

Enerji Sektöründe Dijitalleşme ve Blokzincir Teknolojisindeki Gelişmenin Ekonomik Etkileri

Araştırma Makalesi /Research Article

Esma DOĞAN¹
Müslüme NARİN²

ÖZ: Sanayi devrimleri sonucunda artan enerji ihtiyacı, geleneksel enerji kaynakları olan fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Ancak bu kaynakların sınırlı olması ve çevreye verdiği zararlar nedeniyle sürdürülebilir olmadıkları açıktır. Artan küresel enerji talebi ve çevresel endişeler kapsamında, enerji sektörü için yenilikçi alternatifler arama zorunluluğunun ortaya çıktığı günümüzde, dijital teknolojiler enerji üretim ve tüketim süreçlerini dönüştürme potansiyeline sahiptir. Akıllı şebekeler, nesnelere interneti, yapay zekâ, blokzincir gibi teknolojiler, enerjinin daha verimli kullanılmasını sağlayarak iklim değişikliği ile mücadelede ve enerji verimliliğinde önemli ilerlemeler kaydedilmesine yardımcı olabilir. Özellikle blokzincir teknolojisi, enerji sektöründeki işlemleri merkezi olmayan bir yaklaşımla, şeffaflık ve güvenlik sağlayarak, işlem maliyetlerini düşürme ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etme potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada dijital teknolojilerden biri olan blokzincir teknolojisinin enerji sektöründe yaratabileceği iktisadi etkiler ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Dijital Dönüşüm, Blokzincir, Yenilenebilir Enerji, Enerji Verimliliği.

JEL Kodları: O3, O4, N7, Q4

Economic Effects of Development in Digitalization and Blockchain Technology in the Energy Sector

ABSTRACT: The increasing energy need as a result of industrial revolutions is met by fossil fuels, which are traditional energy sources; however, it is clear that these resources are not sustainable due to their limited resources and the damage they cause to the environment. In today's world where it is necessary to look for innovative alternatives for the energy sector within the scope of increasing global energy demand and environmental concerns, digital technologies have the potential to transform energy production and consumption processes. Technologies such as smart grids, the internet of things, artificial intelligence, and blockchain can help make significant progress in the fight against climate change and energy efficiency by ensuring more efficient use of energy. Blockchain technology, in particular, has the potential to reduce transaction costs and promote the use of renewable energy sources by decentralizing transactions in the energy sector, providing transparency and security. In this study, the economic effects that blockchain technology, one of the digital technologies, can create in the energy sector are investigated.

Keywords: Energy, Digital Transformation, Blockchain, Renewable Energy, Energy Efficiency.

JEL Codes: O3, O4, N7, Q4

Geliş Tarihi / Received: 16/02/2024

Kabul Tarihi / Accepted: 12/03/2024

¹ Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İktisat Politikası Yüksek Lisans Programı Öğrencisi, esma.dogan@hbv.edu.tr, orcid.org/0009-0004-8458-0782

² Prof. Dr. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, muslume.narin@hbv.edu.tr, orcid.org/0000-0002-1476-2802

1. Giriş

Dijital teknolojilerin iktisadi ve toplumsal yaşamla hızla bütünleştiği günümüzde enerjiye olan ihtiyaç da önemli ölçüde artış göstermektedir. Küresel enerji talebi artmaya devam ettikçe ve çevresel kaygılar yoğunlaştıkça, sektör, geleneksel enerji üretim ve tüketim türlerine yenilikçi alternatifler aramak durumunda kalmaktadır. Bu doğrultuda dijital dönüşüm; enerji sektöründe verimlilik, şeffaflık ve sürdürülebilirlik sunma potansiyeli ile oldukça dikkat çekmektedir.

Akıllı şebekeler, nesnelerin interneti, yapay zekâ, blokzincir, veri analitiği, bulut bilişim gibi teknolojileri kapsayan dijital dönüşüm, enerji sektörüne verimlilik ve esneklik kazandırmaktadır. Bu kapsamda dijital dönüşümün, baştan sona tüm enerji süreçlerini optimize ederek verimlilik artışı ve sürdürülebilir kaynak yönetimi sağlamak, karbon ayak izini azaltmak gibi hedefleri bulunmaktadır. Dijital dönüşüm teknolojilerinden biri olan blokzincir teknolojisi, merkezi olmayan veri tabanları oluşturarak enerji sektöründe şeffaflığı ve güveni artırma imkânı sağlayabilecektir. Blokzincir ağında depolan bir kod olan akıllı sözleşmeler (smart contracts), dağıtılmış defter teknolojisi (distributed ledger technology - DLT), P2P (peer-to-peer) gibi yeni yapıların enerji ticaretini kolaylaştırarak hız, güvenilirlik ve uygun maliyet avantajları ile iktisadi olarak da çeşitli pozitif etkiler yaratması beklenmektedir. Ancak yeni teknolojilerin gerçek dünyaya uyarlanabilmesi ile ilgili bazı zorluklar ve hukuki gereklilikler da söz konudur.

Bu çalışmanın amacı, dijital teknolojiler ve bu teknolojilerden özellikle blokzincir uygulamalarının, enerji sektöründe yaratabileceği iktisadi etkileri ortaya koymaktır. Bu çerçevede çalışmada öncelikle geleneksel enerji kaynakları ve enerji piyasa yapısı kısaca ele alınmış, ardından enerji sektörü özelinde dijital dönüşüm kavramına değinilmiştir. Daha sonra dijital dönüşüm teknolojilerinden blokzincir teknolojisi ayrıca incelenmiş, bu sayede enerji sektöründe piyasa yapısının nasıl değişebileceği ortaya konulmuştur.

2. Enerji Kaynakları ve Enerjinin Ekonomik Önemi

Bilim insanları enerjiyi, iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlamaktadır. Modern uygarlıkların var olmasını sağlayan unsurlardan biri, insanların enerjiyi bir biçimden diğerine nasıl dönüştüreceklerini ve nasıl kullanacaklarını öğrenmeleridir. Enerji, doğanın devamlılığı için zorunlu bir ihtiyaçtır. Dolayısıyla insanoğlu, hayatının her evresinde enerjiyi yoğun bir biçimde kullanmıştır. Bu kullanım alanları, elektrikli ev araçları, otomobiller, evlerin ve işyerlerinin aydınlatılması, üretim sürecinde kullanılan makinaların çalıştırılması, tarımsal üretim olarak sıralanabilir.

Enerjinin sıcaklık, ışık, hareket, elektrik, kimyasal, yer çekimsel birçok formu bulunmaktadır. Bu enerji kaynakları için alt başlıkta çeşitli sınıflandırma yapılmıştır (IEA, 2022).

2.1. Enerji Kaynakları

Enerji kaynakları, kullanılış özelliklerine, dönüştürülebilir olmalarına, ticari ve ticari olup olmamalarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Tablo 1’de enerji kaynaklarına ilişkin sınıflandırma yer almaktadır.

Tablo 1: Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması

Enerji Kaynakları				
Kullanışlarına Göre			Dönüştürülebilir Olmalarına Göre	
Yenilenemez		Yenilenebilir	Birincil	İkincil
Fosil Kaynaklar	Kömür	Hidrolik	Kömür	Elektrik, benzin, mazot, motorin
	Petrol	Güneş	Petrol	
	Doğalgaz	Rüzgâr	Doğalgaz	İkincil kömür kok, petro kok
Çekirdek Kaynaklı	Toryum	Biokütle	Hidrolik	
		Jeotermal	Güneş	
	Uranyum	Dalga, gel-git	Biokütle	Hava gazı
		Hidrojen	Rüzgâr	
			Dalga, gel-git	

Kaynak: Aykırı, 2017: 56.

Enerji kaynakları kullanışlarına göre yenilenemez ve yenilenebilir olarak ikiye ayrılmaktadır. Yenilenemez enerji kaynakları fosil kaynaklardan oluşan kömür, petrol, doğalgaz; çekirdek kaynaklı kaynaklar toryum ve uranyumdan oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise hidrolik, güneş, rüzgâr, biokütle, jeotermal, dalga, gel-git ve hidrojen enerji olarak sıralanabilir.

Dönüştürülebilir olmalarına göre enerji kaynakları birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak iki başlıkta toplanmaktadır. Birincil enerji kaynakları doğada ilk haliyle bulunan enerji kaynağıdır. Bu kaynaklar kömür, petrol, doğalgaz, hidrolik, güneş, biokütle, rüzgâr, dalga, gel-git enerjisidir. İkincil enerji, birincil enerji kaynağından dönüştürülen enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynakları elektrik, benzin, mazot, motorin, ikincil kömür kok, petro kok, LPG, hava gazından oluşmaktadır.

Enerji kaynakları, tabloda yer alan sınıflandırma dışında, ticari ve ticari olmayan enerji kaynakları olarak da ayrıştırılmaktadır. Ticari enerji kaynakları, küresel piyasalarda kolaylıkla bulunan ve modern endüstriyel talepleri karşılayan petrol, doğalgaz, hidroelektrik ve nükleer enerji gibi kaynakları içermektedir. Ticari olmayan enerji kaynakları ise küresel düzeyde piyasası olmayan odun, hayvansal ve tarımsal atıklardan oluşmaktadır (Bilginöglü, 1991: 123).

Kömür, petrol ve doğalgaz gibi yenilenemeyen fosil enerji kaynakları rezervleri ve üretimi sınırlıdır ve tükenme riski taşımaktadır. Bu enerji kaynakları, sanayileşme süreciyle birlikte yaygın olarak kullanılmaya başlamış ve ülkelerin ekonomik varlıklarını önemli ölçüde etkilemiştir. Bu enerji kaynaklarına hiç sahip olmayan ya da yeterince bulunmayan ülkeler, dışa bağımlı hale gelmiştir (Şahin, 2021: 5-15). Öte yandan bu fosil yakıtların yoğun kullanımı, sera gazı salımlarına yol açarak çevresel zararlara ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. En çok sera gazı salımı kömürden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden birkaç on yıldır üretim

sürecinde kömürün yerine doğalgaz kullanılmaya başlamıştır. Buna rağmen, motorlu taşıtlarda hala yoğun şekilde kullanılmakta olan petrol, her ülkenin sahip olmak istediği bir enerji kaynağıdır (Şahin, 2021: 5-15).

