ÜRETİM YÖNETİMİNDE DİJİTALLEŞME

Editör

Doç. Dr. Yasemin TATLI

Vizetek
Yayıncılık

ÜRETİM YÖNETİMİNDE DİJİTALLEŞME

Editör

Doç. Dr. Yasemin TATLI

Yazarlar

Gökhan ÇAYBAŞI - Harun DUMLU - Murat RUHLUSARAÇ - Oğuz Emre BALKAR

E-ISBN: 978-625-382-552-2
DOI: 10.54637/vizetek.9786253825522

Copyright © Vizetek
Bu kitabın basım, yayım ve satış hakları Vizetek Yayıncılık Sanayi ve Ticaret Limited Şirketine aittir. Vizetek Yayıncılık'ın izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri, kapak tasarımı, elektronik, mekanik, fotokopi, manyetik, kayıt ya da başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz.
Bu kitap, elektronik (e-kitap) formatlarında yayımlanmaktadır.
Kitap içeriğinin tüm sorumluluğu yazar(lar)ına aittir.

Yayın Tasarımcısı / Koordinatörü: Ferit RESULOĞULLARI
Kapak Tasarımı ve Mizanpaj: Ahmet TUNÇDEMİR
Baskı: Ankara | Ekim, 2026

Materyal Türü: Elektronik Kitap (Çevrim içi / Web tabanlı)
Elektronik Yayın Formatı: PDF
Elektronik Yayın Tipi: Adobe Ebook Reader

Vizetek Yayıncılık

Seyranbağları Mah. İncesu Cad. 10/2 Çankaya/ANKARA
Tel.: (0312) 482 00 11
Web: www.vizetek.com.tr
E-mail: vizetekyayincilik@gmail.com
Yayıncı Sertifika No: 41575

ÖN SÖZ

Dijitalleşme, sadece üretimde kullanılan teknolojileri değil planlama, karar verme ve hizmet sunma biçimlerini de değiştirmektedir. Değişimin üretim yönetimine yansımalarını farklı konular üzerinden ele almak, mevcut uygulamaları ve yeni yaklaşımları değerlendirmek açısından önem taşımaktadır.

"Üretim Yönetiminde Dijitalleşme I" adlı bu kitapta, üretim süreçlerinde kullanılan bilgi teknolojileri, yapay zekâ tabanlı üretim çizelgeleme yaklaşımları, dijital ikiz projeleri ve metaverse tabanlı hizmet üretimi konularına yer verilmiştir. Dört bölümden oluşan kitap, dijitalleşmenin mal ve hizmet üretimindeki karşılıklarını bir araya getirmektedir.

Kitabın hazırlanmasına çalışmalarıyla katkı sunan bölüm yazarlarına, değerlendirme ve önerileriyle destek veren hakemlerimize ve yayımlanma sürecindeki emekleri için yayınevi çalışanlarına teşekkür ederim.Kitabın, üretim yönetiminde dijitalleşme konusuna ilgi duyan araştırmacılar, öğrenciler ve uygulayıcılar için yararlı bir kaynak olmasını ve yeni çalışmalara katkı sağlamasını dilerim.

Editör

Yasemin TATLI

İÇİNDEKİLER

1. BÖLÜM

Dijitalleşme Kapsamında Üretim Süreçlerinde
Kullanılan Başlıca Bilgi Teknolojileri..... 1

Harun DUMLU

2. BÖLÜM

Dijitalleşme Çağında Üretim Çizelgeleme:
Klasik Modellerden Yapay Zekâ Tabanlı Yaklaşımlara Geçiş 15

Murat RUHLUSARAÇ

3. BÖLÜM

Dijital İkiz Projelerinde Konsorsiyum Yapısı ve
İnovasyon Verimliliği Üzerine Ampirik Bir Değerlendirme..... 33

Oğuz Emre BALKAR

4. BÖLÜM

Dönüşüm Sürecinde Nakdî ve Aynî Sosyal Yardımların Yeniden Tasarımı:
Metaverse Tabanlı Hizmet Üretimi ve İnovasyon Yönetimi Perspektifi..... 62

Gökhan ÇAYBAŞI

1. BÖLÜM

DİJİTALLEŞME KAPSAMINDA ÜRETİM SÜREÇLERİNDE KULLANILAN BAŞLICA BİLGİ TEKNOLOJİLERİ

Harun DUMLU[1]

GİRİŞ

Son yıllarda hem insan hayatının birçok alanında hem de işletmelerin farklı departmanlarında olduğu gibi üretim süreçlerinde de dijitalleşmenin arttığı ve buna bağlı olarak dijitalleşmeyi sağlayan bilgi teknolojilerinin çok sık kullanıldığı görülmektedir. Öyle ki inovasyondan Ar-Ge çalışmalarına, fiziki üretimden lojistiğe ve depolamadan geri dönüşüme kadar üretim süreçlerinin neredeyse tamamında dijitalleşmenin etkileri görülmektedir.

Dijitalleşme, işletmelerin pazarda rakipleri ile daha rekabet edebilir bir konuma ulaşmalarına katkı sunmaktadır. Buna karşın dijitalleşmeye daha fazla kaynak ayırmak maliyetlerin artmasına da neden olabilmektedir. Bu nedenle doğru dijital teknolojilerin kullanılması, maliyetler çok fazla artmadan rekabet edebilmeyi sağlamaktadır. İşletmelerin ve yöneticilerin doğru teknolojiyi kullanabilmeleri amacıyla gerekli araştırmayı ve yeterli görülen yatırımı yapmaları önem arz etmektedir. Dijitalleşme ile işletmelerin birçok faaliyette farklı bilgi teknolojilerinden faydalanmaları gerekir. Örneğin; pazarlama faaliyetlerinde farklı bilgi teknolojileri kullanılırken, muhasebe faaliyetlerinde farklı bilgi teknolojilerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bunun yanı sıra çoğu işletme faaliyetinde ortak olarak kullanılabilen bilgi teknolojilerinin tercih edilmesi maliyetlerin düşürülmesine ve işletme birimleri arasında koordinasyonun sağlanmasına da katkı sumaktadır.

Dijitalleşmenin en çok etkilediği işletme faaliyetlerinden biri de üretim faaliyetidir. Üretimde bilgi teknolojilerinden faydalanmak hem maliyetlerin düşürülmesine hem de pazardaki rakip ürünler ile benzer kalitede veya daha yüksek kalitede ürün üretebilmeye katkı sağlamaktadır. Dijitalleşme ile üretim

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Giresun Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, ORCID: 0000-0002-0897-0154.

süreçlerinde hatalar ve fireler daha da aza indirgenebilmekte ve üretim faaliyetinin kesintisiz bir şekilde devam etmesi sağlanabilmektedir. Buradan hareketle bu bölümde dijitalleşme kapsamında üretim süreçlerinde kullanılan başlıca bilgi teknolojileri irdelenmektedir.

Üretim ve Dijitalleşme

Üretim kavramı, insanların ihtiyaç duyduğu gereksinimlerin, doğa tarafından tam olarak karşılanamaması sonucu ortaya çıkmış olan bir kavramdır. Üretimdeki temel amaç mal veya hizmet meydana getirmektir. Bunu gerçekleştirebilmek için temel üretim faktörleri olan emek, toprak ve sermayenin belirli yöntem ve tekniklerle bir araya getirilmesi gerekir (Kobu, 2014). Geleneksel anlamdaki üretim de emek yoğun faaliyetler gerçekleştirilirken, dijitalleşmenin artması ile emek yoğunluğunun azaldığı ve onun yerine bilgi teknolojilerinden faydalanıldığı görülmektedir. Üretim süreçlerinde bilgi teknolojileri; planlama, imalat, kalite kontrol, lojistik, servis-bakım ve iletişim amacıyla kullanılmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda üretim süreçlerinde bilgi teknolojilerinden şu şekilde faydalanıldığı söylenebilir;

- Planlamada hem üretilecek ürünün şekli ve özelliklerinin belirlenmesi amacıyla hem de üretimde kullanılacak makine, teçhizat, hammadde, yardımcı malzeme vb. girdilerin özelliklerinin belirlenmesi ve tedarik sürecinin yönetilmesi amacıyla bilgi teknolojilerinden faydalanılmaktadır.
- İmalatta ise planlaması yapılan ürünlerin planlandığı şekilde üretiminin gerçekleştirilmesinde bilgi teknolojileri kullanılmaktadır. Bilgi teknolojileri sayesinde imalat faaliyetleri daha güvenli, hızlı ve hatasız bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.
- Kalite kontrol sürecinde hem üretime girdi olarak katılacak hammadde ve yardımcı malzeme gibi parçaların hem de üretim süreci sonucunda elde edilen nihai ürünlerin istenilen kalite ve özellikte olup olmadığının belirlenmesinde bilgi teknolojileri kullanılmaktadır. Bunu yanı sıra üretim faaliyetini gerçekleştiren makine ve teçhizatların da kontrolünde bilgi teknolojilerinden faydalanılır.
- Lojistik süreçlerde bilgi teknolojileri hem girdi olarak kullanılacak malzemelerin takibinde hem de nihai ürünlerin istenilen zamanda istenilen yere ulaştırılmasında kullanılmaktadır. Ayrıca üretim

faaliyetleri sürecinde gerçekleştirilen fabrika içi lojistik faaliyetlerin koordinasyonunda da bilgi teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Bunun yanı sıra depolama süreçlerinde de bilgi teknolojileri kullanılarak, stok takibi, sipariş işleme, raflama, elleçleme, üretime sevk etme ve dağıtım faaliyetleri daha kolay, hızlı ve sistemli bir şekilde yürütülebilmektedir.

- Servis-bakımda ise üretim sürecinde kullanılan her türlü makine ve teçhizatın bakımlarının düzenli bir şekilde takip edilmesi, gerekli olduğunda tamiratının yapılması gibi faaliyetlerde bilgi teknolojileri sıkça kullanılmaktadır.
- Tüm işletme birimlerinde olduğu gibi üretim biriminde de iletişim süreçlerinde bilgi teknolojileri gerekli bilgilerin toplanması, saklanması ve ihtiyaç duyulduğunda gerekli yerlere iletilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra üretim biriminin diğer birimler ile olan koordinasyonunun artırılmasına da katkı sunmaktadır.

Bir ürünün tasarımından, üretimine hatta müşteriye ulaştırılmasına kadar bilgi teknolojilerinin kullanıldığı ve bilgi teknolojileri sayesinde üretim sürecinin daha etkin bir şekilde yönetilebildiği görülmektedir. İlgili işletmede veya ilgili işletme biriminde kullanılacak bilgi teknolojilerinin belirlenmesi, önemli bir karar problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu karar problemi içerisinde çok sayıda kriteri ve farklı alternatifleri içerebilmektedir. Dolayısıyla işletme veya birim yöneticileri tarafından etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilecek doğru bilgi teknolojilerinin belirlenmesi gerekir. Bunun için çok kriterli karar verme yöntemleri, Delphi yöntemi, fayda-maliyet analizi, balık kılçığı analizi, karar ağacı analizi ve SWOT analizi (GZFT analizi) gibi bilimsel karar verme tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Üretim Süreçlerinde Kullanılan Başlıca Bilgi Teknolojileri

Dijitalleşme kapsamında üretim süreçlerinde kullanılan başlıca bilgi teknolojileri; bulut bilişim, nesnelerin interneti, yapay zekâ, otomasyon sistemleri, otonom robotlar ve sensörler olarak belirtilebilir.

Bulut Bilişim

Bulut bilişim, kapasitesi artan verilerin depolanması, yedeklenmesi ve ihtiyaç olduğunda paylaşılmasını sağlayan internet temelli bir teknolojidir (Çelik, 2021). Herhangi bir zaman ve mekân kısıtlaması olmadan

kullanılabilir olması, bulut bilişimin en güçlü yanıdır (Meghana, vd., 2018). Kullanım amacına göre dört farklı bulut bilişim sınıfından bahsedilebilir. Bunlar (Yıldız, 2009; Henkoğlu ve Külcü, 2013);

- *Genel Bulut:* İnternet üzerinden web tabanlı olarak herkesin kullanımına açık olan bulut hizmetleridir. Örneğin; Google, Yandex, Amazon vb.
- *Özel Bulut:* Sadece belirli bir kurum veya kuruluş tarafından kullanılabilen ve ilgili kuruma özel olarak oluşturulmuş bulut hizmetidir. Özel bulutlarda hizmet sağlayıcı, ilgili kurum veya kuruluşun kendisi olabileceği gibi üçüncü parti bulut hizmet sağlayıcısı da olabilmektedir.
- *Melez Bulut:* Genel ve özel bulut hizmetlerinin bir arada kullanıldığı bulut hizmetidir. Bazı hizmetler herkesin ulaşabileceği şekilde tasarlanmışken, ilgili kişi, kurum veya kuruluşa özel olarak kullanılabilecek hizmetler veya saklanacak veriler de bulunmaktadır. Özel olarak sunulan hizmetlere ve saklanan verilere sadece ilgili kişi, kurum veya kuruluşlar ulaşabilmektedir.
- *Topluluk Bulutu:* Belirli bir topluluğun ulaşmasına izin verilen bulut hizmetleridir. Bulut sistemi içerisinde yer alan uygulama ve verilere sadece izin verilen topluluklar ve topluluk üyeleri erişim sağlayabilmektedir.



Şekil 1. Bulut Bilişim

Kaynak: www.bizbulut.com

Bulut bilişim işletmelere, maliyetlerin düşürülmesi, hizmet kalitesinin artırılması ve esneklik gibi faydalar sunmaktadır (Seyrek, 2011). Üretim sürecinde kurum içi iletişim, kurum dışı iletişim, kurumsal kaynak planlama, veri depolama ve süreç takibi gibi konularda bulut bilişim hizmetlerinden faydalanılmaktadır. Kurum içerisinde hem üretim biriminin birim içi iletişiminde hem de diğer işletme birimleri ile olan iletişim faaliyetlerinde özel bulut hizmetleri kullanılmaktadır.

Kurum dışı iletişim faaliyetlerinde, özellikle tedarik zinciri üyeleri arasındaki bilgi akışının sağlanmasında hem özel hem de genel bulut hizmetlerinin ya da melez bulut hizmetlerinin kullanıldığı söylenebilir. Kurumsal kaynak planlama ve veri depolama amacıyla diğer işletme birimlerinde olduğu gibi üretim biriminde de bulut hizmetlerden yararlanıldığı ve üretim sürecinde karşılaşılan ve karşılaşılabilecek sorunların takibinin bulut hizmetler ile tam zamanında ve sorunsuz bir şekilde yürütüldüğü görülmektedir.

Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin interneti, nesnelerin kendi aralarında iletişim kurduğu, veri transferi yaptığı, bilgi toplayıp bu bilgileri kullanarak karar verdiği bir ağ yapısıdır (Aktaş vd., 2014). Bu ağ yapısı küçük bir alanda oluşturulabileceği gibi daha geniş bir alanda hatta dünya çapında bir alana sahip olabilmektedir. Günlük yaşamda insan hayatını kolaylaştıran akıllı ev uygulamaları, araç takip sistemleri ve güvenlik uygulamaları gibi birçok nesnelerin interneti uygulaması mevcuttur.

Nesnelerin internetinin kişisel kullanımdan güvenliğe, enerjiden sağlığa, tarımdan ulaşıma, üretimden ticarete birçok farklı alanda kullanıma sahip olduğu görülmektedir. Üretimde nesnelerin interneti ilk olarak RFID (Radio Frequency Identification) uygulamaları ile başlamıştır. RFID, temel olarak sabit bir konum ile hareketli nesneler arasında çeşitli radyo frekansları ve teknikleri aracılığıyla dijital bilgi iletimi sağlamak amacıyla kullanılan bir sistemdir (Landt, 2005). Üretim alanında RFID etiketi bulunan ekipman ve malzemelerden alınan bilgiler kullanılarak üretimde süreç yönetimi gerçekleştirilir.

Üretimde nesnelerin interneti kullanımının sağladığı başlıca faydalar şöyle sıralanabilir:

- Üretim sürecinde kullanılan ekipman, teçhizat ve makinelerin takibi kolaylaşır.
- Makineler arası bilgi akışını otomatik bir şekilde sağlayarak, üretimde aksamaların önüne geçilebilir.
- Makinelerden gelen bilgiler incelenerek operatörlerin doğru ve eksiksiz faaliyet yürütmelerine katkı sağlar.
- İhtiyaç duyulan hammadde, yardımcı malzeme ve yarı mamul bilgilerine tam zamanında ulaşılabilir.
- Makine arızalarına hızlı müdahale edilebilir.
- Makinelerin bakım-onarım süreçleri ve faaliyetleri hatasız bir şekilde takip edilebilir.
- Yöneticilerin üretim süreçleri ile ilgili bilgilere her yerden ulaşabilmesine imkân tanır.
- Tedarik zinciri içerisinde ihtiyaç duyulan gerekli bilgiler, tedarik zinciri üyeleri ile daha hızlı ve kolay bir şekilde paylaşılabilir.
- Depolama faaliyetleri tam zamanında ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir.
- Stok kontrolü daha kolay gerçekleştirilebilir.
- Lojistik süreçlerde araç takibi ve elleçleme faaliyetlerinin daha kolay ve güvenli bir şekilde yapılmasına katkı sağlar.

Nesnelerin internetinin sağladığı bu faydalara karşın artan enerji tüketimi, siber güvenlik riski, yazılımlar arası uyuşmazlıklar ve makineler arası uyum sorunu gibi istenmeyen durumlarla da karşılaşılabilmektedir. Bu nedenle üretim sürecinde tercih edilecek nesnelerin interneti uygulamalarının, karşılaşabilecek sorunlar göz önünde bulunarak edinilmesi önem arz etmektedir.

Yapay Zekâ

Literatürde yapay zekâ için farklı tanımamaların yapıldığı görülmektedir. Bu tanımlamalar içerisinde en çok kabul gören tanımlamayı yapan Avrupa Konseyi'nin tanımına göre yapay zekâ, belirli hedeflere ulaşabilmek için içinde oldukları ortamı analiz edip bir dereceye kadar özerk bir şekilde hareket edebilen ve akıllı davranışlar sergileyen sistemlerdir (Boucher, 2020). Yapay zekâ insan beynini taklit ederek, karar problemlerini çok kısa sürede çözer ve zaman faydası sağlar. Bunun yanı sıra yapay zekâ, verileri hızlı bir şekilde analiz ederek, tahminde bulunabilir, farklı senaryolar oluşturabilir, yeni

bilgiler öğrenebilir ve farklı materyallerden (yazılar, görsel veya işitsel materyaller) anlam çıkarabilir.

Yapay zekâ üretim sürecinde karşılaşılabilecek hataların erken belirlenmesi, darboğazların öngörülmesi, enerji tüketiminin izlenmesi, çizelgelemenin dinamik bir şekilde güncellenmesi ve kaynak kullanımının optimize edilmesi gibi işlevleri yerine getirmektedir (Meral, 2026). Bunun yanı sıra üretimde yapay zekâ kullanımı yöneticilerin karar verme süreçlerine destek sağlamaktadır. Yöneticilerin kalite kontrol, bakım-onarım, planlama, tasarım ve süreç yönetimi faaliyetlerinde daha hızlı ve güvenilir kararlar alabilmelerine katkı sağlar. Bu sayede üretim sürecinin daha esnek ve öngörülebilir olması sağlanmış olur. Aynı şekilde yapay zekâ destekli sistemlerin ve uygulamaların kullanılması, çalışanlardan kaynaklı olarak doğabilecek hataların azaltılmasına ve üretim sürecinin etkin bir şekilde yürütülmesine de katkı sağlamaktadır.

Yapay zekâ üretimde daha çok diğer bilgi teknolojileri ile birlikte kullanılmaktadır. Nesnelerin interneti uygulamasına sahip bir makineye yapay zekâ desteği eklenerek, karşılaşılan problemlerin çözümü ile ilgili veriler de sunmaktadır. Ayrıca makine faaliyetlerinin nasıl iyileştirilebileceğine dair bilgiler de sağlar. Benzer bir şekilde üretimde kullanılan otonom robotların da yapay zekâ ile desteklenmesi durumunda bu otonom robotların karşılaştığı problemlere göre çözüm üretebilme yeteneğine yani karar verme becerisine sahip olması sağlanır. Buradan da anlaşılabileceği gibi üretimde yapay zekâ daha çok karar verme süreçlerinin hızlandırılması ve kolaylaştırılması amacıyla kullanılmaktadır.

Otomasyon Sistemleri

Otomasyon, üretim sistemlerinin istenilen şekilde çalışmasını, gözlenmesini ve denetlenmesini sağlayan bilgi teknolojilerinin bir arada kullanılmasından oluşur. Makineleşme ile otomasyon sistemleri kavramı sıkça karıştırılmaktadır. Ancak bu kavramlar birbirinden farklıdır. Makineleşme, insan gücünün yerini makinelerin almasıyken, otomasyon sistemleri ise makinelerin öz denetimli bir şekilde bütünleştirilmesidir. Otomasyon sistemlerinin temeli kumanda ve kontrol kavramlarına dayanmaktadır (Özturan ve Tanrıtanır, 2004). Çalışanlar üretim yapmak yerine, otomasyon sistemleri sayesinde üretim faaliyetlerini kumanda eder, denetler ve düzenler.

