

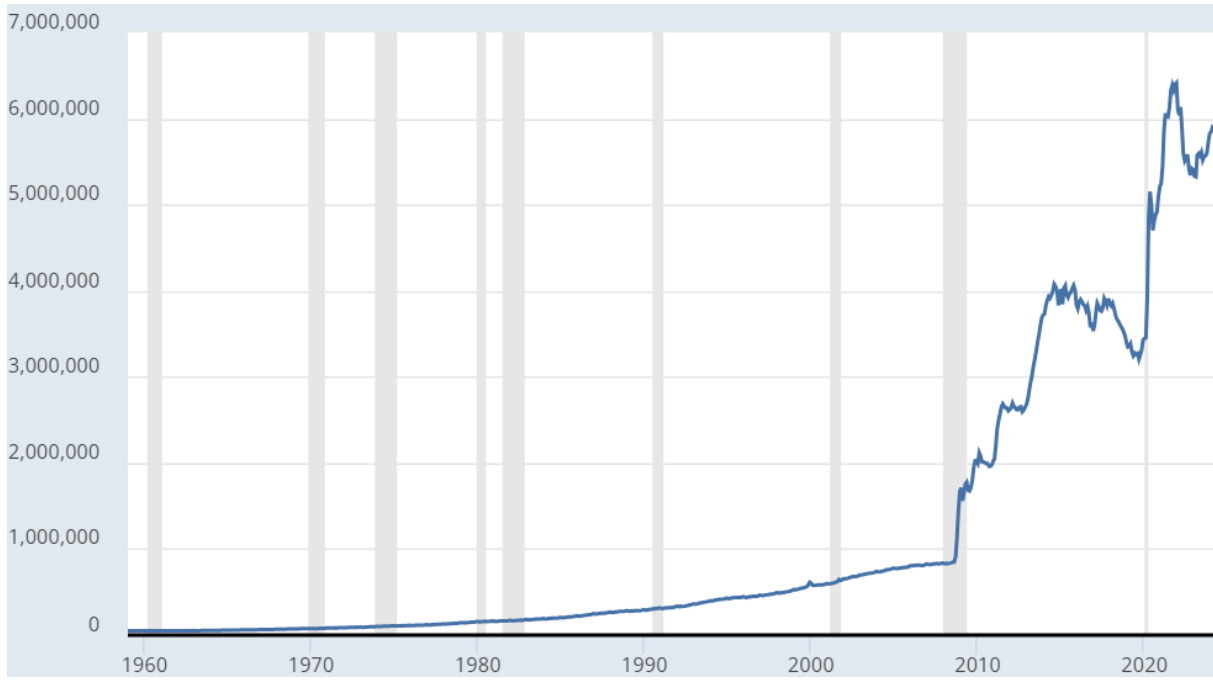
Son dönemlerde bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler finansal piyasaların gelişmesine yol açmıştır. Derinleşen finansal piyasalar, finansal araç çeşitliliğine sebep olmuştur. 2008 Küresel Krizi ve özellikle 2019 yılında yaşanan Covid-19 pandemi süreci kripto para kullanımının, mobil ödeme yöntemlerinin ve blok zincir teknolojilerinin gelişmesinde önemli roller üstlenmiştir (Eşsiz, 2024). Küreselleşme sürecinin getirdiği bu yenilikler geçmiş dönemde kullanılan birçok uygulamanın kalkmasına sebep olmuştur. Geçmiş dönemler ile günümüz kıyaslandığında para piyasalarında devletin rolü ciddi bir ayrımı belirtmektedir. Bu kapsamda değerli metallerin yoğun kullanıldığı dönemden paranın kullanımına geçilmiş, ticaret ve ekonomide artan karmaşıklıkla birlikte kağıttan üretilen paraların kullanılmaya başlandığı görülmüştür (Fidan vd., 2019). Ancak bu gelişmelere rağmen, tedavüldeki kağıt paralar hala altın rezervleri tarafından desteklenmekteydi. Günümüzde ise fiat para birimlerinin serbestçe dalgalanmasına izin verilmektedir; başka bir deyişle, kağıt paraların altın gibi değerli metallerle desteklenmesi gerekmemektedir (Vranken, 2017). Bu noktadan itibaren, para arzını yukarıya veya aşağıya doğru modüle etme olasılığı kolaylıkla mevcuttu ve sonunda modern kapitalizmin doğuşuna yol açtı (Weatherford, 1998). Para basma tekelini elinde bulunduran otoriteler senyoraj geliri elde etmektedir. Bu durum ise hükümetlerin sıkı maliye politikalarına başvurmadan gelir elde etmesine sebep olabilmektedir (Avcı ve Süslü, 2023). Dolayısıyla merkezi otoritelerin tercih ettiği iktisat politikaları ile paranın değeri üzerinde değişiklikler olabilmektedir. Bu durum devletin para üzerindeki rolünün sorgulanmasını beraberinde getirmektedir.

20. yüzyıl, ekonomi genelinde para dolaşımını daha da hızlandıran ve büyümeyi artıran elektronik işlemlerin ortaya çıkmasını sağladı. En önemli gelişmelerden birisi de kâğıt ve elektronik para, fiat para birimlerinin temel değerlerinden tamamen ayrılması olmuştur. Diğer yandan altına dayalı sabit kur sistemi olan Bretton Woods sisteminin 1971 yılında çökmesiyle birlikte döviz kurları altına bağlı olmaktan çıkmıştır. Bu durumun doğal bir sonucu olarak döviz kurları devlete olan güvene dayalı olmaktan çıkmıştır (Wałtorek vd., 2021). Böylece artık fiat para birimleri sistematik biçimde değer kaybetmeye başlamıştır. Öyle ki rezerv para özelliğine sahip olan ABD dolarında da bu durum net biçimde görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. ABD dolarının (USD) satın alma gücü endeksi (1913:01-2023:03) (Kaynak: U.S. Bureau of Labor Statistics, 2024)

Şekil 1'de veriler aylık ve mevsimsellikten arındırılmamıştır. Ayrıca 1982-1984=100 kabul edilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde düşüş trendinin olduğu görülmektedir. Şekil 1'de 1933 yılı Nisan ayı ile birlikte düşüş trendinin düzenli biçimde gerçekleştiği gözlenmektedir. Bu düşüş ile birlikte sistematik biçimde de dolar cinsinde para arzında artış trendi meydana gelmektedir. Bu durum Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. ABD doları cinsinden para tabanı (1959:01-2024:03) (Kaynak: Board of Governors of the Federal Reserve System (US), 2024).

Şekil 2’de veriler mevsimsellikten arındırılmamıştır ve milyon dolar cinsinden gösterilmiştir. Şekil 1’in aksine Şekil 2’de artış trendi açıkça görülmektedir. Bretton-Woods Sistemi’nin yıkılması ile birlikte artış trendi başlamıştır. 2008 Küresel Krizi’nin meydana gelmesi ile birlikte para arzında yüksek oranda artışın olduğu görülmektedir. Diğer önemli artış trendinin ise Covid-19 pandemi döneminde meydana geldiği gözlenmektedir.

Şekil 1 ve Şekil 2 birlikte değerlendirildiğinde para otoritelerinin para tabanlarını ciddi biçimde genişlettiği görülmektedir. Ayrıca fiat para birimleri ciddi biçimde değer kaybına uğramıştır. Bu gelişmeler kripto varlıkların ortaya çıkmasının temel sebeplerden birisini oluşturmuştur. Finansal piyasalarda meydana gelen dalgalanmalar, merkezi otoritelerin kredibilitésinin düşmesi tamamen yeni bir finansal varlığın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bitcoin ilk kripto para birimidir. Bitcoin, fiat ve altın bazlı para birimlerinin zayıf yönlerinin üstesinden gelmeye çalışan merkezi olmayan bir sistemi ifade etmektedir. Bu sistemde para basımı veya ödeme ve işlemlerin doğrulanması hükümetler veya merkez bankaları gibi merkezi otoriteler tarafından yönetilmemektedir. Dolayısıyla ödemeler için daha düşük işlem ücretleri sağlayabilmektedir (Mikołajewicz-Woźniak ve Scheibe, 2015). Kripto para teknolojisi, iktisadi birimlerin herhangi bir aracıya gerek duymadan ödeme yapmalarına izin vermektedir (Eyüboğlu, 2018). Bu sistemin sürdürülebilirliği açısından Kripto vakıfları önemli roller üstlenebilmektedir. Bu vakıflar blok zincir projelerine blok zincirinin merkeziyetsizleşmesine yönelik yardım ve güvence gibi katkılar sunmaktadır. Diğer yandan bilinirlik ve içselleştirmeyi artırmak amacıyla bir proje hakkında pazarlama desteği ve eğitim sağlayabilmektedir. Kripto vakfına benzer özellik gösteren Bitcoin Vakfı’da Bitcoin’in standartlaştırılması, korunması ve tanıtılması için merkezi bir yönetim sağlamaktadır. Fakat bir merkez bankası olarak hareket etmemekte ve para birimi basmamaktadır (Beer ve Weber, 2015).

Küreselleşme süreciyle birlikte meydana gelen finansal krizler önemli olumsuzluklara yol açmıştır. İktisadi açıdan dış borç stoğunda artışlar, yüksek enflasyon ve gelir dağılımında adaletsizlik gibi sorunlara neden olmuştur (Heine ve Thakur, 2011). Bu gelişmeler küreselleşmenin sorgulanmasını beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda finansal piyasalardaki gelişmeler ciddi önem taşımaktadır. Dolayısıyla ticari serbestleşme ile birlikte küreselleşmenin en önemli bileşenleri arasında yer alan finansal serbestleşme adımları tartışılmaya başlanmıştır (Roy ve Kemme, 2020). Bu tartışmalar finansal piyasaların sürdürülebilirliği üzerinde yoğunlaşmaktadır. 2000’li yıllar ile birlikte bilgi-iletişim teknolojisindeki gelişmeler ciddi biçimde artmış ve modern finansal piyasalar bu durumdan çok etkilenmiştir (Dreher vd., 2008). Öyle ki

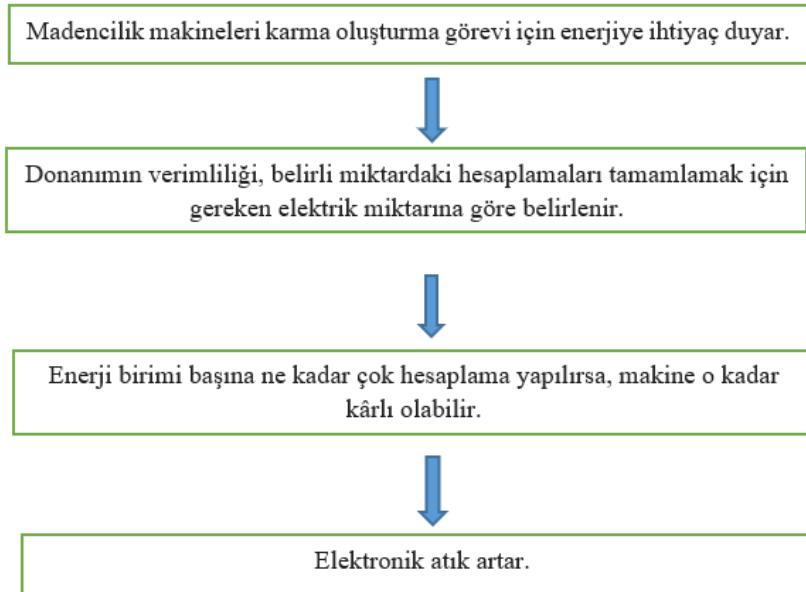
günümüzde finansal piyasalar hızlı bilgi akışıyla karakterize edilmektedir. Farklı yatırım öngörüsüne sahip iktisadi ajanlar arasında çok sayıda işlem yaşanmaktadır. Uzun dönemli birçok fon örneğinde dahi milisaniyeler düzeyinde çalışan (yüksek frekanslı ticaret) özel algoritmalar bulunmaktadır. Finansal piyasalarda yaşanan bu özellikler şüphesiz çok sayıda öge, doğrusal olmayan etkileşimler, yapısal kendi kendine organizasyon ve ortaya çıkan fenomenler gibi karmaşık sistemlerin özelliklerine uymaktadır (Wahtorek vd., 2021).

