

Endüstriyel Simbiyoz Ağlarında Blokzincir Teknolojisinin Kullanımı

¹Emre YAZICI, ²Hacı Mehmet ALAKAŞ

*¹ OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
², Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

Özet

Sürdürülebilir üretim ve tüketim çerçevesinde döngüsel ekonomi amaçlarını gerçekleştirmek için Endüstriyel simbiyoz (ES) ağları önemli bir iş modelidir. ES ağları ile enerji, malzeme ve yan ürünler, hiç atık üretilmeden veya minimum düzeyde atık üretilerek hem ekonomik hem de çevresel faydalar elde edilmektedir. Ancak organizasyonel süreçler, yasal yükümlülükler ve örgüt kültürü gibi çeşitli faktörler nedeniyle ES ağlarındaki faaliyetleri yönetmek oldukça zordur. Sürecin iyi bir şekilde yönetilmesi ve endüstriyel tesisler arasındaki işbirliğinin kolaylaştırılması, malzemelerin lojistik süreçleri ve değişim işleminin ekonomik süreçlerinin yönetilmesi için Blok zincir teknolojisi ES ağları için kullanılabilecek uygun bir teknolojik sistemdir. ES ağlarının sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada şeffaflığın ve gözlemlenebilirliğin sağlanmasındaki zorluklar Blok zincir teknolojisinin şifreleme ve verilerin değiştirilememesi özelliği ile giderilebilmektedir. Blok zincir teknolojisinin sağladığı avantajlar ile ES ağlarındaki süreçler daha kontrol altında yönetilebilmektedir. Bu çerçevede yürütülen çalışmada ES ağlarında blok zincir teknolojisi kullanımını etkileyen başarı faktörlerinin belirlenmesi bu faktörlerin önem düzeylerinin belirlenmesi ve alternatiflerin sıralanması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Blokzincir teknolojisi, Döngüsel ekonomi, Endüstriyel simbiyoz.

Abstract

Industrial Symbiosis (IS) networks are an important business model for achieving circular economy goals within the framework of sustainable production and consumption. Through IS networks, energy, materials, and by-products are shared in ways that generate economic and environmental benefits with zero or minimal waste production. However, managing activities within IS networks is quite challenging due to various factors such as organizational processes, legal obligations, and organizational culture.

Blockchain technology is a suitable technological system that can be used in IS networks to effectively manage the process and facilitate cooperation among industrial facilities, as well as to manage the logistics and economic processes involved in material exchanges. The challenges in ensuring transparency and traceability in achieving the sustainability goals of IS networks can be addressed by blockchain technology's features such as encryption and data immutability. With the advantages provided by blockchain technology, processes in IS networks can be managed more effectively and under better control.

Within this framework, the aim of the present study is to identify the success factors that influence the use of blockchain technology in IS networks, to determine the importance levels of these factors, and to rank the alternatives accordingly.

Keywords: Blockchain technology, Circular economy, Industrial symbiosis.

1. Giriş

Döngüsel ekonomi kavramı gelişmekte olan ve karmaşık bir küresel üretim ortamında çevresel ve ekonomik olarak sürdürülebilir üretim ve hizmet arzını odak noktasında bulunduran mühendislik, ekonomi ve ekoloji gibi disiplinleri bir araya getiren bir yaklaşımdır. Kaynağın geri kazanımı gibi bir teoriye dayanan döngüsel ekonomi yaklaşımı bir işletmenin ortaya çıkardığı atıkların diğer bir işletmenin üretimde girdi olarak kullanıldığı bir süreci kapsar. Bu süreçte simbiyoz ağlarının

kurulması kapsamlı ve karmaşık birçok faaliyeti içerir. Bunlar arasında atık değişim, finansal işlemleri takibi ve lojistik süreçleri en temel süreçlerdir. Simbiyoz ağlarının katılımcı sayısı bu faaliyetlerdeki bilgi ve veri büyüklüğünü etkilemektedir. Ağ yapısı büyüdükçe işlem sayısı artacak işlem sayısı arttıkça da büyük veri ortaya çıkacaktır. Bu nedenle fazla sayıda bilgi akışı içeren simbiyoz ağlarında büyük verilerinde ortaya çıkması ile birlikte sürecin yönetilmesi ve yürütülmesi için teknolojik araçlara ihtiyaç duyulacaktır. Bu çerçevede blok zincir teknolojilerinin benzer uygulamalarda kullanılabildiği bilinmektedir.