Otomasyon sistemlerine yapay zekâ desteğinin eklenmesi ile insan değerlendirmesinin gerekli olduğu durumlar otomatik bir şekilde hızlıca gerçekleştirilebilmektedir. Böylece iş süreçlerini daha da hızlandırmak ve tamamen otomatikleştirmek neredeyse mümkün hale gelmektedir (Karacaer, 2023). Aynı zamanda yapay zekâ desteği ile otomasyon sistemlerinin karar vermesi ve tekrarlayan hataların çözümlerini öğrenerek hataların tekrar etmemesini sağlaması veya tekrar eden hataları düzeltmesi de mümkündür. Böylece insan gücü ile uzun süreler içerisinde çözümlenmeye çalışılacak problemler daha hızlı, güvenli ve sistematik bir şekilde ortadan kaldırılabilmektedir.

Otomasyon sistemleri ardışık olarak bir mantıksal çerçeve içerisinde doğru ve anlamlı işlemler gerçekleştirir. Monoton bir şekilde devam eden işlemlerde insan hatası nedeniyle doğabilecek problemler sıfırlanmış olur. Otomasyon sistemleri verimliliğin artması, üretime değer katmayan faaliyetlerin azalması, iş gücü maliyetlerinin azalması, ürün üretim süresinin azalması, fire ve hataların azalması ve gereksiz beklemelerin önüne geçilmesine katkı sağlar. Bu sayede dolaylı da olsa işletme karlılığına olumlu bir etkisi olduğu söylenebilir.

Otomasyon sistemleri, üretim süreçlerinin organize edilmesinde de önemli bir role sahiptir. Yapılacak işlerin sıralamasının ve çizelgelemesinin yapılması ve üretim faaliyetlerinin bu çizelgeye uygun olarak gerçekleştirilmesi otomasyon sistemleri sayesinde daha hızlı ve sistematik bir şekilde yapılabilmektedir. Hatta yapılan bu sıralama içerisindeki hammadde, yarı mamul ve mamul hareketliliği de otomasyon sistemleri aracılığıyla koordine edilebilmektedir.

Otonom Robotlar

Otonom robotlar, üretim sürecinde kullanılan diğer bilgi teknolojileri ile doğrudan ilişki içerisindedir. Bulut bilişim aracılığıyla ilgili ağdan aldığı verileri, yapay zekâ desteğine sahip bir yazılım ile işleyerek karar verir. Bunun yanı sıra üzerinde bulunan sensörler ve nesnelerin interneti uygulamaları sayesinde çevresinde bulunan operatörler, makineler ve diğer robotlarla iletişim kurabilmektedir. Otonom robotların %70'inin otomotiv, elektrik-elektronik, metal ve makine sanayilerinde kullanıldığı görülmektedir (Özmen vd., 2024).



Şekil 2. Otonom Robotlar

Kaynak: www.fortuneturkey.com

Üretim sürecinde otonom robotlar hem doğrudan üretim faaliyetinin gerçekleştirilmesinde hem de üretime yardımcı diğer faaliyetlerde kullanılabilmektedir. Üretim sürecinde otonom robotlar genellikle şu amaçlar için kullanılır;

- Üretim bandında imalat işlemlerinin yapılması
- Üretim bandında montaj işlemlerinin yapılması
- Üretim sahasında gerçekleştirilen raftan indirme, üretim bandına yerleştirme, üretim bandından indirme, üretim bandına yükleme ve depoya taşıma gibi elleçleme faaliyetlerinin yürütülmesi
- Üretimde kullanılan makinelerin bakım-onarım ve temizliğinin yapılması
- Üretimde kalite kontrolün yapılması
- Stok kontrolünün yapılması
- Üretim sahasının temizlenmesi
- Üretim sahasının ısı ve ışık ihtiyacının karşılanması



Şekil 3. Otonom Elleçleme Robotları

Kaynak: www.oskon.com.tr

Otonom robotlar, üretimde esnekliğin, kalitenin ve verimliliğin artmasına katkı sağlar. Ayrıca çalışanların sağlığını tehlikeye sokabilecek riskli işlerin otonom robotlar tarafından yapılması üretim sürecinde çalışan güvenliğinin artmasına katkı sunar. İnsanlara göre karanlıkta üretim faaliyetlerine devam edebiliyor olması, tekrarlayan ve sıkıcı işlerin yapılmasında hiç duraksamadan devam edebilmesi ve hassas işlerde hata oranının sıfıra yakın olması otonom robotların güçlü yanlarını göstermektedir.

Tüm bunlara ek olarak otonom robotlar, yapay zekâ desteği ile kabiliyetleri ölçeğinde yapabilecekleri yeni işleri öğrenerek becerilerini artırabilmektedir. Bu sayede üretim bandında gerçekleştirilen değişikliklere otonom robotların kolay bir şekilde uyum sağlayabileceği ve üretim faaliyetlerinin yeni teknolojiler edinmeye gerek kalmadan devam edebileceği söylenebilir. Bu da sahip olunan teknolojinin birden fazla üretim modelinde kullanılabilirliğini ve yeni teknoloji edinme maliyetlerine katlanmadan, yeni üretim faaliyetlerine geçilebileceğini göstermektedir.

Sensörler

Sensörler; sıcaklık, ışık, nem, ses, basınç gibi belirtileri ve bu belirtilerdeki değişimleri sinyallere dönüştürerek mekanik aletlere iletmektedir (Kanat, 2015). Bu sensörler genelde tek başına kullanılmamaktadır. Bir makine veya cihaza monte edilerek kullanılır. Dolayısıyla sensörlerin tamamlayıcı bilgi teknolojileri arasında yer aldığı söylenebilir.

Üretim sürecinde de operatörlerin, otonom robotların, makinelerin, nesnelerin, otomasyon ve yapay zekâ sistemlerinin ihtiyaç duyduğu bilgilerin algılanmasında ve ilgili yerlere ulaştırılmasında sensörler kullanılır. Sensörlerin üretim sürecinde çok farklı amaçlar için kullanıldığı görülmektedir. Sensörlerin üretim sürecinde başlıca kullanım alanları şöyle sıralanabilir:

- Stok takibinde
- Sipariş takibinde
- Malzeme miktarının, ağırlığının ve büyüklük ölçülerinin belirlenmesinde
- Makine sıcaklığının belirlenmesinde
- Makinelerde kullanılan malzemelerin seviyelerinin ve ölçülerinin belirlenmesinde
- Araç takibinde
- Güvenlik cihazlarında
- Görüntü algılayarak gerekli birimlere bilgi iletilmesinde
- Üretim alanındaki hareketlerin takibinde
- Ortam sıcaklığının belirlenmesinde
- Ortamın nem oranının belirlenmesinde
- Ortamın otomatik aydınlatılmasında
- Likit malzemelerin seviyelerinin ölçülmesinde
- Basınçla çalışan sistemlerin basınç seviyelerinin belirlenmesinde
- Ebatlama çalışmalarında
- Enerji akım seviyesinin belirlenmesinde
- Makine ve otonom robotların hareket alanlarının belirlenmesinde
- Acil durumların belirlenerek faaliyetin durdurulmasında
- Kimyasal ürünlerin yoğunluğunun, reaksiyon hızının ve içeriğinin belirlenmesinde

Yukarıda açıklanan bilgi teknolojilerinin tam kapasite ile çalışabilmeleri için birçok farklı veriye ihtiyaç duyulur. Bu verilerin bir kısmı sensörler sayesinde elde edilir. Dolayısıyla sensörlerin üretim sürecinde dijitalleşmeyi sağlayan bulut bilişim, nesnelerin interneti uygulamaları, yapay zekâ, otomasyon sistemleri ve otonom robotlar gibi bilgi teknolojilerinin verimli ve doğru çalışabilmeleri için kritik öneme sahip olduğu söylenebilir. Sensörlerin arızalanması gibi durumlarda bilgi teknolojilerinin yanlış bilgi alması ve yanlış faaliyetler yürütmesi söz konusu olabilir. Bu nedenle sensörlerin düzenli bakımlarının yapılması ve kontrollerinin sağlanması önem arz etmektedir.

SONUÇ

Emek yoğun faaliyetlerin gerçekleştirildiği geleneksel üretimden, emek yoğunluğunun azaldığı ve dijitalleşmenin arttığı yeni üretim modellerine geçildiği ve emek yoğunluğu yerine bilgi teknolojilerinden faydalanıldığı görülmektedir. Faydalanılan bu bilgi teknolojileri üretim süreçlerinde planlama, imalat, kalite kontrol, lojistik, servis-bakım ve iletişim gibi faaliyetlerin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. Dijitalleşme kapsamında üretim süreçlerinde kullanılan başlıca bilgi teknolojilerin bulut bilişim, nesnelerin interneti, yapay zekâ, otomasyon sistemleri, otonom robotlar ve sensörler olduğu söylenebilir.

Kapasitesi artan verilerin depolanması, yedeklenmesi ve ihtiyaç olduğunda paylaşılmasını sağlayan internet temelli bir teknoloji olan bulut bilişim işletmelere, maliyetlerin düşürülmesi, hizmet kalitesinin artırılması ve esneklik gibi faydalar sunmaktadır (Çelik, 2021; Seyrek, 2011). Üretim sürecinde kurum içi iletişim, kurum dışı iletişim, kurumsal kaynak planlama, veri depolama ve süreç takibi gibi konularda bulut bilişim hizmetlerinden faydalanılmaktadır.

Nesnelerin kendi aralarında iletişim kurduğu, veri transferi yaptığı ve bilgi toplayıp bu bilgileri kullanarak karar verdiği bir ağ yapısı olan nesnelerin interneti; imalat ve makine takibi, bilgi akışı, tedarik zinciri koordinasyonu, stok kontrolü, lojistik süreçlerin yönetilmesi gibi birçok fayda sağlamaktadır. Buna karşın artan enerji tüketimi, siber güvenlik riski, yazılımlar arası uyuşmazlıklar ve makineler arası uyum sorunu gibi istenmeyen durumlarla karşılaşmamak adına, bu tür sorunlar göz önünde bulundurularak edinilmesi önem arz etmektedir.

İnsan beynini taklit ederek, karar problemlerini çok kısa sürede çözen yapay zekâ, üretimde daha çok diğer bilgi teknolojileri ile birlikte kullanılmaktadır. Bu sayede üretimde karar verme süreçlerinin hızlandırılması ve kolaylaştırılması sağlanmış olur. Yöneticilerin kalite kontrol, bakım-onarım, planlama, tasarım ve süreç yönetimi faaliyetlerinde daha hızlı ve güvenilir kararlar alabilmelerine katkı sağlar. Böylece üretim sürecinin daha esnek ve öngörülebilir olması sağlanmış olur.

Makinelerin öz denetimli bir şekilde bütünleştirilmesi olarak tanımlanan otomasyon sistemleri sayesinde üretim faaliyetleri çalışanlar tarafından kolay ve güvenli bir şekilde kumanda edilir, denetlenir ve düzenlenir. Üretim süreçlerinin organize edilmesinde de önemli bir role sahip olan otomasyon sistemleri, yapılacak işlerin sıralamasının ve çizelgelemesinin yapılması ve üretim faaliyetlerinin bu çizelgeye uygun olarak gerçekleştirilmesini daha da kolaylaştırmaktadır.

Hem doğrudan üretim faaliyetinin gerçekleştirilmesinde hem de üretime yardımcı diğer faaliyetlerde kullanılabilen otonom robotlar; imalat, montaj, elleçleme, taşıma, bakım-onarım, temizlik, kalite kontrol, stok kontrolü vb. işlemlerin yürütülmesinde kullanılmaktadır. Otonom robotlar sayesinde çalışanların güvenliğinin arttırılması ve çalışan hatalarından doğabilecek hataların en aza indirgenmesi sağlanabilmektedir.

Fiziksel veya kimyasal belirtileri sinyallere çeviren sensörler, dijitalleşme kapsamında kullanılan diğer bilgi teknolojilerinin tamamlayıcısı konumundadır. Diğer bilgi teknolojilerinin ihtiyaç duyduğu çoğu bilgi, sensörler aracılığıyla toplanarak ilgili bilgi teknolojisine iletilmektedir. Üretim sürecinde stok takibi, sipariş izleme, makine takibi, araç izleme, güvenlik, sıcaklık, nem, büyüklük ölçümü, hareket algılama vb. birçok faaliyette sensörlerden faydalanılmaktadır.

Görüldüğü gibi dijitalleşme ile üretim süreçlerinde hatalar ve fireler daha da aza indirgenebilmekte ve üretim faaliyetinin kesintisiz bir şekilde devam etmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca üretim sürecinde gerçekleştirilen çoğu faaliyetin dijitalleşme kapsamında kullanılan bilgi teknolojileri sayesinde daha etkin, verimli, kolay ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilebildiği söylenebilir.

Kaynaklar

Aktaş, F., Çeken, C., & Erdemli, Y. E. (2014). Biyomedikal uygulamaları için nesnelerin interneti tabanlı veri toplama ve analiz sistemi. *Tıp teknolojileri ulusal kongresi*, 25-27.

Boucher, P. (2020). *Artificial intelligence: How does it work, why does it matter, and what can we do about it?*. Brüksel: European Parliamentary Research Service.

Çelik, K. (2021). Bulut bilişim teknolojileri. *Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *12*(24), 436-450. https://doi.org/10.47129/bartiniibf.1019898

Henkoğlu, T., & Külcü, Ö. (2013). Bilgi erişim platformu olarak bulut bilişim: Riskler ve hukuksal koşullar üzerine bir inceleme. *Bilgi Dünyası*, *14*(1), 62-86. https://doi.org/10.15612/BD.2013.135

https://bizbulut.com/blog/bulut-bilisim-nedir-ne-ise-yarar, Erişim Tarihi: 25 Eylül 2026.

https://www.fortuneturkey.com/akilli-uretim-cagi-endustri-40-42841, Erişim Tarihi: 25 Eylül 2026.

https://www.oskon.com.tr/blog/otonom-mobil-robotlar-amr-ve-agv-ler-farklar-ve-kullanim-alanlari, Erişim Tarihi: 25 Eylül 2026.

Kanat, V. (2015). *Sensörler ve Arduino*. İstanbul: Dikeyeksen Yayın Dağıtım.

Karacaer, B. (2023). Akıllı otomasyon sistemlerinin getirdiği riskler ve iç denetime etkileri. *İşletme Akademisi Dergisi*, *4*(2), 155-173. https://doi.org/10.26677/TR1010.2023.1248

Kobu, B. (2014). *Üretim Yönetimi*. İstanbul: Beta Basım Yayım Dağıtım.

Landt, J. (2005). The history of RFID. *IEEE potentials*, *24*(4), 8-11. https://doi.org/10.1109/MP.2005.1549751

Meghana, H. L., Mathew, A. O. & Rodrigues, L. L. R. (2018). Prioritizing the Factors Affecting Cloud ERP Adoption – An Analytic Hierarchy Process Approach. *International Journal of Emerging Markets*, *13*(6), 1559-1577. https://doi.org/10.1108/IJoEM-10-2017-0404

Meral, G. (2026). Tasarım ve üretimde hibritleşme: Yapay zekâ destekli tasarım ve üretim süreçleri. İçinde T. Aşçı ve F. Yılmaz (Ed.), *Yapay Zekâ Çağında Mimarlık ve Tasarıma Akademik Bakış* (s.77-90). Ankara: Serüven Yayınevi.

Özmen, F., Takva, Ç., Aslan, S., & İlerisoy, Z. Y. (2024). Endüstri 4.0 ve Bina Üretim Sektöründe Yeni Aktör: Robotik Sistemler ve Otonom Robotlar. *Modular Journal*, *7*(1-2), 160-181. https://doi.org/10.59389/modular.1585623

Özturan, S., & Tanrıtanır, E. (2004). Otomasyon ve otomasyon sistemleri. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, *54*(2), 29-42.

Seyrek, İ. H. (2011). Bulut Bilişim: İşletmeler için fırsatlar ve zorluklar. *Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, *10*(2), 701-713. https://izlik.org/JA37MY95CR

Yıldız, Ö. R. (2009). Bilişim dünyasının yeni modeli: Bulut Bilişim (Cloud Computing) ve denetim. *Sayıştay Dergisi*, (74), 5-23. https://izlik.org/JA55YP76WX

2. BÖLÜM

DİJİTALLEŞME ÇAĞINDA ÜRETİM ÇİZELGELEME: KLASİK MODELLERDEN YAPAY ZEKÂ TABANLI YAKLAŞIMLARA GEÇİŞ

Murat RUHLUSARAÇ[1]

Giriş

Üretim sistemleri, özellikle sanayileşme ile birlikte buhar gücünün kitle üretimine entegrasyonuyla hız kazanmış, bilişim teknolojilerinin gelişimiyle de yeni bir ivme kazanmıştır. Emek yoğun üretim süreçleri, yerini otomatik üretim sistemlerine bırakmaya başlayınca, dijitalleşme ve endüstriyel dönüşümün temelleri de atılmıştır. Bu dönüşüm, siber-fiziksel sistemlerin getirdiği gerçek zamanlı veri akışı ve merkeziyetsiz karar alma yetenekleri sayesinde, üretim süreçlerinin dinamik yapısına uyum sağlamayı kolaylaştırmaktadır (Rossit vd., 2019). Dijital dönüşüm, üretim sistemlerini statik planlama yaklaşımlarından kurtararak veri odaklı ve esnek süreçlere geçişi zorunlu kılmaktadır (Ivanov vd., 2021). Bu doğrultuda, Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri olan dijital ikizler ve gerçek zamanlı üretim analitiği, sahadaki anlık değişimleri dinamik olarak sisteme yansıtarak süreçlerin otonom bir şekilde revize edilmesine olanak tanır (Zanchettin, 2022).

Ancak bu teknolojilerin operasyonel düzeye indirgenmesi; Nesnelerin İnterneti (IoT), bulut tabanlı üretim ve büyük veri analitiği gibi katmanların entegrasyonundan kaynaklanan ciddi teknik sınırları da beraberinde getirir (Luo vd., 2023; Parente vd., 2020). Sürece merkeziyetsiz karar mekanizmalarının ve otonom ajanların dahil edilmesi, özellikle süreç tasarımı ile enerji/güç yönetimi gibi hibrit kısıtların eş zamanlı optimize edilmesini zorlaştırmaktadır (Destouet vd., 2023; Mourtzis, 2022). Diğer taraftan, sistemlerin ölçeklenebilirliği ve yüksek boyutlu veriler altındaki hesaplama yükü, belirsizlik anlarında dirençli (resilient) bir çizelgeleme yapısı kurulmasının önündeki en büyük engellerden biridir. Tam da bu tıkanma noktalarında devreye giren derin öğrenme temelli yaklaşımlar ve pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning) algoritmaları, otonom politika öğrenme

[1] Arş. Gör. Dr., Erciyes Üniversitesi İİBF İşletme, Üretim Yönetimi,
ORCID: 0000-0003-1092-8331.

yetenekleri sayesinde dinamik çizelge güncellemelerindeki hesaplama darboğazlarını aşmayı kolaylaştırır (Itu, 2025).

Yine de tam kapasiteli bir dönüşüm için sistemlerin birlikte çalışabilirliği, veri işleme hızları ve yapay zekâ çıktılarının açıklanabilirliği (explainability) gibi teknik pürüzlerin giderilmesi şarttır (Ngwu vd., 2026; Singh vd., 2026). Bu pürüzler aşıldığında, fiziksel hatlar ile dijital ikizler arasında kurulacak sürekli geri besleme döngüsü, operasyonel kararların doğruluğunu artırarak tesise yüksek esneklik ve ekonomik verimlilik kazandırır (Rossit vd., 2019). Sonuç olarak, bu yeni nesil dijital yaklaşımlar, toplam tamamlanma süresi (makespan) ve gecikme oranlarının azaltılmasında geleneksel yöntemlere kıyasla daha dirençli ve sürdürülebilir bir performans sergilemektedir (Itu, 2025). Ancak tüm bu otomasyon odaklı süreçlerde, insanın sahip olduğu karar verme esnekliğinin ve örtük bilginin (tacit knowledge) göz ardı edilmemesi, sistem verimliliği ile insan faktörü arasında hassas bir dengenin kurulması, operasyonel mükemmellik için kritik bir gerekliliktir (De Felice vd., 2025).

Klasik Üretim Çizelgeleme Yaklaşımları

Üretim çizelgeleme, en genel tanımıyla, kısıtlı kaynakların belirli zaman dilimlerinde görevlere tahsis edilerek operasyonel verimliliğin en üst düzeye çıkarılması sürecidir (Graves, 1981). Sürecin temel amacı, işlerin belirli sıralama kuralları doğrultusunda makinelere atanması, böylece kaynak kullanımının optimize edilerek belirlenen üretim hedeflerine ulaşılmasıdır (Saraç ve Tutumlu, 2021). Çizelgelemenin özünü oluşturan faaliyet, kaynak ve zaman üçlüsü, işletmelerin mevcut kapasitelerini etkili bir şekilde kullanarak müşteri taleplerini teslim tarihlerini aksatmadan karşılamasına olanak tanır (Takan ve Saraç, 2022). Dolayısıyla başarılı bir çizelgeleme mekanizması, makinelerin kesintisiz çalışacağı gibi idealize varsayımlar yerine, sahadaki kısıtlı kaynakları gerçekçi kısıtlarla modelleyerek operasyonel kârlılığa doğrudan katkı sağlar (Altunay ve Eren, 2017; Furugi, 2021; Küpeli vd., 2020).