Kripto para piyasaları son yıllarda büyümektedir. Bu pazarların sürdürülebilirliği, yüksek enerji tüketimi gerektirmesi ve dünya çapında çevresel kaygılar yaratması nedeniyle akademik araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Yüksek enerji tüketimine sebep olan blok zincir teknolojiler, aynı oranda yüksek CO₂ emisyonu tüketimine de sebep olmaktadır. Bu durum çevresel sorunlara ve küresel ısınma gibi sorunlara yol açabilmektedir. Diğer yandan bu teknolojilerin geliştirilmesinde kullanılan makinelerin hızlı değişimi ile elektronik atık problemi de medyana gelebilmektedir. Söz konusu durum Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Bitcoin Elektronik Atık Seyri (2 Ekim 2017-9 Ocak 2024)

Şekil 3'te güncel dönem verileri ile elektronik atıklara ilişkin veriler kiloton/yıl şeklinde düzenlenmiştir. Söz konusu atıkların artan bir trend izlediği görülmektedir. Söz konusu artış ile çevresel kalitenin düşmesi vb. sorunlarının meydana gelmesi olasıdır. Bu atıklardaki artış mekanizması Şekil 4'te gösterilmektedir.

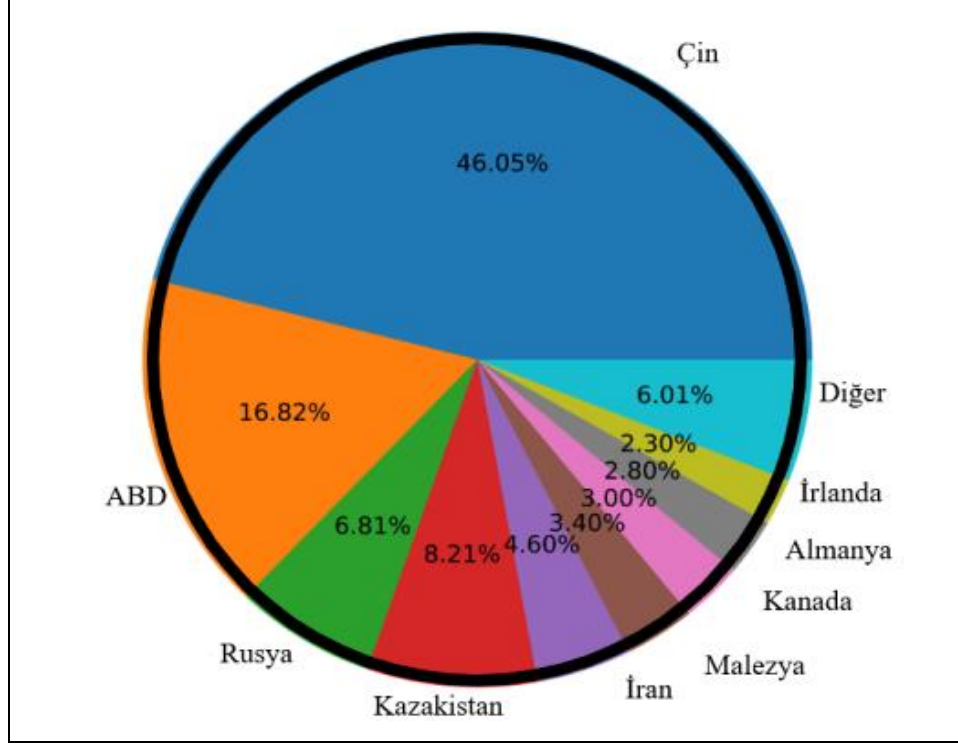


Şekil 4. Elektronik Atık Oluşma Süreci

Şekil 4'te görüldüğü gibi elektronik atıklar özetle daha yüksek teknolojiye ihtiyaç duyulması yoluyla meydana gelmektedir. Bu durumda yeni teknolojiler ile kullanılan makinelerin kullandığı

enerji miktarları artabilmektedir. Artan enerji tüketimi değerlendirildiğinde Bitcoin ile çevre ilişkisi ciddi bir sorun haline gelmektedir (Alkan, 2023). Bu soruna Nakamoto (2008), yüksek elektrik tüketiminin sorun olmaması için madencilik donanımının sürekli artan verimliliğe sahip olması gerektiğini ileri sürmüştür. Fakat 2013'ten bu yana tüketilen enerji maliyeti, bakım maliyeti ve madencilik donanımı satın alma/yenileme maliyeti gibi maliyetler madencilik faaliyetine özel donanım kullanımını gerektiren hesaplama zorlukları yüzünden sürekli artmaktadır (Blandin vd., 2020; Oğul, 2022).

Dünyanın en büyük Bitcoin madenciliği ülkeleri sıralaması incelendiğinde 2023 yılında; Çin (%46), ABD (%16,8), Kazakistan (%8,2), Rusya (%6,8), İran (%4,6), Malezya (%3,4), Kanada (%3), Almanya (%2,8) ve İrlanda (%2,3) şeklinde bir sıralama bulunmaktadır. İlgili dağılım Şekil 5'te görselleştirilmektedir (The Cambridge Centre for Alternative Finance, 2024).



Şekil 5. Bitcoin Madenciliğinde Ülke Dağılımları

Bitcoin üretiminde çevresel bozulmayı en aza indirmek için yenilenebilir enerji kullanımının önemi büyüktür. Kazakistan, İrlanda, Malezya, İran ve Rusya ülkeleri Almanya, Kanada, Çin ve ABD'ye göre daha düşük yenilenebilir enerji kapasitesine sahiptir (Kohli vd., 2023). Özellikle madencilik faaliyetlerinin yoğun olduğu ülkelerde PoW madenciliğinin neden olduğu küresel ısınma ve çevresel kaliteyi düşürücü etkiyi düşürecek önlemlerin alınması çok ciddi bir konu haline gelmiştir. Bu önlemlerin başında da yenilenebilir enerji kullanımı öne çıkmaktadır (Polemis ve Tsionas, 2023; Yılmaz ve Kaplan, 2022).

Bitcoin Madencilik Konseyi (2023) bulgularına göre ise; 2022 yılı itibari ile Bitcoin madencilik faaliyetlerinin yaklaşık %58'inin yenilenebilir enerji kaynakları kullandığı raporlanmaktadır. Bu oran, bir önceki yıla göre %59'luk bir artışı ifade etmektedir. Bu sonuçlar sektörün sürdürülebilirlik açısından olumlu yönde geliştiğini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan sürdürülebilir enerji kullanımının bir önceki yıla göre %59 oranında artması, sektörün çevresel etkilerini azaltma konusunda önemli adımların attığını göstermektedir. Bitcoin Madencilik Konseyi Raporu (2023) sonucuna göre Bitcoin madencilik faaliyetlerine ait enerji kaynaklarının çevresel kaliteyi artırıcı, iklim krizine çözüm üreten, yeşil büyümeyi önceleyen biçimde yönlendirilmesi, temiz enerji kaynaklarının kullanımının her geçen yıl artması küresel açıdan olumlu görülmektedir. Ancak bu çabaların sürdürülebilir olması büyük önem taşımaktadır (Naimoğlu ve ÖzbeK, 2022). Madencilik faaliyeti gerçekleştiren gelişmekte olan ülkelerde çevre dostu enerji kullanımının sürdürülebilirliği ve düşük emisyon hedeflerini gerçekleştirmeleri ciddi önem taşımaktadır.

Kripto para piyasalarının en önemli temsilcisi konumunda olan Bitcoin'in sürdürülebilirliği, yüksek enerji tüketimi gerektirmesi ve dünya çapında çevresel kaygılar yaratması nedeniyle popüler bir konu olmaya devam etmektedir. Bu çalışmada çevresel bozulmanın ölçülmesinde en popüler değişkenler arasında yer alan CO₂ emisyonu kullanılmıştır. Diğer yandan en büyük işlem hacmine sahip Kripto para olması ile finans piyasasında öne çıkan Bitcoin modele dahil edilmektedir. Bu çalışmada Bitcoin'in CO₂ emisyonu üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Çalışmada geleneksel ampirik metotların yanında güncel ampirik metotlardan da yararlanılmaktadır. Bu yönüyle çalışma diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Çalışmada farklı güç özelliklerine sahip birim kök testleri kullanılarak sahte regresyon sorunu aşılmaktadır. Diğer yandan geleneksel eşbütünleşme yaklaşımlarının yanında doğrusal olmayan eşbütünleşme testleri içerisinde güncel testler arasında yer alan Hepsağ (2021) eşbütünleşme testi kullanılmaktadır. İlgili test asimetrik ESTAR sürecin varlığına dayanmakta ve güç özellikleri açısından öne çıkmaktadır. Çalışmada geleneksel eşbütünleşme ve Hepsağ (2021) eşbütünleşme testinin birlikte kullanılması ile hem ampirik hem de teorik çıkarımlar ortaya konularak, çalışma bulgularını güçlü ve özgün hale getirmektedir. Çalışmada karşılaştırmalı ampirik analizlerin yanında son olarak nedensellik testi ile bulgular güçlendirilmektedir. Örneklem dönemi olarak 2008 Küresel Finans Krizini içeren 2010:M8-2024:M3 döneminin seçilmesi güncel politika önerileri sunulması bağlamında çalışmanın diğer özgün yönünü oluşturmaktadır. Literatürde genel olarak geleneksel metotların ya da sadece güncel birkaç metot kullanılarak ilgili konuda çalışmalar yapıldığı değerlendirildiğinde, bu çalışmanın yukarıda ifade edilen yönleri ile literatüre katkı sunacağı değerlendirilmektedir.

