



Ethereum Ağında Arbitrum ve Optimism Uygulamalarının Ölçeklenebilirlik Etkisi Üzerine Bir Araştırma

Mehmet Çınar¹ , Muhammed Apak² 

Öz: Bitcoin'in popülaritesinin artması ile ölçeklendirme sorunları da kaçınılmaz hale gelmektedir. Blok boyutu sınırlamaları ve işlem ücretlerindeki artış, tartışmalara yol açmakta ve alternatif çözüm arayışlarını tetiklemektedir. Ethereum, Bitcoin'in sınırlı işlevselliğini aşmak ve akıllı sözleşmeler gibi daha karmaşık işlevler sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Ancak Ethereum ağının yaygın olarak benimsenmesi, ağın hız ve/veya maliyetten ödün vermeden artan işlem hacmini sürdürebilmekte zorlanmasına neden olmuştur. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, Optimistik Rollup gibi katman-2 ölçeklendirme çözümleri geliştirilmiştir. Bu çalışma, Ethereum ağının ölçeklenebilirlik zorluklarını ve katman-2 ölçeklendirme çözümlerinden Arbitrum ile Optimism'in ölçeklenebilirlik üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Çalışma sonuçlarına göre, Arbitrum ve Optimism'in etkinleştirilmesi sonrasında Ethereum hem günlük ortalama işlem sayılarında hem de ortalama işlem ücretlerinde bir artış meydana gelmektedir. Bu bulgular, Arbitrum ve Optimism gibi katman-2 çözümlerinin Ethereum ağının ölçeklenebilirliğini artırma ve işlem maliyetlerini azaltma potansiyeli hususunda başarılı olmadığını göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Blok zincir, Ölçeklenebilirlik, Optimistik Rollup, Arbitrum, Optimism, Katman-2

JEL: D13, E44, G15

Geliş : 24 Nisan 2024
Düzeltilme : 24 Haziran 2024
Kabul : 07 Ağustos 2024

Tür : Araştırma

Research on the Scalability Effect of Arbitrum and Optimism Applications in the Ethereum Network

Abstract: As Bitcoin's popularity has grown, scaling issues have inevitably emerged. Limitations on block size and increasing transaction fees have sparked debates and triggered the search for alternative solutions. Ethereum was designed to surpass Bitcoin's limited functionality and provide more complex features such as smart contracts. However, the widespread adoption of Ethereum has led to challenges in sustaining increased transaction volumes without compromising on speed and/or cost. In response to these difficulties, layer-2 scaling solutions like Optimistic Rollup have been developed. This study examines the scalability challenges of the Ethereum network and assesses the impact of layer-2 scaling solutions, specifically Arbitrum and Optimism, on scalability. According to the study's findings, the activation of Arbitrum and Optimism results in an increase in both daily average transaction numbers and average transaction fees on Ethereum. These findings indicate that layer-2 solutions like Arbitrum and Optimism have not been successful in enhancing Ethereum's scalability and reducing transaction costs as originally envisioned.

Keywords: Blockchain, Scalability, Optimistic Rollup, Arbitrum, Optimism, Layer-2

JEL: D13, E44, G15

Received : 24 April 2024
Revised : 24 June 2024
Accepted : 07 August 2024

Type : Research

Cite this article as: Çınar, M., & Apak, M. (2024). Ethereum ağında Arbitrum ve Optimism uygulamalarının ölçeklenebilirlik etkisi üzerine bir araştırma. *Business and Economics Research Journal*, 15(4), 389-404. <http://dx.doi.org/10.20409/berj.2024.451>

Copyright: © 2024 by the author(s). This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY-NC) International License.

¹ Prof., PhD., Bursa Uludag University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Econometrics, Türkiye, mcinar@uludag.edu.tr (Corresponding Author)

² Graduate Student, Bursa Uludag University, Institute of Social Sciences, Department of Econometrics, Türkiye, mhmt09apak@gmail.com

1. Giriş

Kripto para birimlerinin tarihçesi merkezi olmayan bir dijital para biriminin kavramsallaştırılmasıyla 21. yüzyılın başına dayanmaktadır. İlk kripto para birimi olan Bitcoin, 2008 yılında takma adı Satoshi Nakamoto olan bir kişi veya grup tarafından tanıtılmıştır (Bonneau vd., 2015). Bitcoin'in ana amacı, merkezi olmayan bir para birimi olarak işlev görmesidir. Diğer bir ifadeyle Bitcoin sistemi kabaca geleneksel bankalar veya kurumlar tarafından kontrol edilemeyen ve işlem yapılmasının ardında matematiksel temellerin olduğu bir sistemdir. Bitcoin'in altında yatan teknoloji olan blok zincir teknolojisi; güvenli, şeffaf ve merkezi olmayan yapıda olup dijital işlemlerde devrim yaratmıştır (Bhutta vd., 2021). Bitcoin'in ortaya çıkışı, finans dünyasında yeni bir dönemin başlangıcı olmuş ve genellikle altcoin olarak adlandırılan çok sayıda alternatif kripto para biriminin geliştirilmesine yol açmıştır (García-Corral vd., 2022). Blok zinciri teknolojisinin ilerlemesi, programcı olan Vitalik Buterin ve bir grup geliştirici tarafından Ethereum platformunun geliştirilmesini sağlamıştır. Ethereum, geliştirdiği akıllı sözleşme teknolojisi ile kripto varlıkları merkezi borsaya ihtiyaç duymadan kendi kendine çalışan merkezi olmayan takas protokolleri ile herkes için ulaşılır kılmıştır. Bu nedenle Ethereum, merkezi olmayan uygulamaları (Decentralized Applications, DApps) geliştirmek için hizmet veren bir blok zincir sistem platformu olarak tanımlanabilmektedir. Böylece sistem kullanılarak sadece finansal işlemlerde değil, aynı zamanda reel olarak çeşitli sektörlerde de kullanılabilme olasılığının önü açılmıştır (Wood, 2014). Ethereum, Temmuz 2015 tarihinde piyasaya çıktığında kripto piyasasının toplam değeri 4,17 milyar \$ iken, bu değer Kasım 2021 yılında 3,01 trilyon \$ olmuş ve Mart 2024'te ise 3,76 trilyon \$'a ulaşmıştır. Bununla birlikte, Ethereum ağının yaygın olarak benimsenmesi, ağın hız ve/veya maliyetten ödün vermeden artan işlem hacmini sürdürülebilmekte zorlanması nedeniyle önemli ölçeklenebilirlik zorluklarını ortaya çıkarmaktadır (Vitalik, 2017). Bu ölçeklenebilirlik sorunu, blok zincir teknolojisinin ana akım olarak benimsenme potansiyeli önünde bir engel olarak görülmektedir.

Ölçeklendirme sorunu, bir sistem veya teknolojinin mevcut ve gelecekteki iş yüklerini verimli bir şekilde işleyebilmesi için gerekli kapasiteyi sağlamada yaşanan zorluklardır. Blok zinciri teknolojisi, özellikle popülerlik kazanmasıyla birlikte, ölçeklendirme sorunuyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu sorun; işlem hızı, işlem maliyetleri ve ağın genel verimliliği üzerinde önemli etkilere sahip olmaktadır. Ölçeklendirme sorununun temel nedenleri arasında, ağın işlem kapasitesi (blok başına işlenebilecek işlem sayısı) ve işlem onay sürelerinin sınırlı olması yer almaktadır. Bu sınırlamalar ağın talebi karşılayamamasına ve işlem ücretlerinin artmasına neden olarak, blok zincirinin daha geniş ölçekte kabulü önünde engel teşkil etmektedir.

Blok zincir ölçeklendirme çözümleri arasında katman-1 (layer 1) ve katman-2 (layer 2) çözümleri bulunmaktadır. Katman-1 çözümleri, blok zincirinin temel protokolünde yapılan değişiklikleri içermektedir. Bu çözümler, blok boyutunu ve işlem verimliliğini artırmak için konsensüs mekanizmasını değiştirme gibi yöntemleri içermektedir. Konsensüs mekanizması, bir blok zincir veya dağıtılmış defter sistemi üzerindeki düğümlerin ağın mevcut durumu konusunda anlaşmaya varmak için kullandığı protokollerin bir bütünüdür. Daha açık bir ifadeyle, bir blok zincirin durumunu ne kadar verimli bir şekilde güncelleyebileceğini ve işlemleri nasıl işleyebileceğini belirleme mekanizmasıdır. Katman-2 çözümleri ise, ana blok zincirinin üzerine inşa edilen ve temel protokolda herhangi bir değişiklik yapmadan ölçeklendirme sorununu ele almayı amaçlayan protokollerdir. Bu çözümler arasında; state channels, plasma, side chains ve rollup'lar gibi teknolojiler gelmektedir (Thibault vd., 2022: 93040). Katman-2 çözümleri, işlemleri ana blok zincirin dışında gerçekleştirmekte ve yalnızca belirli bilgileri ana blok zincire kaydederek ağın ölçeklenebilirliğini artırmaktadır. Bu ölçeklendirme zincirdeki son durumu çözmeden önce zincir dışı işlemleri işleyerek ana Ethereum blok zincirindeki tıkanıklığı hafifletmek için kullanılmaktadır (Buterin, 2021).