Blokzincir teknolojisi (BZT) ortak katılımcıların oluşturduğu verilerin kaydedildiği ve dijital ortamda verilerin şifrelenerek kayıt altında tutulduğu bir defter olarak tanımlanabilmektedir. BZT değişim platformu tarafından desteklenen yenilikçi bir iş modeli ile sektörler arası sinerjilerin oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır. Bu iş modeli, şirketler arasında simbiyotik ilişkiler oluşturmada sürecin kolayca takip edilmesi ve malzeme, yan ürün ve enerji alışverişini güvenilir ve emniyetli bir şekilde sağlayacak bir ortam sunabilmektedir desteklenmektedir. BZT, akıllı sözleşmeler gibi tüm yeteneklerinde ortaya çıkan merkezi olmayan yapısı, iş modelinin güvenilirliğini artırmakta ve benimsenmesini ve pazara nüfuz etmesini kolaylaştıracağından, hem bir değişim platformu hem de bir güven mekanizması olarak hareket etmektedir. BZT tabanlı iş modelinin başarılı bir şekilde uygulanması, çevre bilimi ve bilgi teknolojisinin kesişiminde mevcut en son teknolojiyi aşmaya katkısından, sürdürülebilir bölgesel kalkınmayı teşvik ederek topluma ve ekonomiye fayda sağlamaya kadar çok yönlü olumlu bir etki ortaya çıkarmaktadır.

Özellikle simbiyotik ağların geliştirilmesi için endüstriyel simbiyoz kavramının gelişimini teşvik etmek amacıyla blok zinciri teknolojisini benimsemenin çeşitli potansiyel faydalar vardır[1]. BZT'nin benimsenmesiyle şirketler, güvenli ve şeffaf bir işlem süreci sağlayabilir [2], ve dahası, BZT özelliklerinin birden fazla sektörde dönüşümü kolaylaştırmak ve işlem yaklaşımlarını bozmak için muazzam bir potansiyele sahip olduğu iddia edilmektedir [3]. Blok zinciri teknolojisi, işletmelere ve katılımcılara aracı bir kuruluşa (genellikle güvenliği garanti etmek için kullanılır) ihtiyaç duymadan çevrimiçi işlemler yürütmeleri için gerekli altyapıyı sağlayabilir ve sonuç olarak işlemlerle ilişkili maliyetleri azaltabilir [4]. Bununla birlikte, faydalarına rağmen, blok zinciri teknolojisinin endüstriyel simbiyoz süreçlerinde benimsenmesi literatürde daha fazla araştırılmayı beklemektedir [5].

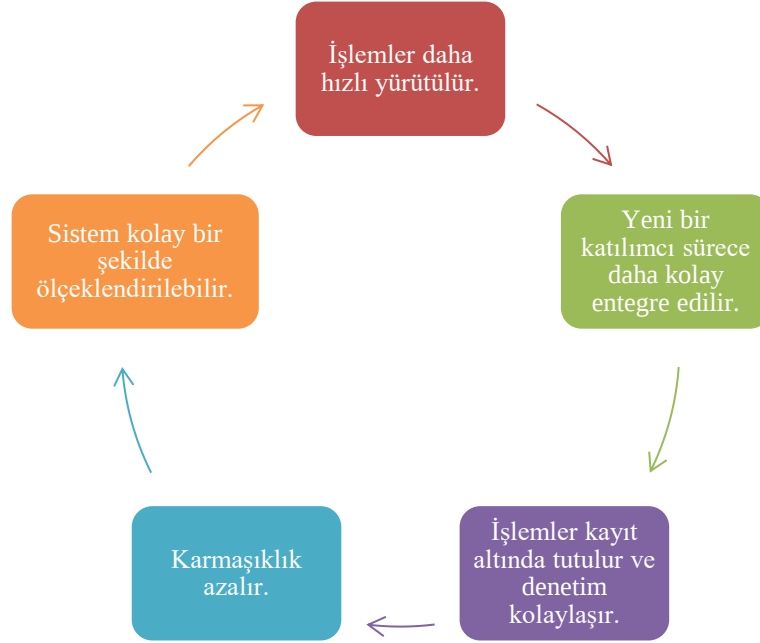
BZT ile katılımcı işletmeler atık değişim sürecinde kolayca akıllı sözleşme imzalayabilir. Böylelikle atık yönetimi süreci kolaylıkla yönetilebilmektedir. BZT'nin sunmuş olduğu akıllı sözleşmeler ile işletmeler anlaşmalarını hızlı ve kolayca yaparak dijital kimlik oluşturur. IS ağına katılan kuruluşlar için bu dijital kimlik ile verilerin bütünlüğünü ve kimlik doğrulamasını sağlar. Ayrıca, her kuruluşun verilere erişme, kaydetme ve veri alma ve değerlendirme düzeyini ve yetkisini belirleyen bir dizi kurallar tanımlanarak süreç dijital ortamda kolayca takip edilebilir [6], [7].