Hidrolik, güneş, rüzgâr, biokütle, jeotermal, dalga, gel-git, hidrojen gibi doğal kaynaklardan elde edilen yenilenebilir enerji kaynağı “doğanın kendi evrimi içinde bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı” (Özkaya, 2023) olarak tanımlanmaktadır. Bu kaynaklar, karbondioksit emisyonlarını azaltarak çevreyle uyumlu olan kaynaklardır. Bu kaynaklar, enerji bağımsızlığı sağlamakta ve istihdam yaratmada da önemli bir rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, erişilebilirlik, sürdürülebilirlik ve çevresel uyumluluk avantajlarına sahiptirler (Özkaya, 2023).

Bu enerji kaynaklarından başka alternatif enerji kaynağı olarak da adlandırılan nükleer enerjidir. Nükleer enerji, atom çektiğinin bölünmesi (filyon, ayrışma) ya da birleşmesi (füzyon, kaynaşma) ile elde edilen ısıyı elektriğe dönüştüren sistemler olarak tanımlanmaktadır (ETKB, 2020). Bazı kaynaklar nükleer enerjiyi yenilenebilir olarak kabul etmekte, bazı kaynaklar sınırlı düzeyde de olsa uranyum ve toryum gibi hammaddeyi kullanması nedeniyle bu enerji türünü yenilenemeyen enerji grubunda değerlendirmektedir. Dünyadaki ülkelerin çoğu, fosil yakıtların tükenme riskinin bulunması ve nükleer enerjinin yüksek üretim kapasitesinin olması nedeniyle nükleer enerjiye yönelmiştir. Ancak gelişmiş ülkelerin çevreye daha duyarlı olan yenilenebilir kaynaklarından enerji üretimini ön plana aldığı, bu nedenle de nükleer enerjiyi öteleme çabasında olduğu görülmektedir.

2.2. Enerji Kaynaklarının Ekonomik Önemi

Enerji, tarih boyunca ülkeler için stratejik bir öneme sahip olmuştur. İktisadi gelişimin ilk safhalarında üretim daha az olduğundan enerji kullanımı da daha az gerçekleşmiştir. Ancak sanayi devrimiyle birlikte enerji, üretim sürecinde önemli rol oynamaya başlamış ve sanayi sektörünün ana itici gücü haline gelmiştir. Enerji kullanımındaki artış, bir yandan tüm üretim sürecini artırmış, öte yandan sosyal dönüşümleri tetiklemiştir. Bu gelişme şehirleşmenin hızlanmasına, fabrikaların çoğalmasına yol açarak enerji talebinin artmasına neden olmuştur. Elektriğin seri üretimde kullanılmasıyla birlikte bilgisayarlı teknolojilerle otomasyona geçilmesi, siber fiziksel sistemler, yapay zekâ gibi teknolojilerin üretime entegre olması ile enerjiye duyulan ihtiyaç daha fazla artış göstermiştir.

Özellikle sanayi üretimindeki artışla birlikte kömür, petrol, doğalgaz gibi ticari enerji kaynaklarına olan talep artmış, ancak ticari olmayan odun, hayvansal atıklar gibi enerji kaynaklarına olan talep azalma eğilimine girmiştir. Tarihsel süreç içerisinde enerji kaynakları, aydınlanma, ısı üretme, fiziksel kuvvet oluşturma, hareket/hız sağlama şeklinde sınıflandırılmıştır. İkincil enerji kaynağı olan elektrik ise soğutma ve iletişim cihazları gibi modern araçların yaygınlaşmasında kullanılmıştır (Yusufoğlu, 2018: 5).

Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren artan nüfus ve üretim yapısındaki gelişmelerle enerjiye olan talep daha fazla artış göstermiştir. Küresel enerji tüketiminin önümüzdeki yıllarda hızla artması beklenirken, mevcut kaynaklarla bu talebin sürdürülebilir bir şekilde karşılanması zorlaşmaktadır. “Küresel enerji tüketiminin, 2035 yılına gelindiğinde 1998 yılında tüketilen enerji miktarının iki katı, 2055 yılında ise üç katı olacağı tahmin edilmektedir.” (Özkaya, 2023).

Ancak dünya genelinde enerji kaynakları, özellikle fosil yakıtlar oldukça sınırlıdır. Örneğin yeni rezervler keşfedilmezse, dünyadaki kömür rezervlerinin yaklaşık 140 yıl, petrol rezervlerinin yaklaşık 54 yıl, doğalgaz rezervlerinin ise yaklaşık 49 yıl ömürleri kaldığı belirtilmektedir (Narin, 2023a: 14; BP, 2021: 16, 34, 46). Bu nedenle ülkeler, yenilenebilir enerji kaynaklarına ve nükleer gibi alternatif enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde nükleer enerjiye yönelik çalışmalar hızla devam etmektedir. Günümüzde nükleer enerji santrali bulunan, kurulum planları yapan ya da yapım aşamasında olan kırka yakın ülke bulunmaktadır. Bu ülkeler nükleer enerjiyi potansiyel bir çözüm olarak görmekte ve elektrik üretiminde kullanmaktadır. Dünyada üretilen elektriğin yaklaşık %10'u nükleer enerjiden sağlanmaktadır (World Nuclear Association, 2024). Ancak nükleer santrallerin kurulumuna ilişkin zaman zaman farklı yaklaşımlar olduğu da görülmektedir. Örneğin 1986 yılında yaşanan Çernobil felaketi sonrasında, nükleer enerjiye talep azalmış, fakat enerji sorununun artmasıyla yeniden nükleer enerjiye dönüş başlamıştır (Özkaya, 2023).

Enerji kaynaklarının kıt olmasının yanı sıra kıt olan bu kaynakların dünya genelinde dağılımında da dengesizlikler olduğu görülmektedir. Bazı bölgelerde ya da ülkelerde bu kaynaklar bol iken bazı bölgelerde ya da ülkelerde oldukça sınırlı hatta hiç bulunmamaktadır. Bütün bunlara ek olarak fosil yakıtların yakılması sonucu doğaya önemli ölçüde karbondioksit salımı gerçekleşmektedir (Bilginoğlu, 1991: 123). Kısaca belirtmek gerekirse enerji kaynaklarının üç temel özelliği bulunmaktadır. Bunlar; kıt oluşları, dünya ölçeğinde dengesiz dağılımı ve enerji dönüşümünün çevre kirliliğine yol açması şeklinde sıralanabilir.

3. Enerji Sektöründe Dijital Dönüşüm

Dijital dönüşüm, dijital teknolojinin tüm üretim ve tüketim alanlarına uygulandığı süreçtir. Yeşil dönüşüm ise çevre bilinci ve sürdürülebilirlik kapsamında üretim sürecinde değişikliğe gidilmesidir. Bu iki kavram birbirinden farklı olmalarına rağmen her biri belirli dinamiklere sahiptirler. Ancak bu iki kavram son yıllarda birlikte kullanılmaya başlanmıştır (European Commission, 2022: 1). Çevre bilinci ve sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmek için dijital dönüşüm teknolojilerini dışarıda bırakmak mümkün değildir.

Tüm dünyada doğaya en çok sera gazı salımı yapan enerji, ulaştırma, sanayi, binalar, tarım gibi sektörlerde, bu gazları azaltmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bunun için uygun teknolojiler ve politikalar oluşturulmaya başlanmıştır. Belirtilen sektörlerde bu teknolojilerin ya da politikaların

oluşturulmaması halinde olumsuz çevresel etkilerin azaltılması da giderek zor olacaktır. Bu alanda küresel ölçekte olduğu kadar Avrupa Birliği'nde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Avrupa Parlamentosu tarafından hazırlanan, 2022 Stratejik Öngörü Raporunda, 2050 yılında daha yüksek bir ortalama gelire sahip olacak 9,7 milyar nüfusun daha fazla gıda, endüstriyel ürün, enerji, konut, ulaşım ve suya ihtiyaç duyulacağı belirtilmiştir. Ayrıca raporda 2050 yılına kadar iklim nötrlüğü ve döngüsellik, şu anda deneysel, deneme veya prototip aşamasında olan yeni teknolojilerin geliştirilmesiyle mümkün olabileceği ifade edilmektedir (European Commission, 2022: 4). Kısacası başta enerji, ulaştırma, tarım, imalat sektörleri olmak üzere tüm sektörlerde sera gazlarına bağlı olumsuz iklim değişikliğinin önüne geçebilmek için çeşitli dijital teknolojilerden faydalanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Enerji sektöründe dönüşüme ihtiyaç duyulmalarının gerekçeleri ve hedefleri, dijital dönüşümün önündeki engellerin neler olduğu, enerji sektöründe yaşanacak dönüşümün enerji verimliliğine ve yenilenebilir enerjiye etkileri ve sürdürülebilirlik bağlamında enerji sektöründe dijital dönüşümün iktisadi etkileri alt başlıklarda ortaya konulmuştur.

3.1. Enerji Sektöründe Dönüşüme Duyulan İhtiyacın Gerekçeleri ve Hedefleri

Son yıllarda enerji sektörünün geleceğine yön veren önemli gelişmeler olmuştur. Bu gelişmeler; enerji kaynaklarının fiyatlarındaki aşırı dalgalanmalar, güneş (fotovoltaik) enerjinin artan kullanımı, değişen yük seviyeleri, farklılaşan tüketici davranışları, beklenen performans standartlarındaki yükseliş, öngörülemeyen meteorolojik şartlar, enerji piyasasına katılan yeni aktörler ve artan siber saldırılar şeklinde sıralanmıştır (Shura, 2021: 37).

Bahse konu etmenlerin yaratacağı sorunların bir kısmı mevcut teknolojik gelişmelerden kaynaklansa da, yeni teknolojilerin kullanılmasıyla en aza indirilebilmektedir. Enerji verimliliğinin sağlanmasıyla yeni enerji kaynaklarının artırılması, enerjide sürdürülebilirliğin sağlanması için dijital dönüşüm teknolojilerinin ve uygulamalarının fayda sağlayacağı ileri sürülmektedir. Özellikle dijital teknolojiler ile üretimden tüketime kadar olan değerler zincirinde şirketlerin önemli ölçüde rekabet avantajı sağlayabilecekleri ifade edilmektedir (Demirkaya, 2022).