Katman-2 çözümlerinden rollup'lar ölçeklenebilirlik sonunun çözümünde iddialı bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Daha açık bir ifadeyle rollup teknolojisi Ethereum ağının temel blok zincirini daha verimli bir şekilde kullanarak daha fazla işlemi işleyebilmesini sağlamaktadır. Bu teknolojinin önde gelen uygulamaları arasında Arbitrum ve Optimism yer almaktadır. Her ikisi de Ethereum ağının kapasitesini geliştirmek, işlem maliyetlerini azaltmak, işlem onayını hızlandırmak gibi hedeflere sahipken, güvenlik ve merkeziyetsizliği korumayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada, Arbitrum ve Optimism, rollup ölçeklenebilirlik uygulamaları incelenmektedir. Bu yeniliklerin Ethereum ağının performansı üzerindeki etkileri ampirik olarak analiz edilerek blok zincir ekosistemini nasıl etkilediği değerlendirilmektedir. Gerek yurt dışı gerekse yurt içi

çalışmalar incelendiğinde genellikle uygulamaların teknolojik yönlerinin ele alındığı görülmektedir. Bu çalışma ise Arbitrum ve Optimism gibi Optimistlik Rollup teknolojilerinin Ethereum ağının ölçeklenebilirliğine katkılarını ampirik olarak incelemesi nedeniyle literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Çalışma şu şekilde tasarlanmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde katman-2 çözümleri üzerine açıklamalara yer verilmektedir. Üçüncü bölümde rollup teknolojisi ve çalışma prensibi üzerinde durulmaktadır. Bu kısımda ayrıca Arbitrum ve Optimism teknolojileri açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde literatür çalışmaları ele alınmakta, beşinci bölümde ise veri ve yöntem üzerinde durularak altıncı bölümde bulgulara verilmektedir. Çalışma sonuç bölümüyle tamamlanmaktadır.

2. Katman-2 Çözümlerine Genel Bir Bakış

Katman-2 çözümleri geleneksel blok zincirlerin ölçeklenebilirlik sorunlarını çözme potansiyelleri nedeniyle büyük ilgi görmeye başlamıştır. Bu çözümler, işlemlerin verimini ve gecikme süresini iyileştirmeyi ve böylece blok zincir ağının genel performansını artırmayı amaçlamaktadır. Yukarıda da ifade edildiği üzere; state channels (durum kanalları), plasma group (plazma grup), side chains (yan zincirler) ve optimistic rollups (optimistlik rollup'lar) Ethereum gibi blok zincirler için yaygın olarak kullanılan katman-2 ölçeklendirme yöntemleri arasında yer almaktadır. Her ne kadar çalışmada rollup'lar üzerinde durulsa da kısaca diğer katman-2 çözümleri şu şekilde açıklanabilir:

- *State Channels (Durum Kanalları)*: Durum kanalları, iki veya daha fazla kullanıcı arasında gerçekleştirilen sık işlemleri işlemek için kullanılan bir tekniktir. İşlemler, Ethereum ana zincirine gönderilmeden önce zincir-dışı (off-chain) olarak gerçekleştirilmektedir. Durum kanalları, işlem sürelerini azaltmakta ve işlem maliyetlerini düşürmektedir (McCorry, 2019).
- *Plasma Group (Plazma Grup)*: Plasma, yan zincirler veya alt zincirler olarak adlandırılan ikincil blok zincirler oluşturarak ana blok zincirinin yükünü azaltmayı amaçlamaktadır. Plasma, işlemleri güvenli bir şekilde işlemek için merkezi olmayan bir yaklaşım sunmakta ve bu sayede ana zincirdeki tıkanıklığı azaltmaktadır (Harishankar, 2020).
- *Side Chains (Yan Zincirler)*: Yan zincirler, ana blok zincirinden ayrı olarak çalışan ve farklı konsensüs mekanizmalarını veya farklı işlem hızlarını kullanabilen blok zincirlerdir. Yan zincirler, ölçeklenebilirliği artırırken, ana zinciri tıkanıklıktan korumaktadır (Neiheiser vd., 2023).
- *Rollups (Rolluplar)*: Rollup'lar, ana blok zincirine bağlı olan ve işlem verilerini saklamak yerine yalnızca işlem geçerliliğini doğrulayan merkezi olmayan bir sistemdir. Rollup'lar, işlem verilerini sıkıştırarak ana zincire daha az işlem göndermekte, bu da işlem maliyetlerini düşürerek ölçeklenebilirliği artırmaktadır.

Rollup'lar, genel olarak iki ana türde ele alınmaktadır. Bunlar "zincir içi rollup" ve "zincir dışı rollup" şeklindedir. Zincir içi rollup'ta (on-chain rollup), işlem verileri ana blok zincirine gönderilmekte, ancak işlem verileri sıkıştırılarak tek bir işlem olarak sunulmaktadır. Ana blok zinciri, işlemlerin geçerliliğini kontrol etmekte ve gerektiğinde yan zinciri güncellemektedir. Bu tür rollup'lar, ana zincirde daha az işlem yapılmasını sağlamakta, böylece işlem maliyetlerini düşürerek ölçeklenebilirliği artırmaktadır. Zincir dışı rollup'ta (off-chain rollup) ise işlem verileri yan zincire gönderilmekte ve yan zincir işlem verilerini saklamaktadır. Ana blok zinciri, sadece işlem geçerliliğini doğrulamakta, ancak işlem verilerini doğrulamamaktadır. Bu tür rollup'lar, ana zincirdeki işlem yükünü azaltmakta ve daha hızlı işlem sürelerine olanak tanımaktadır. Yan zincirde işlem verileri saklandığı için güvenlik protokollerine dikkat edilmelidir.

Optimistlik Rollup iyimser hesaplama ile hareket eden zincir içi rollup'ların bir alt türüdür. Optimistlik Rollup, işlem verilerini ana blok zincirine göndermekte ve ana zincirde işlem verilerinin doğrulanmasını beklemektedir. İşlemlerin doğru olduğu varsayımına dayandığından, sadece yanlış işlemler gerçekleştirildiğinde veya meydana geldiğinde ana zincirde bir anlaşmazlık yaratmaktadır. Bu şekilde, işlem doğrulamasının ana blok zinciri üzerinde gerçekleşmesi gerekmediğinden, Optimistlik Rollup'lar daha hızlı işlem süreleri sağlayabilmektedir. Daha açık bir ifadeyle, Optimistlik Rollup'lar, işlem verilerini sıkıştırarak ana zincire sadece gerekli bilgileri göndermekte ve işlem maliyetlerini azaltmaktadır. Bu, Ethereum gibi ağların

daha yüksek işlem hacmine ulaşmasını ve daha geniş bir kullanım durumunu desteklemesini sağlamaktadır. Optimistlik Rollup teknolojisi, ağın güvenliğini korurken ölçeklenebilirliği artıran etkili bir katman-2 çözümüdür.

Arbitrum ve Optimism'in her iki teknolojisi de, Ethereum ağının işlem kapasitesini artırarak daha düşük işlem ücretleri ve daha hızlı işlem onay süreleri sunmayı amaçlayan Optimistlik Rollup teknolojileridir. Arbitrum, "Off-Chain Labs" tarafından geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuş bir teknolojidir. Arbitrum, Ethereum ağının güvenliğini korurken daha yüksek işlem hızı ve daha düşük maliyetler sunmak için Optimistlik Rollup teknolojisini kullanmaktadır. Off-Chain Labs, Arbitrum'u Ethereum ağı için bir ölçeklendirme çözümü olarak geliştirmiştir. Optimism ise "Public Benefit Corporation" tarafından geliştirilerek kullanıma sunulmuş bir teknolojidir. Optimism de Optimistlik Rollup teknolojisini kullanarak Ethereum ağını ölçeklendirmektedir. Bu platform, kullanıcıların Ethereum üzerinde daha hızlı ve daha ucuz işlemler yapmalarını sağlamak için tasarlanmıştır.

3. Optimistlik Rollup Teknolojisi ve Çalışma Prensipleri

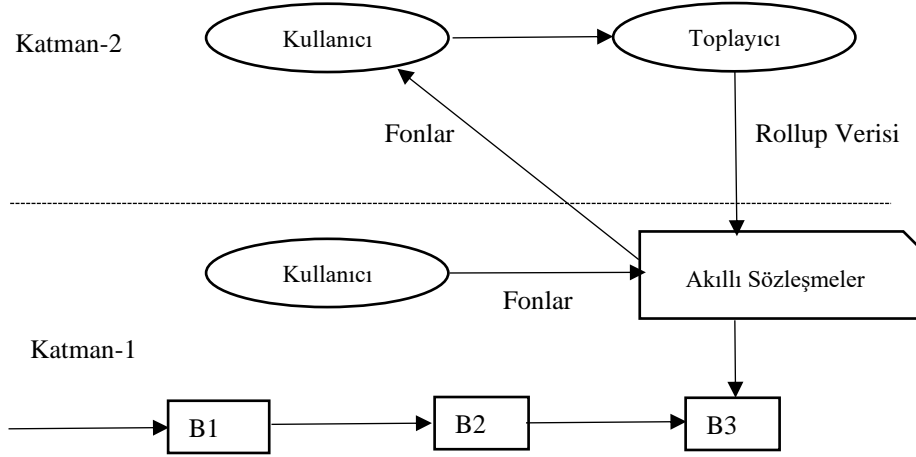
Optimistlik Rollup, Ethereum için bir katman-2 ölçeklendirme çözümüdür. Bu mekanizma, yapılan işlemi ikincil bir katmana aktararak Ethereum ağının ölçeklenebilirlik sınırlamalarını ele almaktadır. Böylece ana ağ üzerindeki yükü azaltmak ve verimi artırmak için tasarlanmıştır (Neiheiser vd., 2023; Sguanci, 2021). Optimistlik Rollup, işlemlerin tek bir sıkıştırılmış veri paketinde Ethereum ana ağına göndermeden önce işlemleri zincir dışında toplayıp işleyerek ağın ölçeklenebilirliğini artırmayı amaçlamaktadır. Optimistlik Rollup'ın çalışma prensibi, işlemlerin ayrı bir zincir üzerinde yürütülmesini ve ardından doğrulama için Ethereum ana ağına sunulan bir kriptografik belgesini oluşturulmasını içermektedir. Bu yaklaşım, Ethereum ağının güvenlik ve merkeziyetsizlik özelliklerini korurken ana ağdaki hesaplama ve depolama gereksinimlerini en aza indirerek önemli ölçeklenebilirlik iyileştirmeleri sağlamaktadır (Werner vd., 2021; Xin vd., 2023).