Dolayısıyla endüstriyel simbiyoz ağları ile BZT'nin ilişkilendirilebileceği birçok süreç mevcuttur. Bu süreçleri aşağıdaki gibi altı başlık altında sınıflandırabiliriz.

- Kaynak takibi ve değişim süreci,
- Atık yönetimi süreçleri
- Finansal işlem süreçleri
- Sertifikalandırma ve Sürdürülebilirlik süreçleri
- Lojistik süreçleri
- Sinerji oluşturma süreçleri

Bu süreçler dikkate alındığında BZT'nin endüstriyel simbiyoz ağlarında kullanımına ilişkin

faydalar en temel haliyle Şekil 1’deki gibi sıralanabilir.



Şekil 1. Blok zincir teknolojisinin Endüstriyel Simbiyoz Ağına Sağladığı Kolaylıklar [5], [8]

Bu çerçeve bu çalışmada endüstriyel simbiyoz ağlarında blok zincir teknolojisinin kullanımını etkileyen kriterlerin ve önem düzeylerinin belirlenmesi ve endüstriyel simbiyoz ağlarına özgü kullanılabilecek alternatif BZT’lerin belirlenerek sıralanması amaçlanmaktadır.

2. Yöntem

Çalışmada alternatiflerin ağırlıklandırılması ve alternatiflerin sıralanması problemi mevcuttur. Bu problemlere ilişkin olarak kriterlerin ağırlıklandırılması kriter ağırlıklandırma algoritmasına sahip AHP yöntemi alternatiflerin sıralanmasında ise TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Ele alınan problemin yapısı gereği kriterlere ve kriterlerin alternatiflere göre değerlendirilmesi simbiyoz ağı sürecinden kaynaklı net olmayan, belirlenemeyen veya tam bilgiye sahip olunamayan durumlar mevcuttur. Bu nedenle Pisagor Bulanık AHP (PB-AHP) ve Pisagor Bulanık TOPSIS (PB-TOPSIS) yöntemleri ile hesaplamalar yapılmıştır. Yazıcı vd. (2024)’nin çalışmasında seçim problemlerinde yaygın olarak kullanılan bu yöntemlerin algoritmik adımları sunulmaktadır [9]–[11].

3. Endüstriyel Simbiyoz Ağlarında Blokszincir Alternatiflerinin Sıralanması

3.1. Problem Tanımı

Çalışmada endüstriyel simbiyoz ağlarına ilişkin olarak kullanılabilecek BZT’lerin seçim problemi ele alınmaktadır. Bu probleme ilişkin olarak BZT’lerden endüstriyel simbiyoz süreçlerine uygun alternatiflerin belirlenmesi önemli bir noktadır. Birçok BZT alternatifi mevcuttur ancak bu çalışmada ele alınan problemi öne çıkaran nokta simbiyoz ağlarının süreçlerine en fazla faydayı sağlayacak alternatifi belirlenmesidir. Bu çerçevede yürütülen uygulama aşamasında ilk olarak

kriterlerin ve bu kriterlerin önem düzeylerinin belirlenmesi mevcuttur. Ardından alternatiflerin sıralanmasına ilişkin hesaplamalar yapılmaktadır.

3.2. Kriterlerin ve Önem Düzeylerinin Belirlenmesi

Blokszincir teknolojisinin endüstriyel simbiyoz ağlarının kurulması, organizasyonel süreçlerinin yönetilmesi ve sürdürülebilir olması için sağladığı faydalar dikkate alınarak kriterler belirlenmiştir. Çalışmada 12 adet kriter belirlenmiştir. Kriterler Tablo 1’de listelenmektedir. Listelenen bu kriterler farklı çalışmalardan ele alınan problemin amacına göre derlenmiştir. Aynı zamanda uzman görüşleri ile de desteklenmektedir.