Dijital dönüşümün enerji sektöründe sağlayacağı yararlar Tablo 2'de görülmektedir. Bu tablodan da anlaşılacağı üzere, dijital dönüşümün enerji sektöründe sistem güvenliği ve istikrarı sağlama, maliyetleri azaltma, çevre koruma ve müşteri memnuniyeti sağlama gibi bir dizi avantajı bulunmaktadır. Blokzincir, sinir ağları, yapay zekâ, robotik süreç otomasyonu, makine öğrenmesi, büyük veri ve analizi, bulut bilişim, nesnelerin interneti gibi teknolojilerden yararlanarak enerji sektöründe akıllı şebekeler kurulabilecek ve işlemler optimize edilebilecektir. Dolayısıyla bir yandan akıllı enerji piyasası oluşturulacak, öte yandan esnek, güvenli ve şeffaflık ile üretim sürecinde verimlilik sağlanacaktır. Bunların yanı sıra dijital teknolojiler kullanılarak enerji üretiminde optimizasyon

sağlanacak, karbon ayak izi hesaplamaları ile enerji tüketimi azaltılacaktır. Böylece mevcut enerji kaynakları daha verimli kullanılacak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yaygın kullanımı da artırılabilecektir. Ayrıca enerji sektöründe dijitalleşme ile giderek artan enerji talebinin verimli, kesintisiz, sürekli ve kaliteli bir şekilde yönetilmesi sağlanmış olacaktır (Bektaş, 2022: 20). Dijital dönüşüm, bir noktadan sonra şirketlerin ekonomik sürdürülebilirliklerini sağlamaktan daha çok bir zorunluluk haline dönüşecektir.

Tablo 2: Dijital Uygulamalar ve Bunların Enerji Sektöründeki Kullanımı ve Yararları

Dijital dönüşümün temel yararları	Enerji sektöründe dijital teknoloji uygulamaları	Enerji sektöründe en fazla kullanılan dijital teknoloji türleri
Sistem güvenliği ve istikrarı sağlama ve maliyet azaltma Çevre koruma	Akıllı şebeke ve optimize edilmiş işlemler	Blokzincir Yapay sinir ağları (ANN) Yapay zekâ (AI) Robotik süreç otomasyonu Makine öğrenmesi Büyük veri, Bulut bilişim
Sistem güvenliği ve istikrarı sağlama ve maliyet azaltma Çevre koruma	Akıllı pazar ve esneklik entegrasyonu	Nesnelerin interneti (IoT) Yapay sinir ağları (ANN) Yapay zekâ (AI) Blokzincir, Büyük veri, Bulut bilişim
Sistem güvenliği ve istikrarı sağlama Maliyet azaltma	Anomali tespiti ve tahmini	Yapay sinir ağları (ANN) Yapay zekâ (AI) Robotik süreç otomasyonu Makine öğrenmesi Büyük veri, Bulut bilişim
Maliyet azaltma	Süreç verimliliği	Yapay sinir ağları (ANN) Yapay zekâ (AI) Robotik süreç otomasyonu Blokzincir Makine öğrenmesi Büyük veri, Bulut bilişim
Çevre koruma Müşteri memnuniyeti	Akıllı ev	Nesnelerin interneti (IoT) Yapay zekâ (AI) Blokzincir, Büyük veri, Bulut bilişim
Müşteri memnuniyeti Sistem güvenliği ve istikrarı sağlama	Güven ve şeffaflık	Blokzincir, Büyük veri, Bulut bilişim

Kaynak: Światowiec-Szczepańska ve Stępień, 2022: 15.

Enerji sektöründeki dijitalleşme süreci oldukça karmaşıktır. Dijitalleşmedeki bu karmaşıklık ve birbirine bağımlılık bir sınıflandırma yapmayı da güçleştirmektedir. Bu sorunlarına rağmen dijitalleşmenin sağladığı birçok yarar bulunmaktadır. Enerji sektöründeki dijitalleşmenin sağladığı bu yararlar; sistem kararlılığı sağlanması, çevrenin korunması, enerji talebinin azaltılması, gelirin artırılması, maliyetin azaltılması ve müşteri memnuniyeti sağlanması olarak sınıflandırılmıştır (Weigel ve Fishedick, 2019: 12).

Enerji sektöründe dijital dönüşüm hedefleri de bulunmaktadır. Bu hedefler küresel enerji politikasını ifade etmektedir. Literatürde bu politikanın üç temel hedefi; maliyetlerin azaltılması, enerji arzının güvence altına alınması ve iklim yüklerinin azaltılması olarak sıralanmıştır. Uluslararası düzeyde enerji politikalarının

analizinde temelinde sürdürülebilir kalkınma arayışı olduğunu açıkça görülmektedir (Światowiec-Szczepańska ve Stępień, 2022: 6).

Dijital dönüşümün enerji sektörünü etkileme yolları Tablo 3'te görülmektedir. Bu tabloda dijital dönüşümün; enerji sektöründe akıllı şebekeler, öngörücü bakım, yenilenebilir enerji, enerji depolama, enerji verimliliği, müşteri deneyimi ve veri analizi alanlarında birtakım yeniliklere sebep olacağı belirtilmektedir. Bu yeniliklerin maliyetleri azaltma, verimliliği artırma, güvenliği artırma, müşteri memnuniyeti sağlama, daha iyi müşteri etkileşimi sağlama, daha bilinçli kararlar alma, operasyonların optimize edilmesi gibi pozitif etkileri olacağı ortaya koyulmuştur.

Tablo 3: Dijital Dönüşümün Enerji Sektörünü Etkileme Yolları

Ne?	Nasıl?	Sonuçlar
Akıllı şebekeler	Enerji şebekesinde dijital teknolojinin uygulanması, güç dağıtımının gerçek zamanlı izlenmesine ve kontrolüne olanak sağlar.	Artan verimlilik Azalan maliyetler Artan güvenilirlik
Öngörücü bakım	Güç ekipmanlarının sağlığını izlemek ve ne zaman bakım gerektiğini tahmin etmek için dijital teknolojiler kullanılıyor.	Azalan aksama süresi Azalan bakım maliyetleri Artan elektrik şebekesi güvenilirliği
Yenilenebilir enerji	Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının performansını optimize etmek için tahmine dayalı analitik, makine öğrenimi ve IoT sensörleri gibi dijital teknolojiler kullanılıyor.	Daha verimli Uygun maliyetli
Enerji depolama	Dijital teknolojiler enerji depolama çözümlerinde de önemli bir rol oynuyor. Gelişmiş pil depolama sistemleri, depolanan enerjinin kullanımını optimize etmek için veri analitiğini kullanır.	Azalan maliyetler Artan güvenilirlik
Enerji verimliliği	Binalarda ve endüstriyel süreçlerde dijital teknolojilerin kullanılması enerji verimliliğinin artırılmasına yardımcı olabilir. Örneğin bina yönetim sistemleri ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerini optimize etmek için sensörleri ve veri analitiğini kullanır.	Azalan enerji tüketimi
Müşteri deneyimi	Dijital teknolojiler enerji sektöründe daha kişiselleştirilmiş ve etkileşimli bir müşteri deneyimine olanak sağlıyor. Örneğin akıllı ev sistemleri, müşterilerin enerji kullanımını akıllı telefonlarından izlemelerine ve kontrol etmelerine olanak tanırken, sohbet robotları ve sanal asistanlar anında destek ve tavsiye sunabiliyor.	Müşteri memnuniyeti Daha iyi müşteri etkileşim
Veri analizi	Dijital dönüşüm, şirketlerin enerji sektöründe daha iyi veri toplama, analiz etme ve yönetme olanağı sağlar.	Daha bilinçli kararlar alınması Operasyonların optimize edilmesi

Kaynak: Nazari ve Musilek, 2023: 13.

3.2. Enerji 4.0 Kapsamındaki Öncü Teknolojiler ve Kullanımı ile Öncelikli Alanlar

Enerji 4.0, Endüstri 4.0 teknolojilerinin enerji sektörüne uyarlanmış halini ifade etmektedir. Endüstri 4.0, imalat ve üretim süreçlerinde dijital teknolojilerin ve otomasyonun entegrasyonunu ifade etmekte, Enerji 4.0 ise bu teknolojik devrimin enerji üretimi, dağıtımı ve tüketimine uygulanışını kapsamaktadır. İçinde bulunulan dönem bir geçiş dönemi olarak düşünülebilmektedir. Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a geçilen bu süreçte Endüstri 4.0'ın ilerlemelerini temel alarak, insanlar ve makineler arasında daha işbirlikçi bir ilişkiye odaklanıldığı söylenmektedir (Atoss, 2023).

Endüstri 4.0'ı tanımlayan yapay zekâ, büyük veri ve analizi, blokzincir, nesnelerin interneti, bulut bilişim, otomasyon, siber güvenlik, simülasyon, eklemeli üretim ve sanal gerçeklik gibi teknolojilerin, Endüstri 5.0 ile birlikte daha ileri bir seviyeye ulaşacağı ve bu süreçte insan merkezli bir yaklaşım ile entegre edilmiş üst düzey yapay zekâ teknolojilerinin ön plana çıkacağı öngörülmektedir. Enerji 4.0'da nesnelerin interneti, yapay zekâ ve makine öğrenmesi, büyük veri, bulut sistemi ile blokzincir teknolojileri gibi teknolojiler ön plana çıkmaktadır (Shura, 2021: 13). Enerji 4.0 ile bu teknolojiler; akıllı şebekeler inşa etmek, yenilenebilir enerjiyi ve dağıtılmış üretimi yönetmek için kullanılacaktır. Ayrıca, enerji şirketlerinin yeni iş modelleri kurmasına ve sürdürülebilir enerji üretim ve dağıtım stratejilerini geliştirmesine olanak tanımaktadır (Mobidev, 2018).

