

KARBON EMİSYONU VADELİ İŞLEM PİYASASINDA OYNAKLIĞIN TAHMİNİ: KÜRESEL KARBON VADELİ İŞLEMLERİ ENDEKSİ ÖRNEĞİ

ESTIMATION OF VOLATILITY IN CARBON EMISSIONS FUTURES MARKET: THE
EXAMPLE OF GLOBAL CARBON FUTURES INDEX

İpek M. YURTTAGÜLER¹

Öz

Günümüz dünyasında özellikle son yıllarda, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların tüketiminden kaynaklanan artan karbondioksit (CO₂) emisyonları nedeniyle küresel ısınma ve iklim değişikliği hakkında pek çok tartışma bulunmaktadır. Sanayi devriminden bu yana sürekli olarak artma eğiliminde olan CO₂ emisyonu iklim değişikliğinin en temel nedeni olarak gösterilmektedir. Birleşmiş Milletler tarafından başlatılan küresel iklim değişikliğini önleme çalışmaları zaman içerisinde Kyoto Protokolü olarak evrilmiştir. Bu protokolle birlikte, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun, iklim üzerinde tehlikeli bir etki oluşturmayacak düzeylerde dengede seyretmesi hedeflenmekte ve bu doğrultuda ülkelere çeşitli sorumluluklar yüklenmektedir. Bu noktada karbon piyasaları, sera gazı salınımının azaltılması noktasında gerek hükümetlerin gerekse de yatırımcıların oluşturduğu karbon kredi ticaretinin gerçekleştiği piyasalar olarak karşımıza çıkmakta ve son yıllarda önemi giderek artmaktadır. Çalışmada, karbon piyasalarının oynaklığı araştırılmakta ve bu oynaklığı tahmin etmek için en uygun modelin belirlenmesi hedeflenmektedir. ARCH-GARCH modellerinin kullanıldığı çalışmada, küresel karbon vadeli işlemleri endeksine ait 2.01.2018 – 02.11.2023 tarihleri arasındaki günlük veri seti kullanılmış ve oynaklık değerlendirmesinde GARCH(1,1) modelinin daha uygun bir model olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Volatilité, Koşullu Değişen Varyans Modelleri, Karbon Emisyonu Vadeli İşlem Piyasası

Abstract

In today's world, there are many discussions about global warming and climate change due to increasing CO₂ emissions resulting from the consumption of fossil fuels such as oil and natural gas. CO₂ emissions, which have tended to increase continuously since the industrial revolution, are shown as the main cause of climate change. Efforts to prevent global climate change initiated by the United Nations have evolved into the Kyoto Protocol. With this protocol, it is aimed to keep the greenhouse gas concentration in the atmosphere balanced at levels that will not have a dangerous impact on the climate, and various responsibilities are imposed on countries in this regard. Carbon markets appear as markets where carbon credit trading is carried out by both governments and investors in order to reduce greenhouse gas emissions, and their importance has been increasing in recent years. In the study, the volatility of carbon markets is investigated and it is aimed to determine the most appropriate model to estimate this volatility. Using ARCH-GARCH models, the daily data set of the global carbon futures index between 2.01.2018 and 02.11.2023 is used and it is concluded that the GARCH (1,1) model is a more appropriate model in volatility evaluation.

Keywords: Volatility, Conditional Heteroskedasticity Models, Carbon Emission Futures Market

¹ Dr. Öğrt. Üyesi, İstanbul Üniversitesi, İktisat Fakültesi, İktisat Bölümü, [ipeksa@istanbul.edu.tr](mailto:ipek@istanbul.edu.tr), Orcid: 0000-0003-3368-3787

Makale Türü: Araştırma Makalesi – Geliş Tarihi:25.03.2024 – Kabul Tarihi: 22.06.2024

DOI:10.17755/esoder.1458494

Atf için: *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 2024;23(91):1219-1235

Bu çalışma Creative Commons Atf-Gayri Ticari 4.0 (CC BY-NC 4.0) kapsamında açık erişimli bir makedir.



This work is an open access article under [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0).

1. GİRİŞ

Karbon emisyonu, son yıllarda özellikle küresel ısınmanın etkilerinin artmasıyla birlikte oldukça önemli bir gündem maddesi halini almıştır. Karbon salınımı olarak da literatürde yer bulan bu kavram, büyük oranda insan faaliyetleri sonucu meydana gelmekte, özellikle doğa üzerinde yarattığı tahribat ile ilişkilendirilmekte ve günümüzdeki araştırmalara konu olmaktadır.

Karbon emisyonu, en genel haliyle, karbon dioksit (CO₂) ve diğer sera gazlarının atmosfere salınmasını ifade etmektedir. Sera gazları, atmosferde güneş ışığını yakalamakta ve yeryüzüne geri yansıtmadan tutmaktadır, bu durum ise dünya üzerinde sıcaklık artışına neden olmaktadır. Karbon emisyonları, fosil yakıtların yanması, sanayi işlemleri, enerji üretimi, ulaşım, orman yangınları ve diğer insan etkinliklerinin bir sonucu olarak atmosfere salınmaktadır (Karaaslan, Abar, Çamkaya, 2017, 1298. Cuervo, Gandhi, 1998, 6-7).

Karbon emisyonları iklim değişikliğinin ana nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların yanması en büyük karbon emisyonu kaynağı olarak bilinmektedir. Bu emisyonlar, atmosferdeki sera gazlarının konsantrasyonunu artırarak sera etkisi nedeniyle küresel ısınmaya neden olmaktadır. Küresel ısınma, iklim değişikliği ile sonuçlanabilmekte ve bu da dünya genelinde iklim kuşaklarının sınırlarının değişmesi, deniz seviyesi yükselmesi, beklenmedik hava olayları ve diğer olumsuz etkileri beraberinde getirebilmektedir (Çetintaş, Türköz, 2017, 148-150).

Uluslararası topluluklar, karbon emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliği ile mücadele etmek amacıyla bir dizi anlaşma ve girişimde bulunmuştur. Bu girişimler arasında Kyoto Protokolü**, Paris Anlaşması*** gibi küresel anlaşmalar ve fosil yakıtların kullanımını azaltmaya yönelik politikalar bulunmaktadır. Bu iki anlaşma da temelde küresel ısınma ve iklim değişikliği ile mücadele etmeyi hedeflemekle birlikte aralarındaki en temel farklılık Kyoto Protokolü'nün sadece gelişmiş ülkeleri kapsayacak şekilde ele alınmasına karşılık Paris Anlaşması'nın tüm ülkelerin sera gazı salınımını azaltmaya yönelik adım atılmasıdır. Bu açıdan bakıldığında, bu anlaşmalar tüm dünya ülkelerini kapsayan ve karbon emisyonlarını azaltmak, iklim değişikliği etkilerini hafifletmek ve gelecek nesiller için daha sürdürülebilir bir dünya yaratmak için önemli adımlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Karbon emisyonlarının azaltılması, uzun vadede çevresel ve ekonomik faydalar sağlayabilmekte, ancak bu geçiş süreci ekonomik dengesizliklere ve zorluklara neden olabilmektedir. Bu nedenle, ekonomik etkileri hafifletmek ve sürdürülebilir bir geçiş sağlamak için uygun politika ve stratejiler geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Karbon emisyon piyasaları ise sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik ekonomik bir mekanizma sağlayan finansal piyasalardır. Bu piyasalar, sera gazı emisyonlarını azaltmak ve sınırlamak amacıyla uygulanan çeşitli iklim değişikliği politikalarını desteklemek amacıyla tasarlanmıştır. Karbon emisyon piyasalarının sera gazı emisyonlarını azaltma amacının yanı sıra ekonomik teşvikler yaratmak ve işletmeleri, kuruluşları ve devletleri bu emisyonları

** Kyoto Protokolü, küresel iklim değişikliği ile mücadele amacıyla uluslararası düzeyde yapılmış bir anlaşmadır. Tam adıyla "Kyoto İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin Protokolü" olarak bilinir. Kyoto Protokolü, 11 Aralık 1997 tarihinde Japonya'nın Kyoto şehrinde düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'nda kabul edilmiştir. Protokol, 16 Şubat 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir.