Tablo 1. Endüstriyel Simbiyoz Ağında Blokszincir Teknolojisi Kullanımını Etkileyen Kriterler

Kriterler	
Aracısızlaştırma [12]	Erişim Kolaylığı [13]
Veri Güvenliği	Ürün izlenebilirliği [14], [15]
Süreç kolaylaştırma	Talep Tahminini Kolaylaştırma[16]
Maliyet Azaltma [17], [18]	Denetlenebilirlik[15]
Şeffaflık [17]	Katılımcı Koordinasyonu [15]
Ölçeklenebilirlik [13]	Teknolojik yapısı
İşlem hızı [15]	

Belirlenen alternatiflere ilişkin olarak üç uzman görüşü ile karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Matrisin oluşturulmasında kullanılan yöntemle özgü geliştirilen Tablo 2’de yer alan dilsel ifadeler kullanılmıştır.

Tablo 2. PB-AHP dilsel karşılaştırma ölçeği [19]

Dilsel Değişken	Pisagor Bulanık Sayılar			
	μ_L	μ_U	ν_L	ν_U
Kesin Düşük Önemli (KD)	0.0	0.0	0.9	1.0
Çok Düşük Önemli (ÇD)	0.1	0.2	0.8	0.9
Düşük Önemli (D)	0.2	0.35	0.65	0.80
Ortalamanın Altında Önemli (OA)	0.35	0.45	0.55	0.65
Eşit (E)	0.1965	0.1965	0.1965	0.1965
Ortalama Önemli (O)	0.45	0.55	0.45	0.55
Ortalamanın Üstünde Önemli (OÜ)	0.55	0.65	0.35	0.45
Yüksek Önemli (Y)	0.65	0.80	0.2	0.35
Çok Yüksek Önemli (ÇY)	0.8	0.9	0.1	0.2
Kesinlikle Yüksek Önemli (KY)	0.9	1.0	0.0	0.0

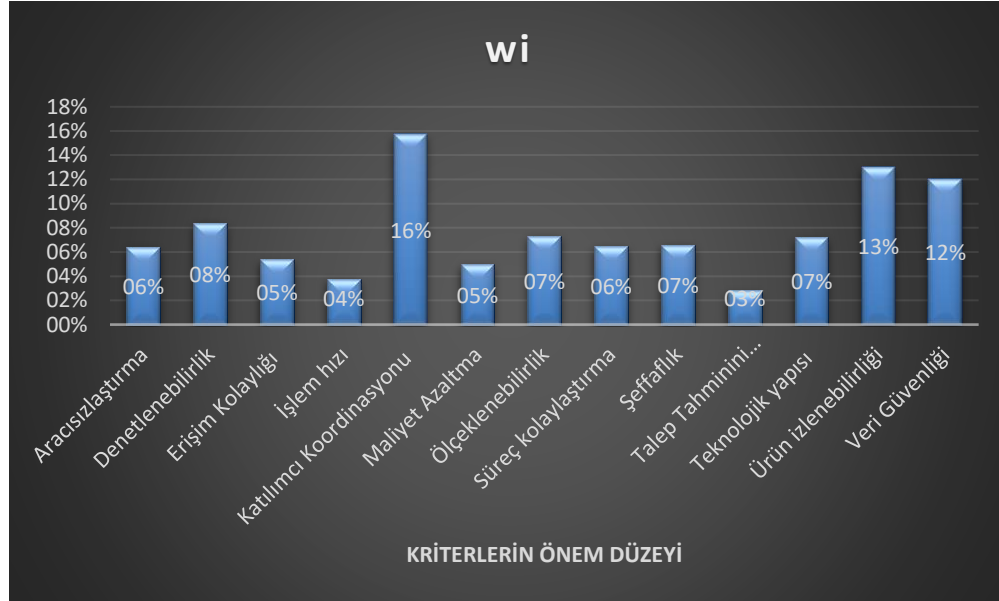
Dilsel ifadeler ile elde edilen karşılaştırma matrisi Tablo 3’te yer almaktadır.