Çalışma şu şekilde yapılandırılmıştır; ikinci bölümde daha önce yapılan güncel çalışmalara yer verilmektedir. Üçüncü bölümde veri seti ve model tanıtılmakta, ampirik metodoloji ortaya konulmaktadır. Dördüncü bölümde ampirik bulgular yer almaktadır. Ampirik bulgular ışığında değerlendirmelerin yer aldığı beşinci ve son bölümde ise politika önerileri sıralanarak çalışma sonlandırılmaktadır.

1. Literatür İncelemesi

Bitcoin ile CO₂ emisyonu ilişkisi kripto para piyasalarının gelişmesiyle birlikte artmaya başlamıştır. Özellikle Bitcoin'in işlem hacminde meydana gelen artışlar ile birlikte çevresel konular dikkat çekmeye başlamıştır. Bu bağlamda gerek Kripto paralar ile çevresel bozulma ya da çevresel kalite konuları hakkında çalışmaların arttığı görülmektedir. Enerji tüketimi bağlamında Bitcoin ile çevre ilişkisini araştıran bazı güncel çalışmalar incelendiğinde Das ve Dutta, 2020; Kristoufek, 2020; Rehman ve Kang, 2021; Polemis ve Tsionas, 2021; Corbet vd., 2021; Polemis ve Tsionas, 2023 çalışmaları öne çıkmaktadır. Bitcoin kullanımında mevcut teknolojik kullanım hızı değerlendirildiğinde yaklaşık 10-15 yıl içerisinde küresel ısınmanın 2°C artacağı belirtilmektedir (Mora vd., 2018). Bu durumun önüne geçilebilmesi için Bitcoin karbon ayak izinin azaltılmasını vurgulayan Mora vd. (2018), yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini de belirtmiştir. Çalışmada fosil yakıt tüketiminin düşürülmesi ve yenilenebilir enerji kullanımının artırılması önerilmektedir. 2016-2018 dönemi verileriyle araştırma yapan Krause ve Tolaymat (2018), Bitcoin'in metal madenciliği ile karşılaştırıldığında aynı düzeyde değer ürettiğini; ancak enerji yoğun olması nedeniyle yaklaşık 10 milyon ton CO₂ emisyonundan sorumlu olan dört kripto para birimi arasında yer aldığını ortaya koymuştur. Çalışmada ayrıca başta Bitcoin olmak üzere söz konusu para birimlerinin enerji ihtiyaçlarının artacağı öne sürülmüştür.

Dilek ve Furuncu (2019) çalışmasında Bitcoin'in çevresel etkilerini araştırmıştır. Çalışma bulguları Bitcoin üretiminin çevresel sonuçlarının olduğunu ve iklim değişikliği üzerinde olumsuz sonuçlara yol açtığını ortaya koymuştur. Diğer yandan ilgili etkilerin sadece çevresel olmadığını ayrıca sosyal maliyetlerinde olduğu belirtilmiştir. Schinckus vd. (2020), 2014:01-2017:12 aylık verileri ile kripto para ticareti ile enerji tüketimi ilişkisini araştırmıştır. Bulgular, artan kripto para ticaretinin kısa ve uzun vadede enerji tüketimini artarak artırdığını göstermiştir. Bu sonuç dolaylı olarak kullanılan enerji türüne göre çevresel bozulma üzerinde etkilere yol açmaktadır. Benzer

bulgu Stoll vd. (2019) tarafından da elde edilmiştir. Üçtuğ ve Ünver (2021) çalışmasında ise Bitcoin'in çevresel bozulmayı arttırdığını ortaya koymuştur. Öyle ki Bitcoin'in çevresel bozulmaya etkisinin altına göre ortalama 25 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bu etkinin düşük olması için ilgili ülkelerde elektrik üretiminin fosil yakıtlardan elde edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Di Febo vd. (2021) çalışmasında Bitcoin ile karbon emisyonu ilişkisini 1 Ağustos 2014-11 Mart 2021 dönemi verileriyle araştırmıştır. Ampirik yöntem olarak çok değişkenli niceliksel koşullu otoregresif (MVMQ-CAViaR) modeli ve nicelikler arası Granger nedensellikten yararlanılmıştır. Ampirik bulgular Bitcoin'in karbon piyasası üzerinde ciddi etkilerinin olduğunu göstermiştir. Diğer yandan karbon emisyonlarının, Bitcoin'in Granger nedeni olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Jiang vd. (2021)'de Çin'de Bitcoin ve karbon emisyonu ilişkisini araştırmıştır. Çalışma sonuçları karbon vergisi uygulamalarının madencilik faaliyetlerinin enerji tüketim yapısında değişikliklere neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca Bitcoin üretiminin karbon emisyonu artışına sebep olduğu vurgulanmaktadır. Naeem ve Karim (2021)'de temiz enerji kaynak kullanımının artmasının Bitcoin'in sürdürülebilirliğini olumlu yönde etkileyeceğini belirtmiştir. Sarkodie vd. (2022) çalışmasında Dinamik ARDL simülasyonları ve genelden özele VAR tahmin yöntemi kullanarak çeşitli finansal göstergeler ile Bitcoin ve karbon ayak izi ilişkisini incelemiştir. Örneklem dönemi 10 Şubat 2017-19 Ekim 2021 şeklindedir. Bulgular Bitcoin kullanımının hem enerji tüketimini hem de karbon ayak izini ciddi derecede etkilediğini ortaya koymuştur. Doğan vd. (2022) çalışmasında Bitcoin ile yeşil enerji ve CO₂ ilişkisini araştırmıştır. Çalışmada 17 Eylül 2014-12 Ekim 2021 örneklem dönemi kullanılmıştır. Ampirik yöntem olarak zamanla değişen Granger nedensellik testinden yararlanılmıştır. Ampirik bulgular hem yeşil enerjinin hem de CO₂ tahsilatlarının Bitcoin'in nedeni olduğunu göstermiştir.

Kohli vd. (2022) çalışmasında Kripto para madenciliğinin yüksek enerji tüketimine neden olduğunu belirtmiştir. 2018-2021 döneminin değerlendirildiği çalışmada çevresel kalitenin düşmemesi için söz konusu faaliyeti yüksek olan ülkelerin yenilenebilir enerji kullanımını öncelmesi gerektiğini vurgulamıştır. Erdoğan vd. (2022)'de Bitcoin ile sürdürülebilir tarım ilişkisini araştırmıştır. Söz konusu ilişkinin asimetrik etkilerini araştırmak amacıyla Toda-Yamamoto ve bootstrap ile genişletilmiş Toda-Yamamoto yöntemlerinden yararlanılmıştır. Fourier ile genişletilmiş Toda-Yamamoto yöntemi bulguları, Ethereum'dan çevresel bozulmaya doğru nedensel bir ilişkinin bulunmadığını ortaya koymuştur. Sarkodie vd. (2022) çalışmasında Bitcoin ile karbon ayak izi ilişkisini incelemiştir. Ampirik yöntem olarak dinamik ARDL simülasyonlarından yararlanılmıştır. Ampirik bulgular, Bitcoin ticaret hacmindeki artışın uzun vadede hem karbon hem de enerji ayak izini %24 artırdığını, ticaret hacmindeki dinamik bir şokun ise bitcoin enerjisini ve karbon ayak izini %46,54 artırdığını ortaya koymuştur. Polemis ve Tsionas (2023) çalışmasında 2016-2018 döneminde 50 ülkeyi kapsayan günlük panel veri seti ile Bitcoin ile çevre ilişkisini incelemiştir. Ampirik yöntem olarak Bayesian analizine ve niceliksel eşbütünleşik vektör otoregresyonuna (CQVAR) başvurulmuştur. Ampirik bulgular, Bitcoin ile CO₂ emisyonları arasındaki nedensellik ilişkisinin varlığını göstermiştir. Ayrıca yenilenebilir enerji kullanımının artmasının, Bitcoin'in karbon ayak izinin düşmesini sağlayacağı belirtilmiştir.

Felek vd. (2023) çalışmasında Bitcoin ile CO₂ emisyonu ilişkisini araştırmıştır. Ampirik yöntem olarak Kapetanios vd. (2006) non-lineer eşbütünleşmeden yararlanılmıştır. Örneklem dönemi olarak 2017:01-2022:01 dönemine ait aylık verilerinden yararlanılmıştır. Ampirik bulgular eşbütünleşme ilişkisinin varlığını göstermiştir. Ayrıca Bitcoin'den CO₂ emisyonuna doğru Granger nedenselliğin varlığına ulaşılmıştır. Karataş vd. (2023) çalışmalarında Bitcoin ile CO₂ emisyonu ilişkisini araştırmıştır. 2 Ekim 2017-2 Mayıs 2022 dönemine ait günlük veriler kullanılmıştır. Ampirik yöntem olarak doğrusal olmayan modellere dayalı birim kök testleri ve nedensellik testinden yararlanılmıştır. Ampirik bulgular, Bitcoin ile CO₂ emisyonları arasında doğrusal

olmayan bir nedensellik ilişkisinin varlığını ortaya koymaktadır. Bulgular ayrıca, yüksek enerji tüketimi ve bazı olumsuz çevresel etkilere rağmen Bitcoin'in ekonomik ortamda bir dizi amaç için kullanılan bir araç olmaya devam ettiğini göstermektedir

2. Ampirik Analiz

Bu bölümde BTC ile CO₂ emisyonu ilişkisine yönelik ampirik yöntem ve bulgulara yer verilmektedir. İlk olarak veri seti tanıtılacaktır. Sonrasında ampirik yöntem özetlenerek, bulgular ortaya konulacaktır.

2.1. Veri Seti

BTC ile CO₂ emisyonu ilişkisinin tespitinde, 2008 Küresel Krizi sonrası dönem ele alınmaktadır. Çalışmada aylık verilerden yararlanılmakta ve güncel dönem incelenmektedir. 2010M8-2024M3 dönemine ait Bitcoin fiyatları ve CO₂ (ton cinsinden) emisyonu verileri kullanılmıştır. BTC talebini temsilen BTC fiyatı kullanılmıştır. Analize dahil edilen her iki değişken de dünya fiyatları olarak Investing ve Trading Economics'den euro bazlı olarak alınmıştır. CO₂ değişkenleri Euro bazlı hesaplandığı için BTC değişkeni de Euro bazlı olarak analize dahil edilmiştir.

2.2. Ampirik Yöntem

Çalışmada geleneksel ve doğrusal olmayan yöntemlere ait birim kök testleri yapılmaktadır. Dolayısıyla doğrusallık testleri önem kazanmaktadır. Doğrusallık sınavında literatürde birçok test yer almaktadır (Ramsey (1969), Keenan (1985), Brock vd. (1987), Harvey ve Leybourne (2007), Harvey vd. (2008)). Doğrusal olmama durumunda, doğrusal olmayan birim kök testlerinin de kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda çalışmada ilk olarak Harvey vd. (2008) doğrusallık testi yapılmıştır. Hepsağ (2021) doğrusal olmayan eşbütünleşme testinin kullanılabilmesi için serilerin durağanlık mertebesinin 1 olması gerekmektedir. Teknik ifadeyle modelde yer alan tüm serilerin I(1) olması gerekmektedir. Bu durumun tespitinde ADF ve PP birim kök testlerinden yararlanılmıştır. Diğer yandan Leybourne vd. (LNV) (1998), Harvey ve Mills (2002) doğrusal olmayan birim kök testleri de yapılarak, düzeyde birim kök sürecin varlığı araştırılmıştır. Uzun dönemli ilişkinin varlığı ise Engle-Granger eşbütünleşme ve doğrusal olmayan eşbütünleşme testi (Hepsağ, 2021) ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak Granger nedensellik testi aracılığıyla değişkenler arasındaki kısa dönemli nedenselliğin varlığı araştırılmaktadır.