*** Paris Anlaşması, iklim değişikliği ile mücadele amacıyla uluslararası bir çerçeve oluşturan anlaşmadır. Tam adı "Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi altında Paris Anlaşması"dır. Anlaşma, 2015 yılında Fransa'nın başkenti Paris'te düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'nda (COP21) kabul edilmiştir. COP21, 30 Kasım - 12 Aralık 2015 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir.

azaltma çabalarına katılmaya teşvik etmek gibi amaçları da bulunmaktadır (Azari, 2014, 1-3). Bu sebeplerle karbon piyasası işlemleri günümüzde oldukça aktif bir yapıya dönüşmüştür. Öte yandan bu piyasaların, Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması gibi uluslararası iklim değişikliği anlaşmaları ile de uyumlu olduğu kabul edilmektedir. Bu sayede karbon piyasası düzenlemelerine katılan ülkelerin sayısı her geçen gün artmakta ve karbon piyasasının genel cirosu da artmaya devam etmektedir.

Karbon emisyon ticaretine ilişkin literatürde iki temel yaklaşım bulunmaktadır (Arı, 2010, 56-57):

1. Sınırla ve Ticaretini Yap (Cap and Trade): Bu yaklaşım, hükümetlerin bir ülke veya bölge içinde belirli bir emisyon sınırı (kota) belirlediği bir sistemdir. Emisyon sınırları genellikle bir ülkenin veya bölgenin toplam sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla belirlenir. Emisyon kotalarını aşan işletmeler veya kuruluşlar, fazla emisyonlarını azaltmak için karbon kredileri satın alabilirler. Diğer yandan, emisyonlarını kotalarla uyumlu bir şekilde sınırlayan işletmeler kota fazlası karbon kredileri satabilirler. Bu sistemin temel amacı, toplam sera gazı emisyonlarını sınırlamak ve emisyonları azaltmak için ekonomik bir teşvik sağlamaktır.

2. Taban – Sertifika Sistemi: Bu yaklaşım, önceden belirlenmiş belirli bir dönemdeki emisyon değeri baz alınarak bir sınırlandırma getirilmesi ilkesine dayanmaktadır. Karbon kredilerinin serbest piyasada ticaretine dayalıdır. Karbon kredileri, sera gazı emisyonlarını azaltma veya kompanse etme çabalarının bir sonucu olarak elde edilen birimlerdir. İşletmeler veya kuruluşlar, emisyonlarını azalttıklarında veya sera gazı emisyonlarını absorbe eden projelere yatırım yaptıklarında karbon kredileri elde edebilirler. Bu kredileri serbest piyasada alım satım yaparak kullanabilirler.

Emisyon ticaretinde uygulanan bu iki sistemde de katılımcıların belirlenen hedeflere ulaşabilmek adına ya doğrudan emisyonlarını azaltarak emisyon azaltıcı tedbirler alması gerekmektedir ya da piyasadan emisyon sertifikası satın alması beklenmektedir. Bu noktada firmaların genellikle emisyonu daraltmak için belirli projeleri uygulama maliyetine katlanmak yerine emisyon sertifikası alma yolunu tercih ettikleri göze çarpmaktadır. Bu şekilde emisyonu azaltma maliyetine görece olarak daha az katlanmış olmaktadır (Edwards, 2008, 7'den aktaran Arı, 2010, 56).

Karbon emisyonu vadeli işlem piyasası (Carbon Emission Futures) ise karbon emisyon hakları veya karbon kredileri gibi karbon emisyonlarıyla ilgili finansal enstrümanların alım satımının yapıldığı bir piyasadır. İklim borsası olarak da bilinen bu piyasalar genellikle sera gazı emisyonları ile ilgili karbon ticareti veya emisyon ticaretini kolaylaştırmak için kurulmuştur. Bu piyasa, çevresel sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği ile mücadele amacıyla kurulmuş olup gerekli düzenlemelerin yapıldığı bir piyasadır. Temel amacı, emisyon azaltma hedeflerine ulaşma çabalarını teşvik etmek ve sürdürülebilirlik amacıyla karbon emisyonlarını kontrol altına almak olan bir ticaret platformunu ifade etmektedir. Öte yandan, bu piyasalar karbon pazarlarındaki fiyat dalgalanmalarından kaynaklanan belirsizlikleri azaltmak ve işletmelere, karbon uyumluluğu veya emisyon azaltma hedeflerine ulaşma konusunda finansal bir strateji geliştirme fırsatı sunmaktadır. Bu piyasalar, karbon emisyonlarını kontrol altına almak ve sürdürülebilir bir geleceğe yönelik çabalara destek sağlamak için önemli bir rol oynamaktadırlar (Çetintaş, Türköz, 2017, 155-158. Gürbüz, Karataş Aracı, Bekçi, 2019, 429. Arı, 2010, 148-149)

İklim borsaları, katılımcılara emisyon kotaları veya karbon kredileri gibi finansal enstrümanları alıp satma imkanı sunar. Bu enstrümanlar, bir kuruluşun belirli bir dönemde yaydığı sera gazı emisyonlarını temsil eder. Emisyon kotası, bir kuruluşun belirli bir miktarda

sera gazını atmosfere salma hakkını ifade eder. Bir kuruluş, emisyonları belirlenmiş bir seviyenin altında tutarsa, fazla kota satma veya gelecekteki emisyon ihtiyaçları için saklama hakkına sahip olabilir. Tersine, emisyonları belirlenmiş sınırın üzerine çıkarsa, eksik kotaları satın alma veya yaptırımlarla karşılaşma riskiyle karşı karşıya kalabilir (Elitaş, Çetin, 2011, 54).

Karbon Emisyonları Vadeli İşlemleri, karbon emisyonlarına dayalı finansal türev ürünlerdir. Bu tür vadeli işlemler, karbon emisyonlarının ticaretine ve fiyat dalgalanmalarına karşı korunma (hedging) veya spekülasyon amacıyla kullanılır. Karbon emisyonları vadeli işlemleri, emisyonlarını azaltma veya uyumlu hale getirme yükümlülüğüne sahip olan işletmeler veya kuruluşlar için risk yönetimi aracı olarak önemli bir rol oynamaktadır.

Dünya üzerinde en çok işlem hacmine sahip borsalar ise şunlardır (Akkaya, Uzar, 2012, 72-73): Avrupa Enerji Borsası, Avrupa İklim Borsası, Chicago İklim Borsası, Çin Emisyon Sistemi ve Piyasası, Montreal İklim Borsası, Avustralya İklim Borsası ve Asya Karbon Global borsaları.

Türkiye’de ise Kyoto Protokolü’nün emisyon ticaretinin sağlanması noktasındaki esneklik mekanizmasından faydalanılmasa da sosyal sorumluluk yaklaşımı ile kurulan Gönüllü Karbon Piyasası bulunmaktadır. Gönüllü Karbon Piyasası, dünya çapındaki karbon piyasaları örnekleri ile karşılaştırıldığında oldukça küçük bir yüzdeyi oluşturmasına karşın ilerleyen yıllarda daha etkin kullanım imkanı ile birlikte geliştirilmeye açık bir piyasadır (Gürbüz, Karataş Aracı, Bekçi, 2019, 430).