Tablo 3. İkili Karşılaştırma Matrisi

Kriterler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
-----------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----

Aracısızlaştırma	C1	E	E	E	OÜ	OA	OÜ	OA	E	OA	H	OA	D	D
Denetlenebilirlik	C2	E	E	OÜ	OÜ	OA	OÜ	OÜ	OÜ	E	OÜ	OÜ	E	E
Erişim Kolaylığı	C3	E	OA	E	OA	D	OA	E	H	OA	OÜ	OA	D	D
İşlem hızı	C4	OA	OA	OÜ	E	D	OA	OA	OA	OA	E	E	D	D
Katılımcı Koordinasyonu	C5	OÜ	OÜ	Y	Y	E	Y	D	OÜ	OÜ	ÇY	OÜ	E	E
Maliyet Azaltma	C6	OA	AA	OÜ	OÜ	D	E	OA	E	OA	OÜ	OA	OA	OA
Ölçeklenebilirlik	C7	AA	OA	E	OÜ	Y	OÜ	E	OA	OÜ	OÜ	OA	OA	OA
Süreç kolaylaştırma	C8	E	OA	D	OÜ	OA	E	OÜ	E	OÜ	OÜ	OÜ	OA	OA
Şeffaflık	C9	OÜ	E	OÜ	OÜ	OA	OÜ	OA	OA	E	OÜ	OA	E	OA
Talep Tahminini	C10	D	OA	OA	E	ÇD	OA	OA	OA	OA	E	OA	D	OA
Teknolojik yapısı	C11	OÜ	OA	OÜ	E	OA	OÜ	OÜ	OA	OÜ	OÜ	E	OA	E
Ürün izlenebilirliği	C12	Y	E	Y	Y	E	OÜ	OÜ	OÜ	E	Y	OÜ	E	E
Veri Güvenliği	C13	Y	E	Y	Y	E	OÜ	OÜ	OÜ	OÜ	OÜ	E	E	E

İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasının ardından yöntem adımları uygulanarak kriterleri önem düzeyleri elde edilmiştir. Kriterlerin önem düzeyleri Şekil 2’de sunulmaktadır.



Şekil 2. Kriterlerin Önem Düzeyleri

Elde edilen sonuçlara göre katılımcı koordinasyonu kriteri Blokzincir alternatiflerinin simbiyoz ağında kullanımı için en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Bu kriteri önem düzeyi açısından ürün izlenebilirliği ve veri güvenliği kriteri takip etmektedir. Bu üç kriterin önem düzeyleri her birisi için %10’da fazla çıkmıştır. Bu kriterlerden sonra ön plana çıkan kriterler olarak Denetlenebilirlik, teknolojik yapı ve Aracısızlaştırma kriterleri ön plana çıkmaktadır.

3.3. Alternatiflerin Belirlenmesi ve Sıralanması

Kriter ağırlıklarının hesaplanmasında PB-TOPSIS yönteminin adımları sırasıyla uygulanmıştır. Karar matrisinin oluşturulmasında grup karar verme tekniği ile değerlendirme yapılarak karar vericilerin ortak kararları belirlenmiştir. Değerlendirmede dört uzman bir araya gelerek görüşlerini bildirmiştir. Uzmanlardan ikisi endüstriyel simbiyoz alanında akademik yayınları bulunan iki uzman ise bilişim teknolojileri alanında uzmandır. Sektörde ve akademik alanda deneyimli uzmanlar ile değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirmelerde Tablo 4'te verilen dilsel terimler kullanılmaktadır.

Tablo 4. PB-TOPSIS yöntemi dilsel ifadeler

Pisagor bulanık sayılar (μ, ν)			
Dilsel terimler	Kısaltmalar	μ	ν
Kesin düşük	KD	0,1	0,99
Çok düşük	ÇD	0,1	0,97
Düşük	D	0,25	0,92
Orta düşük	OA	0,4	0,87
Orta	O	0,5	0,8
Orta yüksek	OY	0,6	0,71
Yüksek	Y	0,7	0,6
Çok yüksek	ÇY	0,8	0,44
Kesin yüksek	KY	0,1	0

Belirlenen alternatifler Tablo 5'te sunulmaktadır. Alternatiflerin belirlenmesi simbiyoz ağının süreçlerine uygun olmasına ilişkin değerlendirmeler uzmanlar tarafından özellikle dikkate alınmıştır.