Doğrusallık testleri temelde iki varsayım ile ayrılmaktadır. Bunlar incelenen serinin durağan ya da durağan dışı olduğu varsayımından hareket eden yaklaşımlardır. Düzey değerinde durağan varsayımından hareket edilen doğrusallık testlerinde (Luukkonen vd., 1985; Tsay, 1986) düzeyde birim kök süreç içeren serilerde sapmalı sonuçlar oluşabilmektedir. Bu sorun ilk olarak Harvey ve Leybourne (2007) tarafından önerilen doğrusallık testi ile çözülmeye çalışılmıştır (Yılcı ve Tıraşoğlu, 2016). Bu testte doğrusallığı araştırılan serinin durağanlığı hususunda herhangi bir kısıtlama konulmadan test gerçekleştirilmektedir. Bu testi takip eden Harvey vd. (2008)'de de benzer durum geçerlidir. Ancak Harvey vd. (2008), Harvey ve Leybourne (2007)'ye kıyasla daha iyi sonlu örneklem boyut ve güç özelliklerine sahiptir.

Zaman serilerinin birim kök süreç içerip içermemesi regresyon çözümlerinde sahte regresyon problemine yol açabilmektedir (Granger ve Newbold, 1974). Dolayısıyla değişkenlerin birim kök sürece sahip olup olmamasının tespiti önem kazanmaktadır. Bir serinin birim kök süreç içermemesi diğer bir deyişle durağan olması aritmetik ortalamasının, varyansının ve kovaryansının sabit olması anlamına gelmektedir (Gujarati ve Porter, 2009). Bu bağlamda Dickey-Fuller (1979) birim kök testinde hata terimi olan ε_t 'nin otokorelasyon içermediği ve Y_t serisinin AR(1) modeline uygun olduğu kabul edilmektedir. Aynı zamanda zaman serilerinde AR(1) dışında farklı mertebeden otoregresif süreçlerde meydana gelebilmektedir. Eğer söz konusu seri AR(1) sürecine sahip değilse kabul hatalı olmakta ve ε_t 'nin otokorelasyon içermesi sorunu ortaya çıkabilmektedir. Bu durum Dickey-Fuller dağılımlarını geçersiz hale getirebilmektedir (Çil, 2018). Dickey ve Fuller (1981) çalışmasında ise otokorelasyon sorununu çözmek için bağımlı değişkenin gecikmeli değerlerine denkleme eklemiştir. DF (1981) önerisine ortalama ve trendin dahil

edilmesiyle genişletilmiş DF testi yapılabilmektedir. Diğer bir deyişle ADF birim kök testi (1), (2) ve (3) yardımıyla sınanmaktadır;

$$\Delta Y_t = \delta Y_{t-1} + \alpha \sum_{j=2}^k \Delta Y_{t-j+1} + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\Delta Y_t = \beta_t + \delta Y_{t-1} + \alpha \sum_{j=2}^k \Delta Y_{t-j+1} + \varepsilon_t \quad (2)$$

$$\Delta Y_t = \alpha + \beta_t + \delta Y_{t-1} + \alpha \sum_{j=2}^k \Delta Y_{t-j+1} + \varepsilon_t \quad (3)$$

(1), (2) ve (3) modelleri sırasıyla; sabitsiz ve trendsiz model, sabitli model, sabitli ve trendli modeli belirtmektedir. (3)'te yer alan α sabit terimi, (2) ve (3)'te bulunan β_t terimi ise trendi ifade etmektedir. ADF birim kök testinde boş hipotez birim kök sürecin varlığı üzerine kurulmaktadır. Alternatif hipotez ise durağanlığı belirtmektedir. Söz konusu hipotezlerin red ya da reddedilememesi durumu elde edilen DF test istatistiği ile MacKinnon kritik değerlerinin kıyaslanması ile tespit edilmektedir. Öyle ki test istatistiği den küçük olduğu durumda serinin birim kök süreç içerdiği anlaşılmaktadır. Phillips ve Perron (1988)'in önerdiği birim kök testi ise Dickey ve Fuller (1979)'da yer alan kalıntıların özdeş ve birbirinden bağımsız olduğu varsayımını esnetmektedir. Phillips ve Perron (1988) otokorelasyon sorununa karşı test direncini artırmak için DF (1981) tarafından modele bağımlı değişkenin gecikmeleri eklemeyi önermiştir. LNV (1998) tarafından önerilen doğrusal olmayan birim kök testinde geçiş fonksiyonu lojistik fonksiyon temeline dayanmaktadır. LNV'de üç farklı model aracılığıyla birim kök sürecin varlığı incelenmektedir. Bunlar: Model A: $y_t = a_1 + a_2 S_t(\gamma, \tau) + \sigma_t$; Model B: $y_t = a_1 + \beta_1 t + a_2 S_t(\gamma, \tau) + \sigma_t$ ve Model C: $y_t = a_1 + \beta_1 t + a_2 S_t(\gamma, \tau) + \beta_2 t S_t(\gamma, \tau) + \sigma_t$ 'dir. Model A, B ve C'de σ_t sıfır ortalamalı $I(0)$ sürecini ifade etmektedir. Örneklem boyutu T ; rejimler arası geçişin hızını kontrol eden parametre ise γ ile belirtilmektedir. γ katsayısı $0 < \gamma < 1$ özelliğine sahiptir. γ değerinin yükselmesi yumuşak geçişin hızlı ve ani olduğunu ortaya koymakta, tersi durum ise geçişin kademeli olduğunu belirtmektedir. $S_t(\gamma, \tau)$ ile lojistik fonksiyonun kapalı formunu belirtilmektedir. Bu fonksiyon $S_t(\gamma, \tau) = [1 + \exp\{-\gamma(t - \tau T)\}]^{-1}$ şeklindedir. LNV birim kök testinde, tüm modellerde boş hipotez birim kök sürecin geçerliliğini göstermektedir. LNV birim kök testindeki modeller ise özetle Model A: Sabitte 1 yumuşak kırılmayı, Model B: Deterministik trend altında sabitte 1 yumuşak kırılmayı, Model C: Hem sabit ve hem trendde 1 yumuşak kırılmayı belirtmektedir. Harvey ve Mills (2002) birim kök testinde değişkenlerde birden fazla yapısal değişikliğin olabileceğini ileri sürmüştür. Bu bağlamda LNV (1998)'in iki yumuşak geçişli versiyonunu önermiştir. Harvey ve Mills (2002)'de LNV (1998)'e ek olarak tüm modellere ilave bir yumuşak geçiş fonksiyonu eklenmiştir. Başka bir ifadeyle LNV'de yer alan üç modele de $S_{2t}(\gamma, \tau)$ eklenerek model oluşturulmuştur. Harvey ve Mills (2002) testinde de tüm modellere ilişkin boş hipotez birim kök sürecin geçerliliği göstermektedir. Harvey ve Mills (2002) birim kök testindeki modeller ise özetle Model A, B ve C'de boş hipotezler LNV'de yer alan durumların yerine 2 yumuşak kırılmanın varlığı üzerine kurulmaktadır.

Geleneksek eşbütünleşme testleri arasında yer alan Engle-Granger (EG) (1987) eşbütünleşme testi için öncelikle değişkenlerin teknik olarak $I(1)$ yapısında olması gerekmektedir. İki aşamadan oluşan EG (1987)'de ilk olarak birinci dereceden durağan olan iki değişken arasında regresyon kurulmaktadır. Bu regresyondan elde edilen kalıntılar ile otoregresif bir model kurulmakta ve kalıntıların birim kök süreci araştırılmaktadır. Birim kökün varlığı durumunda eşbütünleşme ilişkisinin bulunmadığı anlaşılmaktadır. Tersisi durumda ise yani durağanlığın geçerliliğinde eşbütünleşme ilişkisinin varlığına ulaşılmaktadır. Bu testte birim kök sürecin sınanması da EG (1987) kritik değerleri göz önüne alınmaktadır.

Doğrusal olmayan eşbütünleşme testleri içerisinde güncel testler arasında yer alan Hepsağ (2021) eşbütünleşme testi, asimetrik ESTAR sürecin varlığına dayanmaktadır. Diğer bir ifadeyle kısa vadede ortaya çıkan şokların (negatif ve pozitif) uzun vadede dengeye gelme sürecinde farklı etkilere sahip olabileceği varsayılmaktadır. Söz konusu kabul çerçevesinde iki aşamalı bir test uygulanmaktadır. İlk aşamada değişkenlerin düzey değerleri ile regresyon modeli en küçük kareler yöntemiyle tahmin edilmektedir. Tahmin sonucunda hata terimleri elde edilmektedir. Diğer aşamada ise hata terimlerinin asimetrik doğrusal olmayan üssel yumuşak geçişli otoregresif (AESTAR) süreç izlediği varsayılmaktadır. Bu kabul ile birlikte (4) modeli dikkate alınmaktadır.

$$\Delta y_t = G_t(\theta_1, u_{t-1}) \{S_t(\theta_2, u_{t-1})\gamma_1 + (1 - S_t(\theta_2, u_{t-1}))\gamma_2\} u_{t-1} + \Psi' \Delta x_t + \sum_{i=1}^p \omega_i' \Delta z_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4)$$

(4) modeli AESTAR- Hata Düzeltme Modeli (AESTAR-ECM) şeklinde ifade edilmektedir (Hepsağ, 2022). Bu modelde $z_t = (y_t, x_t')'$ $n \times 1$ boyuta sahip birinci mertebeden durağan değişkeni belirtmektedir. Modelde bağımlı değişken y_t , $x_t' = (x_{1t}, \dots, x_{1t})$ ise $k \times 1$ boyutlu bağımsız değişkendir. Regresyon modeline ait hata terimi u_t ile gösterilmektedir. Hata terimi vektörü $u_t = y_t - \beta' x_t$ şeklinde tanımlanmaktadır. (9)'da verilen Δx_t terimi, $\Delta x_t = \sum_{i=1}^p \Gamma_i' \Delta z_{t-i} + \eta_t$ şeklinde tanımlanmaktadır. G_t fonksiyonu ise $G_t(\theta_1, u_{t-1}) = 1 - \exp(-\theta_1(u_{t-1}^2))$, $\theta_1 \geq 0$ şeklinde bir gösterime sahiptir. S_t ise $S_t(\theta_2, u_{t-1}) = [1 + \exp(-\theta_2 u_{t-1})]^{-1}$ $\theta_2 \geq 0$ biçiminde belirtilmektedir. Hepsağ (2021) tarafından önerilen doğrusal olmayan birim kök testinde (4) modeline birinci mertebeden Taylor açılımı uygulanmaktadır. Böylece uzun dönemli bir ilişkin varlığı araştırılabilmektedir. Diğer bir ifadeyle serilerin eşbütünleşik olup olmadığı sınanabilmektedir. Söz konusu dönüşüm sonucunda elde edilen test regresyonu (5)'te belirtilmektedir.