Çalışmada, karbon emisyonu vadeli işlem piyasasına ilişkin küresel karbon vadeli işlemleri endeksine ait 02.01.2018 - 02.11.2023 tarihlerini kapsayan günlük veri seti kullanılarak oynaklığın tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Karbon emisyonu vadeli işlem piyasalarına ilişkin ampirik literatürün oldukça sınırlı olduğu göze çarpmaktadır. Öte yandan karbon piyasasının istikrarlı gelişimi için, karbon vadeli işlem piyasalarındaki fiyatların oynaklığı ve bu piyasaların özelliklerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Uluslararası iklim ve enerji konferansları, geleneksel enerji fiyatlarındaki anormal değişiklikler vb durumlar oynaklığı etkilemekte ve karbon ticareti piyasasında şoklara neden olmaktadır. Bu piyasalardaki fiyatların daha iyi tahmin edilmesi, yatırımcıların risk kontrol yeteneklerini artırmakta ve politika yapıcılara, finansal kurumlara ve işletmelere piyasa verimliliğini değerlendirmesi ve risk yönetimi yapabilmeleri noktalarında karar desteği sağlamaktadır. Tüm bu gerekçelerle, karbon vadeli işlemler piyasalarındaki oynaklığın incelenmesi büyük önem kazanmaktadır. ARCH/GARCH modelleri kullanılarak karbon emisyonu vadeli işlem piyasalarının oynaklık tahmininin literatürde az yer bulması nedeniyle de bu çalışmanın bir katkı niteliğinde olacağı tahmin edilmektedir.

Çalışmada, giriş bölümünün ardından ampirik literatüre yer verilmektedir. Karbon emisyonu vadeli işlem piyasaları oynaklığının modellenmesinde kullanılan ekonometrik yöntemle ilişkin açıklamalardan sonra veri seti ve analiz sonuçları yer almaktadır. Sonuç bölümünde ise analizden elde edilen bulgular değerlendirilmektedir.

2. AMPİRİK LİTERATÜR

Feng, Zou ve Wei (2009) Nisan 2005 ile Aralık 2008 arasındaki dönemin ele alındığı çalışmalarında Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Programından alınan verileri kullanarak doğrusal olmayan dinamik bir bakış açısıyla karbon fiyatındaki oynaklığı incelemektedir. İlk olarak, karbon fiyatı geçmiş bilgilerinin mevcut karbon fiyatına tam olarak yansıtılıp yansıtılmadığını analiz eden çalışmada sonraki aşamada karbon fiyatı geçmişinin hafızasını analiz etmek için R/S, değiştirilmiş R/S ve ARFIMA modelleri kullanılmıştır. Karbon fiyatının kısa vadeli hafızaya sahip olduğunun tespit edildiği çalışmada son olarak kaos teorisi

kullanılarak fiyat dalgalanmaları araştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, karbon piyasası hafif kaotik bir yapıda olup, fiyat dalgalanmasının sadece iç pazar mekanizmasından etkilenmediği, aynı zamanda heterojen ortamdan da etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Byun ve Cho (2013) çalışmalarında, Aralık 2008 ile Aralık 2011 dönemleri arasında günlük veri seti kullanarak Avrupa İklim Borsası karbon vadeli işlem sözleşmelerinin oynaklık tahmininde bulunmaktadır. Üç ayrı yaklaşımdan hareket edilerek yapılan analizde GARCH, EGARCH, TGARCH ve GJR-GARCH modelleri kullanılmaktadır. Elde edilen bulgulara göre GJR-GARCH modelinin EGARCH ve TGARCH modellerinden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Öte yandan karbon vadeli işlemlerinin getirisine yönelik negatif bir şokun, sonraki dönemde getiride pozitif şoktan daha yüksek bir koşullu varyansa yol açtığı belirlenmiştir.

Benschop ve Cabrera (2014) çalışmalarında, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Programında kullanılan ve karbon kredileri olarak karşımıza çıkan Avrupa Birliği Tahsisi'nin kısa vadeli spot fiyatlarını 2008-2012 yılları arasındaki günlük veri seti kullanarak analiz etmişlerdir. MS-GARCH (Markov switching GARCH) kullanıldığı çalışmada, bu modellerin diğer GARCH modellerinden açıklayıcı gücünün daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. MS-GARCH modelleri, basit GARCH modelleri kullanıldığında gözlemlenen oynaklığın kalıcılığı sorununu çözdüğü için tercih edilmektedir.

Wang v.d.(2017) çalışmalarında Çin'deki elektrik reformunun piyasa etkinliğini analiz etmektedirler. Shenzhen şehri örneğinde karbon emisyonu piyasası ele alınmıştır ve gelecekteki gelişmeler açısından bazı önerilerde bulunmaktadır. Çalışmada ARCH-GARCH modelleri kullanılmakta ve ele alınan veri seti açısından AR (2)-GARCH (1,1) modelinin en uygun model olduğu sonucuna varılmaktadır. Elde edilen bulgulara göre, Shenzhen bölgesi için, karbon emisyon ticareti piyasasında rasyonel olmayan aktörlerin, asimetrik bilginin ve çok sayıda işlem maliyetinin mevcut olduğu, bu faktörlerin varlığı ile bilgi aktarımının engellendiği, böylece katılımcıların tüm bilgileri alamadıkları sonucuna varılmıştır.

Huang v.d. (2020) çalışmalarında Shenzhen'deki 2014 – 2017 yılları arasındaki süreçte karbon emisyon ticareti getiri verilerini analiz etmişlerdir. ARCH-GARCH modellerinin kullanıldığı çalışmada, karbon emisyonu piyasasındaki getirinin oynaklık ve birikim özelliklerine sahip olduğu, diğer bir değişle büyük dalgalanmalara büyük dalgalanmaların, küçük dalgalanmalara da küçük dalgalanmaların eşlik ettiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, yatırımcılar karbon emisyon işlemleri yaptıklarında, vadeli işlemler piyasasındaki risklere karşı korunabilir ve belirli risk koşulları altında faydayı maksimuma çıkarabilirler.

Dritsaki ve Dritsaki (2020) çalışmalarında 1960 – 2014 yılları arasında AB-28'de CO₂ emisyonlarını tahmin etmek için en uygun modeli araştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaca ulaşmak için, doğrusal ARIMA modeli ve ARCH modelinin koşullu varyansı ile birleştirilmiş bir otoregresif entegre hareketli ortalama (ARIMA) (1,1,1)-otoregresif koşullu değişen varyans (ARCH) (1) modeli kullanılmıştır. ARIMA(1,1,1)-ARCH(1) modelini tahmin etmek için hem dinamik hem de statik bir süreç uygulanmıştır. Tahmin sonuçlarına göre, statik prosedürün dinamik prosedüre göre daha iyi bir tahmin sağladığını ortaya çıkarılmıştır.

Yu v.d.(2022) çalışmalarında, karbon fiyatı getirilerinin değişkenliğini ve Avrupa Birliği'nin (EUETS) emisyon ticaret sistemindeki (EUETS) ve Hubei'deki Çin karbon pilot pazarlarındaki fiyat dalgalanmalarının dinamik özelliklerini analiz etmek için değiştirilmiş bir ICSS-GARCH modeli oluşturmaktadırlar. 2013 – 2020 yılları arasındaki günlük veri setinin kullanıldığı çalışmada karbon fiyatı getirilerindeki dalgalanmaların kaldıraç etkisine sahip olduğu ve olumsuz haberlerin piyasa üzerindeki etkisinin olumlu haberlerden daha güçlü

olduğu sonucuna varılmıştır. Karbon piyasası düzenleyicilerine de, karbon fiyatı izlemesini geliştirmeleri ve ticaret risklerini azaltmak için karbon piyasasındaki kısa vadeli şoklara odaklanmaları gerektiği önerilerinde bulunulmuştur.

Kalafate ve Khiari (2023) çalışmalarında 2 Ocak 2015 - 17 Şubat 2023 tarih aralığını kapsayan günlük veri setini kullanarak, karbon emisyonları vadeli işlem piyasaları ile su ve emtia piyasalarının borsa oynaklığının yapısını ve özelliklerini GARCH modellerini kullanarak incelemektedirler. Elde edilen bulgulara göre, ele alınan piyasaların getirileri üzerinde finansal kaldıracın etkisinin olduğunu ortaya çıkarmıştır. Finansal kaldıracın varlığının tespit edilmesi ile birlikte negatif şokların pozitif şoklara göre volatilitiyi daha fazla artırdığı sonucuna varılmıştır.