Literatürde çizelgeleme problemleri genellikle makine ortamı, işlem karakteristikleri ve optimize edilmek istenen amaç fonksiyonlarını içeren üçlü bir yapı ile karakterize edilir (Nguyen vd., 2017). Bu problemler makine yerleşimlerine göre tek makine, paralel makine, akış tipi ve atölye tipi olmak üzere dört ana kategoride sınıflandırılır (Saraç ve Özçelik, 2023). Özellikle esnekliğin yüksek olduğu atölye tipi üretim sistemlerinde temel performans

kriterleri: makinelerin toplam boşta kalma sürelerini en aza indirme, toplam iş tamamlama süresini (makespan) minimize etme ve işlerin teslim tarihlerine uyumunu artırma hedefleri üzerinde yoğunlaşır (Altunay ve Eren, 2016; Dikmen vd., 2023). Öte yandan, birden fazla ürünün ve birbirinden farklı üretim rotalarının bulunduğu karmaşık endüstriyel sistemlerde alternatif senaryoları manuel yöntemlerle değerlendirmek son derece zordur. Bu durum, optimum ya da optimuma yakın çözümlere ulaşmak için analitik yaklaşım ve matematiksel programlama tekniklerinin kullanımını ön plana çıkarmaktadır (Günday ve Fığlalı, 2024).

Problem Yapıları

Çizelgeleme problemleri, iş merkezlerinin kapasite kısıtları, operasyonel öncelik ilişkileri ve işlerin hazır olma zamanları (release dates) gibi temel parametreler etrafında şekillenir (Bakır vd., 2023; Şaştım ve Hasgül, 2023). Performans kriterleri açısından, özellikle toplam tamamlanma süresinin (makespan) ve gecikme cezalarının en aza indirilmesi, sistem verimliliğini belirleyen başlıca hedefler olarak kabul edilir (Guzmán vd., 2022). Öte yandan, işlerin atanacağı makine ve kalıp kombinasyonlarına esneklik kazandırılması çözüm uzayını genişleterek problemin hesaplama karmaşıklığını ciddi ölçüde artırır. Operasyonların alternatif makinelerde de yürütülebildiği bu esnek atölye tipi yapılar, kaynakların etkin kullanımı ve dengeli iş yükü dağıtımı için meta-sezgisel (meta-heuristic) yöntemlerin kullanımını adeta zorunlu kılmaktadır (Saraç ve Tutumlu, 2022).

Günümüz üretim ekosisteminde enerji tasarrufu gibi sürdürülebilirlik odaklı stratejilerin sürece dâhil edilmesi, makine hızlarını ayarlama gibi yeni karar değişkenlerini denkleme katmaktadır. Bu durum, geleneksel çizelgeleme modellerini çok amaçlı bir optimizasyon çerçevesine taşır (Bektur, 2020). Dolayısıyla, önceliklerin dinamik olarak değişebildiği bu üretim ortamlarında, tek bir optimum çözüm kümesi yerine karar vericilere farklı ödünleşmeleri (trade-off) ve alternatif senaryoları sunabilen esnek karar destek sistemlerine duyulan ihtiyaç kritik bir boyut kazanmaktadır (Sarıçiçek, 2018).

Klasik çizelgeleme problemlerini dört ana grupta toplayabiliriz:

- Tek makine problemleri
- Paralel makine problemleri

- Akış tipi problemler
- Atölye tipi problemler

Tek makine ortamındaki sıra belirleme algoritmaları, işlerin tek bir kaynak üzerindeki işlem sırasını optimize ederek operasyonel verimliliği en üst düzeye çıkarmayı amaçlar. Bu doğrultuda literatürde sıkça başvurulan sezgisel yaklaşımlardan biri olan En Kısa İşlem Süresi (SPT) kuralı, kısa süren işlere öncelik vererek toplam akış süresini ve dolayısıyla işin tamamlanma zamanını etkili bir şekilde minimize eder. Zamanında teslimat performansını artırmayı amaçlayan En Erken Teslim Tarihi (EDD) kuralı doğrudan işlerin termin sürelerine odaklanırken, işlerin önem derecelerini de sürece dahil eden Ağırlıklı En Kısa İşlem Süresi (WSPT) gibi öncelik tabanlı yaklaşımlar, ağırlıklı toplam tamamlama süresinin optimizasyonunda tercih edilir. Öte yandan, tek bir kritere odaklanmanın yetersiz kaldığı daha kapsamlı senaryolarda, işlerin ağırlıklarıyla birlikte erken bitirme (earliness) ve geç kalma (tardiness) cezalarını eş zamanlı olarak en aza indiren çok amaçlı/çok kriterli modeller ön plana çıkmaktadır (Lokman, 2020).

Paralel makine problemleri, işlerin birden çok makineye atanıp sıralandığı çizelgeleme problemleridir (Chen ve Powell, 1999). Özdeş paralel makinelerde işlerin işlem süreleri eşitken, ilişkisiz paralel makinelerde işlem süreleri makineye bağımlıdır (Fanjul-Peyro vd., 2019). En yaygın amaç makespan minimizasyonu olsa da toplam tamamlanma zamanı, toplam ağırlıklı tamamlanma ve geciken iş sayıları gibi ölçütler de sık çalışılmıştır (Mor vd., 2025). Çözümde tam yöntemlerin üstünlüğünün yanı sıra problem boyutu büyüdüğünde gerçek yaşam kısıtları ve yeni yapısal özellikler eklenmesi ile sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler öne çıkmaktadır (Hautz vd., 2025).

Klasik akış tipi modelde makineler seri yerleşir ve her iş başlangıç makinesinden son makineye kadar aynı rotadan geçer. Her iş farklı makinelerde yapılan operasyonlardan oluşur ve bu operasyonlar belirli bir öncelik yapısına sahiptir (Baker ve Trietsch, 2018). Permütasyon akış tipi modelde, ilk makinedeki iş sırasının tüm makinelerde korunması amaçlanır (Singh vd., 2020). Beklemesiz akış tipi modelde bir iş başladıktan sonra sonraki aşamalarda işlerin beklemeden devam etmesi gerekir (Utama vd., 2024). Blokeli akış tipi modelde ise, ara tamponun sıfır ya da sınırlı olduğu ve sonraki makine hazır değilse önceki makinenin bloke kaldığı durum söz

konusudur (Takano ve Nagano, 2020). Akış tipi modellerin çözümünde güncel eğilimler neticesinde karmaşıklaşan problem düzeyleriyle başa çıkmak için simülasyon tabanlı modeller ve meta-sezgisellerin kullanımı artmaktadır (Prabhu vd., 2024). Bazı işlerin bazı aşamaları atlayabildiği, sırayla tüm makinelerde işlem görmediği durumlarda da esnek akış tipinden söz edilir.

İşlerin rotaları birbirinden farklılık gösteriyorsa, atölye tipi modeller ortaya çıkar. Her işin kendine özgü bir rotası bulunabilir ve bu modelde her bir işin operasyon süreci boyunca makine ziyaretlerinin sayısı kısıtlı veya tekrarlı olacak şekilde çeşitlenebilir. Açık atölye tipinde ise herhangi bir operasyon sırası zorunluluğu yoktur (Destouet vd., 2023).

Problem Varsayımları

Üretim çizelgelemede determinist işlem süreleri, sabit makine kapasitesi ve statik ortam klasik modellerin çekirdeğini oluşturur; ancak pratikte çoğu zaman sistem ortamı bu kadar sade değildir (Sabuncuoglu ve Goren, 2009). Özellikle modern üretim sistemlerinde araştırma ortamları daha çok dinamik, belirsiz, değişken kapasiteli olup bakım ve arıza içermektedir (Khakifirooz vd., 2024).

Deterministik işlem süreleri varsayımı, her operasyonun süresinin önceden bilindiği ve sabit kabul edildiği anlamına gelir (Allahverdi, 2022). Sabit makine varsayımında, kapasitenin plan ufku boyunca değişmediği ve makinenin sürekli erişilebilir olduğu varsayılır. Ayrıca her makinenin aynı anda yalnızca bir işi işlediği ifade edilmektedir. Statik ortam varsayımı ise tüm işlerin ve koşulların en baştan bilindiği, çoğu modelde işlerin sıfır zamanında hazır olduğu ve çizelgeleme esnasında yeni iş gelmediği kurgusuna karşılık gelir (Lohmer ve Lasch, 2020).

Statik ortam varsayımı üretim dinamikleri yok sayıldığında çizelgeleri hızla uygulanamaz hale getirir ve bu durum sık yeniden çizelgeleme ihtiyacı doğurur (Li vd., 2003). Böylelikle çizelgeleme gerginliği yaşanabilir ve teslim tarihlerine uymada sorunlar ortaya çıkabilir; bu da güvenilirliği düşürebilir (Yellig ve Mackulak, 1997). Determinist süreler varsayımı da çoğu ortamda makinelerin durumu, işçi yetkinliği, yorgunluk ve malzeme gecikmesi nedeniyle zayıflar. Benzer şekilde, kapasiteyi sabit görmek, arızayı, önleyici bakımı, fazla mesaiyi, zamanla değişebilen kapasiteyi ve işgücünün uygunluğunu devre dışı bırakır (Yao vd., 2022). Bu sebeplerle araştırmalar

dinamik ve stokastik ortamları çizelgelemek gereğini ortaya çıkarmaktadır (Branke vd., 2016).

Dijitalleşme ile Değişen Üretim Ortamı

Endüstri 4.0'ın entegrasyonu, fiziksel sistemler ile dijital süreçler arasında sürekli bir veri akışı sağlayarak üretim hatlarında dinamik bir karar alma mekanizması oluşturulmasını gerektirmektedir (Woschank vd., 2024). Bu süreçte Nesnelerin İnterneti aracılığıyla elde edilen büyük veriler, karmaşık üretim ortamlarındaki performans darboğazlarını erkenden tanımlayarak hataya açık süreçlerin optimizasyonunu mümkün kılar (Kilic vd., 2018). Ayrıca, gerçek zamanlı veri analitiği sayesinde üretim birimleri otonom kararlar alarak talep dalgalanmalarına karşı esneklik kazanmakta ve kaynak planlamasını çok daha hassas bir şekilde yönetebilmektedir (Alkış vd., 2020).

Büyük veri yönetimi ve akıllı nesnelerin bütünleşik kullanımı, işletmelerin değer zincirini dijital bir altyapı üzerinden dönüştürerek hem içsel süreçlerin hem de piyasa beklentilerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlamaktadır (Jiao vd., 2021). Bu dönüşüm, hiper bağlantılı ve merkezsizleşmiş bir üretim ekosistemine geçişi tetikleyerek, sistemlerin çevresel değişimlere otonom ve eşzamanlı olarak adapte olmasını mümkün kılmaktadır (Calderon-Monge ve Ribeiro-Soriano, 2024). Bununla birlikte, dijital ikiz ve siber-fiziksel sistemlerin uygulanması, sanal modeller üzerinden üretim senaryolarının simüle edilmesine olanak tanıyarak belirsizliklerin yönetimi için stratejik bir çerçeve sunmaktadır (Luo vd., 2023). Söz konusu teknolojik entegrasyon, üretim süreçlerinde meydana gelen fiziksel olayların sanal ortamda sürekli olarak izlenmesini sağlarken, aynı zamanda sensör verileri aracılığıyla anlık performans analizlerinin ve arıza tahminlerinin gerçekleştirilmesine de olanak tanımaktadır (Aka, 2025; Ferreira vd., 2020). Bunun yanı sıra, kimyasal süreçlerden lojistik operasyonlara kadar geniş bir yelpazede uygulanan bu otonom parametre ayarlamaları, üretim rotalarının değişken ürün özelliklerine göre dinamik biçimde optimize edilmesini mümkün kılmaktadır (Çetinkaya, 2021). Söz konusu dijital ayak izleri ve kesintisiz bilgi alışverişi, operasyonel şeffaflığı artırarak işletmelerin riskleri minimize etmelerine ve stratejik kararlarını yüksek verimlilikle uygulamalarına temel teşkil etmektedir (Yüksekbilgili ve Çevik, 2018). Bu teknolojik dönüşüm, makinelerin birbirleriyle ve insanlarla iş birliği içinde çalışmasına olanak tanıyarak değer zinciri üzerindeki tüm unsurların

entegrasyonunu ve kaynak verimliliğini en üst düzeye çıkarmaktadır (Tekin, 2018).

Dinamik ve Gerçek Zamanlı Çizelgeleme

Çizelgelemede belirsizlik birçok farklı biçimde ortaya çıkabilir. Faaliyet sürelerinin tahmini yanlış olabilir, makineler arıza yapabilir, işçiler hastalanabilir, hava koşullarından dolayı gecikmeler yaşanabilir, yeni ve beklenmedik faaliyetler eklenebilir. Bu tür belirsizliklerin tümü temel çizelgenin uygulanamaz olmasına neden olur. Yönetimler genelde bu tür aksamalarla başa çıkmak için önceden proaktif planlar yapma eğilimindedir; ancak yine de reaktif planlara ihtiyaç duyabilirler (Deblaere vd., 2011). Bu noktada, çevrimiçi çizelgeleme, reaktif çizelgeleme ve öngörücü reaktif çizelgelemeden bahsetmek yararlı olacaktır.

Çizelgeleme sürekli devam eden bir süreçtir (Engell, 2009; Subramanian vd., 2012), ancak uzun vadeli çizelgeleme modellerinin çözümü hesaplama açısından çok maliyetli olduğu için makul belirsizliğe sahip sonlu ufuklu modeller kullanılmalıdır. Dinamik çizelgeleme ve online çizelgeleme de denen bu planlama esnasında, gerçek zamanlı bozulmalar yaşanabileceği için zaman geçtikçe elde edilen bilgiler sürece dahil edilerek çözüme katkı sunması hedeflenir (Ruhlusaraç ve Çalışkan, 2020). Bu nedenle çevrimiçi çizelgeleme, yalnızca tetikleyici olayların gerçekleşmesi üzerine değil, aynı zamanda yeni bilgileri dikkate almak için periyodik olarak güncellenmeye dayanan yeniden çizelgeleme barındırdığı için yeniden çizelgelemenin bir genellemesidir (Gupta vd., 2016).

Karar vericiler, çizelgeleme boyunca herhangi bir kaynak kesintisi meydana gelmesi durumunda, kesintilerin etkisini en aza indirebilmek için gerçek zamanlı ve doğru kararlar almalılardır, bu esnadaki planlara reaktif planlar denir. Reaktif çizelgeleme yaklaşımları ise beklenmedik sonuçlardan kaçınmayı ve ardından istenmeyen etkilere dayanarak çizelgeyi onarmayı ve/veya gözden geçirmeyi amaçlar (Chakrabortty vd., 2021).

Öngörücü reaktif çizelgelemede, önce bir temel çizelge oluşturulur ve aksaklığa yanıt olarak gerçek zamanlı olarak yeniden çizelgelenir. Bu yöntem, temel çizelge ve reaktif prosedürlerin bir kombinasyonunu kullanır. İlk olarak, işlerin operasyonlarının planlanan başlangıç ve bitiş zamanlarını belirleyen tahmini bir çizelge oluşturulur. Daha sonra bu çizelge beklenmedik aksaklıklara yanıt olarak güncellenir (Ruhlusaraç ve Çalışkan, 2022).

Yapay Zekâ Tabanlı Çizelgeleme Yaklaşımları

Endüstri şirketleri için verimlilik ve üretkenliğin artırılması şarttır ve yapay zekâ kullanımı, süreç optimizasyonunu sağlayarak sonuçları artırarak bu hedeflere ulaşmak için hayati bir strateji haline gelmiştir (Silva vd., 2025). Bu nedenle, geleneksel çizelgelemenin dezavantajlarından kaçınmak için araştırmacılar esnek karar vermeyi sağlayan, belirsizlikle başa çıkan ve çok yönlü kısıtlamaları optimize eden yapay zekâ tabanlı çizelgeleme yaklaşımları üzerinde araştırmalar yapmaktadır (Siryala vd., 2026). Bu bölümde incelenen uygulamalar ise makine öğrenmesi, derin öğrenme, pekiştirmeli öğrenme ve hibrit yaklaşımlardır.

Makine öğrenimi, otomatik bilgi edinme yöntemleri sınıfına verilen addır. Bir sisteme öğrenme yeteneği kazandırmak, ona uyum sağlama yeteneği kazandırır. Otomatik bilgi edinmenin en önemli nedenlerinden biri, uzmanlardan bilgi edinmenin zorluğundan kaynaklanmaktadır (Aytug vd., 1994).

Makine öğrenimi, gecikme özelliklerine dayalı olarak faaliyet zaman aralıklarını tahmin ederek veri odaklı planlamayı destekleyebilir. Bu teknikler, önceki işlerden elde edilen bilgileri kullanarak tahminleri daha hassas hale getirir, ancak başarıları tamamen bu bilgilerin kalitesine ve erişilebilirliğine bağlıdır (Alikhani vd., 2023).

Derin öğrenme, birden fazla işlem katmanından oluşan hesaplama modellerinin verilerin birden fazla soyutlama seviyesindeki temsillerini öğrenmesini sağlar. Bu yöntemler, konuşma tanıma, görsel nesne tanıma, nesne tespiti, ilaç keşfi ve genom gibi birçok alanda en son teknolojiyi önemli ölçüde geliştirmiştir. Derin öğrenme, bir makinenin her katmandaki temsili hesaplamak için kullanılan iç parametrelerini önceki katmandaki temsilden nasıl değiştirmesi gerektiğini gösteren geri yayılım algoritmasını kullanarak büyük veri kümelerindeki karmaşık yapıyı keşfeder. Derin evrişimsel ağlar, görüntü, video, konuşma ve ses işlemede çığır açarken, tekrarlayan ağlar metin ve konuşma gibi sıralı verilere ışık tutmuştur (LeCun vd., 2015). Derin öğrenme, karmaşık doğrusal olmayan etkileşimleri modelleyerek makine öğrenmesini genişletir ve büyük ölçekli tahmin ve planlama performansı için örüntü tanıma konusunda umut vadetmektedir (Hatami vd., 2022).

Pekiştirmeli öğrenme, hesaplama ajanlarının çevreyle etkileşim ve ödül maksimizasyonu yoluyla en uygun karar verme politikalarını öğrenmelerini

sağlayan bir yöntemdir. Yöntem, planlamayı sıralı bir karar verme süreci olarak modelleyerek sistemlerin proje ortamıyla etkileşim kurmasını ve en uygun politikaları öğrenmesini sağlar. Pekiştirmeli öğrenmeye dayalı çerçeveler, uyarlanabilir ve gerçek zamanlı planlama için oldukça umut vericidir, ancak genellikle yüksek işlem gücü ve eğitim maliyetlerine neden olur (Li vd., 2024).

Üretim çizelgeleme problemlerinde kullanılan yapay zekâ tabanlı yaklaşımları üç grupta toplayabiliriz: meta-sezgiseller, hiper-sezgiseller ve hibrit yaklaşımlar. Doğal hayattan esinlenerek tasarlanan meta-sezgiseller ile hangi sezgiselin kullanılacağını test eden hiper-sezgisellerin bulunduğu ortamda, çeşitli avantajları nedeniyle farklı sezgisellerin bir arada kullanılması durumunda hibrit yaklaşımlar ortaya çıkar. Dolayısıyla bu yaklaşımlar, birden fazla yapay zekâ tabanlı optimizasyon algoritmasının (tabu arama, yerel arama, genetik algoritma, tavlama benzetimi gibi) birleştirilerek daha üstün sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Palamutçuoğlu, 2022).

Klasikten Yapay Zekâya Geçiş Analizi

Klasik yaklaşımlarda çoğunlukla problemi modelle ve çöz kültürü hâkimken, yapay zekâ tabanlılarda sistemin yaklaşımı "veri gözlemle, örüntüyü öğren ve karar ver" şeklindedir. Klasik modelleri statik ortamlarda, önceden bilinen varsayımlarla uygulamak mümkünken, dijital üretim ortamlarında belirsiz zamanlarda, beklenmedik olaylar eşliğinde dinamik çizelgeleme yapmak esnekliği yapay zekâ ile sağlanabilir. Ayrıca klasik çizelgelemede çözüm üretme çoğunlukla önceden belirlenmiş bir algoritmik yapıdayken, yapay zekâ tabanlı sistemlerde karar verme mekanizması veriden veya etkileşimden öğrenilebilir (Zhang ve Zhu, 2025). Klasik yaklaşımlardan yapay zekâ tabanlı yaklaşımlara geçişte yapısal özelliklerin karşılaştırıldığı Tablo 1, bu yaklaşımların özet olarak yalnızca modellenme şeklini, esnekliğini ve öğrenme boyutunu dikkate almıştır.

Tablo 1: Yaklaşımların Yapısal Karşılaştırılması

Özellik	**Klasik**	**Yapay Zekâ**
Modelleme	Açık	Veri tabanlı
Esneklik	Düşük	Yüksek
Öğrenme	Yok	Var

(**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Bu dönüşüm, sistemlerin insan bilişsel süreçlerini taklit eden modellerden ziyade, üst düzey çözüm odaklı ve özgün teknolojik bileşimlerin hedeflendiği yeni bir performans ölçütüne evrilmesini zorunlu kılmıştır (Demirkan, 2025). Geleneksel yöntemlerdeki görev odaklı kıyaslamalar yerini, sistemlerin veriden bağımsız öğrenme ve esnek adaptasyon kapasitelerini merkeze alan yetenek odaklı ölçüm modellerine bırakmaktadır (Dwivedi vd., 2019). Bu süreç, yapay zekâ sistemlerinin doğrusal performans artışlarından ziyade, farklı bilişsel alanlardaki olgunluk düzeylerini ve gelişimsel potansiyellerini standardize eden bütüncül değerlendirme çerçevelerine olan ihtiyacı artırmaktadır (Putnoki ve Orosz, 2026). Bilhassa, sistemlerin başarı oranlarını doğrusal kıyaslamalar üzerinden okumak yerine, yapay zekâ araştırma faaliyetlerini çok boyutlu ve birbiriyle kıyaslanabilir bir ölçeğe taşımak, mimarilerin genel zekâya ulaşma eğilimlerini analiz etmek açısından kritik önem arz etmektedir (Martínez-Plumed vd., 2020).