$$\Delta y_t = \phi_1 u_{t-1}^3 + \phi_2 u_{t-1}^4 + \psi \Delta x_t + \sum_{i=1}^p \omega_i' \Delta z_{t-i} + \varepsilon_t \quad (5)$$

(5) modeli çerçevesinde boş hipotez ve alternatif hipotez sırasıyla (6) ve (7)'de gösterilmektedir.

$$H_0: \phi_1 = \phi_2 = 0 \quad (6)$$

$$H_1: \phi_1 = \phi_2 \neq 0 \quad (7)$$

(6)'da belirtilen boş hipotezin reddedilememesi ile eşbütünleşme ilişkisinin bulunmadığı anlaşılmaktadır. Diğer yandan (7)'nin reddedilememesi durumu ise doğrusal olmayan simetrik veya asimetrik ESTAR eşbütünleşmenin varlığını göstermektedir. Katsayılara getirilen kısıtlara dayalı olarak F_{ANEC} ve F_{ANEG} test istatistikleri hesaplanabilmektedir. Hesaplanan test istatistikleri Hepsağ (2021)'de verilen kritik değerler ile mukayese edilmektedir. Eğer hesaplanan test istatistiği, kritik değerden küçük ise eşbütünleşme ilişkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Ters durumda ise simetrik veya asimetrik ESTAR eşbütünleşmenin varlığına ulaşılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta eşbütünleşmenin varlığı kabulünden sonra simetri ya da asimetri durumlarının tespit edilmesidir. Bunu tespitinde ise $H_0: \phi_2 = 0$ ve $H_1: \phi_2 \neq 0$ hipotezleri ile sınanmaktadır. F test istatistiğinin standart F dağılımına ait kritik değerlerden küçük olmadığı durumda asimetrik ESTAR eşbütünleşmenin varlığına ulaşılmaktadır. Hepsağ (2021) modelinde üç farklı veri yapısı ortaya çıkmaktadır. Bunlar ham veri (Raw Data-Case 1- sabitin ve trendin olmadığı model), ortalamadan arındırılmış veri (Demeaned Data-Case 2-sabitli model) ve trendden arındırılmış veri (Detrended Data-Case 3, sabitli ve trendli model) yapılarıdır.

Eşbütünleşme ilişkisinin bulunmadığını ifade eden boş hipotez reddedilirse, Hepsağ (2021) tarafından önerilen kısa dönemli Granger nedensellik analizi yapılabilmektedir. Nedensellik testinde iki farklı değişkenin gecikmeli değerlerinin bir diğerini açıklamada ne kadar etkili olduğu sınanmaktadır. Fakat bu açıklama gücü bir değişkenin bir diğer değişkenin sebebi veya sonucu olduğunu ortaya çıkartmaz. Granger nedensellik testi bir değişkenin bir diğer değişkene öncülük

edip etmediğini sınamaktadır (Granger, 1969). Bunun için $\Delta y_t = \phi_1 u_{t-1}^3 + \phi_2 u_{t-1}^4 + \psi \Delta x_t + \sum_{i=1}^p \omega_i' \Delta z_{t-i} + \varepsilon_t$ modelinden yararlanılmaktadır. $z_t = (y_t, x_t)' = (\ln BTC_t, \ln CO_2_t)'$ ve $x_t = (\ln CO_2_t)$ şeklindedir. Burada Ortak F testi istatistikleri, $\omega_i = 0$ ve $\psi_i = 0$ boş hipotezlerini sınamak için hesaplanmaktadır (Akkaya ve Hepsağ, 2021). $\omega_i = 0$ boş hipotezi reddedilirse, x_t 'nin y_t 'nin Granger nedeni olduğu anlaşılmaktadır. Diğer yandan $\psi_i = 0$ boş hipotezinin reddedilmesiyle y_t 'nin x_t 'nin Granger nedeni olduğu sonucuna ulaşılmaktadır

2.1. Ampirik Bulgular

Bu kısımda BTC ve CO₂ değişkenlerine ilk olarak Harvey vd. (2008) doğrusallık testi yapılmıştır. İlgili test bulguları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Harvey vd. (2008) Doğrusallık Testi

Değişken	F İstatistiği	Kritik Değerler		
		%10	%5	%1
BTC	23.22	4.605	5.991	9.210
CO ₂	16.03			

Tablo 1 sonuçları hem BTC hem de CO₂ değişkenlerinin F test istatistiklerinin, kritik değerlerden büyük olduğunu göstermektedir. F test istatistiği BTC için 23.22 iken CO₂ için ise 16.03'tür. Söz konusu değerler %1 anlamlılık düzeyinde dahi kritik değerlerden büyüktür. Dolayısıyla doğrusallık üzerine kurulan boş hipotez reddedilmektedir. Diğer bir ifadeyle BTC ve CO₂ doğrusal olmayan bir yapı sergilemektedir. Bu sonuç doğrusal olmayan ampirik yöntemlerin kullanılabileceğini göstermektedir. Tablo 2'de geleneksel birim kök testleri olan ADF ve PP'ye ait bulgular raporlanmaktadır.

Tablo 2. ADF ve PP Birim Kök Test Sonuçları

Düzye	ADF		PP	
	Sabitli Model	Sabitli & Trendli Model	Sabitli Model	Sabitli & Trendli Model
lnBTC	-0.135473	-1.914013	0.189045	-1.569290
lnCO ₂	-0.435822	-1.879277	-0.395938	-1.854216
Birinci Fark				
$\Delta \ln BTC$	-9.632873	-9.758508	-9.520802	-9.635695
$\Delta \ln CO_2$	-13.85094	-13.88034	-13.82563	-13.85318

Not: BTC değişkeni için; ADF birim kök testi için sabitli modelde %1, %5 ve %10 anlam düzeyinde kritik değerler sırasıyla -3.470934; -2.879267 ve -2.576301'dir. Sabitli & trendli modelde bu sıralama -4.015700; -3.437801 ve -3.143138'dir. ADF birim kök testinde Schwarz bilgi kriteri kullanılmıştır. PP birim kök testi için sabitli modelde %1, %5 ve %10 anlam düzeyinde kritik değerler sırasıyla -3.470679; -2.879155 ve -2.576241'dir. Sabitli & trendli modelde bu sıralama -4.015341; -3.437629 ve -3.143037'dir. CO₂ değişkeni için; ADF ve PP birim kök testleri için sabitli modelde %1, %5 ve %10 anlam düzeyinde kritik değerler sırasıyla -3.470679; -2.879155 ve -2.576241'dir. Sabitli & trendli modelde bu sıralama -4.015341; -3.437629 ve -3.143037'dir.

Tablo 2 bulgularına göre BTC ve CO₂ değişkenlerinin düzeyde birim kök süreç içerdiği tespit edilmiştir. Bu durum, test istatistiğinin mutlak değerce kritik değerden büyük olmaması ile görülmektedir. Bu durum tüm anlamlılık seviyelerinde (%1, %5 ve %10) geçerlidir. Diğer yandan ilgili değişkenlerin birinci farklarında birim kök sürece sahip olmadıkları anlaşılmaktadır. Dolayısıyla hem BTC hem de CO₂ değişkenlerinin birinci farkı alındığında durağan oldukları elde edilmektedir. Bu durum istatistiki olarak %1 anlamlılık düzeyinde hem ADF hem de PP birim kök testlerine göre geçerlidir. Böylece iki değişkeninde I(1) olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Söz konusu sonuç hem sabitli hem de sabitli ve trendli modelde geçerlidir. Harvey vd. (2008) doğrusallık testi sonucunda BTC ve CO₂ değişkenlerinin doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğu tespit edilmişti. Dolayısıyla doğrusal olmayan birim kök testleri yapılabilmektedir. Tablo 3'te doğrusal olmayan testler arasında yer alan Leybourne vd. (1998) test sonuçları yer almaktadır.

Tablo 3. Leybourne vd. (1998) Doğrusal Olmayan Birim Kök Test Sonuçları

CO ₂	Hesaplanan Test İstatistiği	Kırılma Tarihi	Sonuç
Model A	-3.77950	Ekim-2011	Birim kök vardır.
Model B	-3.90726	Eylül-2014	Birim kök vardır.
Model C	-4.10349	Ağustos-2011	Birim kök vardır.
BTC	Hesaplanan Test İstatistiği	Kırılma Tarihleri	Sonuç
Model A	-3.34792	Ağustos-2013	Birim kök vardır.

Model B	-3.68284	Mayıs-2021	Birim kök vardır.
Model C	-4.07342	Temmuz-2016	Birim kök vardır.

Not: %10; %5; %1 anlam düzeyinde kritik değerler Model A, B ve C için sırasıyla 3.851; -4.161; -4.761; -4.337; -4.629; -5.201; -4.572; -4.867; -5.435 şeklindedir. Uygun gecikme uzunluğunun tespitinde Akaike kriteri kullanılmış ve iki değişken içinde 1 olarak hesaplanmıştır. Gözlem sayısı 164'tür.

Tablo 3 bulgularına göre hem CO₂'nin hem de BTC'nin düzeyde Model A, B ve C'ye göre birim kök süreç içerdiği görülmüştür. Söz konusu değişkenler üç modele göre de %5 anlamlılık seviyesinde birim kök sürece sahiptir. Tablo 4'te Harvey ve Mills (2002) test sonuçları yer almaktadır.

Tablo 4. Harvey ve Mills (2002) Doğrusal Olmayan Birim Kök Test Sonuçları

CO ₂	Hesaplanan Test İstatistiği	Kırılma Tarihleri	Sonuç
Model A	-4.52879	Eylül-2011; Temmuz-2020	Birim kök vardır.
Model B	-4.64231	Eylül-2014; Mart-2018	Birim kök vardır.
Model C	-3.64704	Haziran-2011; Kasım-2015	Birim kök vardır.
BTC	Hesaplanan Test İstatistiği	Kırılma Tarihleri	Sonuç
Model A	-4.29156	Mayıs-2013; Mayıs-2016	Birim kök vardır.
Model B	-4.91129	Mayıs-2013; Temmuz-2016	Birim kök vardır.
Model C	-4.57266	Mart-2014; Haziran-2014	Birim kök vardır.

Not: %10; %5; %1 anlam düzeyinde kritik değerler Model A, B ve C için sırasıyla -4.90; -5.20; -5.80; -5.44; -5.74; -6.36; -5.93; -6.21; -6.79 şeklindedir. Uygun gecikme uzunluğunun tespitinde Akaike kriteri kullanılmış ve iki değişken içinde 1 olarak hesaplanmıştır. Gözlem sayısı 164'tür.