Optimistlik Rollup'lar, adından da anlaşılacağı üzere, işlemlerin doğruluğu konusunda "iyimser" bir yaklaşım benimsemektedir. Bu teknoloji, işlemlerin doğru olduğunu varsayarak yalnızca bir hata veya sahtekârlık durumunda müdahale edilmesini öngörmektedir. Bu sayede, her işlemin doğruluğunu onaylamak için gereken hesaplama maliyeti ve zaman önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Optimistlik Rollup'ların çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir:

- *İşlem Toplama (Transaction Aggregation)*: Optimistlik Rollup'larda, çok sayıda işlem tek bir veri paketinde toplanmaktadır. Bu işlemler, ana zincirde tek bir işlem olarak işlenmektedir. Ancak aslında yüzlerce veya binlerce işlemi temsil edebilme potansiyeline sahiptir.
- *Verilerin Kaydedilmesi (Data Posting)*: İşlemler toplandıktan sonra, bu işlem grubunun sonuçları ve/veya Merkle kökü gibi özet bilgileri ana zincire "post" edilmektedir. Ancak işlemlerin kendisi ana zincirde işlenmemekte; bu sayede veri depolama ve işlem maliyetleri düşürülmektedir.
- *Hile Kanıtı (Fraud Proof)*: İşlemler iyimser bir şekilde işlendiğinden, yanlış bir işlem yapıldığı iddia edilirse, bu iddiayı destekleyen kanıtların (fraud proof) sunulması gerekmektedir. Bu kanıtlar, bir işlemin geçersiz olduğunu veya yanlış işlendiğini göstermek için kullanılmaktadır. Eğer bir hile kanıtı sunulursa, ana zincir bu kanıtı değerlendirmekte ve gerekirse işlemleri iptal etmekte veya düzeltmektedir.
- *Meydan Okuma Süresi (Challenge Period)*: Her post edilen işlem grubu için belirli bir meydan okuma (challenge) süresi vardır. Bu süre zarfında, işlemlerin doğruluğu konusunda itirazlar sunulabilmektedir. Eğer bu süre zarfında herhangi bir hile kanıtı sunulmazsa, işlemler geçerli kabul edilmekte ve sonlandırılmaktadır.

Yukarıda da ifade edildiği üzere Optimistlik Rollup'lar, işlem verilerini toplayarak katman-1 üzerindeki veri yükünü azaltmayı hedefleyen ölçeklendirme çözümleridir. Şekil 1, bu sürecin akıllı sözleşme yardımıyla nasıl işlediğini ortaya koymaktadır.

Şekil 1. Optimistlik Rollup ve Akıllı Sözleşme Etkileşimleri

Kaynak: Thibault vd. (2022).

Kullanıcı (yatırımcı), katman-2'de bir işlem gerçekleştirdiğinde, bu işlem, katman-2'deki bir toplayıcı tarafından alınmaktadır. Toplayıcı, kullanıcının işlemini ve diğer kullanıcılar tarafından yapılan işlemleri toplamakta ve bunları bir rollup verisi haline getirilmektedir. Rollup verileri, katman-2'deki işlemleri temsil etmektedir. Bu veriler hesaplandıktan sonra katman-1'e aktarılmaktadır (yayınlanmaktadır). Aktarılan rollup verileri, akıllı sözleşme (smart contract) ile etkileşime girerek katman-1 üzerindeki B₁, B₂, B₃ bloklara (burada B₃ bloğuna) dahil edilmektedirler. İşlemin bir blok içindeki işlem setine dahil edilmeden önce, gerekli koşulları (geçerlilik, imza doğrulaması gibi) karşıladığını gösteren doğrulaması yapılmaktadır.

4. Ölçeklenebilirlik Sorunu ve Çözüm Önerilerine İlişkin Literatür Çalışmaları

Blok zincir ağlarında ölçeklenebilirlik çözümlerine yönelik talep arttıkça, Optimistlik Rollup'ın ölçeklenebilirlik etkilerinin kapsamlı bir şekilde araştırılmasına ve değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Zheng, 2021). Ethereum ağının gelişimi ve önemi son yıllarda kapsamlı araştırmalara konu olmuştur. Birçok çalışma Ethereum ağının çeşitli yönlerini inceleyerek blok zinciri teknolojisi ve kripto para birimi alanındaki önemine ışık tutmaktadır. Bu kısımda ölçeklenebilirlik sorununu ele alan ve çözüm önerileri sunan bazı literatür çalışmalarına yer verilmektedir. Ancak ölçeklenebilirlik sorununa ve çözüm önerilerine yönelik literatür çalışmalarının ağırlıklı olarak bu çözümlerin teknolojileri üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, literatürde istatistiksel ve/veya ekonometrik analizlere yer verilmeden, daha çok teknolojiler, teorik analizler ve kavramsal tartışmalar ön plana çıkmaktadır.

Ferretti ve D'Angelo (2019) çalışmalarında Ethereum blok zinciri yapısının karmaşık ağlar teorisi perspektifinden bir analizini sunarak, Ethereum ağının karmaşık doğası ve ölçeklenebilirlik üzerindeki etkileri üzerine yoğunlaşmaktadırlar. Zhou vd. (2020) çalışmalarında, blok zincirinin ölçeklenebilirliğine yönelik çözümlerin kapsamlı bir incelemesini sunmuşlardır. Yazarlar, blok zinciri sistemlerinde âdemi merkezîyetçilik, güvenlik ve ölçeklenebilirlik arasındaki ödünleşimleri vurgulamışlardır. Hafid ve Samih (2020) çalışmalarında, blok zincirlerinin ölçeklendirilmesi üzerine kapsamlı bir araştırma sunarak mevcut ölçeklenebilirlik çözümlerinin verim ve gecikme süreleri de dahil olmak üzere Ethereum ağı üzerindeki performansa dayalı karşılaştırmalı bir analizini yapmışlardır. Bu çalışmada, regresyon analizleri ve performans testleri kullanılarak mevcut ölçeklenebilirlik çözümlerinin verimliliği değerlendirilmiştir. Bu yöntemler, ölçeklenebilirlik çözümlerinin istatistiksel olarak anlamlı etkilerini belirlemeye yardımcı olmuştur. Tahmasebi vd. (2020) çalışmalarında, Ethereum ve sis bilişim teknolojilerini kullanarak nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) cihazlarını izlemek için ölçeklenebilir bir mimari önermekte ve artan IoT cihaz sayısını barındırmada ölçeklenebilirliğin önemini vurgulamaktadırlar. IoT cihazlarının Ethereum ağıyla entegrasyonu, ele alınması gereken ölçeklenebilirlik zorluklarını ortaya çıkarmaktadır. Bergers vd. (2021) çalışmalarında veri ambarları için blok zinciri tabanlı merkezi olmayan bir bütünlük doğrulama modeli önermişlerdir. Bu model veri

yönetimi ve bütünlük doğrulaması bağlamında ölçeklenebilirlik endişelerini ele almaktadır. Bu çalışmada kullanılan metodoloji, veri yoğun blok zinciri uygulamalarının performansını karşılaştırmak için çeşitli kıyaslama testleri ve performans değerlendirme yöntemleri içermektedir. Önerilen model çeşitli kıyaslamalarla testler gerçekleştirilerek veri yoğun blok zinciri uygulamalarında ölçeklenebilirliği ele almanın pratik açıdan uygunluğunu ortaya koymaktadır.