Enerji 4.0'ın bileşenleri ile enerji sistemleri daha verimli, sürdürülebilir, güvenli ve esnek hale getirilmiş olacaktır. Bu, enerji sistemlerinin gelişen ve değişen modern ihtiyaçlara daha iyi uyum sağlamasına, tüketiciye daha fazla kontrol ve seçenek sunmasına ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmasına yardımcı olmasına imkân sağlayacaktır. Ayrıca, enerji akışlarını gerçek zamanlı olarak izleyerek talep ve arzı optimize etmeyi ve böylece enerji tüketimini daha verimli hale getirmeyi amaçlamaktadır. Ancak, Enerji 4.0'ın kendine has zorlukları da bulunmaktadır. Yeni teknolojilerin benimsenmesi için gerekli yatırımların yapılması gerek fiziksel gerekse siber güvenlik standartlarının tüketici ihtiyaçlarını yansıtacak şekilde güncellenmesi gerekmektedir. Ayrıca, adil ve güvenli rekabeti sağlamak için doğru düzenlemelerin yapılması önemli hale gelmektedir (Dart, 2023). Endüstri 4.0 teknolojilerinden biri nesnelerin internetidir. Nesnelerin interneti; çeşitli nesne, obje veya şeylerin bir ortamda etkileşime girip, iş birliği yapabilmesi, diğer bir ifadeyle fiziksel sistemlerin dijitalleşmesidir (Alcacer ve Cruz- Machado, 2019: 901; Narin, 2021: 31). Nesnelerin interneti, internet kullanımının yaygınlaşması ile birlikte kullandığımız birçok nesneye internet teknolojisinin entegre edilmesini ifade etmektedir. Günlük hayatta kullanılan klima, buzdolabı, kahve makinesi, saat gibi eşyalar ile internet vasıtası ile iletişim kurulabilmekte ve onlardan veri alınabilmektedir. Bu sayede her şey, birbiri ile iletişim kurularak bağlantılı hale gelmektedir. Günümüzde giderek yaygınlaşan nesnelerin interneti kavramı, radyo frekansı tanımlama (radio

frequency identification - RFID) teknolojisinin gelişimine dayanmaktadır. Bu teknoloji, esas olarak veriyi radyo dalgaları üzerinde tutan bir yöntem olup, 1960'lı yıllardan itibaren aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır ve günümüzde de kullanım alanı genişlemeye devam etmektedir. Bugün, entegre devrelerin de gelişmesiyle birlikte, bu teknoloji günlük yaşamdan endüstriyel üretime kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Endüstri 4.0'ın bileşenlerinden bir diğeri yapay zekâdır. Yapay zekâ, genellikle canlıya özgü nitelikler olduğu varsayılan karar verme, anlam çıkartma, genelleme, öğrenme ve deneyimlerden yararlanma gibi bilişsel süreçleri yazılımlar ve bilgi işlem birimleri kullanarak gerçekleştirme yeteneğidir. Yapay zekanın bir dalı olan makine öğrenmesi ise bilgisayar sistemlerinin veri analizi yapabilmesi ve deneyimlerden öğrenerek belirli görevleri gerçekleştirebilmesi için kullanılan bir uygulamadır. Temelde, makine öğrenmesi algoritmaları, belirli bir görevi başarmak veya bir problemi çözmek için veri setlerinden desenleri öğrenmekte ve bu desenleri kullanarak gelecekteki verileri tahmin etmekte veya belirli görevleri gerçekleştirmektedir. Makine öğrenmesi, genellikle deneme yanılma yöntemiyle çalışan, yazılımcının doğrudan belirlemediği öğrenme süreçleri ile karakterize edilmektedir (Alcacer ve Cruz- Machado, 2019: 902).

Endüstri 4.0'ın bileşenlerinden bir başkası büyük veridir.³ Büyük veri, genellikle yüksek hacim, hız, çeşitlilik, doğruluk ve değer gibi özelliklere sahip verileri ifade etmektedir. Bu, geleneksel veri işleme araçlarının ötesine geçen karmaşık veri kümelerini işlemeyi gerektirmektedir. Büyük verinin temel özellikleri arasında, farklı şekillerdeki amaçlar için toplanan verilerin çeşitliliği, veri kalitesi ve güvenilirliğinin doğruluğu, verilerin uygun kullanıma göre seçilmesi, veri erişilebilirliği ve yorumlanabilirliğinin sürekliliği ve toplumun farklı kesimleri tarafından verilere atfedilen çok yönlü değerler yer almaktadır. Bu özellikler, büyük verinin sadece “çok fazla veri” olmadığını, aynı zamanda farklı araştırma toplulukları, metodolojik yaklaşımlar ve teorik çerçeveler arasında köprü kurma kapasitesine sahip olduğunu gösterir (Leonelli, 2020). Verilerin analizi katma değeri yüksek işler ortaya koyulmasında zaman ve bilgi kazandıran bir uygulama olarak ortaya çıkmaktadır.

Endüstri 4.0 bileşenlerinden bir başkası bulut sistemi ya da bulut bilişimdir. Bulut sistemi, iletişimde ve bilgi alışverişinde önemli bir görev görmektedir. Bu sistem internet üzerinden çeşitli faaliyetler için ölçeklenebilir kaynaklar sunmakta ve bunların hesaplama hizmetine yardım etmektedir. Örneğin bulut bilişimin, elektrik, su, gaz ve telefonuna ek olarak önemli bir kamu hizmeti olduğu kabul edilmektedir. Kısaca ifade etmek gerekirse bulut bilişim günün her saatinde kullanılabilen uzak sunucular olarak faaliyet göstermektedir (Proctor ve Wilkins, 2019: 54).

³ Ayrıntılı bilgi için bkz. Narin, 2021: 32-33.

Endüstri 4.0'ın bileşenlerinden biri diğeri blokzincirdir. Blokzincir herhangi bir dijital varlığın kayıtlarını şeffaf ve değiştirilemez hale getiren ve herhangi bir üçüncü taraf aracıyı dâhil etmeden çalışan, eşler arası merkezi olmayan dağıtılmış bir defter teknolojisidir.⁴ Blokzincir teknolojisi verilerin kalıcılığı, şeffaflık, güvenlik, merkezi olmayan erişilebilir eşler arası bir yapı sunması gibi bir dizi avantaja sahiptir (Blockchain Council, 2023).

3.3. Enerji Sektöründe Dijital Dönüşümün Önündeki Engeller

Enerji sektöründe yaşanan dijitalleşme, küçük boyutlu yenilenebilir enerji üretimi, enerji depolanması ve esnek talep yönetimi ile ölçek ekonomisinin öneminin azalmasını ifade eden âdemi merkezileşme ve finanstan doğup enerjiye uygulanan teknolojiler (elektrikli araçlar, akıllı şehirler, blokzincir) ile disiplinler arası inovasyon imkânı, yeni ilişkiler ve iş birlikleri kurulmasını gerektirecektir. Bu değişime enerji üretim ve dağıtım şirketlerinin yanı sıra, ekipman üreticileri, ekosistemin bir parçası haline gelen otomotiv, finans, vb. şirketleri de ayak uydurmak zorunda kalacaktır (Dünya Enerji Konseyi, 2018: 3). Bu nedenle dijital dönüşüm teknolojilerinin hayata geçirilmesinde birtakım zorluklar bulunmaktadır.

Enerji sektöründeki bu zorluklar, Shura tarafından 2021 yılında yayınlanan bir araştırmada, altı başlıkta toplanmıştır. Bunlar; dağıtık enerji kaynaklarının yönetimi, elektrifikasyonun yönetilme ihtiyacı, şebeke altyapısı üzerindeki etkiler, artan enerji tüketimi, değişen tüketici beklentileri ve daha iyi veri yönetimi ihtiyacı olarak sıralanmıştır (Shura, 2021: 14). Bu zorlukların önüne geçilmesi için tüm tarafların birlikte çalışmaya gönüllü olması önemli hale gelmektedir. Ancak bunun gerçekleşmesi için kamu tarafı da bir dizi girişimde bulunmalıdır. Devlet, girişimciyi desteklemenin yanı sıra gerekli yasal altyapıyı oluşturmalıdır. Yeni girişimler için büyük problemler yaratabilen eski mevzuat düzenlemeleri yenilikçi bakış açısı ile gözden geçirilip gerekli revizyonlar yapılmalıdır. “Regülasyon deney alanı (regulatory sandbox)” gibi çeşitli pilot uygulamalar İngiltere, Singapur, Birleşik Arap Emirlikleri gibi ülkelerde finans teknolojisi alanında uygulanma fırsatı bulmuştur (Şahbaz, 2017). Yeni düzenlemelere ilişkin uygulamaların yaygınlaştırılması için benzer pilot çalışmaların sayısının ve etki alanının artırılmasının yararlı olacağı belirtilmektedir. Zira dijital gelişimi ilerlemiş, aktörler arası ilişkilerin güçlü olduğu, âdemi merkezi ve müşteri odaklı bir enerji sektör yapısının sürdürülebilirliği, bahse konu teknik altyapı ve mevzuat düzenlemeleri sonrası yine teknik ve insan odaklı bir süreç yönetimini gerektirmektedir. Bu durum, pilot uygulamalar ile yavaş yavaş yaygınlık kazanabilir.

⁴ Dağıtılmış defter teknolojisi (distributed ledger technology - DLT), merkezi olmayan erişilebilir bir dijital veri tabanının güvenli işleyişini sağlayan teknolojidir. Bu teknoloji ekonomi, toplum ve endüstride organizasyon ve iş birliğini değiştirme potansiyeline sahip bilgi teknolojileri alanında uygulanan en yeni teknolojilerden birini oluşturmaktadır. DLT, değer yaratma ve yakalama için yeni olanaklar yaratarak, klasik hale gelen ticari işlem kavramlarını yeniden düzenlemektedir (Sunyaev, 2020: 265; Güleç, 2022).

3.4. Enerji Sektöründe Yaşanacak Dönüşümün Enerji Verimliliğine ve Yenilenebilir Enerjiye Etkileri

Enerji verimliliği, üretim miktarı başına düşen enerji tüketiminin azaltılması olarak tanımlanmaktadır. Bu kavram, yaşam standartları veya hizmet ve üretim kalitesi düşürülmeden enerji tüketiminin minimize edilmesini ifade eder (ETKB, 2023). Enerji yoğunluğu, enerji tüketiminin (tep veya joule cinsinden) ekonomik çıktıya (GSYH) bölünmesiyle ulaşılan bir ülkenin enerji verimliliğini ölçen bir metriktir. Enerji verimliliği yüksek olan bir ülkenin enerji yoğunluğunun düşük olması beklenir (Narin, 2019: 16).

Enerji verimliliği politikaları, sera gazı emisyonlarını düşürme ve ekonomik bağımsızlığı artırma hedefleriyle paralel olarak geliştirilir. IEA'nın Enerji Verimliliği 2022 Raporu'na göre, 2022 yılında bir önceki yıla göre %16'lık bir artışla enerji verimliliğine yönelik küresel yatırımlar (bina yenileme, elektrikli otomobil teknolojileri ve benzeri) 560 milyar ABD doları olmuştur (IEA, 2022: 12).

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğaya diğer enerji kaynakları kadar zarar vermediği gibi ülkeler arasındaki enerjiden kaynaklanan dengesizlik ve üstünlüklerin bertaraf edilmesinin önünü açarak ülkelerin yaşadığı enerji arz şoklarını engelleyebilmektedir. Enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasında kilit rol oynayabilecek yerli ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı cari işlemler açığının da önüne geçebilecektir.