Tablo 4 sonuçlarına göre CO₂ ve BTC'nin Model A, B ve C'ye göre %5 anlamlılık seviyesinde düzeyde birim kök sürece sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Geleneksel ve doğrusal olmayan birim kök sonuçlarına göre geleneksel Engle-Granger (1987) eşbütünlüşme testinin ve Hepsağ (2021) koentegrasyon testinin kullanılabilmesi anlaşılmıştır. Tablo 5'te geleneksel Engle-Granger (1987) eşbütünlüşme test sonucu yer almaktadır.

Tablo 5. Engle-Granger (1987) Eşbütünlüşme Test Sonuçları

Test İstatistiği	Olasılık Değeri
-4.372124	0.0000

Not: MacKinnon (1991) çalışmalarında geliştirilen kritik değer tabloları kullanılmıştır.

Tablo 5 bulgularına göre, Engle-Granger eşbütünlüşme testine ait eşbütünlüşmenin bulunmadığı üzerine kurulan boş hipotez reddedilmektedir. Diğer bir ifadeyle BTC ile CO₂ arasında Engle-Granger tipi eşbütünlüşme ilişkisi bulunmaktadır. Güncel doğrusal olmayan eşbütünlüşme testleri arasında yer alan Hepsağ (2021) koentegrasyon testinin uygulanmasında değişkenlerin ham, ortalamadan arındırılmış ve trendden arındırılmış halleri kullanılmış ve rapor edilmiştir. İlgili sonuçlar Tablo 6'da yer almaktadır.

Tablo 6. Hepsağ (2021) Eşbütünlüşme Test Sonuçları

Veri Türü	$F_{ANEG,t}$	Uygun Gecikme Uzunluğu	$F_{AS,t}$	$F_{ANEC,t}$	Uygun Gecikme Uzunluğu	$F_{AS,t}$
Ham Veri	9.49358	1	3.981447 (0.04785207)	7.00964	1	7.690708 (0.00628051)
Ortalamadan Arındırılmış Veri	7.48573	1	0.728065 (0.39489948)	6.12582	0	7.255661 (0.00788407)
Trendden Arındırılmış Veri	7.90866	1	0.388462 (0.53407465)	4.86806	0	0.005523 (0.94085691)

Not: F_{ANEG} test istatistiğine ait ham veri, ortalamadan arındırılmış veri ve trendden arındırılmış verilere ait %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeylerindeki kritik değerler sırasıyla 6.494, 4.536, 3.678; 8.112, 5.972, 5.009; 9.669, 7.351, 6.303'dür. Benzer biçimde F_{ANEC} test istatistiğine ait kritik değerler 6.767, 4.953, 4.088; 8.433, 6.325, 5.373; 10.082, 7.741, 6.655'dir. Uygun gecikme uzunluğunun tespitinde Akaike bilgi kriteri kullanılmıştır. Parantez içerisindeki ifadeler $F_{AS,t}$ testine ait olasılık değerleridir.

Tablo 6 sonuçlarına göre CO₂ ve BTC değişkenleri arasında eşbütünlüşme ilişkisinin bulunmadığını ifade eden boş hipotez reddedilmektedir. Bu sonuç ilgili değişkenler arasında koentegre ilişkisinin varlığını göstermektedir. Ayrıca F_{AS} sonuçları değerlendirmek için Tablo 7'de yer alan \hat{u}^3_{t-1} teriminin katsayısı incelenmelidir. Eğer \hat{u}^3_{t-1} terimi negatif değer alırsa F_{AS} sonucunda asimetrik ESTAR eşbütünlüşmenin varlığı elde edilmektedir. Tablo 7'de AESTAR-ECM uzun ve kısa dönem sonuçlarına ilişkin bulgular yer almaktadır. Ayrıca Tablo 7'de dönemlere ilişkin tanısalsal test sonuçlarına da yer verilmektedir.

Tablo 7. AESTAR-ECM Uzun ve Kısa Dönem Sonuçları

F_{ANEC} (Ham Veri)		
Uzun Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: LCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
LBTC	0.3467770874	0.0000000
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	0.03	0.8220010
Jargue-Bera	1.40	0.4566352
Ramsey	0.30	0.5787397
ARCH	0.08	0.8542208
Kısa Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: ΔLCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
\hat{u}_{t-1}^B	-0.031137282	0.0053283
\hat{u}_{t-1}^A	0.009683111	0.0062805
ΔLBTC	0.041941088	0.0780824
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	1.27	0.3122432
Jargue-Bera	1.09	0.5788621
Ramsey	0.25	0.6223082
ARCH	0.42	0.5127889
F_{ANEC} (Ham Veri)		
Uzun Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: LCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
LBTC	0.3290284332	0.0000000
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	1.36	0.2616743
Jargue-Bera	1.45	0.4288902
Ramsey	0.34	0.5289223
ARCH	0.02	0.8624520
Kısa Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: ΔLCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
\hat{u}_{t-1}^B	-0.035675479	0.0146421
\hat{u}_{t-1}^A	0.009143968	0.0478520
ΔLBTC	-0.125509212	0.0138702
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	0.01	0.9487902
Jargue-Bera	1.06	0.6021230
Ramsey	0.20	0.6771022
ARCH	0.40	0.5502662
F_{ANEC} (Ortalamadan Arındırılmış Veri)		
Uzun Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: LCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
LBTC	0.1576706479	0.0000000
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	0.01	0.9366872
Jargue-Bera	1.10	0.5619904
Ramsey	0.31	0.5897026
ARCH	0.09	0.8324533
Kısa Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: ΔLCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
\hat{u}_{t-1}^B	-0.034018723	0.0116191
\hat{u}_{t-1}^A	0.028601108	0.0078840
ΔLBTC	0.053780852	0.0147382
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	0.03	0.8082263
Jargue-Bera	1.13	0.5218812
Ramsey	0.19	0.7130635
ARCH	0.39	0.5702322

F_{ANEG} (Ortalamadan Arındırılmış Veri)		
Uzun Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: LCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
LBTC	0.1188278820	0.0000000
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	1.16	0.3165592
Jargue-Bera	1.47	0.4221719
Ramsey	0.28	0.6135182
ARCH	0.04	0.8602339
Kısa Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: ΔLCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
\hat{u}_{t-1}^3	-0.025662178	0.0872851
\hat{u}_{t-1}^4	0.009927023	0.3948994
ΔLBTC	0.163584460	0.0475311
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	1.02	0.4829802
Jargue-Bera	1.57	0.3410215
Ramsey	0.26	0.6208035
ARCH	0.49	0.4802844
F_{ANEC} (Trendden Arındırılmış Veri)		
Uzun Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: LCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
LBTC	0.0335640383	0.0000000
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	0.02	0.8411093
Jargue-Bera	1.43	0.4497732
Ramsey	0.21	0.6482902
ARCH	0.05	0.8540898
Kısa Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: ΔLCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
\hat{u}_{t-1}^3	-0.053908567	0.0500384
\hat{u}_{t-1}^4	-0.001760470	0.9408569
ΔLBTC	0.051887451	0.0166703
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	1.30	0.2873390
Jargue-Bera	1.07	0.5899122
Ramsey	0.37	0.4930292
ARCH	0.47	0.5009328
F_{ANEG} (Trendden Arındırılmış Veri)		
Uzun Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: LCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
LBTC	0.0217140727	0.0000000
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	1.38	0.2356022
Jargue-Bera	1.12	0.5685883
Ramsey	0.28	0.5902669
ARCH	0.03	0.8703782
Kısa Dönem Sonuçları		
Bağımlı Değişken: ΔLCO₂		
Bağımsız Değişken	Katsayı	Olasılık Değeri
\hat{u}_{t-1}^3	-0.074768316	0.0265955
\hat{u}_{t-1}^4	0.017752152	0.5340746
ΔLBTC	0.037453916	0.6504927
Tanısal Testler		
Breusch-Godfrey	0.03	0.8219702
Jargue-Bera	1.39	0.4790133
Ramsey	0.22	0.6219044
ARCH	0.42	0.5311083

Tablo 7'de F_{ANEC} ve F_{ANEG} istatistiklerine göre ham veri, ortalamadan arındırılmış veri ve trendden arındırılmış veri sonuçları verilmiştir. Ayrıca tüm modellere ait hem uzun hem de kısa dönem bulguları verilerek, tanısal test bulguları ortaya konulmuştur. İlk olarak tanısal test sonuçlarına göre gerek F_{ANEC} gerekse F_{ANEG} istatistiklerinin kullanılabilmesi anlaşılmaktadır. Öyle ki hem kısa hem de uzun dönem bulgularına göre otokorelasyon sorununun olmadığı, spesifikasyon hatasının bulunmadığı, normal dağılım özelliğinin sağlandığı ve değişen varyans probleminin olmadığı tespit edilmiştir. Diğer yandan uzun dönem katsayısının yorumlanabilmesi için \hat{u}_{t-1}^3 teriminin negatif olma koşulu da sağlanmaktadır. Bu sonuç F_{ANEC} ve F_{ANEG} 'e ilişkin tüm modellerde geçerlidir. Dolayısıyla Tablo 6'dan elde edilen eşbütünleşme ilişkisinin asimetric ESTAR eşbütünleşme olduğu sonucu elde edilmektedir. Bu sonuç değişkenler arasındaki ilişkiyi etkileyen aynı büyüklükteki bir şokun, uzun vadeli dengeye yönelik değerlendirme ve değer kaybı için farklı ayarlama hızlarına yol açtığı anlamına gelmektedir (Akkaya ve Hepsağ, 2022). Uzun dönem katsayıları incelendiğinde ise F_{ANEC} (ham veri) sonuçlarına göre BTC'de meydana gelen %1'lik bir artış, CO₂ emisyonunu yaklaşık %0.35 artırmaktadır. F_{ANEG} (ham veri) sonuçlarına göre BTC'de meydana gelen %1'lik bir artış, CO₂ emisyonunu yaklaşık %0.33 artırmaktadır. F_{ANEC} (ortalamadan arındırılmış veri) sonuçlarına göre BTC'de meydana gelen %1'lik bir artış, CO₂ emisyonunu yaklaşık %0.16 artırmaktadır. F_{ANEG} (ortalamadan arındırılmış veri) sonuçlarına göre BTC'de meydana gelen %1'lik bir artış, CO₂ emisyonunu yaklaşık %0.12 artırmaktadır. Son olarak F_{ANEC} (trendden arındırılmış veri) sonuçlarına göre BTC'de meydana gelen %1'lik bir artış, CO₂ emisyonunu yaklaşık %0.03 artırmaktadır. F_{ANEG} (trendden arındırılmış veri) sonuçlarına göre BTC'de meydana gelen %1'lik bir artış, CO₂ emisyonunu yaklaşık %0.02 artırmaktadır. Bu sonuçlar BTC'nin çevresel bozulmayı artırıcı etkilerini açıkça (tüm modellere göre) ortaya koymaktadır.