Thibault vd. (2022) çalışmalarında, Ethereum ağında Arbitrum ve Optimism gibi farklı rollup uygulamalarının ölçeklenebilirlik etkilerini değerlendirmek için derinlemesine karşılaştırmalı çalışmalara duyulan ihtiyacı vurgulamaktadırlar. Ayrıca Rollup'lar kullanılarak blok zinciri ölçeklendirme çözümünde gelecek araştırmalara çıkış yolları bağlamında tavsiyelerde bulunmaktadır. Lavaur vd. (2022) çalışmalarında, "herşeyin interneti" (IoE) için blok zinciri hizmetlerindeki ölçeklenebilirlik zorluklarını ele almak için optimistik rollup uygulanmasını tartışmışlardır. Bu durum, gerçek dünyada blok zinciri uygulamalarında optimistik rollup'ların ölçeklenebilirlik üzerindeki etkilerini değerlendirmenin ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır. Bingzhang ve Mamoiko (2022) tarafından yapılan çalışmada, Ethereum ağında kendi kendini yürüten akıllı sözleşmelerin geliştirilmesine açıklık getirilmiş, güven tesis etmek için önceden tanımlanmış kuralların akıllı sözleşme işlevlerine dönüştürülmesi vurgulanmış ve böylece Ethereum ağının güvenli ve otomatik işlemleri kolaylaştırmadaki önemli rolünün altı çizilmiştir. Bellavitis vd. (2020), girişimcilik ile ilk kripto varlık arzları (Initial Coin Offerings, ICO) arasındaki ilişkiyi inceleyerek, ICO'ların dinamikleri ve girişimcilik ortamı üzerindeki etkileri hakkında önemli bulgular sunmuşlardır. Buna ek olarak, Sadath vd. (2022) çalışmalarında blok zincirindeki ölçeklenebilirlik sorunlarını özellikle sağlık hizmetleri bağlamında ele almışlar ve eklenen düğümler ile akıllı sözleşmeler aşamalarını değerlendirmişler ve belirli uygulama alanlarında ölçeklenebilirlik endişelerinin üzerinde durmuşlardır. Bu çalışmada, istatistiksel analizler ve vaka çalışmaları kullanılarak ölçeklenebilirlik sorunlarının sağlık hizmetleri bağlamında nasıl çözülebileceği incelenmiştir. Ayrıca, Lukianchuk (2022) kripto para birimleri ile Visa ve Paypal gibi geleneksel finansal kuruluşlar arasında işlem hızı ve ödeme komisyonlarına odaklanan karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirmişler ve böylece Ethereum ve benzeri platformların finansal alandaki dönüştürücü potansiyelini vurgulamışlardır. Bu analizde kullanılan metodoloji, karşılaştırmalı istatistiksel analizler ve performans değerlendirmeleri içermektedir. Khor vd. (2023) gerçek dünya uygulamalarını desteklemek için blok zinciri protokollerinde ölçeklenebilirliğe duyulan ihtiyacı vurgulayarak, genel blok zinciri tabanlı tedarik zinciri yönetimi sunmaktadırlar. Bu çalışmada, tedarik zinciri yönetimi bağlamında blok zinciri protokollerinin ölçeklenebilirliğini değerlendirmek için teorik analizler ve vaka çalışmaları kullanılmıştır.

Sonuç olarak, literatür çalışmaları Arbitrum ve Optimism teknolojilerinin Ethereum ağı üzerindeki etkilerini ortaya koyarken teknolojik ve kavramsal tartışmalar üzerinde yoğunlaşmakta, istatistiksel ve ekonometrik analizlere yer verilmediği görülmektedir. Bu çalışmada ise, bağımsız örneklem t-testi ve regresyon analizleri gibi istatistiksel yöntemler kullanılarak Arbitrum ve Optimism'in işlem hacimleri ve maliyetleri üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Çalışma bu yönleriyle literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

5. Veri ve Yöntem

Ethereum ağının mevcut ölçeklenebilirlik sorunları, işlem hacmi ve hızının sürdürülebilir bir şekilde artırılmasının önündeki engeller olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma, Ethereum ağının ölçeklenebilirlik sorunlarını ve bu sorunlara katman-2 çözümlerinden Arbitrum ve Optimism teknolojileri aracılığıyla sunulan çözümlerin etkilerini incelemektedir. Araştırma kapsamında, Ethereum ağında gerçekleştirilen işlem sayıları ve bu işlemlerin işlem ücretleri üzerinde Arbitrum ve Optimism'in etkinleştirilmesinin etkileri incelendiğinden, çalışmada Ethereum ağının işlem verileri kullanılmaktadır. Veri seti, Ethereum ağında gerçekleştirilen günlük ortalama işlem sayılarını ve ortalama işlem ücretlerini içermektedir. Veriler; Blockchain Explorer, DefiL Lama, Coin Market Cap internet siteleri üzerinden elde edilmiş ve 01/01/2017-04/07/2024 günlük dönemini içermektedir. Veri dönemi, ilgili verilerin eksiksiz olarak bulunabildiği zaman dilimine göre seçilmiştir. Çalışma kapsamında, normal dağılımın geçerliliği için Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk testleri, bağımsız örneklem için U Mann-Whitney testi son olarak Arbitrum ve Optimism'in Ethereum ağı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için ise regresyon analizleri kullanılmıştır.

Kolmogorov-Smirnov test istatistiği şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$KS = \text{Max}_x |F^*(X) - S_n(X)| \quad (1)$$

Burada $S_n(X)$ örneklem kümülatif dağılım fonksiyonu ve $F^*(X)$ kümülatif normal dağılım fonksiyonunu göstermektedir. Shapiro-Wilk testi ise şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$SW = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i X_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

Burada $X_{(i)}$ en büyük sıra istatistik değeri, \bar{X} basit aritmetik ortalama ve n gözlem sayısını göstermektedir. Hem Kolmogorov-Smirnov hem de Shapiro-Wilk testlerinde sıfır hipotezi red edildiğinde serinin normal dağılmadığı, aksine sıfır hipotezi red edilemediğinde serinin normal dağılım gösterdiği anlamına gelmektedir.

Bağımsız örneklem t-testi, iki bağımsız grubun ortalamaları arasındaki farkı karşılaştırmak için yaygın olarak kullanılmakta ve grupların birbirinden bağımsız olduğu varsayımı üzerine kurulmaktadır (Stoltzfus, 2015). Çalışmada, Arbitrum ve Optimism teknolojilerinin etkinleştirilmesinden önce ve sonra Ethereum ağında gerçekleşen işlem sayıları ve işlem maliyetleri, farklı zaman dilimlerinde toplanmış bağımsız veriler olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, bağımsız örneklem t-testinin kullanımını uygun kılmaktadır (Kim, 2019). Bağımsız örneklem t-testinin kullanımı, verilerin birbirinden bağımsız olduğu ve bir grubun diğer grubun verilerini etkilemediği durumlarda geçerlidir (Ross ve Willson, 2017). Ancak veriler normal dağılım göstermediğinde bağımsız örneklem t-testi yerine parametrik olmayan yöntemlere başvurulmaktadır. Mann-Whitney U testi normal dağılımın geçerli olmadığı durumda kullanılabilen bağımsız örneklem testidir. Diğer bir ifadeyle, bağımsız örneklem testinin parametrik olmayan (non-parametrik) karşılığıdır. Mann-Whitney U test istatistiği hesaplanması için öncelikle iki grubun değerleri küçükten büyüğe sıralanmaktadır. Daha sonra U testi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (3)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (4)$$

$$U = \text{Min}\{U_1, U_2\} \quad (5)$$

Burada U_1 ve U_2 iki grubun skorlarını, R_1 birinci grubun rank toplamını, R_2 ikinci grubun rank toplamını göstermektedir. Hesaplanan en küçük U değeri kritik değerden küçük ise iki grup arasında fark olmadığı, aksine red edildiğinde iki grup arasında istatistiksel olarak fark olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Çalışmada analizin son aşamasında Ethereum ağında, Arbitrum ve Optimism ağlarının etkinleştirilmesinin etkilerini değerlendirmek üzere regresyon analizine yer verilmektedir. Çalışmada kullanılan modeller eşitlik (6)-(8)'de gösterilmektedir.

$$\text{Model 1: Ethereum}_t = \beta_0 + \beta_1 \text{Arbitrum}_t + \epsilon_t \quad (6)$$

$$\text{Model 2: Ethereum}_t = \beta_0 + \beta_2 \text{Optimism}_t + \epsilon_t \quad (7)$$

$$\text{Model 3: Ethereum}_t = \beta_0 + \beta_1 \text{Arbitrum}_t + \beta_2 \text{Optimism}_t + \epsilon_t \quad (8)$$

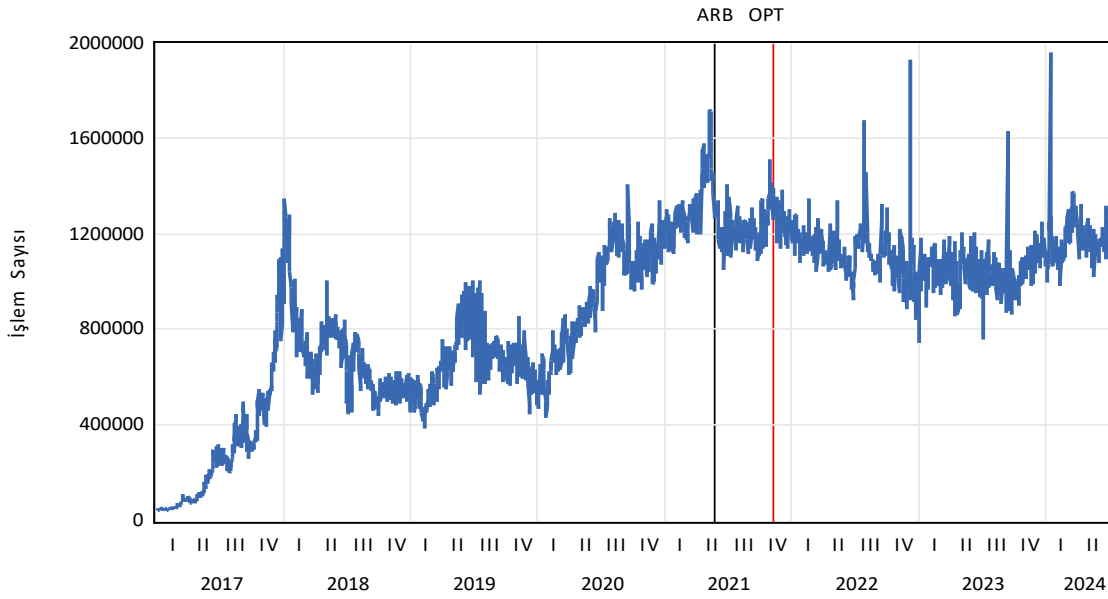
Ekonometrik regresyon modelleri ilk olarak Arbitrum ve Optimism günlük işlem sayıları için daha sonra ise Arbitrum ve Optimism günlük işlem ücretleri için olağan en küçük kareler (OLS) yöntemiyle tahmin edilmektedir. Modellerde β_0 , β_1 , β_2 model katsayıları ve ϵ_t hata terimidir.