Dünya genelinde, hükümetler temiz enerji yatırımlarını desteklemek adına önemli finansal kaynaklar ayırmaktadır. Temiz enerji teknolojileri ve elektrikli araçlar gibi daha çevreci alternatifler maliyet açısından daha rekabetçi hale gelirken, küresel enerji krizi güvenlik ve erişilebilirlik konularında endişeleri artırarak sürdürülebilir seçeneklere olan ilgiyi güçlendirmektedir. Bu girişimler ise teknolojik gelişmeler ölçüsünde mümkün hale gelmektedir.

Enerji dönüşümü, enerji verimliliğinin potansiyelleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla şekillenmekte ve bu süreç, dijitalleşme ve yenilikçi finansman modelleri gibi unsurlarla desteklenmektedir. Dijital teknolojilerin enerji sektörüne uyarlanması, enerji tüketiminin daha verimli hale gelmesine olanak tanımaktadır. Böylece akıllı şebekeler ve akıllı depolama teknolojileri enerji kayıplarını azaltmakta ve şebeke verimliliğini artırmaktadır. Yapay zekâ ve veri analizi, enerji sistemlerinin daha verimli yönetimi için stratejik kararlar almayı kolaylaştırmaktadır. Günümüzde enerji dönüşümüne, “enerji verimliliği potansiyelleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının hızlı bir şekilde yaygınlaşması ve elektrifikasyon uygulamaları” öncülük etmektedir. Bu dönüşümün “bilgi ve iletişim teknolojileri (BIT), dijitalleşme, yenilikçi politikalar, piyasa araçları ve finansman modelleri” ile desteklenmesi verimliliği artırması beklenmektedir. Dijitalleşen enerji sektörü daha hızlı, daha güvenilir, maliyet etkin bir yere gitmektedir. Enerji tasarrufları bu sayede mümkün

olabilmekte bu da sürdürülebilir enerji verimliliğini sağlamayı kolaylaştırabilmektedir (Shura, 2021: 27).

Dijital dönüşüm endüstriyel tesislerden şahsi mülklere kadar geniş bir ölçekte enerji yönetimi ve izleme sistemlerinin gelişimine katkı sunmakta ve kullanıcılara enerji tasarrufu yapabilme farkındalığı kazandırarak enerji verimliliği artışı sağlayabilmektedir. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi değişken kaynakların yönetiminin optimize edilmesi, dijital çözümlerle daha sürdürülebilir hale gelmektedir. Blokzincir teknolojisi ve akıllı kontratlar aracılığıyla gerçekleşen enerji ticareti, asimetrik bilgi sorununu önleyerek daha güvenilir bir ticari platform yaratma potansiyeli taşımaktadır. Dijital teknolojilerin yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği alanlarında kullanımı, yeni iş modellerinin gelişimine ortam hazırlayabilecektir (PWC, 2016).

3.5. Sürdürülebilirlik Bağlamında Enerji Sektöründe Dijital Dönüşümün İktisadi Etkileri

21. yüzyıl, teknolojik yeniliklerin ışığında enerji sektörünün sürdürülebilirlik ilkelerine yönelen bir dönemdir. Sürdürülebilir enerji, doğal kaynakların korunması, çevresel denge ve gelecek nesiller için enerji kullanımı hedeflerini dikkate almaktadır. Bu hedefler, sera gazı salımının azaltılması, enerji üretiminde verimliliğin artırılması, herkes için temiz enerjiye erişim, yenilenebilir kaynaklara yatırım yapma ve enerji bağımlılığını azaltma olarak sıralanmıştır. Sürdürülebilir enerji politikaları ve teknolojileri, ekonomik büyüme ile çevresel koruma arasında dengeli bir ilişki kurmayı amaçlamaktadır (Yang ve Gu, 2021: 1313).

Dijital dönüşüm, enerji sektöründe verimliliği artırarak, maliyetleri düşürmekte ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin uyumlaştırılmasını kolaylaştırmaktadır. Akıllı şebekeler, veri analitiği, nesnelerin interneti ve yapay zekâ gibi teknolojiler; enerji üretimi, iletimi ve dağıtımının daha etkin bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır (Narin, 2021: 39).

Ekonomik açıdan dijital dönüşüm, enerji sektöründe iş modellerini yeniden şekillendirmekte ve yeni iş fırsatları yaratmaktadır (Sabo, 2015: 2). Örneğin, akıllı şebekeler, enerji tedarikçilerine tüketici kullanım verilerini analiz ederek daha rekabetçi fiyatlandırma stratejileri sunma imkânı verirken, tüketiciler için de enerji tüketimlerini daha bilinçli yönetme olanağı sunmaktadır.

4. Enerji Sektöründe Blokzincir Teknolojisi

Blokzincir eşler arası işlemlere ait verilerin kaydedilmesine olanak sağlayan merkezi olmayan teknolojik bir yapıdır. İlk blokzincir uygulamaları Satoshi Nakamoto (2008) tarafından finans sektöründe ilk kripto para olarak nitelendirilen “Bitcoin” oluşturmaya yönelik ortaya çıkmıştır. Blokzincir uygulaması merkezi bir yapı yerine merkezi olmayan bir sistemde işlem yapılmasını sağlama özelliği ile fark yaratmaktadır (PWC, 2016: 3; CBDDO, 2024).

Blokszincir, teknolojinin sağladığı hızlı iletişim avantajları ile üçüncü taraflara ihtiyacın azaldığı eşler arası bir ticaretin birçok sektörde mümkün hale gelebileceğine işaret etmektedir. Böylece sistemlerin daha esnek hale gelmesi ile azalan maliyetler, hızlanan süreçler, artan verimlilik gibi bir dizi avantaj söz konusu olabilecektir. Teorik olarak blokszincir uygulamaları araçlara ve merkezi bir sisteme ihtiyaç duymadan işlemlerin yapılmasını sağlayabilmektedir. Fakat günümüzde blokszincirlerin arkasındaki teknoloji henüz yeterli olgunluğa erişmediği için henüz gelişim evresindedir ve yasal birtakım engeller devam etmektedir (Şahin ve Bulut, 2021). Enerji alanında blokszincir teknolojisinin kullanımı henüz çok yenidir. Bu teknolojinin potansiyelinin tam anlamıyla gerçekleştirilebilmesi ve enerji sektörüne katkısının maksimize edilebilmesi için dağıtık defter, şifreleme (kriptografi), değiştirilemez veri yapısı, simgeleştirme ve merkeziyetsiz yönetim gibi beş temel özelliğinin bütünüyle entegre edilmesi gerekmektedir (Shura, 2021: 46).

Blokszincir tabanlı bir enerji sisteminin bileşenleri akıllı sayaçlar, akıllı cihazlar ve evler, sensör teknolojileri, akıllı telefon uygulamaları olarak sayılabilir (PWC, 2016: 17). Günümüzde blokszincir temelli modeller yaygın bir kullanım alanına sahip değildir. Ancak bu ağlar, gelecekte etkileşime girerek tıpkı internet gibi piyasayı temelden değiştirebilir. Ayrıca, blokszincir teknolojisinin prototip ya da pilot uygulama niteliğindeki birçok örneğine, farklı sektörlerde rastlamak mümkündür. 2016 yılında ABD'nin New York şehrinde âdemi merkezi olarak üretilen enerjinin blokszincir sistemi vasıtası ile ilk defa doğrudan komşular arasında satılması, blokszincir teknolojisinin enerji sektöründe kullanımına bir örnek oluşturmaktadır. Buradaki nihai hedef, üçüncü taraflar olmadan enerji üreticileri ile tüketicileri arasında enerji tedarik sözleşmelerinin yapılabildiği, süreç otomasyonun gerçekleştiği ve tamamen merkezi olmayan bir enerji sistemi kurabilmektir (PWC, 2016: 3).

Enerji sistemleri; güvenilir hizmetlerin sürdürülmesi, yeni hedeflere ulaşılması ve artan karmaşıklığın ele alınması için yeni çözümler gerektirmektedir. Blokszincir teknolojisi, işlemlerin kaydedilmesi ve doğrulanması için merkezi bir kuruluşa ihtiyaç duyulmayan bir yöntem sunar. Ayrıca, blokszincir aracılığıyla sürdürülebilirlik (örneğin, karbon kredileri) kaydı ve ticareti kullanılarak temiz enerji dağıtımı ve karbon emisyonunun azaltılması hızlandırılabilir. Blokszincir teknolojisinin, “elektrik ticaretine yönelik mevcut piyasaları geliştirmesi ve hatta yeni piyasalar oluşturması” öngörülmektedir (Shura, 2021: 42).

Blokszincir teknolojisinin elektrikli mobilite sektöründeki bir başka uygulama alanı, özel şarj altyapısına sahip bireylerin blokszincir üzerinden elektrikli araç sahiplerine şarj hizmetleri sunmasıdır (SOCAR, 2022). Örneğin, bu platform, bir ev sahibinin Airbnb aracılığıyla konuklarına oda kiralamasına benzer bir şekilde, şarj cihazlarına sahip ev sahiplerinin şarj istasyonlarını elektrikli araç sahiplerine kiralamasına olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, işlem maliyetlerini düşürmekte ve akıllı sözleşmeler aracılığıyla otomatik ve güvenli kişiden kişiye ödemeleri

mümkün kılmaktadır. Ayrıca, yeterince kullanılmayan şarj cihazlarını etkinleştirerek elektrikli araçların ve hatta dağıtık yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş çapta kabul edilmesine katkı sağlayabilir. Kontrollü enerji ve depolama akışı, esneklik seçenekleri sunarak otomatik olarak arz ve talep dengesini sağlayabilir. Blokzincir teknolojisi, enerji sektöründeki çeşitli paydaşlar arasında güvenli, şeffaf, hızlı ve hesaplı ticareti olanaklı hale getirmektedir. Bu teknoloji, temiz enerji üretimini takip etmek amacıyla da kullanılabilir. Blokzincirin uygulanması, elektrikli araç şarjı için ödeme yapmayı, temiz enerji kullanımı için fon toplamayı, müşteri cihazlarını yönetmeyi ve benzeri işlemleri kolaylaştırabilir. Ancak, enerji sektörü büyük ölçüde düzenlemeye tabi olduğundan, politika yapıcıların blokzincirin potansiyelini gerçekleştirmedeki önemli rolü göz ardı edilmemelidir (Shura, 2021: 43; SOCAR, 2022).