Villar-Rubio, Huete-Morales ve Galán-Valdivieso (2023) çalışmalarında 2013-2020 yılları arasındaki günlük veri seti kullanılarak Avrupa karbon vadeli fiyatlarının oynaklığını analiz etmişlerdir. ARCH – GARCH modellerinin uygulandığı çalışmada, EGARCH (1,1) modelinin fiyat oynaklığını tanımlama konusunda en iyi model olduğu tespit edilmiştir. Ele alınan dönem içerisinde, belirli bir zaman aralığında fiyatların sürekli artış eğiliminde olduğu, sonrasında ise daha yüksek fiyatlarla daha istikrarlı bir dönemin geliştiği öngörülmektedir. Bu durumun, hem şirketleri hem de bireysel enerji yatırımcılarını karbon piyasasındaki risk yönetimine ilişkin kararlar alırken proaktif olmaya doğru sevk ettiği şeklinde yorumlanmıştır.

Kuziboev v.d.(2023) çalışmalarında Özbekistan'daki karbondioksit emisyonlarının değişkenliğini araştırmaktadır. Bu amaçla, yıllık karbondioksit emisyon verileri için 1925-2021 dönemini kapsayan ARCH - GARCH modelleri kullanılmaktadır. Sonuçlar volatilité değerlendirmesinde ARCH modelinin GARCH modelinden daha yeterli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Özbekistan'da karbondioksit emisyonlarının değişkenliğinin çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Politika yapıcıların, karbondioksit emisyonlarını azaltmaya yönelik çevre politikası önlemlerinde bu emisyonların yüksek değişkenliğini dikkate alması gerektiği önerilmiştir.

Karbon piyasası ile ilgili literatür incelendiğinde, farklı ekonometrik yöntemler kullanılarak farklı analizlerin uygulandığı göze çarpmaktadır. Bu çalışmaya konu olan ARCH-GARCH yöntemi kullanılarak oynaklık tahmininin yapıldığı literatür örnekleri yukarıda sıralanmıştır. Bu örnekler doğrultusunda karbon emisyonu vadeli işlemler piyasaları veri setlerinin farklı oynaklık yapılarına sahip olduğuna ilişkin genel bir kabul görüşten bahsetmek mümkündür. Literatürde var olan çalışmaların büyük bir kısmı, karbon emisyonu vadeli işlemler piyasası için negatif şokların etkisinin pozitif şoklara oranla daha fazla olduğuna işaret etmektedir.

3. EKONOMETRİK YÖNTEM

3.1. Otoregresif koşullu değişen varyans (ARCH) modeli

ARCH (Otoregresif Koşullu Değişken Varyans) modeli, finansal piyasalardaki ve diğer zaman serisi verilerindeki oynaklığı modellemek ve tahmin etmek için ekonometri ve zaman serisi analizinde kullanılan istatistiksel bir modeldir (Songül, 2010, 4-5). 1980'lerin başında Robert F. Engle tarafından geliştirilmiş ve kendisine 2003 yılında Nobel Ekonomi Ödülü'nü kazandırmıştır.

ARCH modelinin altında yatan temel kavram, bir zaman serisindeki volatilitenin veya varyansın dinamik doğasını kapsamaktır. Çok sayıda finansal ve ekonomik zaman serisinde tutarlı bir varyans (homoskedasticity) varsayımı geçersizdir; bu da verilerin volatilitesinin zaman içinde dalgalandığını göstermektedir. ARCH modeli, bir zaman serisinin koşullu

varyansını önceki gözlemlerin bir fonksiyonu olarak formüle ederek bu sorunu bertaraf etmektedir.

ARCH modeli ilk olarak 1982 yılında İngiltere'deki enflasyonist ortamı açıklamak amacıyla Engle tarafından ortaya atılmıştır. Zaman içerisinde diğer çeşitli değişkenlere de uygulanmıştır. Engle'in Birleşik Krallık enflasyon değişkenini analiz ettiği 1982'deki bu çalışması, enflasyon değişkeninin hata terimi varyansının sabit olmadığını ve geçmiş değerlere bağlı olduğunu ortaya koymuştur; bu da Birleşik Krallık enflasyon değişkeninde hata terimi varyansları arasında otokorelasyonun varlığına işaret etmektedir. Bu bulguya dayanarak Engle, bu otokorelasyonu hesaba katacak şekilde oluşturulan ARCH modelinin geliştirilmesini önermiştir (Engle, 1982, 987).

Geleneksel zaman serisi modellerine göre hata terimi varyansının sabit kaldığı varsayılmaktadır. Bu modeller kapsamında incelendiğinde, değişen varyansın (heteroskedastisite) varlığında en küçük kareler tahmin edicisinin tarafsız ve tutarlı özelliklerini koruduğu ancak parametre tahmininde istatistiksel olarak anlamsız sonuçlar verdiği görülmektedir. Sonuç olarak heteroskedastisite sorununun ele alınması veya varyanstaki bu değişkenliğe uyum sağlayacak modeller geliştirilmesi zorunlu hale gelmektedir (Songül, 2010, 4).

Engle'nin (1982) çalışmasıyla hata terimi varyansı ile bir önceki döneme ait hata terimlerinin kareleri arasında bir ilişki kurulmuştur. Bir başka deyişle, sabit varyans varsayımı terk edilmiştir. ARCH modeli ile değerlendirmeye konu olan zaman serisinin oynaklığının modellenmesi için bu oynaklığı tanımlayabilecek bağımsız bir değişkenin modele dahil edilmesi gerekmektedir (Enders, 2004, 112-113).

Sabit varyans varsayımından uzaklaşılması durumunda koşullu varyans AR(q) süreci olarak tanımlanır.

$$\hat{\varepsilon}_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 \hat{\varepsilon}_{t-1}^2 + \alpha_2 \hat{\varepsilon}_{t-2}^2 + \dots + \alpha_q \hat{\varepsilon}_{t-q}^2 + \nu_t \quad (1)$$

Denklem (1) ARCH modelinin en genel hali olarak tanımlanmaktadır. Hata terimlerinin geçmiş değerleri ile olan ilişkisine dayanan bu yaklaşım ile birlikte $\hat{\varepsilon}_t^2, \hat{\varepsilon}_{t-1}^2, \hat{\varepsilon}_{t-2}^2, \dots, \hat{\varepsilon}_{t-q}^2$ hata terimi ve onun geçmiş değerlerini sembolize etmektedir. $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q$ değişkenleri otoregresif parametrelerdir ve bu değerlerin sıfır olması, varyans değerinin α_0 değerine eşit olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla ele alınan ekonomik değişkene ait koşullu varyans, denklem (1)'de ele alınan otoregresif süreç doğrultusunda ortaya çıkmaktadır (Enders, 2004. Gürsakal, 2009).

Ekonomik değişkenlere ait ARCH etkilerinin varlığının belirlenmesine yönelik olarak ise özel bir test geliştirilmiştir. Denklem (1)'in tahmin süreci otoregresif (autoregressive model-AR(q)) modeli olarak ele alınmakta ve ARCH Lagrange çarpanları testi (ARCH Lagrange Multiplier test) ile birlikte değerlendirilerek ARCH etkisinin varlığı sınanmaktadır. ARCH LM Testi olarak da bilinen bu test, modelin hata terimlerinde ARCH etkilerinin bulunup bulunmadığını araştıran bir Lagrange çarpanı testidir. Lagrange çarpanı metodu bir fonksiyonun maksimum ve minimum noktalarını bulmak için kullanılan bir yöntemdir ve bu sayede oynaklığın belirlenmesi hedeflenmektedir. ARCH LM testi istatistiksel değeri $LM = (T - q)R^2$ formülüyle hesaplanır ve q serbestlik derecesine sahip bir χ^2 dağılımı içerir. Buna göre;

$$\begin{aligned} H_0 &= \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_q = 0 \\ H_1 &= \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \dots \neq \alpha_q \neq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

hipotezler test edilir. Bulgulara göre $LM_{ARCH} < \chi_q^2$ table ise H_0 hipotezi reddedilir ve bu şekilde ARCH etkisinin varlığı kabul edilir (Gürsakal, 2009. Özden, 2008).