Çalışmanın kapsamı, Ethereum ağının ölçeklenebilirlik sorunlarına ve katman-2 çözümleri olarak sunulan Arbitrum ve Optimism teknolojilerinin etkilerine odaklanmaktadır. Analiz, yalnızca Ethereum ağının belirli bir dönemine ait verileri kullanarak gerçekleştirilebildiğinden, çalışma sonuçları, katman-2 çözümlerinin Ethereum ağının ölçeklenebilirliğini artırma ve işlem maliyetlerini azaltma potansiyeline dair önemli bilgiler sunmaktadır. Bu teknolojilerin uzun vadeli etkileri ve diğer blok zincir ağlarıyla karşılaştırmaları için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, çalışma, Ethereum 2.0 gibi diğer potansiyel çözümleri veya farklı blok zincir ağlarını inceleme kapsamı dışında tutmaktadır.

6. Bulgular

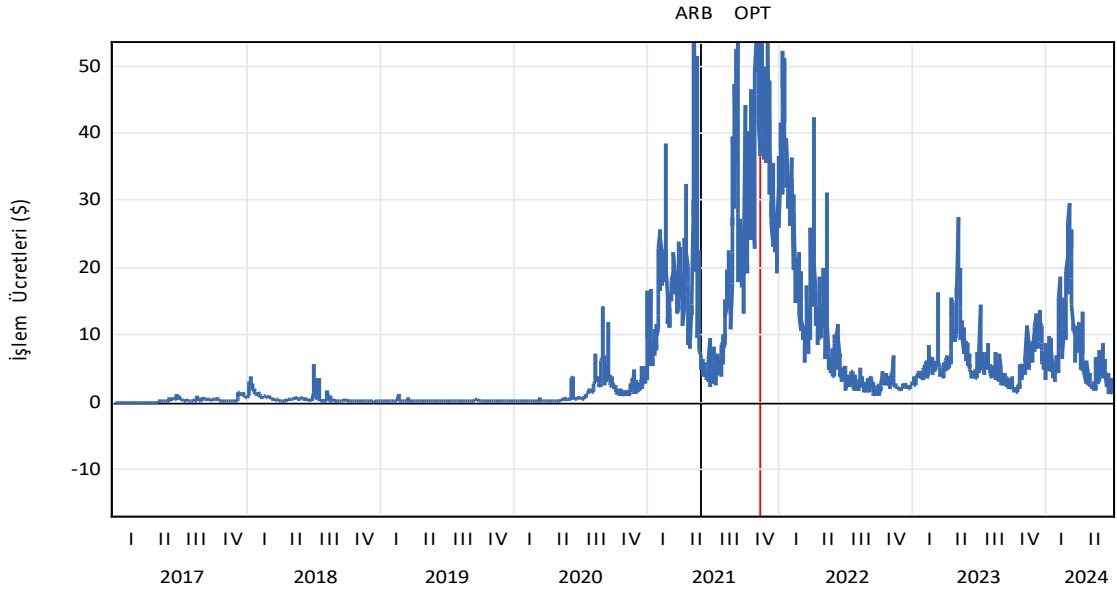
Çalışmada ilk olarak, katman-2 çözümleri olan Arbitrum ve Optimism teknolojileri etkinleştirilmeden önce ve etkinleştirildikten sonra Ethereum ağının yıl bazında günlük işlem sayıları ve işlem ücretlerindeki değişiklikler ele alınmıştır. Şekil 2’de Ethereum ağında gerçekleştirilen günlük işlem sayılarının yıllar itibariyle seyri gösterilmektedir.

Şekil 2. Ethereum Ağı İşlem Sayıları



Şekil 2’de 01/01/2017-04/07/2024 dönemi için Ethereum ağı işlem sayıları zaman yolu grafiği üzerinde 29/05/2021 tarihi Arbitrum’un ve 11/11/2021 tarihi Optimism’in aktif olduğu tarihler gösterilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, 2021 yılından 2023 yılına kadar genel olarak Ethereum ağının işlem sayılarında ortalama olarak azalma görülmektedir. Bu azalma, Arbitrum ve Optimism ağları üzerindeki yükü azaltarak işlem sayılarını sınırlı olsa da düşürmüş olabileceğini işaret etmektedir. Ancak bu etkinin çok sürmediği özellikle 2024 yılı itibariyle Ethereum işlem sayılarında genel bir artış olduğu gözlenmektedir.

Şekil 3’te ise katman-2 çözümleri Arbitrum ve Optimism’in öncesi ve sonrası Ethereum ağı işlem ücretlerine ilişkin sonuçlar verilmektedir. Şekil 3’te yine Arbitrum ve Optimism’in etkinleştirildiği dönemler dikey çizgiler ile gösterilmektedir.

Şekil 3. Ethereum Ağı İşlem Ücretleri

Şekil 3'te görüldüğü üzere, 01/01/2017-04/07/2024 dönemi için Ethereum işlem ücretleri özellikle 2020 yılında çok hızlı bir şekilde 20 \$'ın üzerine çıkmıştır. Bu artış zaman zaman yerini önemli düşüslere bıraksa da 2021 yılı içerisinde 50 \$'a dayanmaktadır. Bu durumun 2019 yılı Ocak ayında 131,92 milyar \$ olan kripto piyasasının toplam değerinin 2021 yılı Kasım ayı itibari ile 3,01 trilyon \$'a ulaşmış olması gösterilebilir. 29/05/2021 tarihinde Arbitrum'un aktif olmasından sonra işlem ücretlerinde geçici bir düşüş yaşansa da 11/11/2021 tarihinde Optimism'in aktif olduktan sonra Ethereum işlem ücretlerindeki düşüşün belirginleştiği görülmektedir. Bu durum, katman-2 çözümlerinin, Ethereum ağının işlem kapasitesini ve verimliliğini artırarak işlem ücretlerini düşürdüğü yönünde önemli bir gösterge olarak değerlendirilebilir.

Arbitrum ve Optimism gibi katman-2 çözümlerinin Ethereum işlem hacmi ve işlem ücretlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir düşüş ortaya koyup koymadığını belirlemek amacıyla öncelikle değişkenlerin normal dağılıma uyup uymadıkları test edilmelidir. Bu amaçla uygulanan Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk Normallik test sonuçları Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk Normallik Testi Sonuçları

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	İstatistik	S. Derecesi	Olasılık	İstatistik	S. Derecesi	Olasılık
Ethereum İşlem Sayıları	0,133	2742	0,001	0,937	2742	0,001
Ethereum İşlem Ücretleri	0,278	2742	0,000	0,624	2742	0,001

Tablo 1 incelendiğinde Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk testlerinin her ikisinde de hem Ethereum işlem sayıları hem de işlem ücretleri serisinin normal dağılmadığını göstermektedir. Bu durumda Arbitrum ve Optimism gibi katman-2 çözümlerinin istatistiksel olarak etkinliğini ortaya koymak için parametrik olmayan (non-parametrik) testlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 2'de 29/05/2021 döneminde aktif olan Arbitrum'un aktif olmadan önce ve aktif olduktan sonrası için ortalama, standart sapma ve Mann-Whitney U test sonuçları yer almaktadır.

Tablo 2. Arbitrum İçin Mann-Whitney U Test Sonuçları

		Gözlem Sayısı	Ortalama (Standart Sapma)	Sıra Ortalaması	Mann-Whitney U	Olasılık Değeri
Ethereum İşlem Sayıları	Arbitrum Öncesi	2119	819757,33 (368515,49)	1257,99	13,8465	0,0000
	Arbitrum Sonrası	623	1086462,94 (108473,06)	1757,59		
Ethereum İşlem Ücretleri	Arbitrum Öncesi	2119	5,6339 (10,8655)	1212,91	19,3454	0,0000
	Arbitrum Sonrası	623	6,1974 (4,4748)	1910,91		

Tablo 2 incelendiğinde Arbitrum'un aktif olmadan önce Ethereum ağı günlük ortalama işlem sayısı 0,81 milyon (819757) adet iken, Arbitrum aktif olduktan sonra günlük ortalama işlem sayısının 1,08 milyona (1086462) çıktığı görülmektedir. Bu artışın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını ortaya koymak amacıyla yapılan Mann-Whitney U değeri 13,85 olarak bulunmuştur. Bu istatistik değeri %1 düzeyinde anlamlı olduğundan Arbitrum öncesi ve sonrası işlem sayılarında anlamlı bir fark olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gerek aritmetik ortalamalar gerekse sıra ortalamaları incelendiğinde Arbitrum sonrası ortalamalar daha yüksektir. Diğer bir ifadeyle bu sonuçlar, Arbitrum'un Ethereum ağının işlem sayıları üzerinde azaltıcı bir etkisi olmadığını, aksine Arbitrum sonrası Ethereum ağının işlem sayılarında istatistiksel olarak anlamlı bir artış olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 2'de Arbitrum'un aktif olmadan önce Ethereum ağı günlük ortalama işlem ücretleri 5,63 \$ iken, Arbitrum aktif olduktan sonra günlük ortalama işlem ücretleri 6,19 \$'a çıkmıştır. Bu artışın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını ortaya koymak amacıyla yapılan Mann-Whitney U değeri 19,35 olarak bulunmuştur. Bu istatistik değeri %1 düzeyinde anlamlı olduğundan Arbitrum öncesi ve sonrası işlem ücretlerinde anlamlı bir fark olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gerek aritmetik ortalamalar gerekse sıra ortalamaları incelendiğinde, Arbitrum sonrası ortalamalar daha yüksektir. Diğer bir ifadeyle bu sonuçlar, Arbitrum'un Ethereum ağının işlem ücretleri üzerinde azaltıcı bir etkisi olmadığını, aksine Arbitrum sonrası Ethereum ağının işlem ücretlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde arttığını göstermektedir.