4.1. Blokzincir Uygulamaları

Blokzincir teknolojisi birçok sektörde kullanılmakla birlikte potansiyel kullanım alanı çok daha geniş bir yelpazeye sahiptir. Sağlık, eğitim, bankacılık ve finans, emlak, perakende, seçim güvenliği ve enerji gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Blokzincir ile sınır ötesi ödemeler ve düşük maliyetli işlemler, fraksiyonel mülkiyet ve varlık tokenizasyonu, elektronik sağlık kayıtlarını (EHR) güvenli bir şekilde saklama ve yönetme, müşteri veri güvenliği, telif haklarının kaydı ve ticareti, enerji üretimi ve tüketimi verilerinin kaydı mümkün hale gelebilmektedir. Ancak, blokzincir teknolojisi henüz erken dönemde olup küresel düzeyde uygulanabilmesi için teknolojinin boyut, kaynak verimliliği, kullanılabilirlik gibi hususlarda gelişim göstermesi gerekecektir (Enerquire, 2017).

Dünyada ABD, Almanya, Çin, Avustralya, Japonya gibi çeşitli ülkelerde farklı blokzincir uygulamaları ve projeleri gerçekleştirilmektedir. Örneğin, 2016 yılında enerji zinciri kullanılarak ilk Avrupa enerji ticareti gerçekleştirilmiştir. Avustralya'da tüketicilerin fazla güneş enerjilerini satmalarına olanak sağlayan P2P enerji ticaret platformu oluşturulmuştur. İsviçre'de çok kiracılı bir ekosistemde bağımsız enerji üreticileri (independent power producer - IPP), tüketiciler ve kamu hizmetleri için merkezi olmayan bir enerji piyasası geliştirilmiştir. Hong Kong'da karbon kredileri ve gelecekteki doğal sermaye varlıkları için merkezi olmayan bir enerji piyasası oluşturulmuştur. Bu tür girişimlerin ekonomik getirisi de söz konusu olduğu için bunlara benzer pek çok örnek vardır. Dolayısıyla blokzincirin enerji sektöründe kullanımı zamanla yaygınlık kazanmaktadır (Indigo Advisory, 2023).

Enerji sektöründe blokzincir uygulamalarının birtakım avantajları ve riskleri bulunmaktadır. Uygulamanın avantajları; eşler arası (P2P) enerji ticareti, şebeke güvenliğini ve sayaç şeffaflığını artırma, yenilenebilir enerji finansmanı ve elektrikli araçlardan şebekeye uygulanan sistemler olarak sıralanabilir. Böylece bu teknoloji ile işlemlerin şeffaflığı, kullanıcıların anonimliği, güvenilir bir ticaret

platformu oluşturulabilmektedir. Ayrıca, blokzincirin merkeziyetsiz yapısı; hizmet reddi saldırılarına karşı yüksek direnç sunması, verilerin değişmezliği, teknolojiyi eşler arası enerji ticareti platformu için güvenilir kılmaktadır (Ertürk vd., 2020: 205-206).

Uygulamanın riskleri ise blokzincir uygulamalarının ölçeklendirme ile ilgili sorunlar oluşturması, enerji transferi esnasında kayıpların oluşması gibi ek sorunların ortaya çıkma ihtimali bulunmaktadır. Ayrıca, uygulamaların pratik kullanılmaması, yüksek işlem ücretlerinin oluşması gibi engeller de mevcuttur. Ek olarak hukuki altyapı ile ilgili yenilikçi düzenlemelere ihtiyaç söz konusudur. Blokzincirin enerji sektöründe etkin bir şekilde kullanılabilmesi için bu zorlukların üstesinden gelmesi gerekmektedir (Ertürk vd., 2020: 206-209).

4.2. Enerji Sektöründe Üretici, Tüketici ve Düzenleyici Boyutları ile Blokzincir Teknolojisi

Enerji sektöründe blokzincir teknolojisinin uygulamaları, tüm paydaşların faaliyetlerini dönüştürme potansiyeline sahiptir. Üreticiler için, blokzincir enerji kaynaklarını daha verimli yönetme ve yenilenebilir enerji sertifikalarının izlenmesi gibi işlemleri kolaylaştırabilecektir. Tüketiciler açısından, bu teknoloji, özellikle enerji ticaretinde şeffaflık ve güvenilirliği artırarak, tüketicilerin enerji piyasasında daha aktif rol almasını sağlayabilecektir. Tüketiciler, merkezsizleştirilmiş ağlar aracılığıyla enerji alım satımında daha fazla özerklik ve kontrol kazanabilecektir.

Düzenleyiciler için blokzincir, enerji piyasasının daha şeffaf olmasına yardımcı olurken, işlemlerin ve enerji akışının doğruluğunu güvence altına alabilir. Bu da politika yapımcıların ve düzenleyici kurumların, piyasa faaliyetlerini ve uyumu daha etkin bir şekilde izlemesine yardımcı olabilir. Bu üç boyut, enerji sektöründe blokzincirin sunduğu entegre ve yenilikçi çözümlerin bir göstergesidir. Blokzincir ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırarak, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayabilir (PWC, 2016: 24).

4.3. Blokzincir ile Merkeziyetsiz Enerji Piyasası ve Blokzincirin Enerji Piyasasına Etkileri

Blokzincir tabanlı merkeziyetsiz enerji piyasaları, öncelikle geleneksel enerji piyasalardan yapısal yönden farklıdır. Geleneksel piyasalar, büyük enerji şirketleri ve düzenleyici kurumlar tarafından kontrol edilirken, blokzincir tabanlı sistemler merkezi bir otorite olmadan işleyebilmektedir. Blokzincir geleneksel piyasalara göre daha yüksek oranda bir güvenlik ve şeffaflık sunmaktadır. Çünkü blokzincir, işlemlerin şeffaf ve değiştirilemez bir kaydının oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

Günümüzde bazı tüketiciler aynı zamanda enerji üreticisi rolünü de üstlenmektedirler; bu kişilere “üreten tüketiciler (prosumer)” denilmektedir.

Bunlar sadece enerji tüketmekle kalmayıp, güneş panelleri, rüzgâr türbinleri veya kojenerasyon sistemleri gibi kendi üretim tesislerini de işletirler. Blokzincir teknolojisi, bu üreten tüketicilerin ürettikleri enerjiyi doğrudan etraflarındaki insanlara satmalarına olanak sağlar. İşlem kayıtlarını güvenli bir şekilde tutan blokzincir sistemleri, bu işlemlerin gerçekleştirilmesinde ve transfer edilmesinde güvenlik sağlar. Tüm işlemler, merkezi bir otoriteye gerek duymadan, eşler arası (P2P) ağlar üzerinden doğrudan gerçekleştirilir (PWC, 2016: 16; SOCAR, 2022). Blokzincir piyasaları, küçük ölçekli üreticilere ve tüketicilere, büyük şirketlerin hâkim olduğu geleneksel piyasalara kıyasla daha fazla katılım ve rekabet imkânı sunar.

Blokzincir ile merkeziyetsiz enerji piyasası, enerji üretim ve tüketim verilerinin güvenli, şeffaf ve manipülasyonlara ve dolandırıcılıklara karşı korunaklı bir şekilde saklanmasını mümkün kılar. Tüketiciler, üreticiler ve dağıtıcılar arasında akıllı sözleşmeler yoluyla otomatikleştirilmiş, doğrulanabilir işlemler gerçekleştirilebilir. Akıllı sözleşmeler, işlemlerin otomatikleştirilmesini sağlayarak, geleneksel piyasalardaki manuel işlemlere göre daha verimli bir işleyiş sunar. Blokzincir ayrıca, akıllı sözleşmeler aracılığıyla enerji ağlarının kontrolünü de mümkün kılar. Bu akıllı sözleşmeler, sistemin ne zaman ve hangi işlemleri başlatacağı konusunda sinyaller verir ve bu sinyaller, enerji arzı ile talebini dengede tutacak şekilde tasarlanmış önceden belirlenmiş kurallara dayanır. Fazladan enerji üretildiğinde, akıllı sözleşmeler bu enerjinin otomatik olarak depolanmasını sağlayabilir, ya da üretim yetersiz kaldığında depolanan enerjiyi piyasaya sürebilir (PWC, 2016: 17; Vionis ve Kotsilieris, 2024: 3).

Bu sistem, enerji alışverişini daha demokratik bir hale getirerek, küçük ölçekli üreticilerin ve tüketicilerin büyük enerji şirketleri olmadan doğrudan ticaret yapabilmelerine olanak tanır. Böyle bir yapı, enerji piyasasının daha rekabetçi ve esnek olmasını sağlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanımını teşvik edebilir. Bu tür potansiyel avantajlar, enerji sektöründe blokzincirin devreye girmesini teşvik ederek enerji sektöründe teknoloji temelli bir dönüşümü mümkün kılabilir.

Enerji sektöründe akıllı sözleşmelerin hayata geçirilmesini sağlayan tüm faktörler dikkate alınarak Vionis ve Kotsilieris (2024: 21) tarafından enerji sektörüne yönelik bir SWOT analizi yapılmıştır. Bu analizde, güçlü ve zayıf yönler ile fırsatlar ve tehditler belirtilmiştir. Güçlü yönleri; enerji sektöründe akıllı sözleşmelerin uygulanmasıyla verimlilik artışının gerçekleşmesi, elle yapılan işlemlerin azalmasıyla verimlilik ve maliyet tasarrufunun sağlanması, şeffaf ve güvenli olması, kayıt tutulabilmesi olarak sıralanabilir. Zayıf yönleri; akıllı sözleşmelerin enerji sektöründe görece olarak benimsenme oranının düşük olması, teknik olarak karmaşık olması, standartların eksik olması, yasal olarak belirsizlik taşımasıdır. Fırsatlar; akıllı sözleşmelerin enerji sektöründe maliyet tasarrufları sağlama potansiyeline sahip olması, yenilikçi ticaret platformlarının ortaya çıkışını kolaylaştırması, karbon kredilerinin ticaretini kolaylaştırması, IoT ile

entegrasyon sağlaması ile enerji yönetimi ve fiyatlandırmada sorunsuz otomasyon sağlamasıdır. Tehditler ise akıllı sözleşmelerde siber güvenlik risklerinin bulunması, hukuki düzenlemelerle ilgili zorluklarının olması, protokollerinde standardizasyon eksikliğinin bulunması, farklı platformlar arasında uyum sorunu yaşanması, bu teknolojiye karşı direnç oluşturulması olarak ifade edilmektedir (Vionis ve Kotsilieris, 2024: 22-25)

Sonuç olarak akıllı sözleşmeler, enerji sektöründe elle yapılan işlemleri azaltarak, işlemleri otomatik hale getirerek kolaylaştırmakta, şirketlerin verimliliğini artırmakta ve şirketlerin önemli bilgilerini korumaktadır. Özellikle blokzincirin şeffaflığı sayesinde işlemlerin güvenilir bir şekilde kaydedilmesi ve hukuki belirsizlikleri gidermeye yardımcı olmaktadır. Verimlilikte artış, işlem maliyetlerinde düşme ve şeffaflık sağlamaktadır. Böylece güven ortamını artırmakta ve düzenleme zorlukları giderilmektedir. Akıllı sözleşmeler, sağladığı bu avantajlarla enerji sektöründe verimlilik, güvenlik, düşük maliyet, daha iyi kayıt tutma gibi faydalar sunabilmektedir (Vionis ve Kotsilieris, 2024: 25; Bengisu, 2021).