ARCH modelinin birçok dikkate değer özelliği Nargeleçekenler (2011) ve Songül (2010) gibi çalışmalarda açıklanmıştır. Koşullu varyans parametresinin pozitif bir değere sahip olması gerekmektedir. Benzer şekilde $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ parametrelerinin tümü pozitif olmalıdır. Spesifik olarak, " $\alpha_i \geq 0$ " olması gerekir; burada $\alpha_0 > 0$ ve $i=1,2,\dots,p$ 'dir. $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n=0$ 'ın sifıra eşit olması durumunda varyans α_0 'a eşit olacaktır. Ayrıca her bir α_n 'nin veya tüm α_n 'lerin toplamının 1'den küçük olması önemlidir. Bu kısıtlama ARCH sürecinin kararlılığını sağlar.

1982 tarihinde Engle ile birlikte ortaya atılan ARCH modeli, ilerleyen yıllarda çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır. Bollerslev (1986), Engle, Lilien ve Robins (1987), Nelson (1991) ve Baillie, Bollerslev ve Mikkelsen'in (1996) çalışmaları, ARCH modelinin geliştirilerek geliştirilmesi üzerine yapılmıştır. Bu gelişmeler sonucunda hareketli ortalama bileşeni de içeren GARCH (Genelleştirilmiş Otoresif Koşullu Değişken Varyans) modelleri ortaya atılmıştır. Bu modeller, diğer çeşitli kullanımların yanı sıra risk yönetiminde, opsiyon değerlemesinde ve portföy optimizasyonunda kritik bir faktör olan volatilitiyi simüle etmek ve tahmin etmek için finans alanında geniş uygulama alanı bulmaktadır.

3.2. Genelleştirilmiş Otoresif Koşullu Değişken Varyans (GARCH) Modeli

ARCH modeli, hata terimlerinin bir otoresif (AR) sürece uyduğu varsayımına dayanan koşullu bir değişken varyans modelidir. Bollerslev tarafından 1986 yılında ortaya atılan GARCH modeli, hata terimlerinin otoresif hareketli ortalama (ARMA) sürecine bağlı olduğunu öne sürmektedir. Bu varsayım GARCH modelinin gelişiminin temelini oluşturmaktadır (Songül, 2010, 14).

GARCH modeli, finansal zaman serileri gibi değişkenlerin volatilitesinin (varyansının) zaman içinde nasıl değişebileceğini modellemek için kullanılan bir istatistiksel modeldir. GARCH modeli, ARCH modelinin geliştirilmiş bir versiyonudur ve daha fazla esneklik sağlar. GARCH modeli, ARCH modeline ek olarak, geçmiş dönemlerin koşullu varyanslarını da dikkate alarak volatilitenin nasıl değiştiğini daha ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır. Bu nedenle, GARCH modeli, finansal piyasalardaki volatilitate tahmini, risk yönetimi ve portföy optimizasyonu gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Şahin, 2023, 574-577. Özden, 2008, 343).

GARCH modelinin farklı varyans yapılarına ve daha karmaşık zaman serilerine uyarlanmış birçok varyantı vardır, ve bu varyantlar genellikle GARCH(1,1), GARCH(p,q), EGARCH (Exponential GARCH), TGARCH (Threshold GARCH) ve diğerleri gibi isimlerle anılır. Bu modeller, değişken volatilitiyi daha iyi modellemek ve finansal risk analizi yapmak için kullanılır (Çalışkan Çavdar, Aydın, 2017, 701-702).

GARCH(p,q) modelinin en genel gösterimi şu şekildedir (Bollerslev, 1986, s. 308-309):

$$\varepsilon_t | \psi_{t-1} \sim N(0, h_t), \quad (3)$$

$$h_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^p \beta_i h_{t-i} = \alpha_0 + A(L)\varepsilon_t^2 + B(L)h_t \quad (4)$$

Denklemden yer alan h_t ortalaması sıfır, varyansı bir olan tesadüfi bir değişken olarak değerlendirilirken ε_t ise hata terimini ifade etmektedir. Yukarıdaki denklemlerle ifade edilen GARCH modelinde bazı kısıtların karşılanması gerekmektedir. Bu kısıtlar, $p \geq 0, q > 0; \alpha_0 > 0, \alpha_i \geq 0, i = 1, \dots, q, \beta_i \geq 0, i = 1, \dots, p$ şeklinde sıralanabilmektedir (Bollerslev, 1986, s. 309).

ARCH ve GARCH modelleri, koşullu varyansın ölçülmesinde ve finansal oynaklığın belirlenmesinde literatürde sıklıkla başvurulan modellerdir. Bu doğrultuda çalışmada ICE küresel karbon vadeli işlemleri endeksine ait günlük veri seti kullanılarak oynaklığı tahmin etmek adına en uygun model tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda ilk olarak endeksin doğal logaritması alınarak durağanlık analizine başvurulmuştur. Ardından ARCH ve GARCH modelleri uygulanmış ve ARCH-LM testi ile oynaklığın varlığı sınanmıştır. Son olarak ise bu modeller arasından en uygun modelin belirlenmesi aşaması gerçekleştirilmiştir.

4. VERİ SETİ ve ANALİZ SONUÇLARI

Çalışmada 2.01.2018 – 02.11.2023 tarihleri arasını kapsayan ICE küresel karbon vadeli işlemleri endeksine ait günlük veri seti kullanılmaktadır. Araştırmaya konu olan bu seri dünyada en aktif olarak ticareti yapılan dört karbon piyasasındaki fiyatlandırmalardan oluşmaktadır. Bunlar: 2005'te başlayan Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Planı (AB ETS), 2013'te başlayan Batı İklim Girişimi (Kaliforniya Emisyon Üst Sınırı ve Ticaret Programı) , 2009 yılında kurulan Bölgesel Sera Gazı Girişimi (RGGI) ve 2021 yılında oluşturulan Birleşik Krallık Emisyon Ticaret Planı (UK ETS). Bu piyasalar, dünyadaki en büyük bölgesel ekonomilerden bazılarını ve ikincil ekonomileri temsil etmektedir. ICE'nin vadeli işlem piyasalarında işlem gören programlara yönelik vadeli işlem piyasası, tüm karbon bazlı vadeli işlem sözleşmelerindeki hacmin çoğunluğunu oluşturmaktadır². Ele alınan bu serinin oynaklık tahminini yapılabilmesi adına en sıklıkla başvurulan yöntemler olan ARCH - GARCH modellerine başvurulmuştur.

Doğal logaritması alınarak analize dâhil edilen veri seti öncelikli olarak durağanlık testlerine tabi tutulmuştur. Durağanlık, zaman serisi analizleri için ilk adım olarak başvuru ve seriye dair önsel bir çıkarsama yapma imkanı sunan bir yöntemdir. Literatürde sıklıkla karşımıza çıkan Augmented Dickey Fuller (ADF) ve Phillips Perron (PP) birim kök testleri uygulanarak durağanlık analizi gerçekleştirilmiştir. Karbon Emisyonları Vadeli İşlem Piyasalarına ait durağanlık test sonuçları Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1: Birim kök test sonuçları

	Karbon Emisyonu Vadeli İşlemleri	
	Test İstatistiği	%5 Kritik Değer
ADF birim kök testi	-2.597362	-3.412803
PP birim kök testi	-2.670878	-3.412803

Karbon Emisyonu Vadeli işlemler piyasasına ilişkin birim kök test sonuçları incelendiğinde, ADF ve PP testlerine göre %5 anlamlılık düzeyinde, test istatistiği değerlerinin kritik değerlerden mutlak değer anlamında küçük olması neticesinde serinin durağan olmadığı belirlenmiştir. Bu şartlar altında, serinin birinci dereceden farkı alınması halinde durağan olup olmadığı araştırılmaktadır.

² Ayrıntılı bilgi için bkz: <https://www.ice.com/fixed-income-data-services/index-solutions/commodity-indices/carbon-futures>

Tablo 2’de birinci dereceden farkı alınan d(karbon) serisinin, elde edilen test sonuçlarına yer verilmektedir.