Tablo 2'de dikkati çeken diğer bir husus ise Arbitrum sonrası standart sapmaların azalmasıdır. Daha açık bir ifadeyle, Ethereum işlem sayılarının standart sapması Arbitrum öncesi 368515,49 iken, Arbitrum sonrası 108473,06 şeklindedir. Benzer durum Ethereum işlem ücretlerinin standart sapması için de geçerlidir. Ethereum işlem ücretlerinin standart sapması Arbitrum öncesi 10,87 iken, Arbitrum sonrası 4,47'dir. Her ne kadar Arbitrum'un aktif olmasından sonra ortalama işlem sayıları ve ücretlerinde bir azalma olmasa da standart sapmalarında bir azalma görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, Arbitrum sonrası işlem sayıları ve işlem ücretleri ortalamasına daha yakın dağılmaktadır.

Tablo 3. Optimism İçin Mann-Whitney U Test Sonuçları

		Gözlem Sayısı	Ortalama (Standart Sapma)	Sıra Ortalaması	Mann-Whitney U	Olasılık Değeri
Ethereum İşlem Sayıları	Optimism Öncesi	967	977316,9638 (273764,0893)	862,7931	8,2456	0,0000
	Optimism Sonrası	967	1110886,0155 (106314,5108)	1072,2068		
Ethereum İşlem Ücretleri	Optimism Öncesi	967	6,6653 (11,4488)	751,9260	16,9763	0,0000
	Optimism Sonrası	967	9,5408 (11,8370)	1183,0739		

Tablo 3'te 11/11/2021 tarihinde aktif olan Optimism'in aktif olmadan önce ve aktif olduktan sonrası için ortalama, standart sapma ve Mann-Whitney U test sonuçları yer almaktadır.

Tablo 3 incelendiğinde Optimism'in aktif olmadan önce Ethereum ağı günlük ortalama işlem sayısı 0,971 milyon (977316) adet iken, Optimism aktif olduktan sonra günlük ortalama işlem sayısının 1,11 milyona (1110886) çıktığı görülmektedir. Bu artışın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını ortaya koymak amacıyla sınıanan Mann-Whitney U değeri 8,25 olarak bulunmuştur. Bu istatistik değeri %1 düzeyinde anlamlı olduğundan Optimism öncesi ve sonrası işlem sayılarında anlamlı bir fark olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gerek aritmetik ortalamalar gerekse sıra ortalamaları incelendiğinde, Optimism sonrası ortalamalar daha yüksektir. Diğer bir ifadeyle bu sonuçlar, Optimism'in Ethereum ağının işlem sayıları üzerinde azaltıcı bir etkisi olmadığını, aksine Optimism sonrası Ethereum ağının işlem sayılarında istatistiksel olarak anlamlı bir artış olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3'de Optimism'in aktif olmadan önce Ethereum ağı günlük ortalama işlem ücretleri 6,66 \$ iken, Optimism aktif olduktan sonra günlük ortalama işlem ücretleri 9,54 \$'a çıkmıştır. Bu artışın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını ortaya koymak amacıyla sınıanan Mann-Whitney U değeri 16,98 olarak bulunmuştur. Bu istatistik değeri %1 düzeyinde anlamlı olduğundan Optimism öncesi ve sonrası işlem ücretlerinde anlamlı bir fark olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gerek aritmetik ortalamalar gerekse sıra ortalamaları incelendiğinde, Optimism sonrası ortalamalar daha yüksektir. Bu sonuçlar, Optimism'in Ethereum ağının işlem ücretleri üzerinde azaltıcı bir etkisi olmadığını, aksine Arbitrum sonrası Ethereum ağının işlem ücretlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde arttırdığını göstermektedir.

Tablo 3'te Ethereum işlem sayılarının standart sapması Optimism öncesi 273764,0893 iken Optimism sonrası 106314,5108 şeklindedir. Ethereum işlem ücretlerinin standart sapması Optimism öncesi 11,45 iken, Optimism sonrası 11,84'tür. Her ne kadar Optimism'in aktif olmasından sonra ortalama işlem sayıları ve ücretlerinde bir azalma olmasa da Ethereum işlem sayılarının standart sapmasında bir azalma olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle Optimism sonrası işlem sayıları ortalamasına daha yakın dağılmaktadır. Optimism sonrası Ethereum işlem ücretlerinin standart sapması ise artmıştır. Ethereum ağı üzerinde dönemsel yoğunluklar ve ağ tıkanıklıkları, işlem ücretlerinin ani artışlarına ve düşüşlerine neden olduğundan (Jian-Peng vd., 2019), bu tür yüksek standart sapmalar doğası gereği ortaya çıkmaktadır. Tablo 2 ve Tablo 3'te yer alan test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, Arbitrum ve Optimism katman-2 çözümlerinin aktif olmasının Ethereum ağı üzerinde gerek işlem sayıları gerekse işlem ücretleri açısından azaltıcı bir etki yaratmadığı şeklindedir.

İlgili değişkenlere ilişkin korelasyon katsayıları Tablo 4'te gösterilmektedir. Tablo 4 incelendiğinde en yüksek korelasyonun 0,67 ile Arbitrum ve Optimism değişkenleri arasında pozitif ve orta üstü derecede ilişki olduğu, Arbitrum ve işlem ücretleri, optimism ve işlem ücretleri ile optimism ve işlem sayıları arasında negatif ve zayıf ilişki olduğu görülmektedir. Arbitrum ve işlem sayıları arasında ise pozitif ve anlamsız bir ilişki söz konusudur.

Tablo 4. Korelasyon Katsayıları

	İşlem Sayıları	İşlem Ücretleri	Arbitrum	Optimism
İşlem Sayıları	1,0000 -----			
İşlem Ücretleri	0,4100 (0,0000)	1,0000 -----		
Arbitrum	0,0349 (0,2772)	-0,2703 (0,0000)	1,0000 -----	
Optimism	-0,0939 (0,0035)	-0,4250 (0,0000)	0,6677 (0,0000)	1,0000 -----

Not: Parantez içerisindeki değerler korelasyon katsayısının anlamlı olduğu olasılık değerlerini göstermektedir.

Optimism ve Arbitrum'un Ethereum ağının günlük işlem sayıları üzerindeki etkilerini görmek amacıyla kurulan regresyon sonuçları Tablo 5'te verilmektedir. Ethereum işlem sayılarını açıklamak amacıyla Model 1'de Arbitrum, Model 2'de Optimism ve Model 3'te ise hem Optimism hem de Arbitrum bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Tahmin sonuçları incelendiğinde determinasyon katsayısı Model 1 için 0,10 ve Model 2 için 0,08 olarak elde edilmiştir. Model 3'te ise bu değer yaklaşık 0,11 olarak hesaplanmıştır. Her üç model bağlamında modellerin determinasyon katsayısının 0,0808-0,1051 aralığında olduğu, diğer bir ifadeyle Arbitrum ve Optimism'un Ethereum ağının günlük işlem sayılarındaki değişimi yaklaşık %11 açıkladığı görülmektedir. Benzer sonuçlar ayarlanmış determinasyon katsayıları açısından da elde edilmiştir. Model 1, Model 2 ve Model 3'te tahmin edilen tüm parametreler istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. İlaveten hesaplanan F-istatistik değerleri Model 1 için 318,14, Model 2 için 241,07 ve Model 3 için 160,81 olarak hesaplanmıştır. Her üç model de istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı olduğundan modellerde uyum iyiliğinin olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Tablo 5'te Model 3 çoklu doğrusal regresyondur ve modelin VIF değeri 1,1107'dir. Buna göre Model 3'te çoklu doğrusal bağlantı sorununun olmadığı görülmektedir.

Tablo 5. Arbitrum ve Optimism'in Ethereum İşlem Sayıları Üzerindeki Etkisi

	Model 1	Model 2	Model 3
Sabit Terim	819753,3032*** (23727,1842)	836289,6757*** (22329,6940)	819757,3303*** (23731,5152)
Arbitrum_t	266705,6118*** (25525,7566)	-	227568,7298*** (26457,3869)
Optimism_t	-	264389,2892*** (25102,2676)	53352,9047*** (16371,8094)
R²	0,1040	0,0808	0,1051
Ayarlanmış R²	0,1037	0,0805	0,1044
AIC	28,2407	28,2662	28,2402
SIC	28,2450	28,2705	28,2426
VIF			1,1107
F-istatistiği	318,1389	241,0672	160,8098
F-olasılık	0,0000	0,0000	0,0000

Not: *** %1 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlılığı göstermektedir. Parantez içerisindeki değerler Newey-West standart hatalarıdır.