Tablo 5. Endüstriyel Simbiyoz Ağı Blokzincir Alternatifleri

Alternatif
Algorand (A1)
Bitcoin (A2)
Corda (A3)
EOSIO (A4)
Ethereum (A5)
Hyperledger Fabric (A6)
IOTA (A7)
Ripple (A8)
Stellar (A9)
Tezos (A10)
VeChain (A11)
Kaynak: Uzman görüşleri ve [15], [20]

Alternatifler değerlendirmek için elde edilen karar matrisi Tablo 4'te yer alan dilsel ifadeler ile oluşturulmuştur. Karar matrisinin elde edilmesinin ardından PB-AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları PB-TOPSIS yöntemine entegre edilerek alternatiflerin sıralamaları hesaplanmıştır.

Tablo 6. Karar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
A1	OY	OY	ÇD	O	Y	ÇY	OY	OY	OY	OY	OY	OY	O
A2	O	O	O	O	OA	D	O	O	OY	O	O	O	OY
A3	Y	ÇY	Y	Y	Y	ÇY	Y	O	OY	OY	Y	Y	Y
A4	O	O	OA	OA	ÇD	ÇD	O	O	O	O	O	O	OY
A5	OY	Y	OY	OY	Y	ÇY	OY	O	Y	OY	OY	OY	Y
A6	Y	ÇY	Y	Y	Y	ÇY	Y	O	Y	Y	Y	Y	Y
A7	O	Y	OA	O	Y	ÇY	O	Y	Y	OY	Y	O	Y
A8	OA	OY	D	D	Y	Y	OA	O	Y	OA	OA	OA	O
A9	O	Y	O	O	OY	ÇY	OY	OY	Y	O	O	O	OY
A10	OY	O	OY	OY	ÇD	OA	OY	O	OY	Y	Y	OY	OY
A11	OY	Y	OY	OY	Y	ÇY	OY	O	Y	OY	OY	OY	Y

Karar matrisinin oluşturulmasının ardında PB-TOPSIS yönteminin algoritmik adımları sırasıyla uygulanarak alternatifler için sıralamalar elde edilmiştir. Elde edilen sıralamalar Tablo 7’de özetlenmektedir.

Tablo 7. Alternatiflerin Sıralaması

Alternatifler	Uzaklıklar	Sıralama
Algorand	-8.62	6
Bitcoin	-15.92	10
Corda	-0.85	2
EOSIO	-18.82	11
Ethereum	-4.50	3
Hyperledger Fabric	-0.10	1
IOTA	-5.95	5
Ripple	-14.29	9
Stellar	-9.08	7
Tezos	-13.02	8
VeChain	-4.50	3

4. Tartışma

Endüstriyel simbiyoz ağlarında süreçlerin yönetilmesi önemli kararları bünyesinde barındırmaktadır. Bununla birlikte süreçlerde büyük kapsamda veri ortaya çıkmaktadır. Bu verilerin paylaşılması, yönetilmesi ve analiz edilmesi gibi süreçlerde önemli düzeyde gelişmiş teknolojiye ihtiyaç vardır. Zira endüstriyel simbiyoz ağlarının kurulmasının önündeki engellerde dahi teknolojik alt yapı eksikliği [17], [21], [22] bir kriter olarak değerlendirilmektedir. Bu noktada endüstriyel simbiyoz ağlarının yönetilmesinde BZT’ler önemli bir katkı sunmaktadır.

Yürütülen bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre kriterlerin önem düzeylerinde sinerji süreçlerine ilişkin kriterler ve tedarik zincirine özgü kriterler ön plana çıkmaktadır. Bu yönüyle kriterlerin endüstriyel simbiyoz süreçlerine özgü değerlendirmeleri bu kriterlerin ön plana çıkmasında etkili olmuştur.