Dijitalleşme, üretim çizelgelemesini tamamen klasik optimizasyon modellerinden koparmaktan ziyade, bu modellerin veri, öğrenme ve gerçek zamanlı karar verme yetenekleriyle bütünleştirildiği hibrit bir paradigma doğrultusunda dönüştürmektedir. Aksi halde tek başına yapay zekâ tabanlı çizelgelemenin başlıca sorunları (Ngwu vd., 2026);

- Veri bağımlılığı,
- Eğitim maliyeti,
- Modelin açıklanabilirliği,
- Yeni problem boyutlarına genellenebilirlik,
- Gerçek üretim ortamlarında doğrulama eksikliği,
- Endüstriyel bilgi sistemleriyle entegrasyon,
- Büyük durum/eylem uzaylarında ölçeklenebilirlik,
- Güvenilirlik ve karar güçlülüğüdür.

Sonuç

Son gelişmelerin de açıkça gösterdiği üzere, çizelgeleme karar verme problemi olmaktan çıkıp öğrenen bir sistem problemi hâline gelmektedir. Uç yapay zekâ uygulamaları gerçek dünya cihazlarında yapay zekânın kullanılabildiği örneklerdir. Bu örneklerde, bir bulut hizmet sağlayıcısı gibi merkezi bir veri sistemine ihtiyaç duyulmadan, doğrudan ağın uç noktasında kullanıcılara yakın yerde yapay zekâ hesaplamaları yapılarak daha çevik, düşük gecikmeli, tutarlı ve sürekli hizmet alınabilmektedir (Singh ve Gill, 2023). Dijital ikiz teknolojisi kullanımı, fiziksel sistemlerin sanal modellerinin oluşturulmasını, üretim süreçlerinin simülasyonunu, optimizasyonunu ve tahmine dayalı analizini kolaylaştırır. Doğrudan insan gözlemine gerek kalmadan dijital ikizler operasyonel performans ve potansiyel arızalar hakkında kritik görünürlük sağlar (Ruhlusaraç, 2025).

Geleneksel yaklaşımlar, özellikle büyük veri hacimlerinin işlenmesi bağlamında, gerçek zamanlı atölye üretiminin planlanması ve yönetimi söz konusu olduğunda önemli zorluklarla karşılaşır. İşte burada yapay zekâdaki son gelişmeler devreye girmekte ve üretim sistemlerindeki öngörülemeyen olaylara ve sık sık meydana gelen aksamalara anında yanıt vermeyi sağlayan daha gelişmiş algoritmalar sunmaktadır. Buna karşılık, geleneksel yöntemler makine öğrenimi ve derin pekiştirmeli öğrenme gibi tekniklere kıyasla önemli sınırlamalar taşımaktadır. Bu sınırlamalar, parametrelere duyarlılık, yakınsama hızı, arama alanını kapsamlı bir şekilde keşfetme yeteneği ve standart olmayan sorunları ele alma veya sorun özelliklerindeki ve kısıtlamalarındaki değişikliklere uyum sağlama performansı gibi çeşitli yönlerde kendini gösteriyor. Öte yandan, bahsedilen yeni araçlar yüksek öğrenme yeteneği, karmaşık sorunları çözmede iyileştirilmiş performans, diğer tekniklerle sorunsuz entegrasyon, karmaşık arama alanlarının daha verimli keşfi ve sorunlardaki veya ortamdaki değişikliklere yanıt olarak dinamik uyum yeteneği gibi birçok önemli avantaj sunuyor (Hassan vd., 2024).

Gelecekte, yapay zekâ tekniklerinin kullanımı insan müdahalesine daha az bağımlı olacak ve giderek daha güvenilir ve daha zamanında sonuçlar sağlayacaktır. Bu tekniklerin sunduğu yetenekler, bakım programlarının tanımlanması, makinenin kullanılabilirliği ve gerçekleştirilecek iş emirleri gibi görevlerin hızlı ve dinamik bir şekilde yönetilmesine olanak tanır. Genel

olarak, klasik yaklaşımların hâlen devrede olduğu ve yapay zekânın tamamlayıcı bir rol üstlendiği söylenebilir. Bu alanda yapay zekâ kullanımının olumlu bir etkiye sahip olduğu ve üretim tahminlerinin kalitesinde önemli iyileşmeler sağladığı sonucuna varılabilir.

Kaynaklar

Aka, S. (2025). Üretim Sistemlerinde Dijital İkiz Kullanımına Yönelik Bariyer Analizi. *Uluslararası Ekonomi, İşletme ve Politika Dergisi*, 9(1), 247-261. https://doi.org/10.29216/ueip.1614573

Alikhani, H., Le, C., Jeong, H. D., & Damnjanovic, I. (2023). Sequential machine learning for activity sequence prediction from daily work report data. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(9), 04023082-1-11. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-13165

Alkış, G. & Pirtini, S. & Ertemel, A.V. (2020), Lojistik Sektöründe Endüstri 4.0 Uygulamalarının Operasyonel Verimliliğe Etkisi, *BMIJ*, 8(1): 371-395, http://dx.doi.org/10.15295/bmij.v8i1.1341

Allahverdi, A. (2022). A survey of scheduling problems with uncertain interval/bounded processing/setup times. *Journal of Project Management*, 7(4), 255-264. https://doi.org/10.5267/j.jpm.2022.3.003

Altunay, H., & Eren, T. (2016). Ders Programı Çizelgeleme Problemi İçin 0-1 Tamsayılı Programlama Modeli Ve Bir Örnek Uygulama. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2), 473-488. https://doi.org/10.17482/uumfd.285480

Altunay, H., & Eren, T. (2017). Ders programı çizelgeleme problemi için bir literatür taraması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 55-70. https://izlik.org/JA42RJ69CH

Aytug, H., S. Bhattacharyya, G. J. Koehler & J. L. Snowdon. (1994). A review of machine learning in scheduling," in *IEEE Transactions on Engineering Management*, 41(2), 165-171, https://doi.org/10.1109/17.293383

Baker, K.R. & Trietsch, D. (2018). Flow Shop Scheduling. Kenneth R. Baker & Dan Trietsch (Eds.), In *Principles of Sequencing and Scheduling*. (283-318). John Wiley & Sons. USA. https://doi.org/10.1002/9781119262602.ch10

Bakır, M., Sebatlı Sağlam, A., & Çavdur, F. (2023). Bağlantısız Paralel Parti Üretimi Yapan Makine Çizelgeleme Probleminin Karışık-Tamsayılı Programlama ile Çözümü. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 653-663. https://doi.org/10.2339/politeknik.996529

Bektur, G. (2020). Enerji etkin ve sıra bağımlı hazırlık süreli tek makine çizelgeleme problemi için tavlama benzetimi algoritması tabanlı hibrit sezgisel çözüm önerisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 407-420. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.598082

Branke, J., Nguyen, S., Pickardt, C. W., & Zhang, M. (2016). Automated Design of Production Scheduling Heuristics: A Review. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20, 110-124. https://doi.org/10.1109/tevc.2015.2429314

Calderon-Monge, E., & Ribeiro-Soriano, D. (2024). The role of digitalization in business and management: a systematic literature review. *Rev Manag Sci* 18, 449–491. https://doi.org/10.1007/s11846-023-00647-8

Chakrabortty, R.K., Rahman, H.F., Haque, K.M.A., Paul, S.K., & Ryan, M.J., (2021). "An event-based reactive scheduling approach for the resource constrained project scheduling problem with unreliable resources". *Computers and Industrial Engineering*. 151, 1-16. 106981. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106981

Chen, Z., & W. B. Powell, (1999). Solving Parallel Machine Scheduling Problems by Column Generation. *INFORMS Journal on Computing* 11(1), 78-94. https://doi.org/10.1287/ijoc.11.1.78

Çetinkaya, F. F. (2021). Endüstri 4.0 farkındalığının inovasyon üzerindeki etkisi. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 21(2), 571-598. https://doi.org/10.18037/ausbd.959277

De Felice, F., De Luca, C., Petrillo, A., Forcina, A., Ortiz Barrios, M. A., & Baffo, I. (2025). The Role of Digital Transformation in Manufacturing: Discrete Event Simulation to Reshape Industrial Landscapes. *Applied Sciences*, 15(11), 6140. 1-35. https://doi.org/10.3390/app15116140

Deblaere, F., Demeulemeester, E., & Herroelen, W., (2011). "Reactive scheduling in the multi-mode RCPSP". *Computers and Operations Research*. 38(1), 63–74. https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.01.001

Demirkan, S. (2025). Yapay Zekâ Uygulamalarının İş Süreçlerine Katkısı. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8(3), 680-694. https://doi.org/10.34248/bsengineering.1620747

Destouet, C., Tlahig, H., Bettayeb, B., & Mazari, B. (2023). Flexible job shop scheduling problem under Industry 5.0: A survey on human reintegration, environmental consideration and resilience improvement, *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 155-173, ISSN 0278-6125, https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.01.004

Dikmen, H. B., Balcı, F., Çetin, E., Ilgın, Y., Kaya, H., Kartal, Y. B., Osmanlı, F., Özen, A. M., Sürücü, E., & Kızılay, D. (2023). Farklı Performans Kriterleri Altında Paralel Makine Çizelgeleme Problemi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(3), 1030-1053. https://doi.org/10.21923/jesd.1244549

Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Ismagilova, E., Aarts, G., Coombs, C., Crick, T., Duan, Y., Dwivedi, R., Janssen, M., & More Authors (2019). Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy. *International Journal of Information Management*, 57, 101994. 1-47. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.08.002

Engell, S. (2009). Uncertainty, decomposition and feedback in batch production scheduling. In *Computer Aided Chemical Engineering*, 26, 43-62. https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70010-0

Fanjul-Peyro, L., R. Ruiz, & F. Perea. (2019). Reformulations and an exact algorithm for unrelated parallel machine scheduling problems with setup times, *Computers & Operations Research*, 101, 173-182, ISSN 0305-0548, https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.07.007.

Ferreira, W., F. Armellini, L. De Santa-Eulalia. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review, *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106868, 1-17. ISSN 0360-8352, https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868.

Furugi, A. (2021). Makine uygunluk kısıtlaması ve sıra bağımlı kurulum süresi ile özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi için tabu arama algoritması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1539-1550. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.806641

Graves. Stephen C. (1981). A Review of Production Scheduling. *Operations Research*, 29(4), 646-675. https://doi.org/10.1287/opre.29.4.646

Gupta, D., C.T. Maravelias, & J.M. Wassick. (2016). From rescheduling to online scheduling, *Chemical Engineering Research and Design*, 116, 83-97, ISSN 0263-8762, https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.035.

Guzman, E., B. Andres, & R. Poler. (2022). Models and algorithms for production planning, scheduling and sequencing problems: A holistic framework and a systematic review, *Journal of Industrial Information Integration*, 27, 100287, 1-17. ISSN 2452-414X, https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100287.

Günday, G. G., & Fığlalı, N. (2024). Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Tavlama Benzetimiyle Çözümünde Rassal Aramanın Katkısı. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 12(2), 881-900. https://doi.org/10.29130/dubited.1215635.

Hassan, A., Triki, H., Trabelsi, H., Haddar, M. (2024). *Literature Review of Scheduling Problems Using Artificial Intelligence Technologies Based on Machine Learning*. In: Chouchane, M., et al. Design and Modeling of Mechanical Systems - VI. CMSM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67152-4_36.

Hatami, M., Franz, B., Paneru, S., & Flood, I. (2022). Using deep learning artificial intelligence to improve foresight method in the optimization of planning and scheduling of construction processes. In *Computing in Civil Engineering*, 1171-1178. https://doi.org/10.1061/9780784483893.143

Hautz, J., Klemmt, A., & Mönch, L. (2025). Exact and heuristic approaches for scheduling parallel stress test machines in semiconductor reliability laboratories. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. https://doi.org/10.1007/s10696-025-09630-9

Itu, A. (2025). Industrial Scheduling in the Digital Era: Challenges, State-of-the-Art Methods, and Deep Learning Perspectives. *Applied Sciences*, 15(19), 10823, 1-27. https://doi.org/10.3390/app151910823.

Ivanov, D., Sokolov, B., Chen, W., Dolgui, A., Werner, F., & Potryasaev, S. (2021). A control approach to scheduling flexibly configurable jobs with dynamic structural-logical constraints. *IISE Transactions*, 53(1), 21–38. https://doi.org/10.1080/24725854.2020.1739787.

Jiao, R., Commuri, S., Panchal, J., Milisavljevic-Syed, J., Allen, J. K., Mistree, F., & Schaefer, D. (2021). "Design Engineering in the Age of Industry 4.0." *ASME. J. Mech. Des*. 143(7): 070801. https://doi.org/10.1115/1.4051041.

Khakifirooz, M., Fathi, M., Dolgui, A., & Pardalos, P. M. (2024). Scheduling in Industrial environment toward future: insights from Jean-Marie Proth. *International Journal of Production Research*, 62(1–2), 291–317. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2245919.

Kilic, G. H., Ozturk, M. G., & Koseoglu, A. M. (2018). Inventory control methods in industry 4.0 implementations. *Journal of Management, Marketing and Logistics* (JMML), 5(4), 324-340. http://doi.org/10.17261/Pressacademia.2018.991.

Küpeli, İ., Sarucan, A., & Küpeli, A. S. (2020). Dağıtık Permütasyon Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Yapay Arı Koloni Algoritması İle Çözümü. *El-Cezeri*, 7(2), 549-562. https://doi.org/10.31202/ecjse.670424

LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature* 521, 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Li, D. C., Chen, L. S., & Lin, Y. S. (2003). Using Functional Virtual Population as assistance to learn scheduling knowledge in dynamic manufacturing environments. *International Journal of Production Research*, 41(17), 4011–4024. https://doi.org/10.1080/0020754031000149211

Li, M., Zheng, Q., & Ashuri, B. (2024). Application of artificial intelligence in design automation: a two-stage framework for structure configuration and design. *Journal of Construction Engineering and Management*, 150(8), 04024083, 1-12. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-14409

Lohmer, J., & Lasch, R. (2020). *Production planning and scheduling in multi-factory production networks: a systematic literature review* (Version 1). Taylor & Francis. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12854503.v1

Lokman, B. (2020). İki kriterli tek makinalı çizelgeleme problemi için bir yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 35(4), 2075-2088. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.573734

Luo, D., S. Thevenin, & A. Dolgui. (2023). A state-of-the-art on production planning in Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 61(19), 6602-6632. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2122622

Parente, M., G. Figueira, P. Amorim & A. Marques. (2020). Production scheduling in the context of Industry 4.0: review and trends, *International Journal of Production Research*, 58(17), 5401-5431, https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1718794

Martínez-Plumed, F., Tolan, S., Pesole, A., Hernández-Orallo, J., Fernández-Macías, E., & Gómez, E. (2020). Does AI Qualify for the Job?: A Bidirectional Model Mapping Labour and AI Intensities. *Association for Computing Machinery* (ACM). 94-100. https://doi.org/10.1145/3375627.3375831

Mor, B., Mosheiov, G. & Shabtay, D. (2025). Scheduling problems on parallel machines with machine-dependent generalized due-dates. *Ann Oper Res,* 347, 1455–1471. https://doi.org/10.1007/s10479-025-06468-0

Mourtzis, D. (2022). Advances in Adaptive Scheduling in Industry 4.0. *Front. Manuf. Technol.* 2, 937889. 1-29. https://doi.org/10.3389/fmtec.2022.937889

Nguyen, S., Mei, Y. & Zhang, M. (2017). Genetic programming for production scheduling: a survey with a unified framework. *Complex Intell. Syst*. 3, 41–66. https://doi.org/10.1007/s40747-017-0036-x

Ngwu, C., Liu, Y. & Wu, R. (2026). Reinforcement learning in dynamic job shop scheduling: a comprehensive review of AI-driven approaches in modern manufacturing. *J Intell Manuf* 37, 1093–1108. https://doi.org/10.1007/s10845-025-02585-6

Palamutçuoğlu, B. T., (2022). Üretim Çizelgeleme Problemlerinde Yapay Zekâ Uygulamaları: Bir Derleme Çalışması, *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi*, 57(4), 3360-3379. https://doi.org/10.15659/3.sektor-sosyal-ekonomi.22.12.1905

Prabhu, A., Raghunandana, K., & Pai, P. (2024). Workload Control in Flow Shops with Bottleneck Shifting and Process Time Variability. *Production Engineering Archives*, 30, 48 - 56. https://doi.org/10.30657/pea.2024.30.4

Putnoki, A.M., Orosz, T. (2026). Cognitive and artificial intelligence evaluation framework. *Artif Intell Rev*. 59(98), 1-52. https://doi.org/10.1007/s10462-026-11493-x

Rossit, D. A., Tohmé, F., & Frutos, M. (2019). Industry 4.0: Smart Scheduling. International *Journal of Production Research*, 57(12), 3802–3813. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504248

Ruhlusaraç, M. (2025). "Dark Factories and Autonomous Logistics: A Sustainability-Oriented Assessment", 23rd International Logistics and Supply Chain Congress (LMSCM2025), 131-150. E-ISBN: 978-625-92779-2-9

Ruhlusaraç, M., & Çalışkan, F., (2020). "A mathematical model for dynamic project scheduling problem and reactive scheduling implementation". *Business & Management Studies: An International Journal.* 8 (4), 83-97. https://doi.org/10.15295/bmij.v8i4.1708

Ruhlusaraç, M., & Çalışkan, F., (2022). Dynamic multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem with weighted earliness and tardiness: a real-life boutique furniture implementation, *bmij*, 10 (3): 1095-1117, https://doi.org/10.15295/bmij.v10i3.2111

Sabuncuoglu, I., & Goren, S. (2009). Hedging production schedules against uncertainty in manufacturing environment with a review of robustness and stability research. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(2), 138–157. https://doi.org/10.1080/09511920802209033

Saraç, T., & Özçelik, F. (2023). Çok amaçlı ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için bir matsezgisel algoritma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(3), 1953-1966. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.873295

Saraç, T., & Tutumlu, B. (2021). İlişkisiz paralel makine çizelgeleme probleminde eniyi makine sayısının belirlenmesi için bir doğrusal tamsayılı matematiksel model ve çözüm yaklaşımları. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 329-346. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.686683

Saraç, T., & Tutumlu, B. (2022). İşlerin bölünebildiği ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için iki amaçlı bir matematiksel model. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 37(4), 2293-2308. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.967343

Sarıçiçek, İ. (2018). Özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme problemlerinin çözümü için bir karar destek sistemi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 108-116. https://izlik.org/JA79PB97MP

Silva, B., F. Ferreira, G. Magalhães, I. Azevedo, D. Dias, A.S. Santos & L.R. Varela. (2025). *Literature Review of Artificial Intelligence Applications in Production Planning and Scheduling*. In: Machado, J., Trojanowska, J., Soares, F., Rea, P., Butdee, S., Gramescu, B. (eds) Innovations in Mechatronics Engineering IV. icieng 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94223-5_10

Singh, H., Oberoi, J. S., & Singh, D. (2020). Multi-objective permutation and non-permutation flow shop scheduling problems with no-wait: a systematic literature review. *RAIRO Oper. Res*., 55, 27-50. https://doi.org/10.1051/ro/2020055

Singh, P., Krishnan, K., & Boldsaikhan, E. (2026). A Review of Production Scheduling with Artificial Intelligence and Digital Twins. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 10(1), 6. https://doi.org/10.3390/jmmp10010006

Singh, R. & Gill, S. S. (2023). Edge-AI: a survey. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 71-92. https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.02.004

Siryala, M., Sahu, P., Bavanari, P. & Desai, V. (2026). *Artificial Intelligence in Project Scheduling: A Comprehensive Review of Techniques, Applications and Future Opportunities.* In S. S. Kulkarni, A. Agarwal, H. K. Singla & D. Desai (Eds.), Shaping Tomorrow's Built Environment: Convergence of Digital Innovation and Sustainable Strategy, 397-413. https://doi.org/10.17492/JPI/NICMAR/260524

Subramanian, K., Maravelias, C. T., & Rawlings, J. B. (2012). A state-space model for chemical production scheduling. *Computers & chemical engineering*, 47, 97-110. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.025

Şaştım, Ö., & Hasgül, S. (2023). Ortak sunuculu ve proses kaynak kısıtlı ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için bir matematiksel model. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 39(1), 607-620. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1099034

Takan, A., & Saraç, T. (2022). Sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş paralel makine çizelgeleme problemi için yeni çözüm gösterimleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 1041-1054. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.815942

Takano, M., & Nagano, M. S. (2020). Solving the permutation flow shop problem with blocking and setup time constraints. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11, 469-480. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2019.11.002

Tekin, Z. (2018). The examination of applications of industry 4.0 in enterprises by content analysis method. *PressAcademia Procedia* (PAP), 7, 251-255. http://doi.org/10.17261/Pressacademia.2018.891

Utama, D. M., Umamy, S. Z., & Imron, C. N. A. (2024). No-Wait Flow Shop scheduling problem: a systematic literature review and bibliometric analysis. *RAIRO Oper. Res*., 58, 1281-1313. https://doi.org/10.1051/ro/2024008

Woschank, M., Dallasega, P., König, A. & M. Hoffelner. (2024). Potentials of using real-time data to increase the update frequency of production planning and control strategies in MTO: a discrete event simulation study. *Flex Serv Manuf J*, 36, 760-779. https://doi.org/10.1007/s10696-024-09550-0

Yao, X., Almatooq, N., Askin, R. G., & Gruber, G. (2022). Capacity planning and production scheduling integration: improving operational efficiency via detailed modelling. International *Journal of Production Research*, 60, 7239-7261. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2028031

Yellig, E. J., & Mackulak, G. T. (1997). Robust deterministic scheduling in stochastic environments: The method of capacity hedge points. *International Journal of Production Research*, 35(2), 369–379. https://doi.org/10.1080/002075497195803

Yüksekbilgili, Z., & Çevik, G. Z. (2018). Endüstri 4.0 Bağlamında Türkiye'nin Yerine İlişkin Güncel ve Gelecek Eksenli Bir Analiz. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 3(2), 422-436. https://doi.org/10.29106/fesa.412009

Zanchettin, A.M. (2022). Robust scheduling and dispatching rules for high-mix collaborative manufacturing systems. *Flex Serv Manuf J* 34, 293-316. https://doi.org/10.1007/s10696-021-09406-x

Zhang, X., & G. Zhu. (2025). A literature review of reinforcement learning methods applied to job-shop scheduling problems, *Computers & Operations Research*, 175, 106929, 1-15. ISSN 0305-0548, https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106929.