5. Enerji Sektöründe Blokzincir Teknolojisinin Ekonomik Etkileri

Kaynak tahsisinin yeterli şekilde sağlanamadığı durumlarda piyasa başarısızlıkları ortaya çıkabilmektedir. Piyasa başarısızlığı bir iş birliği eksikliği olarak da değerlendirilebilir. Herhangi bir piyasada, piyasa başarısızlığı ile karşılaşılması halinde, kamu bu piyasalara müdahale edebilmektedir. Piyasa başarısızlığı nedenleri arasında “ortak tüketime konu olan mal ve hizmetlerin tedariki, dışsal fayda veya maliyete sahip mal ve hizmetleri üretimi tekel ve karteller tarafından üretilen çıktı sınırlaması, bilgi sorunu (asimetrik bilgi), eksik (aksak) piyasalar” yer almaktadır (TUBA, 2024: 2). Enerji piyasaları da doğal tekel özelliğine sahip piyasalar olduğu için bu piyasalarda piyasa aksaklığından söz edilmektedir. Enerji piyasalarında özellikle dağıtım şebekelerinin birbirine bağımlı olması nedeniyle tekelci bir yapı sergilemektedir. Bunun dışında enerji altyapısının inşa edildiği bölgede, yalnızca lisans almış tüzel kişilik bu işleri yapabilmektedir. Bu durumda başka bir şirket, hâlihazırda mevcut olan altyapıya alternatif olarak yeni bir ağ inşa etmek istediğinde mali açıdan çok büyük bir maliyetle karşılaşacaktır. Bu yüzden yeni yatırım yapmak isteyen bu şirket, piyasaya girmekten kaçınacaktır. Böylece enerji altyapı yatırımları yapan ilk firma tekelci bir yapı sergileyecektir. Bunun dışında OPEC gibi, enerji sektöründe oligopolistik piyasa yapıları ile karşılaşmak mümkün olabilmektedir. Ayrıca, enerji sektöründe şebeke dışsallığı gibi çeşitli dışsallıklar ile tüketicilerin ve üreticilerin enerji piyasası hakkında eşit bilgiye sahip olmamasından kaynaklı asimetrik bilgi sorunu da mevcuttur (Narin, 2023b: 170-172; Yetkin Ataer, 2022: 1098). Doğal tekel oluşumları, dışsallıklar, bilgi asimetrisi gibi gerekçeler ile enerji sektöründe piyasa başarısızlıkları ortaya çıkabilmektedir.

Enerji sektöründe piyasa başarısızlıklarının çözümü genellikle çok boyutlu ve karmaşık politikalar gerektirir. Blokzincir gibi dijital dönüşüm teknolojileri ise

farklı üretici ve perakendecilerin piyasaya girişini kolaylaştırarak rekabeti arttırmaya yardımcı olabilmektedir. Blokzincir, enerji ticaretinin tokenize edilmesi (simgeleştirme) yoluyla daha küçük ölçekli üreticilerin ve tüketicilerin doğrudan piyasaya katılımını teşvik edebilmektedir. Bu durum aynı zamanda hizmet kalitesinin iyileştirilmesine de olanak sağlayabilmektedir. Finans alanında blokzincir ile elde edilen tecrübelerle, enerji sektöründe merkezsiz bir enerji dağıtım sistemi oluşturmak da mümkün olabilecektir. Öte yandan düzenli oluşturulan enerji şebekeleri sayesinde üreticiler ve tüketiciler doğrudan birbirleri ile bağlantı hale gelebilecektir. Dolayısıyla güç üreticilerinden, iletim ve dağıtım sistem operatörlerine, tedarikçilere kadar devam eden mevcut çok karmaşık enerji sistemleri sadeleştirilmiş olacaktır. Bu, aynı zamanda pazarın yeni ihtiyaçlarını daha iyi yansıtacak bir yapıyı da beraberinde getirebilecektir (PWC, 2016: 16).

Yeni teknolojiler ile enerji verimliliğini ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak ve piyasa başarısızlıklarını azaltmak mümkündür. Bunun için yenilikçi enerji teknolojilerine yatırım yapmak gerekmektedir. Blokzincir tabanlı akıllı sözleşmeler, mikro şebeke ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bütünleşmesini kolaylaştırarak, enerji dağıtımında verimlilik ve esneklik sağlayabilecektir. Blokzincir, enerji tüketimi ve üretimi verilerinin güvenli ve şeffaf bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyabilecektir. Bu, bilgi asimetrisini azaltabilir ve daha bilinçli kararlar alınmasını sağlayabilir. Ancak, blokzincir teknolojisinin enerji sektöründeki piyasa başarısızlıklarını çözmedeki etkinliği, uygulama şekline ve diğer düzenleyici ve teknolojik faktörlere bağlıdır. Ayrıca, bu teknolojinin kendine has zorlukları ve sınırlamaları da göz önünde bulundurulmalıdır.

6. Sonuç

Sanayi devrimleri ile birlikte enerjiye olan gereksinim artış göstermiştir. Geleneksel olarak bu talep kömür, petrol ve doğalgaz gibi, sınırlı ve çevreye zarar veren fosil yakıtlarla karşılanırsa da bunun sürdürülebilir olmadığı ortaya çıkmıştır. Bu kaynakların dünyada adil dağılmamış olması, kaynak zengini ülkeler için orantısız ekonomik güce, enerji arz krizlerine, fosil kaynakları olmayan ülkeler için cari işlemlerde kronik açıklara ve hatta uluslararası enerji çatışmalarına yol açmıştır. Bu tür iktisadi dengesizliklerin yanı sıra fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar dönülmez bir noktaya gelmeden sürdürülebilir ekonomik ve sosyal yapının yeniden inşası gerekli hale gelmiştir. Olası bir iklim krizinin önlenerek sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesi için enerji kaynaklarının temiz olması ve enerji verimliliğinin artırılması önem arz etmektedir. Bu noktada dijital teknolojilerin bu amacı gerçekleştirmede rol üstlenme potansiyeli vardır.

Dijital teknolojiler, enerjinin daha akıllı kullanılmasını sağlayarak enerji verimliliğine ve iklim değişikliğiyle mücadeleye önemli bir katkı sağlayabilmektedir. Akıllı şebekeler, IoT cihazları ve yapay zekâ, gerçek zamanlı izleme ve yönetimi mümkün kılarak yenilenemeyen enerji kaynaklarına olan talebi azaltmak mümkün olacaktır. Ayrıca enerji verimliliği sağlanarak, bu

kaynakların israfı azaltılabilecektir. Bu tür bir dönüşüm, sera gazı salımlarını azaltacak ve düşük karbonlu bir ekonomiye geçişi destekleyerek sürdürülebilirliği teşvik edecektir. Akıllı şebekeler, akıllı sayaçlar ve enerji yönetim sistemleri, bu tür verimliliği ve sürdürülebilirliği destekleyen dijital araçlara örnek olarak verilebilir.

Enerji sektöründe değişime öncülük eden teknolojilerden blokzincir henüz gelişme döneminde olsa da kuramsal olarak sektörün yapısını dönüştürme potansiyeli ile dikkat çekmektedir. Her ne kadar henüz başlangıç aşamasında olsa da blokzincirin enerji sektöründe kullanımına dünyada bölgesel düzeyde ya da pilot çalışma şeklinde birçok uygulama örneği gösterilebilmektedir. Blokzincir enerji sektöründe maliyetleri düşürerek ve işlemleri otomatikleştirerek verimliliği artırabilecektir. Bu teknoloji, veri şeffaflığı ve güvenliği sağlama, bilgileri çarpıtmaya karşı koruma sunma, tüketici güvenini güçlendirme gibi avantajlar sağlamaktadır. Eşler arası ticareti mümkün kılması ile özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimini teşvik edecektir. Bireylerin ve işletmelerin enerji üretimi ve tüketimini daha etkili yönetmelerini sağlayan bu teknoloji, yerel enerji ağları içinde enerji alışverişini basitleştirerek asimetrik bilgiyi azaltacaktır. Akıllı sözleşmeler aracılığıyla otomasyon sağlayan blokzincir, veri yönetimini ve analizini güçlendirmektedir. Ayrıca, küçük ölçekli üreticilerin ve tüketicilerin enerji piyasalarına katılımını kolaylaştırarak daha kapsayıcı bir enerji ekosistemi oluşturmaktadır. Bu özellikler, enerji sektörünü daha sürdürülebilir ve tüketici dostu bir hale getirmeye yardımcı olabilecektir.

Blokzincir teknolojisinin enerji sektöründeki ekonomik etkileri, merkezi olmayan enerji ticaretinden gelişmiş tedarik zinciri yönetimine ve yenilenebilir enerjinin benimsenmesinin kolaylaştırılmasına kadar çok yönlüdür. Blokzincir, yukarıda da bahsedildiği gibi şeffaf ve güvenli işlemleri mümkün kılmakta, işlem maliyetlerini azaltmakta ve piyasa katılımcıları arasında güveni artırmaktadır. Merkezi olmayan enerji şebekelerini yaygınlaştırarak geleneksel enerji piyasalarını yeni sisteme dönüştürmek mümkün olacaktır. Böylece eşler arası enerji ticaretini mümkün kılarak tüketicilere aynı zamanda üretici rolünü verebilmektedir. Bütün bu etkiler, enerji sektörünü daha rekabetçi, verimli ve sürdürülebilir hale getirebilir. Blokzincir, enerji sektöründe gerçekleştirebileceği bu dönüşümlerle piyasa başarısızlıklarını azaltma potansiyelini de beraberinde getirir. Sonuç olarak, blokzincirin benimsenmesi piyasa verimsizliklerini önemli ölçüde azaltabilir, sürdürülebilir enerji ticaretini sağlayabilir ve piyasa başarısızlığının azaltılması yoluyla ekonomik büyümeyi sağlayabilir. Enerji sektöründe dijitalleşmenin ve blokzincir uygulamasının yaygınlaştırılması için sektördeki tüm paydaşların iş birliği yapması, devletin düzenleyici rolünü üstlenmesi ve siber güvenlik konularına odaklanması kritik öneme sahiptir.