Tablo 2: Birinci dereceden farkı alınmış serinin birim kök test sonuçları

	d(Karbon)	
	Test İstatistiği	%5 Kritik Değer
ADF birim kök testi	-25.59683	-3.412807
PP birim kök testi	-39.89789	-3.412805

Birinci dereceden farkı alınan karbon emisyonu vadeli işlemler piyasası serisinin durağanlık test sonuçları incelendiğinde ise %5 anlamlılık seviyesinde, test istatistiği değerlerinin kritik değerlerden mutlak değerce daha yüksek olması sonucunda ele alınan veri setinin durağan olduğu sonucuna varılmaktadır.

Oynaklığın tahmini için başvurulan ARCH-GARCH modellerinin tahmin edilebilmesi için ilk olarak, araştırmaya konu olan değişkenlere ait ARMA modellerinden ortalama denklemlerinin tespit edilmesi beklenmektedir. Çalışmada, karbon emisyonu vadeli işlemler piyasası serisine ait parametrelerin anlamlılıkları ve model seçim kriterleri ışığında ARMA(1,1) modelinin en uygun model olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 3: Karbon Emisyonu Vadeli İşlemler Piyasası Serisi İçin ARMA(1,1) Modeli Tahmin Sonuçları

	Katsayılar	Standart Hata	t Değeri	Olasılık Değeri
Sabit	0.001500	0.000699	2.146205	0.0320
AR(1)	-0.955648	0.035137	-27.19788	0.0000
MA(1)	0.932976	0.041607	22.42343	0.0000
AIC	-4.362405			
SC	-4.348259			
Log. Olab.	3282.347			

ARMA(1,1) modeline ait hata terimlerinin ARCH etkisinde olup olmadığının belirlenmesi adına ARCH-LM testi yapılmaktadır. Bu testten elde edilen sonuçlar Tablo 4’de gösterilmektedir.

Tablo 4: ARMA(1,1) modeline ait ARCH-LM test sonuçları

F-statistic: 37.32332		Prob. F(2,1498): 0.0000		
Obs*R-squared: 71.24588		Prob.Chi-Square(2): 0.0000		
Değişken	Katsayı	Standart Hata	t Değeri	Olasılık Değeri
c	0.000549	4.92E-05	11.15880	0.0000
RESID ² (-1)	0.193214	0.025776	7.495736	0.0000
RESID ² (-2)	0.068268	0.025776	2.648506	0.0082

Tablo 4’de ARMA(1,1) modeline ilişkin ARCH etkisinin olup olmadığı araştırılmaktadır. Elde edilen bulgular ışığında, modele ait olasılık değerlerinin 0.05 anlamlılık düzeyinden küçük olması nedeniyle ARCH etkisinin olduğunu savunan alternatif hipotez kabul edilmektedir. Bu noktada seriye ilişkin kaç adet ARCH etkisinin olduğunu tespit etmek amacıyla ARCH-LM test sonuçları analiz edilmektedir. Tabloda yer alan kalıntı karelerin olasılık değerlerinin 0.05 anlamlılık düzeyinden küçük olması beklenmektedir. Dolayısıyla, karbon emisyonu vadeli işlem piyasası serisine ilişkin ARCH-LM test sonuçlarına göre iki adet ARCH etkisinin bulunduğu tespit edilmiştir. Buna göre, ARCH(2) modelinin kurulması gerekmektedir.

Tablo 5: ARCH(2) modeline ait test sonuçları

Değişken	Katsayı	Standart Hata	z Değeri	Olasılık Değeri
c	0.001851	0.000622	2.978383	0.0029
AR(1)	-0.962356	0.027117	-35.48927	0.0000
MA(1)	0.943826	0.033118	28.49899	0.0000
VARYANS DENKLEMİ				
C	0.000505	2.48E-05	20.36999	0.0000
RESID(-1) ²	0.166360	0.026206	6.348191	0.0000
RESID(-2) ²	0.159867	0.031504	5.074515	0.0000

Bu şartlar altında, ARCH(2) modeline ait denklem şu şekilde oluşturulmaktadır:

$$KARBON_t = 0.001851 - 0.962356 KARBON_{t-1} + 0.943826 \varepsilon_{t-1} \quad (5)$$

Varyans denklemi ise şu şekildedir:

$$h_t = 0.000505 + 0.166360 h_{t-1}^2 + 0.159867 h_{t-2}^2 \quad (6)$$

(6) numaralı denklem varyans denklemini ifade etmektedir. Bu denklemde yer alan tüm katsayılar pozitif büyüklükte dirler. Öte yandan, denklemde bulunan katsayıların toplamı (0.166360 + 0.159867= 0.326227) 1'den küçük bir sonuçtır. Bu değer 1'e yaklaştıkça oynaklığın görece olarak daha yüksek olduğu kabul edilmektedir. Çalışmada elde edilen bu toplam değer (0.326227) sonucuna bakıldığında, oynaklığın görece olarak zayıf olduğu şeklinde yorumlanabilmektedir.

Karbon emisyonu vadeli işlem piyasasına ilişkin ulaşılan ARCH(2) modeline ait ARCH etkisinin sınanması gerekmektedir. Bu sebeple ARCH-LM testine başvurulmaktadır. Bu teste göre, sıfır hipotez ARCH etkisinin olmadığını, alternatif hipotez ise bu etkinin varlığını test etmektedir. Buna göre, sıfır hipotezinin kabulü ARCH etkisinin yokluğuna işaret etmektedir. Tablo 6'da 1,4,8 ve 12 gecikmeye ait ARCH-LM test sonuçlarına yer verilmiştir.

Tablo 6: ARCH(2) modeline ilişkin ARCH-LM test sonuçları

F - istatistiği	0.153625	Olasılık F (1,1499)	0.6952
Gözlem *R-kare değeri	0.153814	Ki-kare olasılık değeri (1)	0.6949
F - istatistiği	7.889456	Olasılık F (4,1493)	0.0000
Gözlem *R-kare değeri	31.00809	Ki-kare olasılık değeri (4)	0.0000
F - istatistiği	7.619718	Olasılık F(8,1485)	0.0000
Gözlem *R-kare değeri	58.90903	Ki-kare olasılık değeri (8)	0.0000
F - istatistiği	5.760282	Olasılık F(12,1477)	0.0000
Gözlem *R-kare değeri	66.61424	Ki-kare olasılık değeri (12)	0.0000

Karbon emisyonu vadeli işlem piyasasına ilişkin veri setinin volatilitisini belirlemek için başvuru lan ARCH-LM test sonuçlarına göre, 1.gecikmede oynaklığın varlığından söz edilmezken 4,8 ve 12. gecikmelerde oynaklığın varlığına işaret etmektedir. Değerlendirmeye konu olan gecikmelerin tümü ARCH etkisinin bertaraf edilmediği bir durumu yansıttıklarından dolayı GARCH modeline başvurulmaktadır. Bu şekilde oynaklığın ortadan kalktığı bir model belirlenmeye çalışılacaktır.

Çalışmada, GARCH modeli kullanılarak hangisinin karbon emisyonu vadeli işlem piyasasına ilişkin seri için en uygun model olduğu araştırılmaktadır.

Tablo 7: GARCH(1,1) modeline ait test sonuçları

Değişken	Katsayı	Standart Hata	z Değeri	Olasılık Değeri
c	0.001688	0.000587	2.876350	0.0040
AR(1)	-0.869545	0.117293	-7.413456	0.0000
MA(1)	0.841749	0.129826	6.483682	0.0000
VARYANS DENKLEMİ				
C	3.87E-05	7.70E-06	5.025986	0.0000
RESID(-1) ²	0.107546	0.012915	8.327515	0.0000
GARCH(-1)	0.840984	0.019203	43.79401	0.0000

Tablo 7’de GARCH(1,1) modelinin tahmin sonuçları yer almaktadır. Buna göre, GARCH parametresinin olasılık değerinin 0.05 anlamlılık düzeyinden küçük bir değer almış olması nedeniyle anlamlı olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu modele göre ARCH etkisinin varlığı araştırılmakta ve Tablo 8’de bu modele ilişkin ARCH-LM test sonuçları bulunmaktadır.