3. BÖLÜM

DİJİTAL İKİZ PROJELERİNDE KONSORSİYUM YAPISI VE İNOVASYON VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE AMPİRİK BİR DEĞERLENDİRME

Oğuz Emre BALKAR[1]

Giriş

Dijital ikizler, fiziksel varlıkların, süreçlerin ve sistemlerin güncel verilerle beslenen dijital temsillerini oluşturarak izleme, kestirim ve optimizasyon kararlarının aynı çevrim içinde yürütülmesine imkân sağlamaktadır. İlişkili diğer kavramlardan (dijital model ve dijital gölge) farkı, veri akışının yönüne ve otomasyon derecesine göre anlaşılmaktadır (Kritzinger vd., 2018). Bu noktada iki yönlü veri bağlantısı, dijital ikizi statik bir modelden ayıran temel niteliklerden biri olarak görülmektedir (Fuller vd., 2020).

Belirli bir sistemin içerisindeki yaşam döngüsü boyunca varlığın kimliğinin, durumunun, davranışının ve çevresindeki bağlantılarının temsil edilmesi, dijital ikiz kapsamı içerisinde yer almaktadır (Jones vd., 2020). Söz konusu özellikler, gerçekleştirilen dijital ikiz projelerine olan yaklaşımları da etkilemektedir. Nitekim, günümüzde bu projeler yalnızca bir yazılım geliştirme faaliyeti olarak değil, model, donanım ve alan bilgisinin birlikte yönetildiği sosyo-teknik inovasyon sistemleri olarak da ele alınmaktadır.

Özellikle, dijital ikiz uygulamalarının ve projelerinin üretim, enerji, sağlık, ulaştırma ve kent yönetimi gibi alanlara yayılması dikkat çekmektedir. Sektörlere ve kullanım senaryolarına bağlı olarak kavramın farklı biçimlerde değerlendirildiği görülmektedir (Barricelli vd., 2019). Örneğin, siber-fiziksel sistemlerle kurulan bağlantı, fiziksel süreç ile dijital temsil arasında sürekli bir öğrenme döngüsü oluşturmaktadır (Tao vd., 2019). Öte yandan, üretim sistemlerinde izleme, kestirim ve yeniden yapılandırma rollerinin veri bağlantısının kapsamına göre değiştiği anlaşılmaktadır (Negri vd., 2017). Gerçek zamanlı veri ediniminin ise bu sistemlerin uygulama kapasitesini

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Lojistik Programı, ORCID: 0000-0001-5853-0926.

güçlendirdiği belirtilmektedir (Uhlemann vd., 2017). Dolayısıyla, dijital ikizlerin geliştirilmesi için farklı teknik uzmanlıkların aynı proje yapısı içinde bir araya getirilmesi kritik önem taşımaktadır.

Bu bağlamda dijital ikizlerin, ürün tasarımı, üretim ve hizmet aşamalarını birbirine bağlaması, kuruluş sınırlarının dışına da çıkan bir bilgi üretim düzeni ortaya çıkarmaktadır. Burada kullanılabilecek yöntemlerden biri olan büyük veri analitiği aracılığıyla fiziksel süreçlerden elde edilen heterojen verilerin karar bilgisine dönüştürülebildiği ifade edilmektedir (Qi ve Tao, 2018). Ancak süreçlerin düzgün bir şekilde ilerlemesi için model doğruluğu, hesaplama maliyeti ve belirsizlik arasında bir dengenin kurulması gerekmektedir (Rasheed vd., 2020). İlgili çerçevede, kavramsal mimarilerin endüstriyel uygulamalara aktarılabilmesi için mevcut bilgi sistemleri ve iş süreçleriyle uyumlaştırılması zorunlu olmaktadır (Lattanzi vd., 2021). Bu yüzden, dijital ikiz projelerinde teknik başarının yanı sıra ortak seçimi, görev paylaşımı ve konsorsiyum yönetimi boyutlarına da dikkat edilmesi önem arz etmektedir.

Çünkü doğru bir şekilde oluşturulan konsorsiyumlar, kuruluşların kendi bünyelerinde bulunmayan veri kaynaklarına, laboratuvarlara, pilot alanlara ve tamamlayıcı yeteneklere erişebilmelerine imkân sağlamaktadır. Bu bağlamda erişilen dış bilginin değerinin, kuruluşların bu bilgiyi tanıma, özümseme ve kullanma kapasitesine bağlı olduğu belirtilmektedir (Cohen ve Levinthal, 1990). Ayrıca, mevcut veya planlanan kurumlar arası ağların, öğrenme ve inovasyonun başlıca öncülleri olduğu gösterilmektedir (Powell vd., 1996). Bununla beraber, dış bilgi arayışının belirli bir düzeye kadar kurum veya kuruluşa yarar sağladığı, ancak aşırı açıklığın dikkat dağınıklığı ve özümseme yükü yaratabildiği ifade edilmektedir (Laursen ve Salter, 2006).

Öte yandan, dijital ikiz projeleri bağlamında belirli organizasyonlar öne çıkmaktadır. Bunlardan biri olarak, Avrupa Birliği (AB) çerçeve programları, sınır ötesi araştırma ve inovasyon ağlarının oluşturulmasına yönelik önemli politika araçları arasında yer almaktadır. Bu programlardaki proje ağlarının farklı ülkelerdeki araştırma kuruluşları ile işletmeleri birbirine bağladığı görülmektedir (Barber vd., 2006). Bununla beraber, belirli çekirdek kuruluşların tekrarlanan katılımına bağlı olarak ağların merkezileşebildiği belirtilmektedir (Breschi ve Cusmano, 2004). Dolayısıyla, politika odaklı iş birliği ağlarında ortak seçiminin hem bilimsel uzmanlıklar hem de program öncelikleri doğrultusunda şekillendiği anlaşılmaktadır (Protogerou vd., 2010).

Benzer şekilde, Avrupa araştırma ağlarının yeni katılımcılar ve tekrarlanan bağlar aracılığıyla zaman içerisinde yeniden yapılandığı hususu dikkat çekmektedir (Balland vd., 2019).

Avrupa araştırma ağlarında gözlenen merkezileşme, çeşitlenme ve yeniden yapılanma eğilimleri, dijital ikiz projelerindeki konsorsiyum yapısının bağımsız bir inceleme alanı olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Geçmişten günümüze kadar dijital ikizler konusunda çok sayıda araştırmanın yapıldığı ve bu çalışmalarda çoğunlukla kavramsal tanımlar, sistem mimarileri, etkinleştirici teknolojiler ve uygulama sorunları üzerinde durulduğu görülmektedir. Sistematik incelemelerde veri birlikte işlerliği, model güncelliği ve standartlaşma gibi teknik problemlerin öne çıktığı anlaşılmaktadır (Semeraro vd., 2021). Bununla beraber, dijital ikizlerin inovasyon üzerindeki etkilerinin yeni iş birliği ve değer yaratma biçimleriyle ilişkili olduğu ifade edilmektedir (Holopainen vd., 2024). Dijital inovasyon ittifaklarında, ortak portföyün tamamlayıcı kaynaklara erişim ile yönetsel karmaşıklık arasında denge kuracak şekilde yapılandırılması gerektiği belirtilmektedir (Bockelmann vd., 2024). Bu yüzden dijital ikiz projelerinin başarısının yalnızca teknik yeterliliklere değil, aynı zamanda projeye katılan kuruluşların sayısına, çeşitliliğine ve aralarındaki ilişkilerin niteliğine de bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan, erişilen literatür genel olarak değerlendirildiğinde, kamu destekli dijital ikiz projelerindeki konsorsiyum yapısının finansman başına çıktı üretimiyle ilişkisini proje düzeyinde inceleyen araştırmaların sınırlı sayıda olduğu dikkat çekmektedir.

Belirlenen araştırma boşluğundan hareketle gerçekleştirilen bu çalışmada, Horizon 2020 ve Horizon Europe kapsamındaki dijital ikiz projelerinde konsorsiyum yapısı ile inovasyon çıktıları arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Konsorsiyum yapısının farklı boyutlarıyla incelenebilmesi amacıyla konsorsiyum büyüklüğü, ülke çeşitliliği, kuruluş türü çeşitliliği, Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletme (KOBİ) payı, önceki iş birliği yoğunluğu, yeni katılımcı payı ve koordinatör deneyimi bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. İnovasyon çıktısı, projeler kapsamında üretilen yayın ve teknik çıktıların toplamı üzerinden ölçülmüştür. İnovasyon verimliliği ise ilgili çıktıların Avrupa Komisyonu katkısına oranlanmasıyla değerlendirilmiştir.

Avrupa Komisyonu Topluluk Araştırma ve Geliştirme Bilgi Servisi (CORDIS) üzerinden elde edilen ikincil veriler, 58,840 projeyi kapsayan tarama süreci sonucunda oluşturulmuştur. Belirlenen örneklem, sayım verilerine uygun negatif binom-2 modelleri, ağ analizi, çeşitlilik etkileşim modeli, alternatif örneklem tanımları ve makine öğrenmesi yaklaşımıyla incelenmiştir. Böylece ortak sayısı ile ortak çeşitliliğinin birbirlerinden ayrılması, bilimsel ve uygulamalı çıktıların farklı biçimde değerlendirilmesi ve geçmiş iş birlikleri ile yeni katılımcıların aynı model içerisinde ele alınması sağlanmıştır. Belirtilen çerçevede analiz işlemleri gerçekleştirilerek, ulaşılan bulguların incelenmesi ve yorumlanması süreçleri yürütülmüştür.

Kuramsal Çerçeve

Dijital ikiz kavramının gelişim süreci incelendiğinde, fiziksel ve dijital sistemler arasındaki sürekli veri bağlantısının kavramın temel belirleyicilerinden biri olduğu görülmektedir. İlgili sistemlerde sensör verileri, mühendislik modelleri ve operasyonel kararlar ortak bir bilgi mimarisi içerisinde bütünleştirilmektedir. Dijital ikizlerin ürün tasarımı, üretim ve hizmet süreçlerini yaşam döngüsü boyunca ilişkilendirdiği ifade edilmektedir (Tao vd., 2018). Fiziksel süreçlerden elde edilen büyük verilerin sanal modellerle bütünleştirilmesi, akıllı üretim uygulamalarının karar kapasitesini geliştirmektedir (Qi ve Tao, 2018). Bununla beraber, model doğruluğu ve belirsizlik yönetimi gibi hususlar dijital ikiz uygulamalarının başarısını doğrudan etkileyebilmektedir (Rasheed vd., 2020). Bu yüzden dijital ikiz projeleri, yalnızca teknik bir model geliştirme faaliyeti olarak değil, farklı bilgi kaynaklarının sürekli biçimde eşleştirildiği bütünleşik bir inovasyon süreci olarak da değerlendirilmektedir.

Söz konusu teknik yapıların endüstriyel süreçlere aktarılması sırasında kavramsal modellerin mevcut iş süreçleri ve bilgi sistemleriyle uyumlaştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Lattanzi vd., 2021). Bu ihtiyaç, farklı uzmanlıkların ve örgütsel kaynakların aynı proje yapısı içerisinde bir araya getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Dijital ikizlerin inovasyon yönetimi üzerindeki sonuçlarının yalnızca teknoloji edinimiyle sınırlı olmadığı, bilgi paylaşımı ve değer yaratma biçimlerini de değiştirdiği belirtilmektedir (Holopainen vd., 2024).

Belirtilen çerçevede, açık inovasyon yaklaşımı, kuruluşların bilgi üretiminde dış kaynaklardan yararlandığını ve bilgi akışlarının farklı yönlerde

gerçekleşebildiğini kabul etmektedir (Dahlander ve Gann, 2010). İşbirliği portföylerinin bileşiminin ürün ve süreç inovasyonlarını farklı kanallar üzerinden etkilediği görülmektedir (Faems vd., 2005). Mevcut bilginin yeniden kullanılması güvenilirliği artırırken, yeni bilgi arayışı alışılmış kombinasyonların dışına çıkılmasını sağlayabilmektedir (Katila ve Ahuja, 2002). Bu bağlamda dijital ikiz konsorsiyumlarındaki inovasyon, farklı ortaklardan edinilen bilgilerin prototip, standart, yayın ve teknik çıktı gibi sonuçlara dönüştürülmesiyle ortaya çıkmaktadır.

Dijital ikiz projelerinde bilgi kaynaklarının kapsamını belirleyen diğer unsurlardan biri de konsorsiyum büyüklüğü olarak görülmektedir. Ortak sayısının artması, sensör teknolojileri, veri bağlantısı, modelleme, yapay zekâ, siber güvenlik ve pilot uygulama gibi tamamlayıcı bileşenlerin aynı proje içerisinde yer almasını kolaylaştırabilmektedir. Büyük ölçekli iş birliği ağlarındaki kümelenmenin ve kısa bağlantıların bilgi dolaşımını destekleyerek inovasyon üretimini artırabildiği gösterilmektedir (Schilling ve Phelps, 2007). Bununla birlikte, ittifak ağının bileşiminin keşifçi inovasyona erişimde, bağ sayısından daha açıklayıcı olabildiği ifade edilmektedir (Phelps, 2010). Bu durum, ortak sayısındaki artışın başlangıçta daha geniş bir bilgi ve kaynak tabanı sağlayabileceğini, ancak konsorsiyum bileşiminin niteliği dikkate alınmadan büyüklüğün tek başına yeterli bir performans göstergesi olarak değerlendirilemeyeceğini göstermektedir.

Öte yandan, konsorsiyum büyüdükçe iletişim kanalları, görev bağımlılıkları ve karar alma süreçleri de çoğalmaktadır. Disiplin ve kuruluş sınırlarını aşan araştırma ekiplerinde koordinasyonun, bilgi paylaşımının yanında görevlerin ve teşviklerin uyumlaştırılmasını da gerektirdiği belirtilmektedir (Cummings ve Kiesler, 2005). Çok kuruluşlu projelerde coğrafi ve kurumsal dağılımın koordinasyon maliyetleri aracılığıyla proje sonuçlarını zayıflatabildiği görülmektedir (Cummings ve Kiesler, 2007). Küçük teknoloji firmalarının iş birliği ağlarında, ortak sayısının bilgi yaratımına katkısının belirli bir düzeyden sonra azalabildiğine dikkat çekilmektedir (Yoon vd., 2015). Dolayısıyla konsorsiyum büyüklüğünün inovasyon çıktısını başlangıçta artırması, belirli bir düzeyden sonra ise koordinasyon yükü nedeniyle bu katkının zayıflaması beklenmektedir.

Konsorsiyumların bilgi tabanını genişleten bir diğer unsur ülke çeşitliliği olarak görülmektedir. Farklı ülkelerden ortakların aynı proje içerisinde yer

alması, düzenleyici ortamların, pazar bilgilerinin, araştırma altyapılarının ve uygulama alanlarının bir araya gelmesini sağlamaktadır. Bölgesel bilgi tabanı ile ağ konumunun, iş birliği ağlarının inovasyon performansına yaptığı katkıyı değiştirdiği ifade edilmektedir (De Noni vd., 2018). Avrupa araştırma ağlarında yeni bilgi bileşimlerinin oluşmasının coğrafi bağlantılarla ilişkili olduğu görülmektedir (Balland vd., 2019). Bununla beraber, çeşitlilik ile ağ bağlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiği ve farklılıkların uygun ilişki yapıları içinde inovasyona dönüştürülebildiği belirtilmektedir (Lungeanu ve Contractor, 2015). Bu nedenle ülke çeşitliliğinin sağladığı bilgi genişliğinin, geliştirilen dijital ikiz çözümlerinin farklı koşullarda sınanmasını kolaylaştırması ve inovasyon çıktıları üzerinde olumlu bir sonuç oluşturması beklenmektedir.

Ülke çeşitliliğiyle ilişkili olmakla birlikte, ondan farklı bir bilgi bileşimi sağlayan kuruluş türü çeşitliliği, üniversitelerin bilimsel bilgi üretimi, firmaların sistem bütünleştirme yeteneği, araştırma merkezlerinin yöntem geliştirme kapasitesi ve kamu kuruluşlarının uygulama bilgisi arasında tamamlayıcılık oluşturabilmektedir. Farklı ortak türlerinden oluşan iş birliği ağlarının ürün inovasyonunun derecesini artırabildiği gösterilmektedir (Nieto ve Santamaría, 2007).

İnovasyon için bilişsel mesafenin, tarafları farklılaştıracak ancak karşılıklı anlaşmayı engellemeyecek bir düzeyde olması gerektiği ifade edilmektedir (Nooteboom vd., 2007). Teknolojik mesafe, ağ merkeziliği ve yoğunluk gibi göstergelerin keşifçi bilgi üretimini birlikte biçimlendirdiği anlaşılmaktadır (Gilsing vd., 2008). Bu doğrultuda kuruluş türü çeşitliliğinin farklı bilgi üretim ve uygulama kapasitelerini birleştirerek dijital ikiz projelerinin inovasyon çıktısını destekleyebileceği düşünülmektedir.

Bununla beraber, kuruluş türü çeşitliliğinin sağladığı tamamlayıcılık, ortaklık portföyünün dengesi ve kuruluşların bilgiyi bütünleştirme kapasiteleri tarafından sınırlandırılabilmektedir. Ortak türü çeşitliliğinin inovasyon performansına katkısının farklı sınır koşullarına göre değiştiği ifade edilmektedir (Hagedoorn vd., 2018). Portföy çeşitliliğinin radikal ve artımsal inovasyon üzerinde aynı sonucu oluşturmadığı belirtilmektedir (Oerlemans vd., 2013). Teknolojik çeşitlilik ile ittifakların örgütlenme biçiminin birlikte yönetilmesinin Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) performansını etkilediği gösterilmektedir (Sampson, 2007). Bu değerlendirmeler, kuruluş türü

çeşitliliğinin tek başına olumlu sonuçlar doğurabilmesine karşın, ülke çeşitliliğiyle aynı anda yükselmesi durumunda coğrafi ve kurumsal farklılıkların çift katmanlı bir koordinasyon yükü oluşturabileceğini göstermektedir.

Kuruluş bileşiminin uygulamaya aktarım boyutunda KOBİ'ler ayrı bir önem taşımaktadır. KOBİ'ler dijital ikiz projelerine niş yazılım, sensör, veri analitiği ve sektör odaklı uygulama bilgisi sağlayabilmektedir. Küçük ölçekli örgütsel yapıların hızlı karar alma, prototip geliştirme ve müşteri ihtiyaçlarına uyum sağlama süreçlerini destekleyebileceği düşünülmektedir. Özellikle, bölgesel Ar-Ge konsorsiyumlarında ortak bileşimin KOBİ verimliliği üzerinde farklı sonuçlar meydana getirdiği gösterilmektedir (Caloffi vd., 2020). Kamu destekli teknoloji konsorsiyumlarına katılımın, firmaların Ar-Ge üretkenliğini dış bilgi ve ortak altyapı aracılığıyla etkileyebildiği belirtilmektedir (Lechevalier vd., 2010). Bu nedenle konsorsiyumdaki KOBİ payının artmasının özellikle prototip geliştirme, teknik çıktı üretme ve elde edilen bilginin uygulamaya aktarılması bakımından inovasyon çıktısını desteklemesi beklenmektedir.