Tablo 5'e görüldüğü üzere Model 1-Model 3 için tahmin edilen parametreler benzer sonuçlar üretmektedir. Sabit terim Optimism ve Arbitrum'un etkinleştirilmediği durumda Ethereum ağındaki günlük ortalama işlem sayılarını temsil etmektedir. Model 1 için tahmin edilen sabit terim 819753,30'dir. Benzer şekilde sabit terim Model 2'de 836289,67 ve Model 3'te ise 819757,33'tir. Bu değerler Ethereum ağının temel işlem aktivitesinin bir göstergesi olarak modelin temel alınacak ortalama işlem sayılarıdır. Arbitrum'un etkinleştirilmesinden sonra Ethereum ağının günlük işlem sayıları Model 1'de ortalama olarak 266705,61 adet ve Model 3'te 227568,73 adet artmaktadır. Benzer şekilde Optimism'in etkinleştirilmesi sonrasında Ethereum ağının günlük işlem sayıları Model 2'de 264389,28 adet ve Model 3'te 53352,90 adet artmaktadır.

Optimism ve Arbitrum ağlarının Ethereum ağının günlük işlem ücretleri üzerindeki etkilerini görmek amacıyla kurulan regresyon Tablo 6'da verilmektedir. Ethereum işlem ücretlerini açıklamak amacıyla Model 1'de Arbitrum, Model 2'de Optimism ve Model 3'te ise hem Optimism hem de Arbitrum bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır.

Tahmin sonuçları incelendiğinde Model 1'in genel olarak anlamsız, Model 2 ve Model 3'ün determinasyon katsayılarının ise istatistiksel olarak anlamlı olmakla beraber oldukça düşük çıktığı

görülmektedir. Model 3'ün tahmin edilen tüm parametreleri istatistiksel olarak anlamlıdır. Tablo 6'da Model 3 çoklu doğrusal regresyondur ve modelin VIF değeri 1,0410'dur. Buna göre Model 3'te çoklu doğrusal bağlantı sorununun olmadığı görülmektedir. Model 2 için tahmin edilen sabit terim 5,51 \$ iken, Model 3'te 5,63 \$'dır. Sabit terim Optimism ve Arbitrum'un etkinleştirilmediği durumda Ethereum ağındaki günlük ortalama işlem ücretini temsil etmektedir. Bu değerler Ethereum ağının temel işlem aktivitesinin bir göstergesi olarak modelin temel alınacak ortalama işlem ücretleridir. Buna göre Model 3'e göre Arbitrum'un etkinleştirilmesinden sonra Ethereum ağının günlük işlem ücreti ortalama olarak 1,73 \$ azalmaktadır. Optimism'in etkinleştirilmesi sonrasında ise Ethereum ağının günlük işlem ücretleri Model 2'ye göre 1,53 \$, Model 3'e göre ise 3,13 \$ artmaktadır.

Tablo 6. Arbitrum ve Optimism'in Ethereum İşlem Ücretleri Üzerindeki Etkisi

	Model 1	Model 2	Model 3
Sabit Terim	5,6239*** (0,6839)	5,5076*** (0,6355)	5,6339*** (0,6843)
Arbitrum_t	0,5635 (0,8412)	-	-1,7383** (0,7566)
Optimism_t	-	1.5259* (0,8853)	3,1379*** (0,6964)
R²	0,0006	0,0033	0,0051
Ayarlanmış R²	0,0002	0,0030	0,0044
AIC	7,4009	7,3981	7,3971
SIC	7,4052	7,4024	7,3994
VIF			1,0410
F-istatistiği	1,5958	9,2817	7,0853
F-olasılık	0,2066	0,0023	0,0008

Not: ***, ** ve * sırasıyla %1, %5, %10 düzeylerinde istatistiksel olarak anlamlılığı göstermektedir. Parantez içerisindeki değerler Newey-West standart hatalarıdır.

Ethereum ağı, işlem ücretleri mekanizması açısından son derece dinamik ve çok yönlü bir yapıya sahiptir. Özellikle işlem ücretleri, Ethereum ağı üzerindeki işlemler için kullanıcılardan alınan ödemeleri ifade etmekte ve ağ yoğunluğu, işlemin karmaşıklığı ve kullanıcıların işlemlerinin ağ tarafından ne kadar hızlı işlenmesini istedikleri gibi birçok faktöre bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında yapılan regresyon analizleri Ethereum işlem ücretleri üzerinde Arbitrum ve Optimism işlem sayılarının etkisinin ortaya konması bakımından sınırlılıklara sahiptir.

7. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, Ethereum ağında Arbitrum ve Optimism katman-2 çözümlerinin ölçeklenebilirlik üzerindeki etkilerini ampirik olarak incelemektedir. Bu yönü ile çalışma Ethereum ağına farklı bir bakış açısı sunmaktadır. Arbitrum ve Optimism gibi katman-2 çözümleri Ethereum ağı üzerindeki işlem sayılarının ve işlem ücretlerinin düşürülmesi hedeflenerek etkinleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre Arbitrum'un etkinleştirilmesinden önce günlük ortalama işlem sayısı 0,81 milyon adet ve işlem ücretleri 5,63 \$ iken, Arbitrum aktif olduktan sonra günlük ortalama işlem sayısının 1,08 milyona ve ortalama işlem ücretinin 6,19 \$'a çıktığı görülmektedir. Optimism'in etkinleştirilmesinden önce günlük ortalama işlem sayısı 0,97 milyon adet ve ortalama işlem ücreti 6,66 \$ iken, Arbitrum aktif olduktan sonra günlük ortalama işlem sayısının 1,11 milyona ve ortalama işlem ücretinin 9,54 \$'a çıktığı görülmektedir. Standart sapmaların yüksek olması, veri setinin doğası gereği normaldir. Kripto para piyasalarındaki yüksek volatilité ve dönemsel yoğunluklar, işlem sayıları ve işlem ücretlerinde büyük dalgalanmalara yol açmakta, bu da standart sapmanın yüksek olmasına neden olmaktadır. Ek olarak, regresyon analizi sonuçları da bu bulguları desteklemektedir.

Katman-2 çözümleri, özellikle büyük ve karmaşık işlemleri ana ağ üzerinde tutarken, küçük ve basit işlemleri zincir-dışı (off-chain) olarak gerçekleştirmektedir. Bu strateji, ana ağın güvenlik ve merkeziyetsizlik avantajlarını korurken, işlem maliyetlerini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Ancak, ana ağda kalan işlemler, daha yüksek hesaplama gücü ve veri depolama gereksinimleri nedeniyle daha yüksek ücretler talep edebilmektedir. Bu da işlem ücretlerinin artmasına neden olmaktadır. Katman-2 çözümleri sonrası Ethereum ağında işlem sayılarının ve işlem ücretlerinin artmasının birkaç nedeni vardır. İlk olarak, katman-2 çözümleri, ana ağ üzerindeki bazı işlemleri zincir-dışı (off-chain) olarak gerçekleştirmektedir, bu da ana ağdaki toplam işlem sayısını azaltmaktadır. Ancak, ana ağda gerçekleşen işlemler daha karmaşık ve yüksek değerli işlemler ise işlem ücretlerinin artmasına neden olabilmektedir. Ayrıca, katman -2 çözümlerinin kullanımı, ana ağdaki işlemlerin yoğunluğunu ve karmaşıklığını artırabilmektedir. Bu durum, ana ağda hem yüksek işlem sayılarına hem de daha yüksek işlem ücretlerine yol açabilmektedir.

Çalışma sonuçları Arbitrum ve Optimism teknolojilerinin Ethereum ağının işlem verimliliğini artırma ve işlem ücretlerini düşürme potansiyelini gerçekleştirmediğini ortaya koymaktadır. Ethereum ağının ölçeklenebilirlik zorluklarını ele almak için Arbitrum ve Optimism gibi katman-2 çözümleri önemli bir potansiyele sahip olmasına rağmen, bu teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, Ethereum ağının daha geniş ölçekte benimsenmesine ve verimli bir şekilde işlemesine katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, Ethereum ve katman-2 teknolojileri hakkında devam eden araştırmalar ve geliştirmeler, blok zincir ekosisteminin geleceğini şekillendirmede önemli bir rol oynamaya devam edecektir. Bu doğrultuda, gelecekteki araştırmalarda şu konuların ele alınması yararlı olacaktır. Arbitrum ve Optimism'in etkilerini güçlü bir şekilde değerlendirmek için daha uzun dönemleri kapsayan verilerin gerçekleşmesi beklendikten sonra bu yeni veri seti ile çalışma bir kez daha ele alınabilir. Yine veri yapısına bağlı olarak zaman serisi veya panel verilerle alternatif metodolojiler kullanılabilir. Yeterli veriye ulaşılması durumunda state channels, plasma, side chains gibi Arbitrum ve Optimism dışında diğer katman-2 çözümlerinin de etkileri incelenerek bu teknolojiler karşılaştırılabilir. Ethereum ağındaki kullanıcı davranışlarının ve bu davranışların katman-2 çözümlerine nasıl tepki verdiği incelenebilir. Son olarak ölçeklendirilebilirlik ile Arbitrum ve Optimism gibi önerilen uygulamaların reel sektör üzerindeki etkileri araştırılabilir.