Alternatiflerin sıralanması ise sonuçlara göre kurumsal işbirliğini ön plana çıkaran, ürünlerin izlenmesi ve takibini kolaylaştıran ve denetlenebilirlik özelliği yüksek olan alternatifler sıralama

ön plana çıkmaktadır. Bu noktada katılımcı koordinasyonu kriterine hizmet edebilecek kriterler kurumsal işbirliğine katkı sağlayabilecek alternatiflerdir. Finansal süreçlerde yaygın kullanılan Bitcoin gibi alternatiflerin endüstriyel simbiyoz sürecinde biraz daha arka planda yer aldığı görülmektedir. Bunun temel nedeni ise endüstriyel simbiyoz ağında tek odak noktasının finansal süreçler olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla genel olarak elde edilen sonuçlar uzmanlar ile tartışılıp analiz edildiğinde elde edilen sonuçların hem kriterler hem de alternatifler açısından endüstriyel simbiyoz sürecine uyumlu olduğunu düşünülmektedir.

Sonuç

Sürdürülebilir ekonomi için döngüsel iş modelleri, kaynakların verimli kullanılması ve olumsuz çevresel etkilerin azaltarak ekonomik faydalar ortaya çıkarmaya olanak sağlayan stratejik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu süreçlerde katılımcıların fazla sayıda olması ve büyük miktarda verinin ortaya çıkması ile birlikte sürecin yönetilmesi için teknolojik araçlara ihtiyaç vardır. Bu amaca hizmet etme noktasında blokzincir teknolojisi son zamanlarda yaygın bir kullanıma sahiptir.

Yaygınlaşan bu kullanım blokzincir teknolojisinin endüstriyel simbiyoz süreçleri için sahip olması gereken kriterlerin belirlenmesi ve blokzincir alternatiflerinin seçimine ilişkin karar problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda yürütülen çalışmada blokzincir teknolojisinin endüstriyel simbiyoz süreçlerini kullanımını etkileyen kriterleri belirlenerek bu kriterlerin önem düzeyleri PB-AHP yöntemi ile hesaplanmıştır. Ardından alternatiflerin sıralanması için PB-TOPSIS yöntemi kullanılarak alternatif blokzincir teknolojileri sıralanmıştır.

Kriterler arasında önem düzeylerine göre işbirliği sürecini ön plana çıkaran kurumsal koordinasyon kriterleri en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Bu kriteri tedarik zinciri yapısında ihtiyaç duyulan ürün takibini kolaylaştırıcı kriter ön plana çıkmıştır. Alternatifler arasında ise Hyperledger alternatifi birinci alternatif olarak belirlenmiştir.

Çalışmada ele alınan kriterler endüstriyel simbiyoz ağı sürecine ilişkin bütünsel olarak değerlendirilmiştir. Sonraki çalışmalarda endüstriyel simbiyoz ağının her bir sürecine ayrı olarak alternatiflerin değerlendirilmesi yapılabilir.

Kaynaklar

- [1] I. A. Ferreira, R. Godina, A. Pinto, P. Pinto, ve H. Carvalho, “Boosting additive circular economy ecosystems using blockchain: An exploratory case study”, *Comput. Ind. Eng.*, c. 175, sayı December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2022.108916.
- [2] S. A. Rehman Khan, Z. Yu, S. Sarwat, D. I. Godil, S. Amin, ve S. Shujaat, “The role of block chain technology in circular economy practices to improve organisational performance”, *Int. J. Logist. Res. Appl.*, c. 25, sayı 4–5, ss. 605–622, 2022, doi: 10.1080/13675567.2021.1872512.
- [3] L. Ning ve Y. Yuan, “How blockchain impacts the supply chain finance platform business model reconfiguration”, *Int. J. Logist. Res. Appl.*, c. 26, sayı 9, 2023.
- [4] C. F. Durach, T. Blesik, M. von Düring, ve M. Bick, “Blockchain Applications in Supply