Tablo 8: GARCH(1,1) modeline ilişkin ARCH-LM test sonuçları

F - istatistiği	0.000260	Olasılık F (1,1499)	0.9871
Gözlem *R-kare değeri	0.000260	Ki-kare olasılık değeri (1)	0.9871
F - istatistiği	0.795090	Olasılık F (4,1493)	0.5283
Gözlem *R-kare değeri	3.184229	Ki-kare olasılık değeri (4)	0.5275
F - istatistiği	0.791066	Olasılık F (8,1485)	0.6106
Gözlem *R-kare değeri	6.339861	Ki-kare olasılık değeri (8)	0.6092
F - istatistiği	0.661571	Olasılık F (12,1477)	0.7895
Gözlem *R-kare değeri	7.965904	Ki-kare olasılık değeri (12)	0.7878

GARCH(1,1) modeline ait ARCH-LM test sonuçları Tablo 8’de yer almaktadır. Elde edilen bulgulara göre, modele ait Ki-Kare olasılık değerleri farklı gecikme uzunlukları ile belirlenmiştir. Bu sayede ARCH etkisinin varlığını ne kadarlık bir gecikme süresinde sürdürdüğünün tespit edilmesi amaçlanmıştır. 1,4,8,12 gecikme uzunluklarının kullanıldığı modelde olasılık değerlerinin tümü 0.05 düzeyinin üstünde gerçekleşmiştir. Bu nedendir ki, ARCH etkisinin olmadığı sıfır hipotezi kabul edilmekte ve modelde ARCH etkisinin olmadığı sonucuna varılmaktadır. Diğer bir deyişle, yapılan modelleme sonucunda artıklarda yer alan ARCH etkisi giderilmiştir.

Modeller arasındaki uygunluğu belirlemek için başvurulan bir başka yöntem ise modellere ait seçim kriterlerini karşılaştırmaktır.

Tablo 9: Model Seçim Kriterleri

MODEL SEÇİM KRİTERLERİ			
Kriter	ARCH(2)	GARCH(1,1)	En iyi seçim
Log likelihood	3330.891	3374.771	GARCH(1,1)
Akaike	-4.427285	-4.485713	GARCH(1,1)
Schwarz	-4.406055	-4.464484	GARCH(1,1)
Hannan-Quinn	-4.419377	-4.477805	GARCH(1,1)

Tablo 9’da model seçim kriterleri ışığında hangi modelin daha uygun olduğu araştırılmaktadır. Seçim kriterlerine göre model belirlenirken, Log likelihood değerlerinde büyük olan, diğer kriter değerleri açısından da mutlak değerce büyük olan model seçilmektedir. Öte yandan model karşılaştırmalarında Akaike değeri küçük olan model tercih edilmektedir (Ucal, 2006, 46. Villar-Rubio v.d., 2023, 500). Buna göre, karbon emisyonu vadeli işlem piyasasının oynaklığını belirleme noktasında GARCH(1,1) modelinin daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Karbon emisyonu, atmosferdeki sera gazlarını artırarak küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine katkıda bulunan bir faktördür. Özellikle karbon dioksit (CO₂) gibi sera gazları, güneşten gelen ışınları absorbe ederek atmosferde biriken ve gezegenimizin sıcaklığını artıran gazlardır. Karbon emisyonlarını azaltmak ve sürdürülebilir bir gelecek için daha temiz enerji kaynaklarına yönelmek küresel bazda önem taşımaktadır. Karbon emisyonunu azaltmaya yönelik uygulanan tüm politikalar küresel ısınmanın etkilerini hafifletmeye, iklim değişikliği ile mücadele etmeye ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamaya yardımcı olmaktadır. Bu nedenle karbon emisyonundaki oynaklığın araştırılması önem kazanmaktadır.

Karbon emisyonu oynaklığı, genellikle bir ekonominin veya endüstrinin zaman içindeki karbon emisyon seviyelerindeki değişkenliğini ifade etmektedir. Bu terim, bir bölge, ülke, sektör veya şirketin belirli bir dönemde ne kadar karbon emisyonu yaydığının, belirli bir referans noktasına göre nasıl değiştiğini göstermektedir. Karbon emisyonu oynaklığı genellikle çeşitli faktörlerden kaynaklanmaktadır. Bunlar arasında enerji talebindeki değişiklikler, enerji üretim yöntemlerindeki değişiklikler, ekonomik dalgalanmalar, teknolojik ilerlemeler ve çevresel politika değişiklikleri gibi faktörler bulunmaktadır. Bir bölgenin veya endüstrinin karbon emisyonu oynaklığını anlamak, iklim değişikliğiyle mücadele çabalarını yönlendirmek ve karbon emisyonlarını azaltmaya odaklanmak için önemlidir.

Karbon emisyonu vadeli işlemler piyasası ise karbon emisyon haklarına dayalı finansal araçların alınıp satıldığı piyasalardır. Bu piyasa, ekonomik teşvik sağlamak, emisyon azaltım hedeflerine ulaşmak, risk yönetimi yapmak ve finansal piyasalara likidite eklemek gibi önemli avantajlar sunarak sürdürülebilirlik çabalarına katkıda bulunmaktadır. Bu noktada, bu piyasalardaki oynaklığın tespit edilmesi de önem kazanmaktadır. Tüm bu gerekçelerle çalışmada, 2.01.2018 – 02.11.2023 tarih aralığını kapsayan karbon emisyonu vadeli işlemler piyasası veri seti kullanılarak oynaklığı açıklayan en uygun model tahmininde bulunulmaya çalışılmıştır.

Karbon emisyonu vadeli işlemler piyasası oynaklık tahmini için öncelikli olarak ele alınan seriye ait birim kök analizi yapılmıştır. Birinci farkı alınmasının ardından durağan hale gelen seriye ait otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonları incelenerek en uygun ARMA modeli tespit edilmiştir. Bu noktada kurulan ARMA modelinde ARCH etkisi incelenmiş ve seriye ait oynaklığın varlığı belirlenmiştir. Bu oynaklığın modellenmesi noktasında başvurulan çeşitli analizler neticesinde en uygun modelin GARCH(1,1) modeli olduğu sonucuna varılmıştır. Uygulanan modelin güvenilirliği ARCH-LM testi ile kontrol edilmiş ve GARCH(1,1) modeli ile oynaklığın bertaraf edildiği gözlenmiştir. Sonuç olarak GARCH(1,1) modeli ile ele alınan karbon emisyonu vadeli işlemler piyasası serisindeki oynaklığın ortadan kalktığı tespit edilmiştir. Oynaklığın giderildiği bir modelin kurulabilmesi yatırımcılar ve piyasa katılımcıları açısından risklerini daha etkin bir şekilde yönetebildiklerini göstermektedir. Bu sayede yatırımcılar pozisyonlarını daha kolay koruyabilmektedirler. Öte yandan şirketler açısından da daha güvenilir ve istikrarlı bir piyasanın varlığına işaret etmektedir. Ayrıca, vadeli işlem piyasalarında sık sık işlem yapan yatırımcılar için, daha düşük oynaklık işlem maliyetlerinin azalması gibi bir etki yaratmaktadır.

Yatırımcılar açısından iklim borsası oynaklığı dikkatlice izlenmeli ve stratejiler belirlenmelidir. Karbon emisyonu piyasasındaki oynaklığın yatırımcılar açısından önemi; bu piyasalarda, fiyat hareketleri takip edilerek risk ve fırsatların belirlenmesi noktasında kendisini göstermektedir. Bu piyasalardaki oynaklığı yorumlarken; regülasyon ve politika değişiklikleri, ekonomik koşullar, enerji piyasası değişiklikleri, doğal afetler ve iklim değişikliği ilişkisi, uluslararası ilişkiler ve iklim diplomasisi gibi unsurlar da dikkate alınmalıdır. Karbon piyasalarına ilişkin oynaklığın araştırılması politika yapımcıların ve yatırımcıların riskleri tespit etmelerine ve önleme tedbirleri geliştirmelerine yardımcı olmaktadır. Düzenleyiciler, karbon fiyatlarının izlenmesini geliştirerek ticari riskleri en aza indirmeye çalışırken politika yapımcılar için sistemin kurulma şeklini iyileştirmeyi hedeflemektedirler.