Beyan ve Açıklamalar (Declarations and Disclosures)

Yazarların Etik Sorumlulukları (Ethical Responsibilities of Authors): Bu çalışmanın yazarları, araştırma ve yayın etiği ilkelerine uyduklarını kabul etmektedirler.

Çıkar Çatışması (Conflicts of Interest): Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Finansal Destek (Funding): Bu çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen SYL-2024-1740 kodlu proje sonuçlarından üretilmiştir. Yazarlar, desteklerinden ötürü Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederler.

Yazar Katkı Oranı (Author Contributions): Yazarlar, çalışmaya olan katkılarını şu şekilde beyan etmişlerdir: Kavramlaştırma ve çalışma dizaynı, M. Çınar ve M. Apak; verilerin toplanması, M. Apak; verilerin analizi ve sonuçların yorumlanması, M. Çınar; çalışmanın ilk/taslak halinin yazılması, M. Apak ve M. Çınar; çalışmanın gözden geçirilmesi ve düzenlenmesi/düzeltilmesi, M. Çınar ve M. Apak. Çalışmanın ilk ve son hali tüm yazarlar tarafından okunmuş ve onaylanmış olup, yazarlar çalışmalarıyla ilgili sorumluluğu kabul etmektedirler.

İntihal Denetimi (Plagiarism Checking): Bu çalışma, intihal tarama programı kullanılarak intihal taramasından geçirilmiştir.

Kaynaklar

- Bellavitis, C., Cumming, D., & Vanacker, T. (2022). Ban, boom, and echo! Entrepreneurship and initial coin offerings. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 46(5), 1136-1169. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3608978>
- Bergers, J., Shi, Z., Korsmit, K., & Zhao, Z. (2021, December). Dwh-dim: A blockchain-based decentralized integrity verification model for data warehouses. In *2021 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain)* (pp. 221-228). IEEE. <https://doi.org/10.1109/Blockchain53845.2021.00037>
- Bhutta, M. N. M., Khwaja, A. A., Nadeem, A., Ahmad, H. F., Khan, M. K., Hanif, M. A., ... & Cao, Y. (2021). A survey on blockchain technology: Evolution, architecture, and security. *Ieee Access*, 9, 61048-61073. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072849>
- Bingzhang, L., & Mamoiko, A. (2022). Developing self-executing smart contracts on Ethereum for container shipping in China. *T-Comm*, 16(8), 38-45. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2019.07.022>
- Bonneau, J., Miller, A., Clark, J., Narayanan, A., Kroll, J. A., & Felten, E. W. (2015, May). Sok: Research perspectives and challenges for bitcoin and cryptocurrencies. In *2015 IEEE symposium on security and privacy* (pp. 104-121). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SP.2015.14>
- Buterin, V. (2020). A rollup-centric Ethereum roadmap. Fellowship of Ethereum magicians. <https://ethereum-magicians.org/t/a-rollup-centric-ethereum-roadmap/4698> (Access Date: 19 July 2022).
- Ferretti, S., & D'Angelo, G. (2020). On the Ethereum blockchain structure: A complex networks theory perspective. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 32(12), e5493. <https://doi.org/10.1002/cpe.5493>
- García-Corral, F. J., Cordero-García, J. A., de Pablo-Valenciano, J., & Uribe-Toril, J. (2022). A bibliometric review of cryptocurrencies: How have they grown? *Financial Innovation*, 8, 1-31. <https://doi.org/10.1186/s40854-021-00306-5>
- Hafid, A., Hafid, A. S., & Samih, M. (2020). Scaling blockchains: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 8, 125244-125262. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007255>
- Harishankar, M., Akestoridis, D. G., Iyer, S. V., Laszka, A., Joe-Wong, C., & Tague, P. (2020). Payplace: Secure and flexible operator-mediated payments in blockchain marketplaces at scale. *arXiv preprint arXiv:2003.06197*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.06197>
- Jian-peng, D., Hang, L., Xiao-Ling, P., Chao-Ni, Z., Tian-Huai, Y., & Xian-Min, J. (2019). Research progress of quantum memory. *Acta Physica Sinica*. <https://doi.org/10.7498/APS.68.20190039>
- Khor, J. H., Sidorov, M., & Zulfarnain, S. A. B. (2023). Scalable lightweight protocol for interoperable public blockchain-based supply chain ownership management. *Sensors*, 23(7), 3433. <https://doi.org/10.3390/s23073433>
- Kim, H. Y. (2019). Statistical notes for clinical researchers: the independent samples t-test. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 44. <https://doi.org/10.5395/rde.2019.44.e25>
- Ko, K., Jeong, T., Woo, J., & Hong, J. W. K. (2024). Survey on blockchain-based non-fungible tokens: History, technologies, standards, and open challenges. *International Journal of Network Management*, 34(1), e2245. <https://doi.org/10.1002/nem.2245>
- Lavaur, T., Lacan, J., & Chanel, C. P. (2022). Enabling blockchain services for IoE with Zk-Rollups. *Sensors*, 22(17), 6493. <https://doi.org/10.3390/s22176493>
- Lee, C. A., & Chrisochoides, N. (2008, January). A (condensed) parametric study of optimistic computation in wide-area, distributed environments. In *Proceedings of the 15th ACM Mardi Gras conference: From lightweight mash-ups to lambda grids: Understanding the spectrum of distributed computing requirements, applications, tools, infrastructures, interoperability, and the incremental adoption of key capabilities* (pp. 1-8).
- Li, K., Tang, Y., Chen, J., Wang, Y., & Liu, X. (2021, November). TopoShot: Uncovering Ethereum's network topology leveraging replacement transactions. In *Proceedings of the 21st ACM Internet Measurement Conference* (pp. 302-319). <https://doi.org/10.1145/3487552.3487850>
- Lin, X., Zhang, Y., Huang, C., Xing, B., Chen, L., Hu, D., & Chen, Y. (2023). An access control system based on blockchain with zero-knowledge rollups in high-traffic IoT environments. *Sensors*, 23(7), 3443. <https://doi.org/10.3390/s23073443>
- Lukianchuk, D. Y. (2022). The evolutionary development of money: from minted coins to cryptocurrencies. *Бізнес Інформ*, (11), 190-194.
- McCorry, P., Buckland, C., Bakshi, S., Wüst, K., & Miller, A. (2020). You sank my battleship! a case study to evaluate state channels as a scaling solution for cryptocurrencies. In *Financial Cryptography and Data Security: FC 2019*

- International Workshops, VOTING and WTSC, St. Kitts, St. Kitts and Nevis, February 18-22, 2019, Revised Selected Papers 23* (pp. 35-49). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54978-1_3
- Neiheiser, R., Inácio, G., Rech, L., Montez, C., Matos, M., & Rodrigues, L. (2023). Practical limitations of Ethereum's layer-2. *IEEE Access*, 11, 8651-8662. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3236895>
- Ross, A., & Willson, V. (2017). Independent samples t-test. *Research Methods for Social Work*, 13-16.
- Sadath, L., Mehrotra, D., & Kumar, A. (2022). Addressing scalability issues in blockchain: A use case from healthcare. *Research Square* (p. 10). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1330943/v1>
- Sguanci, C., Spatafora, R., & Vergani, A. M. (2021). Layer 2 blockchain scaling: A survey. *arXiv preprint arXiv:2107.10881*.
- Stoltzfus, J. (2015). Student's t-test for independent samples. *Journal of Medical Education and Curricular Development*, 1(1), 27. <https://doi.org/10.4137/JMECD.S31744>
- Tahmasebi, S., Habibi, J., & Shamsaie, A. (2020, September). A scalable architecture for monitoring IoT devices using Ethereum and fog computing. In *2020 4th International Conference on smart city, internet of things and applications (SCIOT)* (pp. 66-76). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SCIOT50810.2020.9239047>
- Thibault, L. T., Sarry, T., & Hafid, A. S. (2022). Blockchain scaling using rollups: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 10, 93039-93054. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3205385>
- Werner, S., Perez, D., Gudgeon, L., Klages-Mundt, A., Harz, D., & Knottenbelt, W. (2022, September). Sok: Decentralized finance (defi). In *Proceedings of the 4th ACM Conference on Advances in Financial Technologies* (pp. 30-46). <https://doi.org/10.1145/3558535.3558980>
- Wood, G. (2014). Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. *Ethereum Project Yellow Paper*, 151(2014), 1-32.
- Yu, T., Luo, F., Pu, C., Zhao, Z., & Ranzi, G. (2022). Dual-blockchain-based P2P energy trading system with an improved optimistic rollup mechanism. *IET Smart Grid*, 5(4), 246-259. <https://doi.org/10.1049/stg2.12046>
- Zheng, Z., Qi, D., Zhou, N., Wang, X., & Yu, M. (2018). Improving per-node computing efficiency by an adaptive lock-free scheduling model. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 101(10), 2423-2435. <https://doi.org/10.1587/transinf.2017EDP7398>
- Zheng, Z., Xie, P., Zhang, X., Chen, S., Chen, Y., Guo, X., ..., & Zhou, L. (2021). Agatha: Smart contract for DNN computation. *arXiv preprint arXiv:2105.04919*.
- Zhou, Q., Huang, H., Zheng, Z., & Bian, J. (2020). Solutions to scalability of blockchain: A survey. *IEEE Access*, 8, 16440-16455. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967218>