Konsorsiyum bileşiminin yanı sıra ortaklar arasındaki geçmiş ilişkiler de bilgi bütünleştirme kapasitesini biçimlendirmektedir. Önceden birlikte çalışmış ortaklar arasında ortak dil, güven ve koordinasyon rutinleri gelişebilmektedir. Doğrudan bağların bilgiye erişim sağladığı, yapısal boşlukların ise farklı bilgi kümelerinin birleştirilmesine imkân verdiği ifade edilmektedir (Ahuja, 2000). Genel ittifak deneyimi ile belirli bir ortağa özgü deneyimin, ortak Ar-Ge projelerinin performansını farklı mekanizmalarla etkilediği görülmektedir (Hoang ve Rothaermel, 2005). Güçlü ve zayıf bağların birlikte yönetildiği ağ yapılarının inovasyon açısından ayırt edici bir ilişkisel kapasite oluşturabildiği belirtilmektedir (Capaldo, 2007). Bu yaklaşım, önceki iş birliği yoğunluğunun ortakların birbirlerinin çalışma biçimlerini tanımasını sağladığını ve dijital ikiz projelerindeki koordinasyon maliyetlerini azaltabileceğini göstermektedir.

Önceki iş birliklerinin sağladığı güven ve deneyime karşın, tekrarlanan ilişkiler bağlantı ağlarının kapanması ve bilgi tekrarı gibi sorunlara neden olabilmektedir. Güçlü bağların inovasyon açısından değerinin, ağın geri kalanında bulunan bilgi çeşitliliğine bağlı olduğu ifade edilmektedir (Rost, 2011). Tekrarlanan ortaklıkların sosyal yakınlığın ekonomik amaçların önüne

geçmesi durumunda performansı zayıflatabildiği gösterilmektedir (Holloway ve Parmigiani, 2016). Avrupa bölgelerindeki inovasyonerlerin tekrarlanan iş birliklerinin coğrafi ve teknolojik örüntülerle birlikte şekillendiği görülmektedir (Tóth vd., 2021). Buna göre, önceki iş birliği yoğunluğunun inovasyon çıktısıyla ilişkisi, güven ve koordinasyon yararları ile bilgi tekrarı riski arasındaki dengeye bağlı olmaktadır.

Yerleşik bağların karşısında yeni katılımcılar, konsorsiyuma farklı teknik repertuvarlar, pazar bağlantıları ve problem tanımları kazandırabilmektedir. Ortaklardan elde edilen bilginin yeni biçimlerde birleştirilmesinin, Ar-Ge ittifaklarında bilginin kullanılabilirliğini etkilediği belirtilmektedir (Kok vd., 2020). Bununla beraber, yeni katılımcı payının yükselmesi, ortak dilin ve proje rutinlerinin henüz oluşmadığı bir konsorsiyum yapısı meydana getirebilmektedir. Teknik standartların öğretilmesi ve idari süreçlerin kurulması için gereken zaman, dijital ikiz projelerindeki arayüz bağımlılıklarına bağlı olarak artabilmektedir. Dolayısıyla, yeni katılımcılar bilgi çeşitliliği ve yeni kombinasyonlar yoluyla inovasyonu destekleyebilmekte, ancak yüksek entegrasyon maliyetleri bu katkının çıktı üretimine dönüşmesini sınırlandırabilmektedir.

Bilgi çeşitliliğinin inovasyon çıktısına dönüştürülmesinde yönetimi sağlayan koordinatörün deneyimi de belirleyici olabilmektedir. Koordinatör, dijital ikiz projelerinde teknik bütünlük ile idari uyum arasındaki temel bağlantıyı kurmaktadır. Deneyimli bir koordinatörün tamamlayıcı ortakları seçmesi, çalışma paketleri arasındaki bağımlılıkları öngörmesi ve raporlama takvimini teknik risklerle uyumlu hâle getirmesi beklenmektedir. Kamu destekli Ar-Ge konsorsiyumlarında proje liderliği ile kamu gözetiminin performansı etkileyen farklı yönetişim araçları olduğu belirtilmektedir (Nishimura ve Okamuro, 2018). Araştırma konsorsiyumlarının başarısının program tasarımı ile katılımcıların bilgi paylaşma motivasyonuna bağlı olduğu gösterilmektedir (Branstetter ve Sakakibara, 2002). İlişki temelli değerlendirme yaklaşımında performansın üretken iş birliği bağlarının gelişimiyle birlikte incelenmesi önerilmektedir (Pisacane ve Tagliacozzo, 2023). Bu nedenle koordinatörün önceki dijital ikiz proje deneyiminin, ortak seçimler, bilgi paylaşımı ve teknik bağımlılıkların yönetimi üzerinden inovasyon çıktılarıyla olumlu bir ilişkisi olması beklenmektedir.

Kuramsal çerçeve genel olarak değerlendirildiğinde, dijital ikiz projelerindeki konsorsiyum yapısının birbirini tamamlayan ve sınırlandıran çok sayıda boyuttan oluştuğu anlaşılmaktadır. Konsorsiyum büyüklüğü ile ülke ve kuruluş türü çeşitliliği erişilebilen bilgi ve kaynakların kapsamını genişletirken, aynı zamanda koordinasyon yükünü artırabilmektedir. KOBİ katılımı teknik bilginin uygulamaya aktarılmasını desteklerken, önceki iş birlikleri yerleşik koordinasyon rutinleri sağlamaktadır. Yeni katılımcılar farklı bilgi bileşimleri oluşturabilmekte, koordinatör deneyimi ise söz konusu farklılıkların ortak proje hedefleri doğrultusunda yönetilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bu yüzden konsorsiyum yapısının inovasyon çıktısıyla ilişkisinin tek bir gösterge üzerinden değil, büyüklük, çeşitlilik, ağ yerleşikliği, katılımcı bileşimi ve yönetişim kapasitesi birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İlgili değerlendirmeler doğrultusunda araştırma hipotezleri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

H1a. Konsorsiyum büyüklüğü dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H1b. Konsorsiyum büyüklüğünün karesi inovasyon çıktısıyla negatif ilişkilidir.

H2. Konsorsiyumdaki ülke çeşitliliği dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H3. Konsorsiyumdaki kuruluş türü çeşitliliği dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H4. Konsorsiyumdaki KOBİ payı dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H5. Önceki iş birliği yoğunluğu dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H6. Konsorsiyumdaki yeni katılımcı payı dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H7. Koordinatörün önceki dijital ikiz proje deneyimi projenin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H8. Ülke çeşitliliği ile kuruluş türü çeşitliliğinin etkileşimi inovasyon çıktısıyla negatif ilişkilidir.

Metodoloji

Araştırmada nicel, açıklayıcı ve kesitsel bir tasarım benimsenmiştir. Analizlere, Avrupa Birliği tarafından desteklenen araştırma ve inovasyon projeleri dâhil edilmiştir. Veriler, CORDIS tarafından yayımlanan Horizon 2020 (H2020) ve Horizon Europe (HE) açık veri dağıtımlarından elde edilmiştir. Horizon 2020 proje verilerine, Avrupa Komisyonu tarafından paylaşılan veri tabanı aracılığıyla erişilmiştir (European Commission, 2026a). Benzer şekilde, Horizon Europe proje verilerine de ilgili veri tabanı üzerinden ulaşılmıştır (European Commission, 2026b).

İlk olarak, toplam 58,840 proje dijital ikizle ilişkili ifadeler bakımından taranmıştır. Proje başlığı veya kısaltmalarında "digital twin", "digital twins" veya "digital-twin" ifadesi bulunan kayıtlar A katmanı altında ele alınmıştır. Aynı ifadeler, proje amacı, anahtar kelimeleri veya diğer metin alanlarında yer alıyorsa, B katmanı altında sınıflandırılmıştır. İfadenin yalnızca projeye bağlı yayın ya da teknik çıktı kayıtlarında yer alması ise C katmanı olarak tanımlanmıştır. Dijital ikizlerle ilişkili olan, ancak doğrudan bu ifadeleri içermeyenler ise D katmanında tutulmuş ve ana analize dâhil edilmemiştir.

Yapılan sınıflandırmaların ardından, A ve B katmanlarından oluşan 853 projelik çekirdek örneklem belirlenmiştir. 7 Ağustos 2026 tarihinden sonra başlayan 101 proje ile tek kuruluşlu 80 proje kapsam dışında bırakılmıştır. Böylece ana analitik örneklem, 672 çok ortaklı dijital ikiz projesinden oluşmuştur. Ayrıca, çok ortaklı projelere odaklanılarak, konsorsiyum yapısına ilişkin değişkenlerin karşılaştırılabilir biçimde hesaplanması sağlanmıştır. C katmanının dâhil edildiği genişletilmiş örneklem, farklı proje olgunluğu koşulları kapsamında sağlamlık analizlerinde ele alınmıştır. Bu bağlamda ele alınan projelere ilişkin istatistikler, Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Araştırmada Ele Alınan Projelere İlişkin Genel İstatistikler

Boyut	Proje Sayısı
CORDIS kapsamında taranan projeler	58,840
A, B, C ve D katmanlarındaki tüm aday projeler	1,334
A ve B çekirdek örneklem	853
7 Ağustos 2026 tarihinden sonra başlayan projeler	101
Başlamış çekirdek projeler	752
Tek kuruluşlu projeler	80
Ana analitik örneklem	672
En az iki yıl gözlenen olgun örneklem	414
Tamamlanmış çok ortaklı projeler	216

Tablo 1'de belirtildiği üzere, 58,840 proje içerisinden 1,334 aday kayıt belirlenmiştir. Buna göre A ve B katmanlarında 853 proje yer almıştır. Gelecekte başlayacak ve tek kuruluşlu projelerin çıkarılması sonucunda, 672 gözlemden oluşan ana örnekleme ulaşılmıştır. Bunun yanında, en az iki yıl gözlenen 414 proje ile tamamlanan 216 proje alternatif örneklem olarak değerlendirilmiştir. C katmanını kapsayan genişletilmiş örneklemde proje sayısı 1,088'e kadar yükselmiştir. Böylece, ana sonuçların örneklem tercihine duyarlılığının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Araştırmanın bağımlı değişkeni olan İnovasyon Çıktısı (İÇ), CORDIS kayıtlarındaki yayın ve teknik çıktı sayılarının toplamı üzerinden hesaplanmıştır. Kaliteye duyarlı alternatif sonuç değişkeni, Dijital Nesne Tanımlayıcısı (DOI) içeren yayınlar ile teknik çıktıların bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bilimsel ve uygulamalı çıktı mekanizmalarının birbirinden ayrılması amacıyla, yayın ve teknik çıktılar ayrıca değerlendirilmiştir. İnovasyon Verimliliği (İV) ise toplam inovasyon çıktısının milyon € cinsinden Avrupa Komisyonu Azami Katkısına (AKK) oranlanmasıyla ölçülmüştür. İlgili hesaplama Denklem 1'de gösterilmiştir.

$$\text{İV}_\text{i} = \frac{(\text{Yayın}_\text{i} + \text{Çıktı}_\text{i})}{(\frac{\text{AKK}_\text{i}}{1{,}000{,}000})} \quad (1)$$

Denklem 1'de İV, bir projedeki yayın ve teknik çıktı toplamının milyon € cinsinden AKK'ye oranını göstermektedir. Bağımsız değişkenlerden Konsorsiyum Büyüklüğü (KB) benzersiz katılımcı sayısıyla ölçülmüş ve çarpık dağılım nedeniyle doğal logaritmik dönüşüm uygulanmıştır. Olası doğrusal olmayan ilişkinin belirlenmesi için merkezlenmiş logaritmik KB'nin

karesi modele eklenmiştir. Ülke Çeşitliliği (ÜÇ) ve Kuruluş Türü Çeşitliliği (KTÇ), kategori paylarına dayalı normalize edilmiş Shannon entropisiyle 0 ile 1 arasında hesaplanmıştır (Shannon, 1948). Değerin yükselmesi, ortakların ülke veya kuruluş türleri bakımından daha dengeli dağıldığını göstermektedir. Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletme Payı (KOBİP) ise KOBİ sayısının toplam katılımcı sayısına oranı olarak belirlenmiştir.

Önceki İş Birliği Yoğunluğu (ÖİY), proje başlangıç tarihinden önce birlikte en az bir dijital ikiz projesinde yer alan ortak çiftlerinin konsorsiyumdaki tüm olası ortak çiftlerine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Aynı tarihte başlayan projeler birbirleri açısından geçmiş deneyim olarak kabul edilmemiştir. Yeni Katılımcı Payı (YKP), proje başlangıcına kadar veri setindeki başka bir dijital ikiz projesine katılmamış kuruluşların konsorsiyum içindeki oranını göstermektedir. Koordinatör Deneyimi (KD) ise koordinatör kuruluşun başlangıç tarihinden önce katıldığı dijital ikiz proje sayısıyla ölçülmüş ve ilgili değişkene logaritmik dönüşüm uygulanmıştır. Kontrol değişkenleri kapsamında Gözlem Süresi (GS), program, tamamlanma durumu, seçim katmanı ve fon türü modele dâhil edilmiştir. CORDIS kuruluş türü kodları özel kuruluş (PRC), yükseköğretim kuruluşu (HES), araştırma kuruluşu (REC), kamu kuruluşu (PUB) ve diğer kuruluş (OTH) olarak sınıflandırılmıştır. Analizlerde kullanılan değişkenler ve ölçüm birimleri, Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Araştırmanın Değişkenleri ve Ölçüm Birimleri

Değişken	Kısaltma	Ölçüm
İnovasyon Çıktısı	İÇ	Yayın + teknik çıktı sayısı
İnovasyon Verimliliği	İV	Milyon € AKK başına İÇ
Konsorsiyum Büyüklüğü	KB	Benzersiz katılımcı sayısı, ln
Ülke Çeşitliliği	ÜÇ	Normalize Shannon entropisi, 0-1
Kuruluş Türü Çeşitliliği	KTÇ	PRC, HES, REC, PUB, OTH entropisi
KOBİ Payı	KOBİP	KOBİ sayısı / katılımcı sayısı
Önceki İş Birliği Yoğunluğu	ÖİY	Önceden bağlı çift / tüm olası çift
Yeni Katılımcı Payı	YKP	Deneyimsiz kuruluş / tüm ortaklar
Koordinatör Deneyimi	KD	Önceki dijital ikiz proje sayısı, ln(1+x)
Kontrol değişkenleri	—	GS, program, tamamlanma durumu, seçim katmanı ve fon türü

PRC: özel kuruluş; HES: yükseköğretim kuruluşu; REC: araştırma kuruluşu; PUB: kamu kuruluşu; OTH: diğer kuruluş

Tablo 2'de yer alan değişkenlerden İÇ ve İV ana bağımlı değişkenler olarak belirlenmiştir. KB, ÜÇ, KTÇ, KOBİP, ÖİY, YKP ve KD değişkenleri bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. Ayrıca, GS, program, tamamlanma durumu, seçim katmanı ve fon türü, kontrol değişkenleri olarak hesaplamalara katılmıştır.

Analiz sürecinde ilk olarak veri kalitesi kontrolleri yapılmıştır. Proje anahtarları, başlangıç tarihleri, AKK, konsorsiyum göstergeleri ve çıktı değişkenlerinde eksik değer bulunmadığı tespit edilmiştir. Proje ve program anahtarlarında yinelenen kayıt bulunmadığı belirlenmiştir. Ardından değişkenlerin dağılımları tanımlayıcı istatistiklerle, aralarındaki monoton ilişkiler ise Spearman sıra korelasyon katsayısı (ρ) aracılığıyla incelenmiştir (Spearman, 1904). Parametrik ortalama karşılaştırmalarında Welch t testi kullanılmıştır (Welch, 1947). Parametrik olmayan karşılaştırmalarda Mann-Whitney U testi uygulanmıştır (Mann ve Whitney, 1947). Çoklu karşılaştırmalarda Yanlış Keşif Oranı (FDR), Benjamini-Hochberg yöntemiyle kontrol edilmiştir (Benjamini ve Hochberg, 1995).

Yayın ve teknik çıktı sayılarının negatif olmayan tamsayı değerlerden oluştuğu ve varyanslarının ortalamalardan belirgin biçimde yüksek olduğu görülmüştür. Bu yüzden, sayım verilerindeki aşırı saçılmanın dikkate alınabilmesi amacıyla Poisson modeli yerine Negatif Binom-2 (NB2) modeli kullanılmıştır (Cameron ve Trivedi, 1986). AKK'nin doğal logaritması modele ofset olarak eklenmiş ve böylece katsayıların finansman başına beklenen çıktı oranındaki değişimi göstermesi sağlanmıştır. Araştırmada kullanılan temel NB2 modeli Denklem 2'de sunulmuştur.

$$\ln\left(\frac{\mathbb{E}[Y_i \mid X_i]}{F_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 KB_i^c + \beta_2 (KB_i^c)^2 + \sum_{k=1}^{K} \beta_k X_{ki} \qquad (2)$$

Denklem 2'de Y_i, i projesinin yayın ya da teknik çıktı sayısını, F_i AKK'yi, X_{ki} ise açıklayıcı ve kontrol değişkenlerini temsil etmektedir. KB_i^c, doğal logaritması alınarak örneklem ortalaması etrafında merkezlenmiş konsorsiyum büyüklüğünü göstermektedir. β_1 ve β_2 katsayıları KB ile çıktı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi, β_k katsayıları ise diğer değişkenlerle ilişkili tahmin katsayılarını göstermektedir.

Temel modele ek olarak, DOI içeren yayınlar ve teknik çıktılardan oluşan kaliteye duyarlı çıktı, yayın sayısı ve teknik çıktı sayısı ayrı ayrı

modellenmiştir. ÜÇ ile KTÇ'nin birlikte oluşturduğu sonuçların belirlenmesi amacıyla merkezlenmiş değişkenlerin çarpımından bir etkileşim terimi oluşturulmuştur. Finansman başına çıktı oranının ln(1+x) dönüşümü, değişen varyansa dayanıklı HC3 kovaryans matrisi kullanılan en küçük kareler (OLS) modeliyle incelenmiştir (MacKinnon ve White, 1985). Ayrıca, herhangi bir çıktı üretme olasılığı yalnızca HE projelerinde lojit model aracılığıyla değerlendirilmiştir (Hosmer vd., 2013). H2020 gözlemlerinin tamamında en az bir çıktı bulunduğundan dolayı programlar arası lojit modelinde tam ayrışma ortaya çıkmıştır.

Son olarak, sonuçların örneklem tercihine duyarlılığı altı farklı kapsam üzerinden sınanmıştır. Bu kapsamda tek kuruluşluların dâhil edildiği çekirdek örneklem, en az iki yıl gözlenen olgun projeler, tamamlanmış projeler, yüksek özgüllüklü A katmanı, üst yüzde birlik çıktıların çıkarıldığı ana örneklem ve C katmanını içeren genişletilmiş örneklem kullanılmıştır. Ek olarak, modelin örneklem dışı tahmin performansının daha güvenilir biçimde değerlendirilmesi amacıyla beş katlı Çapraz Doğrulama (CV) uygulanmıştır (Stone, 1974). Rastgele Orman (RF) modeliyle İV'nin tahmin edilebilirliği ve değişkenlerin doğrusal olmayan önem sıralaması değerlendirilmiştir (Breiman, 2001).

Bulgular

Araştırma örnekleminin temel özellikleri incelenmiş ve projelerin program, seçim katmanı, fon türü ve tamamlanma durumlarına göre farklılaştığı görülmüştür. Ana örneklemdeki 672 projenin 562'si HE ve 110'u H2020 kapsamında desteklenmiştir. Araştırma ve İnovasyon Eylemi (RIA) ile İnovasyon Eylemi (IA) türlerinin her birinde 281 proje bulunduğu belirlenmiştir. 7 Ağustos 2026 tarihi itibariyle, 216 projenin tamamlandığı tespit edilmiştir. Projelerin %50.74'ü 11-20 ortaklı, %26.19'u ise en az 21 ortaklı konsorsiyumlardan oluşmuştur. Değişkenlere ilişkin ayrıntılı tanımlayıcı istatistikler Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Tanımlayıcı İstatistikler

Değişken	Ortalama	Standart Sapma	Medyan	Minimum	Maksimum
KB	17.107	10.876	16.000	2.000	97.000
Ülke sayısı	7.789	3.198	8.000	1.000	20.000
KOBİP	0.260	0.161	0.250	0.000	1.000
ÜÇ	0.896	0.144	0.924	0.000	1.000
KTÇ	0.801	0.198	0.845	0.000	1.000
ÖİY	0.070	0.111	0.037	0.000	1.000
YKP	0.506	0.229	0.500	0.000	1.000
KD	8.409	12.708	4.000	0.000	94.000
İÇ	19.860	26.325	11.000	0.000	197.000
İV	4.112	6.122	2.102	0.000	66.152

Not: KD, koordinatörün önceki dijital ikiz proje sayısını göstermektedir.

Tablo 3'te ifade edildiği üzere, bir projede ortalama 17.107 ortak ile 7.789 ülke bulunduğu görülmüştür. ÜÇ ortalaması 0.896, KTÇ ortalaması 0.801 ve KOBİP ortalaması 0.260 olarak hesaplanmıştır. ÖİY ortalaması 0.070 iken, YKP ortalaması 0.506 düzeyinde bulunmuştur. Proje başına İÇ'nin ortalaması 19.860, medyanı 11.000 ve maksimum değeri 197.000 olarak belirlenmiştir. Projelerin %24.26'sında CORDIS'e kaydedilmiş bir yayın ya da teknik çıktı olmadığı anlaşılmıştır. İV ortalaması 4.112 ve medyan değeri 2.102 olarak tespit edilmiştir.