- Chain Transactions”, *J. Bus. Logist.*, c. 42, sayı 1, ss. 7–24, 2021, doi: 10.1111/jbl.12238.
- [5] R. Gonçalves, I. Ferreira, R. Godina, P. Pinto, ve A. Pinto, “A Smart Contract Architecture to Enhance the Industrial Symbiosis Process Between the Pulp and Paper Companies - A Case Study”, içinde *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, c. 320 LNNS, doi: 10.1007/978-3-030-86162-9_25.
- [6] B. Esmailian, J. Sarkis, K. Lewis, ve S. Behdad, “Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0”, *Resour. Conserv. Recycl.*, c. 163, 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105064.
- [7] M. Kouhizadeh, J. Sarkis, ve Q. Zhu, “At the nexus of blockchain technology, the circular economy, and product deletion”, *Appl. Sci.*, c. 9, sayı 8, 2019, doi: 10.3390/app9081712.
- [8] R. Godina, A. Bruel, A. Neves, ve J. C. O. Matias, “The Potential of Blockchain Applications in Urban Industrial Symbiosis”, içinde *IFAC-PapersOnLine*, 2022, c. 55, sayı 10, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.122.
- [9] S. Lahane ve R. Kant, “A hybrid Pythagorean fuzzy AHP – CoCoSo framework to rank the performance outcomes of circular supply chain due to adoption of its enablers”, *Waste Manag.*, c. 130, ss. 48–60, 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.05.013.
- [10] E. Yazıcı, H. M. Alakaş, ve T. Eren, “Selection of waste receiving companies for sustainable industrial symbiosis network: an application a case in Ankara for foundry industry waste”, *Neural Comput. Appl.*, ss. 1–18, Nis. 2024, doi: 10.1007/S00521-024-09683-1/TABLES/12.
- [11] S. Lahane ve R. Kant, “Evaluation and ranking of solutions to mitigate circular supply chain risks”, *Sustain. Prod. Consum.*, c. 27, ss. 753–773, Tem. 2021, doi: 10.1016/J.SPC.2021.01.034.
- [12] A. Aydoğdu ve H. M. Çakır, “Blockchain Teknolojisinin Uygulama Alanları ve Finans”, *Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*, c. 15, sayı 30, ss. 101–128, 2024, doi: 10.47129/bartiniibf.1556654.
- [13] A. Kama, “E-Ticaret Yöntemi ile Faaliyet Gösteren Firmalarda Tedari Zinciri için Blokzincir Teknolojisi Uygulaması ve Seçimi: Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Bir Uygulama”, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, 2023.
- [14] S. Külahlı ve V. Çağlıyan, “Tedarik Zincirinde Blokzinciri Teknolojisi Uygulamaları Sistematik Bir Literatür Taraması”, *Sos. Ekon. Araştırmalar Derg.*, c. 22, sayı 1, ss. 57–75, 2022, [Çevrimiçi]. Available at: www.scopus.com.
- [15] E. Yavuz, “Tedarik Zinciri Yönetiminde Blok Zincir Kullanım Kriterlerinin Belirlenmesi ve AHP Yöntemi ile Ağırlıklandırılması”, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2022.
- [16] H. Treiblmaier, “The impact of the blockchain on the supply chain : a theory-based research framework and a call for action”, *Supply Chain Manag. An Int. J.*, c. 26, sayı 6, ss. 545–559, 2018, doi: 10.1108/SCM-01-2018-0029.
- [17] A. Bruel ve R. Godina, “A Smart Contract Architecture Framework for Successful Industrial Symbiosis Applications Using Blockchain Technology”, *Sustain.*, c. 15, sayı 7, 2023, doi: 10.3390/su15075884.
- [18] I. A. Ferreira, G. Palazzo, ve H. Carvalho, “Implications of the blockchain technology adoption by additive symbiotic networks”, *Clean. Logist. Supply Chain*, c. 6, sayı December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.clscn.2023.100095.
- [19] M. F. Ak ve M. Gul, “AHP-TOPSIS integration extended with Pythagorean fuzzy sets for information security risk analysis”, *Complex Intell. Syst.*, c. 5, sayı 2, ss. 113–126, 2019,

- doi: 10.1007/s40747-018-0087-7.
- [20] Salaj ve M. Kumari, “A multi-criteria approach to blockchain in supply chain management assessment: entropy-CRITIC weight method and MCDM for enhanced decision support”, *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, sayı 0123456789, 2025, doi: 10.1007/s13198-025-02764-x.
- [21] G. Watkins, R. Husgafvel, N. Pajunen, O. Dahl, ve K. Heiskanen, “Overcoming institutional barriers in the development of novel process industry residue based symbiosis products - Case study at the EU level”, *Miner. Eng.*, c. 41, ss. 31–40, 2013, doi: 10.1016/j.mineng.2012.10.003.
- [22] L. R. Bacudio vd., “Analyzing barriers to implementing industrial symbiosis networks using DEMATEL”, *Sustain. Prod. Consum.*, c. 7, sayı February, ss. 57–65, 2016, doi: 10.1016/j.spc.2016.03.001.