Son olarak değişkenler arasındaki kısa dönemli Granger nedensellik analizi yapılmaktadır. İlgili sonuçlar Tablo 8'de yer almaktadır

Tablo 8. Granger Nedensellik Testi Sonuçları

F_{ANEC} (Ham Veri)		
Boş Hipotez	F istatistiği	Sonuç
$\Delta LBTC \neq \Delta LCO_2$	3.42944 (0.03485213)	Granger nedensellik bulunmaktadır.
F_{ANEC} (Ortalamadan Arındırılmış Veri)		
$\Delta LBTC \neq \Delta LCO_2$	4.34552 (0.027724)	Granger nedensellik bulunmaktadır.
F_{ANEG} (Ortalamadan Arındırılmış Veri)		
$\Delta LBTC \neq \Delta LCO_2$	5.31446 (0.00584425)	Granger nedensellik bulunmaktadır.

Tablo 8 sonuçlarına göre kısa dönemde BTC, CO₂ nin Granger nedeni olmadığını öne süren boş hipotez reddedilmiştir. Başka bir deyişle Bitcoin, çevresel bozulmanın Granger nedenidir.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bitcoin madenciliği güçlü bilgisayarların bir matematik esasına dayanmaktadır. Söz konusu bilgisayarlar ilgili matematik problemine çözüm bulmak için yüksek seviyede enerji harcamaktadır. Söz konusu enerjinin (elektrik enerjisi) çevresel problemler yaratacağı son dönemde sıklıkla tartışılmaktadır. Bilgi ve iletişim teknolojilerinde meydana gelen değişimler geleneksel ödeme araçlarının yerini diğer araçların alacağını göstermektedir. Bu kapsamda dijital para madenciliğinin önemi artmaktadır. Bu çalışmada artan bu önemi tartışmak için güncel ampirik yöntemler aracılığıyla BTC ve CO₂ ilişkisi sınanmıştır. 2010M8-2024M3 örneklem döneminden yararlanılan çalışmada ampirik bulgular BTC'nin çevresel bozulma ile uzun dönemli ilişkisini ortaya koymuştur. Ayrıca BTC'nin çevresel bozulmayı artırdığı sonucu elde edilmiştir. Granger nedensellik analizi ise kısa dönemde BTC'den CO₂'ye doğru nedensellik ilişkisinin varlığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar Krause ve Tolaymat (2018), Dilek ve Furuncu (2019), Üçtuğ ve Ünver (2021) ve Felek vd. (2023) çalışmalarına benzerdir. Gerek literatür gerekse bu

çalışmada genel olarak BTC'nin çevre üzerindeki etkisi kanıtlanmıştır. Ancak bu etkinin pozitif ya da negatif olması BTC üretim sürecinde kullanılan enerji türü ile ilişkili olabilmektedir. Öyle ki gerek literatürdeki çalışmalar gerekse temiz enerji kaynaklarının CO₂ emisyonlarını artırdığını gösteren araştırmalar bu fikri desteklemektedir. Küreselleşmenin derinleştiği günümüzde kripto para madenciliği çalışmalarının devam edeceği tahmin edilmektedir. Bu durum çeşitli ülke merkez bankalarının BTC konusunda aldığı kararlardan anlaşılabilir. Bitcoin vb. kripto paralara karşı bazı ülke merkez bankalarının olumlu yaklaşımı göz önüne alındığında ve çalışma bulguları değerlendirildiğinde devletlere önemli görevler düştüğü değerlendirilmektedir. Özellikle dijital para madenciliğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının belli bir oranda kullanımı şartını getirilmesi önemli görülmektedir. Böylece zamanla blockchain teknolojisinin, enerji tüketimi için kullanıcı dostu bir uygulamaya dönüşebileceği ve bürokratik engellerin geleneksel uygulamalara göre daha az olması sebebiyle maliyetleri düşüreceği, verimliliği artıracığı düşünülmektedir. Diğer yandan ülke ekonomilerinin başta Kyoto Protokolü ve Paris İklim Anlaşması olmak üzere küresel ölçekteki yükümlülüklerini yerine getirmesi, bu anlaşmalara uymayan taraflara caydırıcı yaptırımlar uygulanmasının gerekliliği önemli görülmektedir. Ülkelerin fosil yakıttan elde ettiği enerji miktarını düşürerek kripto para üretiminde kullanılan enerjinin temiz enerji kaynaklarından elde edilme oranını artırıcı teşvikler ve çevre vergileri gibi adımlar atması gerekmektedir. Diğer yandan enerji yoğun madencilik süreçlerinde yaşanan çevresel bozulmanın düşürülmesi için ilgili madencilik faaliyetlerinde emisyon vergileri uygulanabilir. Bunun yanında yeni kripto projelerine çevreye duyarlı, enerji verimliliği yüksek teşvikler sağlanabilir. Yeni kurulacak işletmelerde düşük karbon salınımı taahhüdü talep edilerek, işletme faaliyetleri denetlenebilir. Bu çalışmayı takip eden araştırmalarda Bitcoin'in yanında diğer kripto para birimleri ve çeşitli ülke ekonomilerine ait borsaların ve para politikalarının çevre ile ilişkisi araştırılabilir. Böylece iktisadi yapılarda hem geleneksel hem de yeni gelişmeler ile çevresel konular daha geniş perspektifte değerlendirilerek öneriler sunulabilir. Ayrıca veri kısıtı sebebiyle çevresel bozulmayı temsilen CO₂ emisyonu kullanılmıştır. Bunun yerine veri kısıtını aşarak (örneğin panel veri analizi kullanılarak) CO₂ emisyonu yerine ekolojik ayak izi ya da karbon ayak izi gibi daha kapsamlı değişkenler kullanılabilir.

KAYNAKÇA

- Akkaya, Ş., & Hepsag, A. (2021). "Does Fuel Tax Decrease Carbon Dioxide Emissions in Turkey? Evidence from An Asymmetric Nonlinear Cointegration Test and Error Correction Model", *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 35094-35101.
- Alkan, G. (2024). Blok Zincir Teknolojisinin Uluslararası Ticaret Bağlamında Çevresel Etkileri; Bitcoin ve Karbon Ayak İzi İlişkisinin Bayesyen Yöntem ile Belirlenmesi, Doktora Tezi. Akdeniz Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Avcı, M., & Süslü, B. (2023). "Türkiye Ekonomisinde Senyoraaj Geliri, Kamu Borçlanması Gereği ve Enflasyon İlişkisi", *Sosyal ve Beşeri Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 24(53), 1-14.
- Beer, C., & Weber, B. (2015). "Bitcoin-the Promise and Limits of Private Innovation in Monetary and Payment Systems", *Monetary Policy and the Economy*, 53-66.
- Blandin, A., Pieters, G., Wu, Y., Eisermann, T., Dek, A., Taylor, S., & Njoki, D. (2020). *3rd Global Cryptoasset Benchmarking Study*. University of Cambridge, Judge Business School.
- "Board of Governors of the Federal Reserve System (US)", (2024). Monetary base. Federal Reserve Bank of St. Louis. <https://fred.stlouisfed.org/series/BOGMBASE> 24.03.2024.
- Brock, W., Dechert, W., & Scheinkman, J. (1987). *A Test for Independence Based on the Correlation Dimension (Working Paper)*. University of Wisconsin at Madison, University of Houston, and University of Chicago.

- Corbet, S., Lucey, B., & Yarovaya, L. (2021). "Bitcoin-energy Markets Interrelationships: New Evidence", *Resources Policy*, 70, 101916.
- Çil, N. (2018). *Finansal Ekonometri*. Der Yayınları, No: 450.
- Das, D., & Dutta, A. (2020). "Bitcoin's Energy Consumption: Is it the Achilles Heel to Miner's Revenue?", *Economics Letters*, 186, 108530.
- Di Febo, E., Ortolano, A., Foglia, M., Leone, M., & Angelini, E. (2021). "From Bitcoin to Carbon Allowances: An Asymmetric Extreme Risk Spillover", *Journal of Environmental Management*, 298, 113384.
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). "Distribution of the Estimators for autoregressive Time Series With A Unit Root", *Journal of the American Statistical Association*, 74(366a), 427-431.
- Dickey, D. A., & 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.
- Dilek, S., & Furuncu, Y. (2019). "Bitcoin Mining and its Environmental Effects", *Ataturk University Journal of Economics and Administrative Sciences*, 33(1), 91-106.
- Dogan, E., Majeed, M. T., & Luni, T. (2022). "Are Clean Energy and Carbon Emission Allowances Caused by Bitcoin? A Novel Time-varying Method", *Journal of Cleaner Production*, 347, 131089.
- Dreher, A., Gaston, N., & Martens, P. (2008). *Measuring Globalisation: Gauging its Consequences*. Springer.
- Engle, R. F., & Granger, C. W. J. (1987). "Co-integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing", *Econometrica*, 55(2), 251-276.
- Erdogan, S., Ahmed, M. Y., & Sarkodie, S. A. (2022). "Analyzing Asymmetric Effects of Cryptocurrency Demand on Environmental Sustainability", *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 31723-31733.
- Eşsiz, F. P. (2024). "Dijitalleşme ve Para Politikası: Merkez Bankası Dijital Parası ve Finansal İstikrar İlişkisi", *Uluslararası Ekonomi Siyaset İnsan ve Toplum Bilimleri Dergisi*, 7(4), 373-383.
- Eyüboğlu, K. (2018). "Examining Day of The Week and Month of The Year Effects in Bitcoin and Litecoin Markets", *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(1), 165-183.
- Felek, Ş., Karademir, C., & Ceylan, R. (2023). "Bitcoin ile Karbon Emisyonu İlişkisi: Doğrusal Olmayan Eşbütünleşme Analizi", *Ekonomi Politika ve Finans Araştırmaları Dergisi*, 8(1), 141-162.
- Fidan, M., Dilek, S., & Esev, A. (2019). "Dünden Bugüne Paranın Tarihi ve Türkiye'de Kağıt Para Kullanımı", *Kilis 7 Aralık Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 9(18), 141-162.
- Granger, C. W. (1969). Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods", *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 37(3), 424-438.
- Granger, C. W., & Newbold, P. (1974). "Spurious Regressions in Econometrics", *Journal of Econometrics*, 2(2), 111-120.
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic Econometrics* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Harvey, D. I., & Mills, T. C. (2002). "Unit Roots and Double Smooth Transitions", *Journal of Applied Statistics*, 29(5), 675-683.
- Harvey, D. I., & Leybourne, S. J. (2007). "Testing for Time Series Linearity", *The Econometrics Journal*, 10(1), 149-165.
- Harvey, D. I., Mills, T. C., & Xiao, B. (2008). "A Powerful Test for Linearity When the Order of Integration is Unknown", *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 12(3), 1-24.