Modelde yer alan değişkenler arasındaki birlikte hareketin belirlenmesi amacıyla Spearman korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Ham çıktı sayısı ile GS arasında $\rho=0.826$, İV ile GS arasında ise $\rho=0.760$ düzeyinde pozitif ilişki bulunmuştur. KB ile AKK arasındaki ilişkinin $\rho=0.731$ olması, bütçe kontrol edilmediğinde ortak sayısının çıktı üzerindeki etkisinin olduğundan daha yüksek görünebileceğine işaret etmiştir. ÖİY ile YKP arasında $\rho=-0.697$ düzeyinde negatif ilişki tespit edilmiştir. Bununla beraber, Varyans Şişirme Faktörünün (VIF) en yüksek 2.360 olması nedeniyle ciddi bir çoklu doğrusal bağlantı sorunu bulunmadığı anlaşılmıştır (O'Brien, 2007).

Dijital ikiz projelerindeki kuruluşlar arasındaki bağlantıların incelenmesi amacıyla, başlamış 752 çekirdek proje üzerinden bir iş birliği ağı oluşturulmuştur. Ağdaki benzersiz kuruluşlar ve iş birliği bağlantılarının yanı sıra Bağlı Bileşen Sayısı (BBS), Ağ Yoğunluğu (AY), Ortalama Derece (OD), Ortalama Yerel Kümelenme Katsayısı (OYKK) ve Tekrarlanan Bağlantıların Payı (TBP) hesaplanmıştır. Bu göstergeler aracılığıyla ağın bütünleşme

düzeyi ile tekrarlanan ilişkilerin yaygınlığı değerlendirilmiştir. Elde edilen temel ağ göstergeleri Tablo 4'te paylaşılmıştır.

Tablo 4. Dijital İkiz İşbirliği Ağının Temel Göstergeleri

Gösterge	Değer
Başlamış çekirdek projeler	752
Benzersiz kuruluşlar	6,090
İş birliği bağlantıları	125,254
En büyük bileşenin payı	%99.33
BBS	40
AY	0.0068
OD	41.13
OYKK	0.849
TBP	%4.26

Tablo 4'te bir bağlantı, iki kuruluşun en az bir projede birlikte yer almasını göstermektedir. Bu sonuçlara göre iş birliği ağında 6,090 kuruluş ve 125,254 benzersiz bağlantı bulunduğu belirlenmiştir. BBS 40 olmasına rağmen, 6,049 kuruluşun en büyük bileşen içerisinde yer aldığı ve bu bileşenin kuruluşların %99.33'ünü kapsadığı görülmüştür. OD 41.13, AY 0.0068 ve OYKK 0.849 olarak hesaplanmıştır. TBP'nin ise yalnızca %4.26 olduğu tespit edilmiştir. En merkezî kuruluşun 103 projeye katılan ve 1,721 farklı kuruluşla bağlantı kuran Fraunhofer olduğu görülmüştür. Fraunhofer'i 69 projeyle CERTH ve 46 projeyle Delft Teknik Üniversitesi izlemiştir. Ülkeler arasındaki en sık ortaklığın 343 projeyle İspanya-İtalya arasında gerçekleştiği anlaşılmıştır.

Elde edilen ağ göstergeleri birlikte değerlendirildiğinde, dijital ikiz ekosisteminin proje temelli kapalı gruplar içerisinde yüksek derecede kümelendiği görülmüştür. Buna karşılık düşük AY, tüm kuruluşların birbirleriyle doğrudan bağlantı kurmadığını göstermiştir. En büyük bileşenin yüksek payı ağın Avrupa ölçeğinde büyük ölçüde bütünleştiğine, düşük TBP ise iş birliklerinin çoğunlukla proje özelinde kaldığına işaret etmiştir. Dolayısıyla dijital ikiz iş birliği ağının yerel ölçekte sıkı, genel ağ düzeyinde ise seçici bir yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır.

Ana modele geçmeden önce, çıktı değişkenlerinin sayım verisi özellikleri ve aşırı saçılma durumu incelenmiştir. Yayın sayısının varyans/ortalama oranı 33.72, teknik çıktı sayısının oranı ise 16.79 olarak hesaplanmıştır. NB2 modelindeki aşırı saçılma parametresinin (α) 0.680 olduğu ve Poisson

modeline karşı gerçekleştirilen Olabilirlik Oranı (LR) testinin anlamlı sonuç verdiği belirlenmiştir (Wilks, 1938). Bu nedenle NB2 modelinin veri yapısına daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Modelin yakınsadığı, log olabilirlik değerinin -2,194.85 ve Akaike Bilgi Ölçütünün (AIC) 4,429.70 olduğu görülmüştür. Model katsayıları Olay Hızı Oranı (IRR) ve yüzde 95 güven aralığı (%95 GA) ile raporlanmıştır. Ana model sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Konsorsiyum Yapısının İnovasyon Çıktısıyla İlişkisi

Değişken	IRR	%95 GA	p
KB	0.835	0.701-0.995	0.044
$(KB^c)^2$	1.018	0.862-1.203	0.835
ÜÇ, +0.10	1.139	1.039-1.248	0.005
KTÇ, +0.10	1.034	0.979-1.092	0.228
KOBİP, +0.10	1.047	0.995-1.102	0.075
ÖİY, +0.10	0.843	0.755-0.941	0.002
YKP, +0.10	0.879	0.828-0.934	<0.001
KD	0.962	0.877-1.055	0.410

Tablo 5'teki sonuçlara göre KB'nin doğrusal terimi negatif ve istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (IRR=0.835, p=0.044). Diğer değişkenler sabitken logaritmik KB'deki bir birimlik artışın, finansman başına beklenen çıktı oranını %16.46 azalttığı görülmüştür. Karesel terimin ise anlamlı olmadığı belirlenmiştir (IRR=1.018, p=0.835). Bu nedenle H1a desteklenmemiş ve H1b kapsamında beklenen ters U biçimli ilişkiye yönelik yeterli kanıt elde edilememiştir. Tahmin edilen yanıt eğrisinde, 14 ortaklı referans konsorsiyuma göre göreli çıktı oranının 20 ortak için 0.940'a, 30 ortak için 0.881'e ve 40 ortak için 0.844'e gerilediği tespit edilmiştir.

ÜÇ'deki 0.10 birimlik artışın finansman başına beklenen çıktı oranını %13.85 yükselttiği belirlenmiştir (IRR=1.139, p=0.005). Böylece H2 desteklenmiştir. KTÇ'nin pozitif olan ana etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır (IRR=1.034, p=0.228). KOBİP'in etkisi %10 düzeyinde pozitif olmakla birlikte, %5 anlamlılık sınırının üzerinde kalmıştır (IRR=1.047, p=0.075). Bu yüzden H3 ve H4 toplam İÇ modeli açısından desteklenmemiştir.

ÖİY'deki 0.10 birimlik artışın beklenen çıktı oranını %15.74 azalttığı görülmüştür (IRR=0.843, p=0.002). Bu bulgu, H5'te öngörülen pozitif ilişkiyi

desteklememiştir. YKP'deki 0.10 birimlik artışın da çıktı oranını %12.06 azalttığı belirlenmiştir (IRR=0.879, p<0.001). Böylece H6 beklenen yönün tersine sonuçlanmıştır. İki değişkene ait bulgular birlikte değerlendirildiğinde, yüksek ağ kapanmasının ve yüksek ortak yenilenmesinin tek başına İV'yi artırmadığı anlaşılmıştır. KD'nin ise anlamlı bir sonuç vermediği tespit edilmiş ve H7 desteklenmemiştir (IRR=0.962, p=0.410).

Kontrol değişkenleri incelendiğinde, GS'nin modeldeki en güçlü belirleyici olduğu görülmüştür. ln(1+yıl) değerindeki bir birimlik artışın beklenen çıktı oranını 43.86 kat artırdığı belirlenmiştir (p<0.001). HE projelerinin koşullu çıktı oranının H2020 projelerinin 2.51 katı olduğu tespit edilmiştir (p<0.001). B katmanı projelerinin oranının A katmanına göre %34.35 daha düşük olduğu görülmüştür (p=0.003). Fon türleri bakımından, RIA projelerine göre IA projelerinde daha düşük, Koordinasyon ve Destek Eylemi (CSA) ile Marie Skłodowska-Curie Eylemleri (MSCA) kapsamında daha yüksek çıktı oranları tahmin edilmiştir. Bu sonuçlar, proje yaşı ve fon türü gibi özelliklerin İÇ'nin değerlendirilmesinde dikkate alınması gerektiğini göstermiştir.

Ana modelde elde edilen sonuçların çıktı türlerine göre farklılaşıp farklılaşmadığını belirlemek amacıyla kaliteye duyarlı çıktı, yayın ve teknik çıktı modelleri ayrı ayrı tahmin edilmiştir. Böylece, konsorsiyum yapısının bilimsel ve uygulamalı üretim üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Ulaşılan sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Çıktı Türlerine Göre Temel Değişkenlerin IRR Değerleri

Değişken	Kaliteye Duyarlı	Yayın	Teknik Çıktı
KB	0.832*	1.080	0.747**
ÜÇ	1.144**	1.290***	1.016
KTÇ	1.026	1.081*	1.006
KOBİP	1.053	1.018	1.073*
ÖİY	0.831**	0.836	0.913
YKP	0.871***	0.878**	0.900**
KD	0.977	0.939	1.037
*: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001			

Tablo 6'daki kaliteye duyarlı çıktı modelinde, ana modelin temel sonuçlarının korunduğu görülmüştür. KB'nin negatif, ÜÇ'nin pozitif, ÖİY ile YKP'nin negatif olduğu belirlenmiştir. İlgili değişkenlerin IRR değerleri

sırasıyla 0.832, 1.144, 0.831 ve 0.871 olarak hesaplanmıştır. KOBİP'in ise %5 anlamlılık sınırına yakın bir pozitif ilişki gösterdiği tespit edilmiştir (IRR=1.053, p=0.053). Böylece ana sonuçların yalnızca DOI içermeyen yayın kayıtlarından kaynaklanmadığı anlaşılmıştır.

Yayın modelinde ÜÇ'nin bilimsel üretim açısından daha güçlü bir etkiye sahip olduğu görülmüştür (IRR=1.290, p<0.001). KTÇ'deki 0.10 birimlik artışın yayın oranını %8.05 yükselttiği belirlenmiştir (IRR=1.081, p<0.050). Bu sonuç H3'e kısmi destek sağlamıştır. YKP'nin bilimsel yayınlarda da negatif sonuç verdiği tespit edilmiştir (IRR=0.878, p=0.008). ÖİY katsayısı negatif olmakla birlikte, %5 düzeyinde anlamlı bulunmamıştır (IRR=0.836, p=0.060).

Teknik çıktı modelinde KB'nin daha belirgin bir negatif ilişki oluşturduğu görülmüştür (IRR=0.747, p=0.002). KOBİP'teki 0.10 birimlik artışın beklenen teknik çıktı oranını %7.27 yükselttiği tespit edilmiştir (IRR=1.073, p=0.022). Böylece H4 uygulamalı çıktı boyutunda desteklenmiştir. YKP'nin teknik çıktı üretiminde de negatif olduğu belirlenmiştir (IRR=0.900, p=0.001). ÜÇ ve KTÇ'nin teknik çıktılar üzerindeki ana etkileri ise anlamlı bulunmamıştır. Dolayısıyla çeşitlilik boyutlarının bilimsel ve uygulamalı çıktı kanallarında farklı sonuçlar meydana getirdiği anlaşılmıştır.

Alternatif çıktı modelleri genel olarak değerlendirildiğinde, toplam çıktı modelinde görünmeyen bazı ilişkilerin bilimsel ve uygulamalı sonuçlar ayrıştırıldığında belirginleştiği görülmüştür. KTÇ'nin bilimsel yayınlarla, KOBİ katılımının ise teknik çıktılarla daha güçlü biçimde ilişkili olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık YKP'nin her iki çıktı türünde de negatif yönde sonuç verdiği anlaşılmıştır. Bu farklılaşma, dijital ikiz projelerindeki İÇ'nin aynı üretim mekanizmasına sahip olmadığını göstermiştir.

ÜÇ ile KTÇ'nin birlikte oluşturduğu etki ayrıca incelenmiştir. İki merkezlenmiş değişkenin etkileşim katsayısı negatif ve anlamlı bulunmuştur (IRR=0.972, p=0.002). ÜÇ'nin ana etkisinin etkileşim modelinde de pozitif kaldığı belirlenmiştir (IRR=1.124, p=0.012). Bu sonuç H8'i desteklemiş ve bir çeşitlilik boyutunun etkisinin diğer çeşitlilik boyutu yükseldikçe zayıfladığını göstermiştir. Dolayısıyla coğrafi ve kurumsal çeşitliliğin aynı anda artmasının çift katmanlı bir koordinasyon yükü meydana getirebildiği anlaşılmıştır.

İV'ye ilişkin bulguların alternatif bir modelle değerlendirilmesi amacıyla, finansman başına çıktının ln(1+x) dönüşümü üzerinden HC3 sağlam standart hatalı OLS modeli tahmin edilmiştir. Modelin belirlilik katsayısı (R^2) 0.646 olarak hesaplanmıştır. ÖİY'nin İV ile negatif ilişkili olduğu belirlenmiştir (β=-0.068, p=0.038). KB'nin %10 düzeyinde negatif sonuç verdiği görülmüştür (β=-0.076, p=0.090). ÜÇ katsayısı pozitif olmakla birlikte anlamlılık sınırını aşmamıştır (β=0.064, p=0.104). Breusch-Pagan testinin değişen varyansa işaret etmesi nedeniyle HC3 kovaryansının kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmıştır (p<0.001).

Ardından, HE projelerinde herhangi bir çıktı bulunma olasılığı lojit model aracılığıyla incelenmiştir. Modelin örneklem içi Eğri Altında Kalan Alan (AUC) değeri 0.977 ve 0.5 eşik değerindeki doğruluğu 0.931 olarak hesaplanmıştır. Konsorsiyum yapısına ilişkin değişkenlerin hiçbirinin çıktı üretip üretmeme olasılığı üzerinde anlamlı sonuç vermediği tespit edilmiştir. GS pozitif, tamamlanma durumu ile B katmanı göstergeleri ise negatif bulunmuştur. Tamamlanma değişkeninin işareti, diğer süre kontrolleri ve CORDIS raporlama zamanlamasıyla birlikte değerlendirilmiştir. Bu sonuç, konsorsiyum yapısının çıktının varlığından daha çok çıktı yoğunluğuyla ilişkili olabileceğini göstermiştir.

Ana örnekleme ek olarak altı alternatif örneklem tanımı kullanılmış ve böylece sonuçların tutarlılığı toplam yedi model üzerinden değerlendirilmiştir. KB'nin bütün modellerde negatif, ÜÇ'nin ise bütün modellerde pozitif yönde olduğu görülmüştür. ÖİY ile YKP'nin yedi modelin tamamında negatif sonuç verdiği tespit edilmiştir. KTÇ ve KOBİP tüm modellerde pozitif olmasına rağmen, toplam çıktı sağlamlık modellerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Değişkenlerin yön ve anlamlılık bakımından gösterdiği tutarlılık Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Sağlamlık Modellerinde Tutarlılık

Değişken	Yön	Anlamlı Model	Medyan IRR
KB	7/7 negatif	5 negatif	0.835
$(KB^c)^2$	4 pozitif, 3 negatif	0	1.018
ÜÇ	7/7 pozitif	5 pozitif	1.115
KTÇ	7/7 pozitif	0	1.031
KOBİP	7/7 pozitif	0	1.026
ÖİY	7/7 negatif	6 negatif	0.862
YKP	7/7 negatif	6 negatif	0.890
KD	2 pozitif, 5 negatif	0	0.985

Tablo 7'deki yedi model, ana örneklem ile alternatif olgunluk, tamamlanma, özgüllük ve genişletilmiş örneklem tanımlarını kapsamaktadır. Buna göre, KB yedi modelin beşinde anlamlı ve negatif, ÜÇ ise beş modelde anlamlı ve pozitif bulunmuştur. ÖİY ile YKP altı modelde anlamlı ve negatif sonuç vermiştir.

Genişletilmiş 1,088 projelik örneklemde KB için IRR=0.847, ÜÇ için IRR=1.062, ÖİY için IRR=0.926 ve YKP için IRR=0.890 değerleri hesaplanmıştır. Böylece ana bulguların uç değerlerden ya da yalnızca bir örneklem tanımından kaynaklanmadığı anlaşılmıştır.

Ek olarak, beş katlı CV kullanılan RF modelinde R^2=0.665 ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) 0.389 olarak belirlenmiştir. En yüksek permütasyon öneminin GS'ye ait olduğu, konsorsiyum değişkenleri içerisinde ise KD, ÜÇ, KB ve KTÇ'nin öne çıktığı görülmüştür.

Erişilen sonuçlar doğrultusunda, araştırma hipotezlerinin kabul edilme durumları elde edilen ampirik sonuçların genel örüntüsü üzerinden sınıflandırılmıştır. Konsorsiyum büyüklüğüne ilişkin doğrusal ve doğrusal olmayan etkiler, farklı çeşitlilik boyutlarının bağımsız ve birlikte oluşturduğu sonuçlar, konsorsiyumdaki KOBİ varlığının farklı çıktı türleri üzerindeki etkisi, geçmiş iş birliklerinin yoğunluğu, yeni katılımcıların konsorsiyum içerisindeki ağırlığı ve koordinatörün önceki proje deneyimi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Böylece hipotezlerin sonuçlandırılmasında yalnızca tekil katsayıların anlamlılığına değil, değişkenlerin farklı modellerde sergilediği genel davranışa ve sonuçların kuramsal beklentilerle ne ölçüde örtüştüğüne de odaklanılmıştır. Hipotezlerin kabul veya ret durumlarına ilişkin toplu değerlendirme Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Sağlamlık Modellerinde Tutarlılık

Hipotez		Kabul Durumu
H1a	Konsorsiyum büyüklüğü dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Reddedildi
H1b	Konsorsiyum büyüklüğünün karesi inovasyon çıktısıyla negatif ilişkilidir.	Reddedildi
H2	Konsorsiyumdaki ülke çeşitliliği dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Kabul edildi
H3	Konsorsiyumdaki kuruluş türü çeşitliliği dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Kabul edildi*
H4	Konsorsiyumdaki KOBİ payı dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Kabul edildi**
H5	Önceki iş birliği yoğunluğu dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Reddedildi
H6	Konsorsiyumdaki yeni katılımcı payı dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Reddedildi
H7	Koordinatörün önceki dijital ikiz proje deneyimi projenin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Reddedildi
H8	Ülke çeşitliliği ile kuruluş türü çeşitliliğinin etkileşimi inovasyon çıktısıyla negatif ilişkilidir.	Kabul edildi

*: Sadece yayın çıktıları için kabul edildi.
**: Sadece teknik çıktılar için kabul edildi.

Tablo 8'deki sonuçlar, KB'ye ilişkin H1a ve H1b hipotezlerinin desteklenmediğini göstermiştir. ÜÇ'ye ilişkin H2 ile ÜÇ ve KTÇ arasındaki negatif etkileşime ilişkin H8 desteklenmiştir. KTÇ'yi ele alan H3 yalnızca yayınlarda, KOBİP'e ilişkin H4 ise teknik çıktı modelinde kısmen desteklenmiştir. ÖİY, YKP ve KD'ye ilişkin H5, H6 ve H7 hipotezleri desteklenmemiştir. Genel olarak, dijital ikiz konsorsiyumlarında ortak sayısından daha çok ortakların bileşiminin ve farklı çıktı türlerine yaptığı katkının önemli olduğu anlaşılmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada, AB tarafından desteklenen dijital ikiz projelerinde konsorsiyum yapısı ile İV arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. CORDIS açık verileri aracılığıyla 58,840 proje taranmış ve 672 çok ortaklı dijital ikiz projesinden oluşan ana örneklem değerlendirilmiştir. İÇ, yayın ve teknik çıktıların toplamı üzerinden, İV ise milyon € AKK başına düşen İÇ sayısıyla ölçülmüştür. Veriler, NB2 modeli, ağ analizi, alternatif çıktı

modelleri, etkileşim modeli, farklı sağlamlık örneklemleri ve RF yaklaşımıyla incelenmiştir.

Araştırmadan elde edilen temel bulgu, daha büyük konsorsiyumların finansman başına daha yüksek İÇ üretmediğini göstermiştir. KB'nin anlamlı ve negatif olduğu, KB'nin karesel teriminin ise ters U biçimli ilişkiyi desteklemediği belirlenmiştir. Bu sonuç, ortak sayısındaki artışla elde edilen kaynak genişliğinin koordinasyon, veri uyumu ve karar alma maliyetleri tarafından sınırlandırılabildiğine işaret etmiştir. Disiplinlerarası araştırmalarda koordinasyon maliyetlerinin proje sonuçlarını zayıflatabildiği daha önce gösterilmiştir (Cummings ve Kiesler, 2007). Dijital ikiz projelerindeki teknik arayüz bağımlılıklarının, ilgili koordinasyon maliyetlerini daha belirgin hâle getirdiği düşünülmüştür.

ÜÇ'nin toplam çıktı ve yayın oranlarını artıran en tutarlı konsorsiyum özelliği olduğu görülmüştür. Farklı ülkelerden ortakların araştırma altyapılarını, pazar bilgilerini ve pilot alanlarını projeye taşıması, elde edilen bilginin farklı koşullarda kullanılabilmesini desteklemiştir. Avrupa araştırma ağlarındaki coğrafi bağlantıların yeni bilgi bileşimlerinin oluşmasına katkı sağladığı daha önce de belirtilmiştir (Balland vd., 2019). Bununla beraber, ÜÇ ile KTÇ arasındaki etkileşim negatif sonuç vermiştir. Bu bulgu, iki farklı heterojenlik boyutunun aynı anda yükselmesi durumunda tamamlayıcılık yararının koordinasyon yükü nedeniyle azalabildiğini göstermiştir.