Kaynakça

Alcacer, V., ve Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899-919.

Atoss (2023). The path from Industry 4.0 to Industry 5.0, ATOSS Software AG, <https://www.atoss.com/en/insights/blog/from-industry-4-0-to-industry-5-0>, (Erişim: 17.01.2024).

Avrupa Birliği Başkanlığı (2024). Fası 15: Enerji. T.C. Dışişleri Bakanlığı, Avrupa Birliği Başkanlığı, https://www.ab.gov.tr/fasil-15-enerji_80.html, (Erişim: 12.02.2024).

Aykırı, M. (2017). Enerjide Dışa Bağımlılık ve Sağlıklı Büyüme: Türkiye Örneği. *Aydın İktisat Fakültesi Dergisi*, 3(2), 50-67.

Bektaş, M. (2022). Enerjide Dijitalleşme ve İnovasyon. *Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi*, 174, 18-20. <https://www.enerji-dunyasi.com/edergi/6/174/21/#zoom=z>, (Erişim: 22.12.2023).

Bengisu, Ö. (2021). Hukuk, enerji, blockchain ve akıllı sözleşmeler. *Petro-Türk*, <https://www.petroturk.com/makale/hukuk-enerji-blockchain-ve-akilli-sozlesmeler-2>, (Erişim: 02.02.2024).

Bilginoğlu, M. A. (1991). Gelişmekte Olan Ülkelerde Enerji Sorunu ve Alternatif Enerji Politikaları. *Erciyes Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi*, 9, 122-147.

Blockchain Council (2020). What Is Blockchain Technology, And How Does It Work?. Blockchain Council, (Erişim: 02.01.2024).

BP (2021). Statistical Review of World Energy 2021. 70th Edition, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>, (Erişim: 12.12.2023).

CBDDO (2024). Blokzincir Sözlüğü. Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi, <https://cbddo.gov.tr/sss/blokzincir-sozlugu/> (Erişim: 22.01.2024).

Dart, M. (2023). Energy 4.0: How Digital Evolution is Shaping the Future of Electricity. *Energy Spacewell* <https://www.dexma.com/blog-en/energy-4-0-how-digital-revolution-is-shaping-the-future-of-electricity>, (Erişim: 03.01.2024).

Demirkaya, Y. (2022). Yapay Zekâ, Enerji Sektöründe Dijitalleşmeyi ve İnovasyonu Hızlandırıyor, *Türkiye AI*, <https://turkiye.ai/yapay-zeka-enerji-sektorunde-dijitallesmeyi-ve-inovasyonu-hizlandiriyor>, (Erişim: 04.12. 2023).

Dünya Enerji Konseyi (2018). Enerji Sektöründe İnovasyonun Motoru Yeni Girişimler. Dünya Enerji Konseyi, Türk Milli Komitesi, Yeni Enerji Teknolojileri Çalışma Grubu. <https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2018/02/YET2.pdf>, (Erişim: 10.12.2023).

Enerquire (2017). Blockchain in the energy sector: Institutional disruption?. Enerquire, <https://www.enerquire.com/blog/blockchain-in-the-energy-sector-the-institutional-side>, (Erişim: 06.01.2024).

Ertürk, E., Lopez, D., ve Yu, W. Y. (2020). Benefits and Risks of Using Blockchain in Smart Energy: A Literature Review, *Contemporary Management Research*, 15(3), 205-225.

ETKB (2020). Nükleer Enerji. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-nukleer-enerji> (Erişim: 12.12.2023).

European Commission (2022). Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, 2022 Strategic Foresight Report, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0289&%3Bqid=1658824364827>, (Erişim: 06.12.2023).

Güleç, M. (2022). DLT (Dağıtık Defter Teknolojisi - Distributed Ledger Technology) Nedir? Medium, Oct 13, 2022, <https://medium.com/@gulecmurat/dlt-da%C4%9F%C4%B1t%C4%B1k-defter-teknolojisi-distributed-ledger-technology-nedir-b899b621d7db>, (Erişim: 18.01.2024).

IEA (2022). Energy Efficiency 2022. International Energy Agency, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7741739e-8e7f-4afa-a77f-49dadd51cb52/EnergyEfficiency2022.pdf>, (Erişim: 03.12.2023).

IEA (2023). Clean energy investment is extending its lead over fossil fuels, boosted by energy security strengths. International Energy Agency, <https://www.iea.org/news/clean-energy-investment-is-extending-its-lead-over-fossil-fuels-boosted-by-energy-security-strengths>, (Erişim: 03.12.2023).

Indigo Advisory (2023). Global Blockchain Activity - Interactive Map. <https://www.indigoadvisorygroup.com/blockchain>, (Erişim: 06.01.2024).

Leonelli, S. (2020). Scientific Research and Big Data. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2020 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/science-big-data> (Erişim: 13.01.2024).

Mobidev (2018). Energy 4.0: Digital Transformation In Energy and Utilities Industry. <https://mobidev.biz/blog/digital-transformation-energy-utilities-sector>, (Erişim: 03.01.2024).

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>, (Erişim: 22.12.2023).

Narin, M. (2019). Türkiye'nin Enerji Politikaları: Enerji Arz Güvenliği. *Toprak İşveren Dergisi*, 124, 4-19.

Narin, M. (2021). Ekonomide Endüstri 4.0 ve Uygulamaları. *Endüstri 4.0 ve Uygulamaları* içinde (Eds. Aydın Şık ve Cevdet Yiğit Özbek), 23-48, Detay Yayıncılık, Ankara.

Narin, M. (2023a). Küresel İklim Değişikliği Kapsamında Türkiye'nin Yenilebilir Enerji Politikaları. *Toprak İşveren*, 139, 14-23.

Narin, M. (2023b). Enerji Sektöründe Piyasa Başarısızlığı. *Teoride ve Uygulamada Piyasa Başarısızlığı* içinde (Eds. Müslüme Narin ve Merter Mert), Ekin Yayınevi, 167-181.

Nazari, Z., ve Musilek, P. (2023). Impact of Digital Transformation on the Energy Sector: A Review. *Algorithms*, 16(4), 211.

Özkaya, S. Y. (2023). Yenilenebilir Enerji Kaynakları. T.C. Dışişleri Bakanlığı, <https://www.mfa.gov.tr/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.tr.mfa>, (Erişim: 03.12.2023).

Proctor, M., ve Wilkins, J. (2019) 4.0 Sight-digital industry around the world. Technical report, EU Automation. <https://www.euautomation.com/4sight>, (02.02.2024).

PWC (2016). Blockchain – An Opportunity for Energy Producers and Consumers?. PwC Global Power and Utilities, <https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-blockchain-opportunity-for-energy-producers-and-consumers.pdf>, (Erişim: 25.01.2024).

Sabo, F. (2015). Industry 4.0 – A comparison of the status in Europe and the USA. Thesis FH Kufstein, <https://www.marshallplan.at/images/All-Papers/MP-2014/Sabo.pdf>, (Erişim: 22.01.2024).

Shura (2021). Türkiye'de Enerji Sektörünün Dijitalleşmesi Kapsamında İş Modellerinin, Teknolojilerin ve Gerekli Mevzuat Altyapısının Değerlendirilmesi. Shura Enerji Dönüşüm Merkezi.

Sunyaev, A. (2020). Distributed Ledger Technology. Internet Computing: Principles of Distributed Systems and Emerging Internet-Based Technologies, Chapter 9, 265-299.

Światowiec-Szczepańska, J., ve Stępień, B. (2022). Drivers of Digitalization in the Energy Sector-The Managerial Perspective from the Catching Up Economy. *Energies*, 15(4), 1437.

SOCAR (2022). Enerjinin Dev Potansiyeli: Blok Zincir Nedir? Neden Önemlidir?, 02.12.2022, <https://www.socar.com.tr/blog/4/blok-zincir-nedir>, (Erişim: 02.01.2024).

Şahbaz, U. (2017). Kamu İnovasyonu Geliştirmek için Ne Yapmalı? *Medium*, <https://medium.com/make-innovation-work/kamu-inovasyonu-geli%C5%9Ftirmek-i%C3%A7in-ne-yapmal%C4%B1-b9e0caea3cc>, (Erişim: 14.12.2023).

Şahin, G. (2021). *Natural Gas Economics in the scope of long-term contracts of Turkey*. Gazi Kitabevi, Ankara.

Şahin, G., ve Bulut, E. (2021). Paranın Evrim Sürecinde Kriptoparaların Geleceği. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(2), 485-508.

TUBA (2024). Piyasa Başarısızlığı. *Türkiye Bilimler Akademisi Açık Ders*, https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1580/mod_resource/content/1/HAFTA_13_PİYASA_BASARISIZLIGI.pdf, (Erişim: 03.01.2024).

Vionis, P., ve Kotsilieris, T. (2024). The Potential of Blockchain Technology and Smart Contracts in the Energy Sector: A Review. *Applied Sciences*, 14(1), 253. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/1/253>, (Erişim: 13.02.2024).

Weigel, P., ve Fishedick, M. (2019). Review and categorization of digital applications in the energy sector. *Applied Sciences*, 9(24), 5350.

World Nuclear Association (2024). World Nuclear Power Reactors and Uranium Requirements. <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>, (Erişim: 17.01.2024)

Yang, F., ve Gu, S. (2021). Industry 4.0, A Revolution that Requires Technology and National Strategies. *Complex and Intelligent Systems*, 7, 1311-1325.

Yetkin Ataer, M. (2022). Enerji Sektöründe Piyasa Başarısızlıklarına Devlet Müdahalesi ve Devlet Başarısızlıkları. *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi*, 57(2), 1094-1114.

Yusufoğlu, M. (2018). Türkiye'de Kalkınma-Sermaye Birikimine Enerji İhtiyacı Üzerinden Bakmak. Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı Kalkınma İktisadi ve İktisadi Büyüme Bilim Dalı Doktora Tezi, İstanbul.