KAYNAKÇA

- Akkaya, G. C., & Uzar, C. (2012). Karbona dayalı finansal gelecek sözleşmeleri ve fiyat gelişimi üzerine bir inceleme. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 32, 67-80.
- Arı, İ. (2010). *İklim değişikliği ile mücadelede emisyon ticareti ve Türkiye uygulaması*. [DPT Uzmanlık Tezleri]. Ankara. [İklim-Degisikligi-ile-Mucadelede-Emisyon-Ticareti-ve-Turkiye-Uygulamasi-Izzet-Ari.pdf \(sbb.gov.tr\)](https://www.sbb.gov.tr/iklim-degisikligi-ile-mucadelede-emisyon-ticareti-ve-turkiye-uygulamasi-izzet-ari.pdf)
- Azari, H. Y. (2013). Karbon emisyon piyasaları. *Institute of Social Sciences, Selcuk University*, 1-9. Çevrimiçi <https://www.researchgate.net/publication/260554129>
- Baillie, R. T., Bollerslev, T. & Mikkelsen, H. O. (1996). Fractionally integrated generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 74, 3-30. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(95\)01749-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(95)01749-6)

- Benschop, T. & Cabrera, B. (2014). Volatility modelling of CO2 emission allowance spot prices with regime-switching Garch models. *SFB 649 Discussion Paper*, 050, 1-27.
- Bollerslev, T. (1986). Generalized auto regressive conditional heteroskedasticity, *Journal of Econometrics*, 31, 307-327. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(86\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0304-4076(86)90063-1)
- Byun, S.J. & Cho, H. (2013). Forecasting carbon futures volatility using Garch models with energy volatilities, *Energy Economics*, vol. 40(C), 207-221. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.06.017>
- Cuervo J., & Gandhi P. (1998). Carbon Taxes: their macroeconomic effects and prospects for global adoption: a survey of the literature. IMF Working Paper No. 98/73, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=882354>
- Çavdar, Ş. Ç., & Aydın, A. D. (2017). Borsa İstanbul kurumsal yönetim endeksi'nde (xkury) volatilitenin etkisi: arch, garch ve swarch modelleri ile bir inceleme. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(3), 697-711.
- Çetintaş, H., & Türköz, K. (2017). İklim değişikliği ile mücadelede karbon piyasalarının rolü. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 20(37), 147-168. <https://doi.org/10.31795/baunsobed.645182>
- Dritsaki, M. & Dritsaki, C. (2020), Forecasting European Union CO2 emissions using autoregressive integrated moving average autoregressive conditional heteroscedasticity models, *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(4), 411-423. <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/9186>
- Edwards R., (2008), *Carbon finance geop and business options*. Climate Change Capital, MSc Environmental Technology, Imperial College, London.
- Elitaş, C., & Çetin, A. C. (2011). Karbon ticareti ve karbon bankacılığı. *Muhasebe Ve Denetime Bakış*, (35), 51-78. [1869440 \(dergipark.org.tr\)](https://doi.org/10.1869440)
- Enders, W. (2004). *Applied econometric time series* (Second ed.). J. Wiley.
- Engle, R. F. (1982). Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation. *Econometrica*, 50(4), 987-1007. <https://doi.org/10.2307/1912773>
- Engle, R. F., Lilien, D. M. & Robins, R. P. (1987). Estimating time varying risk premia in the term structure: The Arch-M model. *Econometrica*, 55(2), 391-407. <https://doi.org/10.2307/1913242>
- Feng Z H, Zou L L & Wei Y M. (2011). Carbon price volatility: Evidence from EU ETS, *Applied Energy*, 88(3): 590-598. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.017>
- Gürbüz, C., Karataş Aracı, Ö. N., & Bekçi, İ. (2019). Dünya'da ve Türkiye'de karbon ticareti ve karbon muhasebesi uygulamaları üzerine bir araştırma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 11(28), 424-438. <https://doi.org/10.20875/makusobed.568835>
- Gürsakar, S. (2009). Varyans kırılması gözlemlenen serilerde Garch modelleri: döviz kuru oynaklığı örneği, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 0 (32), 319-337. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/erciyesuibd/issue/5889/77913>
- Huang J., Ge J., Chang K. & Tian Y. (2020). Dynamic hedging analysis of carbon emission trading yield in Shenzhen, *Energy & Environment*, Vol. 31(5). 870-885. <https://doi.org/10.1177/0958305X19882409>

- Kalafate N. & Khiari I. (2023). Modeling volatility in the stock markets using Garch models: Applied to carbon, water and commodity markets. *Finance & Markets Journal*, No.2 Vol.10, 38 – 54.
- Karaaslan, A., Abar, H. & Çamkaya, S. (2017). CO2 Salınımı üzerinde etkili olan faktörlerin araştırılması: OECD ülkeleri üzerine ekonometrik bir araştırma. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21(4), 1297-1310. [405790 \(dergipark.org.tr\)](https://doi.org/10.1501/405790)
- Kuziboev, B., Vysušilová, P., Salahodjaev, R., Rajabov, A. & Rakhimov, T. (2023). The Volatility assessment of CO2 emissions in Uzbekistan: Arch/Garch models. *International Journal of Energy Economics and Policy*, Vol 13, Issue 5, s. 1-7. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14487>
- Nargeleçekenler, M. (2011). Euro kuru satış değerindeki volatilitenin Arch ve Garch modelleri ile tahmini, *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Mecmuası*, 54 (2), 153-179. [8028 \(dergipark.org.tr\)](https://doi.org/10.1501/8028)
- Nelson, D. B. (1991). Conditional heteroskedasticity in asset returns: a new approach. *Econometrica*, 59(2), 347-370. <https://doi.org/10.2307/2938260>
- Özden, Ü. H. (2008). İMKB bileşik 100 endeksi getiri volatilitésinin analizi, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(13), 339-350. [acarindex-1423905009.pdf](https://doi.org/10.1501/acarindex-1423905009.pdf)
- Songül, H. (2010). Otoresif koşullu değişen varyans modelleri: döviz kurları üzerine uygulama. [Uzmanlık Yeterlilik Tezi. Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Araştırma ve Para Politikası Genel Müdürlüğü], Ankara. [huseyinsongul.pdf \(tcmb.gov.tr\)](https://doi.org/10.1501/huseyinsongul.pdf)
- Şahin, C. (2023). Garch ve yapay sinir ağları modelleri yardımıyla volatilité tahmini: Türk Borsası örneği. *Kastamonu Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(2), 572-595. <https://doi.org/10.21180/iibfdkastamonu.1262407>
- Ucal, M. Ş., (2006). Ekonometrik model seçim kriterleri üzerine kısa bir inceleme. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Cilt 7, Sayı 2, 41-56.
- Villar-Rubio, E., Huete-Morales, MD. & Galán-Valdivieso, F. (2023). Using Egarch models to predict volatility in unconsolidated financial markets: the case of European carbon allowances. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 13, 500–509. <https://doi.org/10.1007/s13412-023-00838-5>
- Wang Y., Wang G., Zuo Y., Fan L. & Xiao Y., (2017). The Market effectiveness of electricity reform: a case of carbon emissions trading market of Shenzhen city, *AIP Conf. Proc.* 1820, 040028-1–040028-5. <https://doi.org/10.1063/1.4977300>
- Yu H., Wang H., Liang C., Liu Z. & Wang S. (2022). Carbon market volatility analysis based on structural breaks: Evidence from EU-ETS and China. *Front. Environ. Sci.* 10:973855. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.973855>
- <https://www.ice.com/fixed-income-data-services/index-solutions/commodity-indices/carbon-futures>