- Heine, J., & Thakur, R. C. (Eds.). (2011). *The Dark Side of Globalization* (pp. 1-282). United Nations University Press.
- Hepsag, A. (2021). "A Unit Root Test Based on Smooth Transitions and Nonlinear Adjustment", *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 50(3), 625-632.
- Hepsag, A. (2022). *Ekonometrik Zaman Serileri Analizlerinde Güncel Yöntemler* (WinRats Uygulamalı). Der Yayınları.
- "Investing", (2024). <https://www.investing.com/> 02.04.2024.
- Jiang, S., Li, Y., Lu, Q., Hong, Y., Guan, D., Xiong, Y., & Wang, S. (2021). "Policy Assessments for the Carbon Emission Flows and Sustainability of Bitcoin Blockchain Operation in China", *Nature Communications*, 12(1), 1-10.
- Karatas, A. M., Karatas, E., Kapusuzoglu, A., & Ceylan, N. B. (2023). *The Nonlinear Relationship Between Bitcoin Mining and Carbon Emissions in the Context of Renewable Energy*. In *Renewable Energy Investments for Sustainable Business Projects* (pp. 127-139). Emerald Publishing Limited.
- Keenan, D. M. (1985). "A Tukey Nonadditivity-type Test for Time Series Nonlinearity", *Biometrika*, 72(1), 39-44.
- Kohli, V., Chakravarty, S., Chamola, V., Sangwan, K. S., & Zeadally, S. (2023). "An Analysis of Energy Consumption and Carbon Footprints of Cryptocurrencies and Possible Solutions", *Digital Communications and Networks*, 9(1), 79-89.
- Krause, M. J., & Tolaymat, T. (2018). "Quantification of Energy and Carbon Costs for Mining Cryptocurrencies", *Nature Sustainability*, 1(11), 711-718.
- Kristoufek, L. (2020). "Bitcoin and Its Mining on the Equilibrium Path", *Energy Economics*, 85, 104588.
- Leypourne, S. J., Newbold, P., & Vougas, D. (1998). "Unit Roots and Smooth Transitions", *Journal of Time Series Analysis*, 19(1), 83-97.
- Luukkonen, R., Saikkonen, P., & Teräsvirta, T. (1988). "Testing Linearity Against Smooth Transition Autoregressive Models", *Biometrika*, 75(3), 491-499.
- Mikołajewicz-Woźniak, A., & Scheibe, A. (2015). "Virtual Currency Schemes: The Future of Financial Services", *Foresight*, 17(4), 365-377.
- Mora, C., Rollins, R. L., Taladay, K., Kantar, M. B., Chock, M. K., Shimada, M., & Franklin, E. C. (2018). "Bitcoin Emissions Alone Could Push Global Warming Above 2°C", *Nature Climate Change*, 8(11), 931-933.
- Naeem, M. A., & Karim, S. (2021). "Tail Dependence Between Bitcoin and Green Financial Assets", *Economics Letters*, 208, 110068.
- Naimoğlu, M., & ÖzbeK, S. (2022). "İngiltere'de Enerji Ar-Ge Harcamaları ile Enerji Tüketimi İlişkisi: Yapısal Kırılmalı Eşbütünleşme Analizi", *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 10(1), 35-45.
- Nakamoto, S. (2008). "Bitcoin: A Peer-to-peer Electronic Cash System". <http://fastbull.dl.sourceforge.net/project/bitcoin/Design%20Paper/bitcoin.pdf> 03.02.2024.
- Oğul, B. (2022). "Türkiye'de Çevresel Teknolojik İnovasyonlar Ekolojik Ayak İzini Azaltıyor mu? ARDL Sınır Testi Analizi", *İnönü Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 409-427.
- Phillips, P. C., & Perron, P. (1988). "Testing for a Unit Root in Time Series Regression", *Biometrika*, 75(2), 335-346.

- Polemis, M. L., & Tsionas, M. G. (2023). "The Environmental Consequences of Blockchain Technology: A Bayesian Quantile Cointegration Analysis for Bitcoin", *International Journal of Finance & Economics*, 28(2), 1602-1621.
- Ramsey, J. B. (1969). "Tests for Specification Errors in Classical Linear Least Squares Regression Analysis", *Journal of the Royal Statistical Society*, 31(2), 350-371.
- Rehman, M. U., & Kang, S. H. (2021). "A Time-frequency Comovement and Causality Relationship Between Bitcoin Hashrate and Energy Commodity Markets", *Global Finance Journal*, 49, 100576.
- Roy, S., & Kemme, D. M. (2020). "The Run-up to the Global Financial Crisis: A Longer Historical View of Financial Liberalization, Capital Inflows, and Asset Bubbles", *International Review of Financial Analysis*, 69, 101377.
- Sarkodie, S. A., Ahmed, M. Y., & Leirvik, T. (2022). "Trade Volume Affects Bitcoin Energy Consumption and Carbon Footprint", *Finance Research Letters*, 48, 102977.
- Schinckus, C., Nguyen, C. P., & Chong, F. H. L. (2020). "Crypto-currencies Trading and Energy Consumption", *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(3), 355-364.
- Stoll, C., Klaaßen, L., & Gellersdorfer, U. (2019). "The Carbon Footprint of Bitcoin", *Joule*, 3(7), 1647-1661.
- "The Cambridge Centre for Alternative Finance", (2024). <https://ccaf.io/> 02.02.2024.
- Topsakal, H. (2021). Makro Ekonometri Değişkenlerdeki Değişimin Birim Kök Testi ile Analizi ve Uygulaması (Yayımlanmamış) Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- "Trading Economics", (2024). <https://tradingeconomics.com/> 02.04.2024.
- Tsay, R. S. (1986). "Nonlinearity Tests for Time Series", *Biometrika*, 73(2), 461-466.
- Tüzün, İ. (2019). İşsizlik Histerisinin Geçerliliği: Türkiye Üzerine Bir Uygulama (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- "U.S. Bureau of Labor Statistics", (2024). "Consumer Price Index for All Urban Consumers: Purchasing Power of The Consumer Dollar in U.S. City Average. Federal Reserve Bank of St. Louis. <https://fred.stlouisfed.org/series/CUUR0000SA0R> 27.03.2024.
- Üçtuğ, F. G., & Ünver, T. C. (2021). *Comparison of Carbon Footprints of Digital Currency (Bitcoin) and Gold: Determination of the Critical Exchange Rate*. In Energy, COVID, and Climate Change, 1st IAEE Online Conference, June 7-9, 2021. International Association for Energy Economics.
- Vranken, H. (2017). "Sustainability of Bitcoin and Blockchains", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 28, 1-9.
- Wątorrek, M., Drożdż, S., Kwapien, J., Minati, L., Oświecimka, P., & Stanuszek, M. (2021). "Multiscale Characteristics of the Emerging Global Cryptocurrency Market", *Physics Reports*, 901, 1-82.
- Weatherford, J. (1998). *The History of Money*. Crown Currency.
- Yılandı, V., & Tıraşoğlu, M. (2016). "Türkiye'nin Makroekonomik Zaman Serilerinin Doğrusallığının Testi", *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(2), 1-16.
- Yılmaz, M. K., & Kaplan, A. (2022). "Kriptopara Madenciliğinin Çevresel Sürdürülebilirlik Üzerine Etkileri", *Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları*, 143-174.

EXTENDED ABSTRACT*GENİŞLETİLMİŞ ÖZET***SUSTAINABILITY AND FINANCIAL MARKETS: THE IMPACT OF BITCOIN ON CARBON EMISSIONS**

Introduction and Research Purpose: Directing the energy resources of Bitcoin mining activities in a way that increases environmental quality, provides solutions to the climate crisis, prioritizes green growth, and the increasing use of clean energy resources every year will reduce the carbon footprint. These developments are seen as positive in terms of fulfilling the environmental responsibility of Bitcoin mining activities. The sustainability of Bitcoin, which is the most important representative of cryptocurrency markets, continues to be a popular topic due to its high energy consumption and environmental concerns worldwide. This study investigates the impact of Bitcoin on CO₂ emissions. The nonlinear empirical approaches used in the study distinguish the study from other studies. Another unique aspect of the study is the sample period from the period after the 2008 Global Financial Crisis to the present (2010:M8-2024:M3). It is evaluated that the study will contribute to the literature on these aspects.

Methodology: In the study, unit root tests of traditional and nonlinear methods are performed. Therefore, linearity tests gain importance. There are many tests in the literature for linearity testing (Ramsey (1969), Keenan (1985), Brock et al. (1987), Harvey and Leybourne (2007), Harvey et al. (2008)). It is understood that nonlinear unit root tests can also be used in case of nonlinearity. In this context, Harvey et al. (2008) linearity test was first performed in the study. In order to use the Hepsağ (2021) nonlinear cointegration test, the stationarity order of the series must be 1. In technical terms, all series in the model must be I(1). ADF and PP unit root tests were used to determine this situation. On the other hand, Leybourne et al. (LNV) (1998), Harvey and Mills (2002) nonlinear unit root tests were also performed to investigate the existence of a unit root process at the level. The existence of a long-term relationship was determined by Engle-Granger cointegration and nonlinear cointegration tests (Hepsağ, 2021). Finally, the existence of short-term causality between the variables is investigated through the Granger causality test.

Conclusions and Recommendation: This study tested the BTC and CO₂ relationship using current empirical methods. The empirical findings in the study, which utilized the 2010M8-2024M3 sample period, revealed the long-term relationship between BTC and environmental degradation. In addition, it was concluded that BTC increased environmental degradation. Granger causality analysis showed the existence of a causal relationship from BTC to CO₂ in the short term. Both the literature and this study have proven the impact of BTC on the environment in general. However, whether this effect is positive or negative may be related to the type of energy used in the BTC production process. In fact, both the studies in the literature and the studies showing that clean energy sources increase CO₂ emissions support this idea. It is estimated that cryptocurrency mining studies will continue today as globalization deepens. This situation can be understood from the decisions taken by the central banks of various countries regarding BTC. Considering the positive approach of some central banks of countries against cryptocurrencies such as Bitcoin and the evaluation of the study findings, it is evaluated that states have important duties. It is considered important to require the use of renewable energy resources at a certain rate, especially in digital currency mining.

KATKI ORANI BEYANI VE ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ

Sorumlu Yazar <i>Responsible/Corresponding Author</i>	SEFA ÖZBEK			
Makalenin Başlığı <i>Title of Manuscript</i>	SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE FİNANSAL PİYASALAR: BİTCOİN'İN KARBON EMİSYONU ÜZERİNDEKİ ETKİSİ			
Tarih <i>Date</i>	06.09.2024			
Makalenin türü (Araştırma makalesi, Derleme vb.) <i>Manuscript Type (Research Article, Review etc.)</i>	ARAŞTIRMA MAKALESİ			
Yazarların Listesi / List of Authors				
Sıra No	Adı-Soyadı <i>Name - Surname</i>	Katkı Oranı <i>Author Contributions</i>	Çıkar Çatışması <i>Conflicts of Interest</i>	Destek ve Teşekkür (Varsa) <i>Support and Acknowledgment</i>
1	BAHAR ÖZBEK	%50	ÇIKAR ÇATIŞMASI BULUNMAMAKTADIR.	-
2	SEFA ÖZBEK	%50	ÇIKAR ÇATIŞMASI BULUNMAMAKTADIR.	-