KTÇ'nin toplam İÇ'yi anlamlı biçimde değiştirmediği, ancak yayınları desteklediği belirlenmiştir. KOBİP'in ise toplam çıktı modelinde sınırlı kaldığı ve teknik çıktı üretiminde pozitif sonuç verdiği görülmüştür. Farklı ortak türlerinin ürün inovasyonunun derecesine katkıda bulunabildiği, önceki araştırmalarda ifade edilmiştir (Nieto ve Santamaría, 2007). Bu çalışmadaki sonuçlar, ilgili katkının inovasyon çıktısının türüne göre farklılaştığını göstermiştir. Üniversite, araştırma merkezi ve firma çeşitliliğinin bilimsel bilgi üretimiyle, KOBİ katılımının ise teknik çıktı üretimiyle daha güçlü biçimde ilişkili olduğu görülmüştür.

ÖİY ile YKP'nin aynı anda negatif sonuç vermesi, araştırmanın dikkat çeken bulgularından biri olmuştur. Yüksek düzeyde tekrarlanan bağların bilgi tekrarına ve ortak seçimin geçmiş ilişkilere bağlı kalmasına neden olabileceği düşünülmüştür. Tekrarlanan ortaklıkların bazı koşullarda performans üzerinde olumsuz sonuç oluşturabildiği daha önce gösterilmiştir (Holloway ve

Parmigiani, 2016). Buna karşılık YKP'nin yükselmesi, ortak dil ile proje rutinlerinin eksikliğini artırabilmektedir. Dolayısıyla tamamen yerleşik ya da tamamen yeni ortaklardan oluşan bir yapı yerine, deneyimli çekirdek ortaklarla seçilmiş yeni katılımcıların birlikte yer aldığı dengeli konsorsiyumların daha uygun olduğu anlaşılmıştır.

KD'nin anlamlı bir sonuç vermediği belirlenmiştir. Bununla beraber, bu bulgunun koordinatör deneyiminin önemsiz olduğu şeklinde yorumlanması uygun olmamıştır. Aksine, kamu destekli konsorsiyumlarda liderliğin etkisinin izleme ve disiplin mekanizmalarıyla birlikte ortaya çıktığı ifade edilmiştir (Nishimura ve Okamuro, 2018). Bu yüzden, koordinatör merkeziliği, çalışma paketi liderliği, bütçe payı ve teknik çıktıların zamanında tamamlanma oranı gibi ayrıntılı göstergelerin kullanılması gerekmektedir.

Erişilen bulgular, dijital ikiz projelerinde ortak sayısının artırılmasından çok, tamamlayıcılık ve koordinasyon kapasitesinin gözetilmesi gerektiğini göstermektedir. Coğrafi ve kurumsal çeşitlilik birlikte yükseldiğinde, veri standartları, arayüz yönetimi ve karar yetkilerinin açık biçimde tanımlanması önem taşımaktadır. Ayrıca, geçmiş iş birliklerine sahip çekirdek ortaklarla yeni katılımcılar arasında dengeli bir yapının kurulması gerekmektedir.

Dolayısıyla, proje değerlendirmelerinin yalnızca ortak sayısına ve ülke kapsamına dayandırılmaması gerekmektedir. Aksine, tamamlayıcı rollerin, geçmiş bağların, yeni katılımcıların entegrasyonunun ve koordinasyon kapasitesinin de dikkate alınması daha doğru olacaktır. İşbirliği ağlarının niteliğinin proje çıktılarıyla birlikte değerlendirilmesi bu süreci destekleyebilecektir (Pisacane ve Tagliacozzo, 2023).

CORDIS kayıtlarının raporlama davranışlarına bağlı olması, yeni projelerde çıktı gecikmesi bulunması ve karşılaştırılabilir patent verilerinin kullanılamaması, çalışmanın sınırlılıkları arasında yer almaktadır. Gelecek araştırmalarda CORDIS verileri ile Avrupa Patent Ofisi gibi çeşitli veri tabanlarındaki veriler birleştirilebilir. Yıllık çıktılar ile ağ merkeziliği, yapısal boşluklar ve teknolojik uzaklık gibi göstergeler incelenebilir.

Kaynaklar

Ahuja, G. (2000). Collaboration networks, structural holes, and innovation: A longitudinal study. *Administrative Science Quarterly*, *45*(3), 425-455. DOI: 10.2307/2667105.

Balland, P.-A., Boschma, R. ve Ravet, J. (2019). Network dynamics in collaborative research in the EU, 2003-2017. *European Planning Studies*, *27*(9), 1811-1837. DOI: 10.1080/09654313.2019.1641187.

Barber, M. J., Krueger, A., Krueger, T. ve Roediger-Schluga, T. (2006). Network of European Union-funded collaborative research and development projects. *Physical Review E*, *73*(3), 036132. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.036132.

Barricelli, B. R., Casiraghi, E. ve Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, *7*, 167653-167671. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.

Benjamini, Y. ve Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 57*(1), 289-300. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x.

Bockelmann, T., Werder, K., Recker, J., Lehmann, J. ve Bendig, D. (2024). Configuring alliance portfolios for digital innovation. *The Journal of Strategic Information Systems*, *33*(1), 101808. DOI: 10.1016/j.jsis.2023.101808.

Branstetter, L. G. ve Sakakibara, M. (2002). When do research consortia work well and why? Evidence from Japanese panel data. *American Economic Review*, *92*(1), 143-159. DOI: 10.1257/000282802760015649.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

Breschi, S. ve Cusmano, L. (2004). Unveiling the texture of a European Research Area: Emergence of oligarchic networks under EU Framework Programmes. *International Journal of Technology Management*, *27*(8), 747-772. DOI: 10.1504/IJTM.2004.004992.

Caloffi, A., Mariani, M., Mattei, A. ve Mealli, F. (2020). What kinds of R&D consortia enhance SMEs productivity? A hierarchical Bayesian approach for the analysis of a regional innovation policy. *Papers in Regional Science*, *99*(1), 25-54. DOI: 10.1111/pirs.12476.

Cameron, A. C. ve Trivedi, P. K. (1986). Econometric models based on count data: Comparisons and applications of some estimators and tests. *Journal of Applied Econometrics, 1*(1), 29-53. DOI: 10.1002/jae.3950010104.

Capaldo, A. (2007). Network structure and innovation: The leveraging of a dual network as a distinctive relational capability. *Strategic Management Journal*, *28*(6), 585-608. DOI: 10.1002/smj.621.

Cohen, W. M. ve Levinthal, D. A. (1990). Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, *35*(1), 128-152. DOI: 10.2307/2393553.

Cummings, J. N. ve Kiesler, S. (2005). Collaborative research across disciplinary and organizational boundaries. *Social Studies of Science*, *35*(5), 703-722. DOI: 10.1177/0306312705055535.

Cummings, J. N. ve Kiesler, S. (2007). Coordination costs and project outcomes in multi-university collaborations. *Research Policy*, *36*(10), 1620-1634. DOI: 10.1016/j.respol.2007.09.001.

Dahlander, L. ve Gann, D. M. (2010). How open is innovation? Research Policy, 39(6), 699-709. DOI: 10.1016/j.respol.2010.01.013.

De Noni, I., Orsi, L. ve Belussi, F. (2018). The role of collaborative networks in supporting the innovation performances of lagging-behind European regions. *Research Policy*, *47*(1), 1-13. DOI: 10.1016/j.respol.2017.09.006.

European Commission. (2026a). CORDIS Horizon 2020 projects [Veri Seti]. Publications Office of the European Union. DOI: 10.2906/112117098108/12.

European Commission. (2026b). CORDIS EU research projects under Horizon Europe 2021-2027 [Veri Seti]. Publications Office of the European Union. DOI: 10.2906/112117098108/20.

Faems, D., Van Looy, B. ve Debackere, K. (2005). Interorganizational collaboration and innovation: Toward a portfolio approach. *Journal of Product Innovation Management*, *22*(3), 238-250. DOI: 10.1111/j.0737-6782.2005.00120.x.

Fuller, A., Fan, Z., Day, C. ve Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, *8*, 108952-108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.

Gilsing, V., Nooteboom, B., Vanhaverbeke, W., Duysters, G. ve van den Oord, A. (2008). Network embeddedness and the exploration of novel technologies: Technological distance, betweenness centrality and density. *Research Policy*, *37*(10), 1717-1731. DOI: 10.1016/j.respol.2008.08.010.

Hagedoorn, J., Lokshin, B. ve Zobel, A.-K. (2018). Partner type diversity in alliance portfolios: Multiple dimensions, boundary conditions and firm innovation performance. *Journal of Management Studies*, *55*(5), 809-836. DOI: 10.1111/joms.12326.

Hoang, H. ve Rothaermel, F. T. (2005). The effect of general and partner-specific alliance experience on joint R&D project performance. *Academy of Management Journal*, *48*(2), 332-345. DOI: 10.5465/amj.2005.16928417.

Holloway, S. S. ve Parmigiani, A. (2016). Friends and profits don't mix: The performance implications of repeated partnerships. *Academy of Management Journal*, *59*(2), 460-478. DOI: 10.5465/amj.2013.0581.

Holopainen, M., Saunila, M., Rantala, T. ve Ukko, J. (2024). Digital twins' implications for innovation. *Technology Analysis & Strategic Management*, *36*(8), 1779-1791. DOI: 10.1080/09537325.2022.2115881.

Hosmer, D. W., Jr., Lemeshow, S. ve Sturdivant, R. X. (2013). Applied logistic regression (3. Baskı). John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9781118548387.

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. ve Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *29*, 36-52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

Katila, R. ve Ahuja, G. (2002). Something old, something new: A longitudinal study of search behavior and new product introduction. *Academy of Management Journal*, *45*(6), 1183-1194. DOI: 10.5465/3069433.

Kok, H., Faems, D. ve de Faria, P. (2020). Ties that matter: The impact of alliance partner knowledge recombination novelty on knowledge utilization in R&D alliances. *Research Policy*, *49*(7), 104011. DOI: 10.1016/j.respol.2020.104011.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. ve Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(11), 1016-1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

Lattanzi, L., Raffaeli, R., Peruzzini, M. ve Pellicciari, M. (2021). Digital twin for smart manufacturing: A review of concepts towards a practical industrial implementation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *34*(6), 567-597. DOI: 10.1080/0951192X.2021.1911003.

Laursen, K. ve Salter, A. (2006). Open for innovation: The role of openness in explaining innovation performance among U.K. manufacturing firms. *Strategic Management Journal*, *27*(2), 131-150. DOI: 10.1002/smj.507.

Lechevalier, S., Ikeda, Y. ve Nishimura, J. (2010). The effect of participation in government consortia on the R&D productivity of firms: A case study of robot technology in Japan. *Economics of Innovation and New Technology*, *19*(8), 669-692. DOI: 10.1080/10438590902872903.

Lungeanu, A. ve Contractor, N. S. (2015). The effects of diversity and network ties on innovations: The emergence of a new scientific field. *American Behavioral Scientist*, *59*(5), 548-564. DOI: 10.1177/0002764214556804.

MacKinnon, J. G. ve White, H. (1985). Some heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties. *Journal of Econometrics, 29*(3), 305-325. DOI: 10.1016/0304-4076(85)90158-7.

Mann, H. B. ve Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics, 18*(1), 50-60. DOI: 10.1214/aoms/1177730491.

Negri, E., Fumagalli, L. ve Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, *11*, 939-948. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198.

Nieto, M. J. ve Santamaría, L. (2007). The importance of diverse collaborative networks for the novelty of product innovation. *Technovation*, *27*(6-7), 367-377. DOI: 10.1016/j.technovation.2006.10.001.

Nishimura, J. ve Okamuro, H. (2018). Internal and external discipline: The effect of project leadership and government monitoring on the performance of publicly funded R&D consortia. *Research Policy*, *47*(5), 840-853. DOI: 10.1016/j.respol.2018.02.007.

Nooteboom, B., Van Haverbeke, W., Duysters, G., Gilsing, V. ve van den Oord, A. (2007). Optimal cognitive distance and absorptive capacity. *Research Policy*, *36*(7), 1016-1034. DOI: 10.1016/j.respol.2007.04.003.

O'Brien, R. M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & Quantity, 41*(5), 673-690. DOI: 10.1007/s11135-006-9018-6.

Oerlemans, L. A. G., Knoben, J. ve Pretorius, M. W. (2013). Alliance portfolio diversity, radical and incremental innovation: The moderating role of technology management. *Technovation*, *33*(6-7), 234-246. DOI: 10.1016/j.technovation.2013.02.004.

Phelps, C. C. (2010). A longitudinal study of the influence of alliance network structure and composition on firm exploratory innovation. *Academy of Management Journal*, *53*(4), 890-913. DOI: 10.5465/amj.2010.52814627.

Pisacane, L. ve Tagliacozzo, S. (2023). A relations-based evaluation framework to support collaborative research and innovation (R&I) networks. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, *36*(4), 800-821. DOI: 10.1080/13511610.2023.2191827.

Powell, W. W., Koput, K. W. ve Smith-Doerr, L. (1996). Interorganizational collaboration and the locus of innovation: Networks of learning in biotechnology. *Administrative Science Quarterly*, *41*(1), 116-145. DOI: 10.2307/2393988.

Protogerou, A., Caloghirou, Y. ve Siokas, E. (2010). Policy-driven collaborative research networks in Europe. *Economics of Innovation and New Technology*, *19*(4), 349-372. DOI: 10.1080/10438590902833665.

Qi, Q. ve Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, *6*, 3585-3593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.

Rasheed, A., San, O. ve Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, *8*, 21980-22012. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.

Rost, K. (2011). The strength of strong ties in the creation of innovation. *Research Policy*, *40*(4), 588-604. DOI: 10.1016/j.respol.2010.12.001.

Sampson, R. C. (2007). R&D alliances and firm performance: The impact of technological diversity and alliance organization on innovation. *Academy of Management Journal*, *50*(2), 364-386. DOI: 10.5465/amj.2007.24634443.

Schilling, M. A. ve Phelps, C. C. (2007). Interfirm collaboration networks: The impact of large-scale network structure on firm innovation. *Management Science*, *53*(7), 1113-1126. DOI: 10.1287/mnsc.1060.0624.

Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. ve Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, *130*, 103469. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103469.

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal, 27*(3), 379-423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology, 15*(1), 72-101. DOI: 10.2307/1412159.

Stone, M. (1974). Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 36*(2), 111-133. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x.

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. ve Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *94*(9-12), 3563-3576. DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.

Tao, F., Qi, Q., Wang, L. ve Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, *5*(4), 653-661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.

Tóth, G., Juhász, S., Elekes, Z. ve Lengyel, B. (2021). Repeated collaboration of inventors across European regions. *European Planning Studies*, *29*(12), 2252-2272. DOI: 10.1080/09654313.2021.1914555.

Uhlemann, T. H.-J., Lehmann, C. ve Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, *61*, 335-340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.

Welch, B. L. (1947). The generalization of 'Student's' problem when several different population variances are involved. *Biometrika, 34*(1-2), 28-35. DOI: 10.1093/biomet/34.1-2.28.

Wilks, S. S. (1938). The large-sample distribution of the likelihood ratio for testing composite hypotheses. *The Annals of Mathematical Statistics, 9*(1), 60-62. DOI: 10.1214/aoms/1177732360.

Yoon, W., Lee, D. Y. ve Song, J. (2015). Alliance network size, partner diversity, and knowledge creation in small biotech firms. *Journal of Management & Organization*, *21*(5), 614-626. DOI: 10.1017/jmo.2015.16.

4. BÖLÜM

DÖNÜŞÜM SÜRECİNDE NAKDÎ VE AYNÎ SOSYAL YARDIMLARIN YENİDEN TASARIMI: METAVERSE TABANLI HİZMET ÜRETİMİ VE İNOVASYON YÖNETİMİ PERSPEKTİFİ

Gökhan ÇAYBAŞI,[1]

Giriş

Metin Toplumların ortaya çıkışlarıyla bireyler arasında yardımlaşma ve dayanışma faaliyetleri sosyal yaşam alanını oluşturan bir unsur olarak doğmuştur. Sosyal yardım uygulamaları, tarih boyunca resmi olmayan yardımlaşma ve dayanışma mekanizmalarından kamu politikalarına doğru dönüşerek modern devlet yapısının önemli yapı taşlarından birisi halini almıştır (Toper vd., 2023:125-130). Bununla birlikte refah devleti yapısına geçiş ile dezavantajlı birlerin destek görmesi amacıyla ayni ve nakdi yardımlar düzenli bir yapıya evrilmiştir. (Uzun, 2024:267). Son zamanlarda artan nüfus, dünya genelinde yaşanan göç hareketleri, doğal afetler ve ekonomik dalgalanmalar sosyal yardımlara olan ihtiyacı artırmıştır. Diğer yandan kamu kaynaklarının sınırlı durumu da halihazırda bulunan sosyal yardım sistemlerinin etkinliğini tartışmalı hale getirmiştir (Özdemir ve Engin 2024; Şeker 2023). Bu kapsamda, sosyal yardım süreçlerinde hak sahipliğinin doğru belirlenmesi, tekrarlı yardımların önlenmesi, kıt kaynakların adil dağıtımı ve özellikle süreçlerin şeffaf bir şekilde yürütülmesi temel sorun alanları olarak öne çıkmaktadır (Çınar ve Özaydın 2025:1235; Atanır, 2024:146). Dijital dönüşüm süreci, kamu hizmetlerinin sunumunda köklü gelişmelere yol açmış (Uslu 2023:20) ve sosyal yardım sistemlerinin de bu dönüşümden etkilenmesine neden olmuştur (Schiffhauer ve Seelmeyer 2021:133). Ülkemizde kullanılmakta olan e-Devlet ve bağlı uygulamalarıyla başlayan dijitalleşme süreci, günümüzde daha ileri teknolojiler ve entegrasyonlar ile desteklenerek entegre izlenebilir sistemlerin geliştirilmesinin önünü açmaktadır. Metaverse bu noktada, sadece bir sanal gerçeklik ortamı sunmanın ötesinde, birçok paydaşın etkileşimini farklı teknolojiler ile

[1] Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Hukuk Bölümü, ORCID: 0000-0002-5068-9841.

bütünleştirerek sağlayan dijital bir ekosistem olarak karşımıza çıkmaktadır (Schöbel ve Leimeister 2023:11). Metaverse, sosyal yardımlar yardım süreçlerinde yardımın kendisini ikame eden bir yapı değildir. Burada görevi yardım süreçlerinin planlanması, yürütülmesi ve denetlenmesini daha etkin hale getiren bir yönetim aracı olarak değerlendirilmektedir (Varriale vd., 2025:951). Özellikle blokzincir teknolojisinin sunduğu kurcalamaya karşı korunaklı defter yapısı ve dijital ikiz yaklaşımının sağladığı gerçek zamanlı izleme imkânı ile birlikte ele alındığında, sosyal yardım süreçlerinde şeffaflık, hesap verebilirlik ve güvenin artırılması açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır (Jin vd., 2025; Colvin vd.,; Xu vd. 2025).

Bu çalışmanın amacı, dijital dönüşüm süreci bağlamında nakdî ve aynî sosyal yardımların mevcut sorun alanlarını ortaya koymak ve metaverse teknolojisinin bu süreçlerde nasıl bir rol oynayabileceğini kavramsal ve uygulamaya yönelik bir model çerçevesinde incelemektir. Bu kapsamda çalışma, metaverse tabanlı bir sosyal yardım dağıtım modeli önererek literatüre katkı sunmayı ve karar vericiler için yol gösterici bir çerçeve geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu doğrultuda çalışmanın diğer bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde sosyal yardım sistemlerinin kavramsal çerçevesi ele alınarak nakdî ve aynî yardımlar ile bu alandaki temel sorunlar incelenmiştir. Üçüncü bölümde metaverse kavramı ve bu yapıyla ilişkili dijital dönüşüm altyapısını oluşturan teknolojiler açıklanmıştır. Dördüncü bölümde metaverse teknolojisinin sosyal yardım süreçlerinde potansiyel kullanım alanları değerlendirilmiştir. Çalışmanın devamında, metaverse tabanlı olarak önerilen sosyal yardım modeli ve modelin süreç akışı sunulmaktadır. Ardından, önerilen yapının denetim mekanizmaları ve kamu güveni üzerindeki olası etkileri tartışılmakta, modelin sınırlılıkları ve potansiyel riskleri değerlendirilmektedir. Son olarak, elde edilen değerlendirmeler doğrultusunda sonuç ve politika önerilerine yer verilmektedir.

KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Sosyal Yardımın Kavramsal Çerçevesi ve Nakdî-Aynî Yardımlar

Sosyal yardım kavramı genel olarak bireylerin asgari düzeyde yaşam standartlarını idame ettirebilmeleri amacıyla kamu veya sivil toplum kuruluşları tarafından sağlanan destekleri ifade eder. Refah devletinin temel unsurlarından birisi olan sosyal yardımlar gelir yetersizliği, işsizlik ve afetler

gibi meydana gelebilecek riskler karşısında devleti var eden bireyleri korumayı amaç edinmektedir. Bu doğrultuda sosyal yardımlar temel olarak ayni ve nakdi yardımlar olmak üzere iki başlıkta incelenebilir. Diğer yandan bu kavramların anlaşılabilmesi için sosyal yardım kavramının tarihi sürecinin ve geçirdiği dönüşümlerin ortaya konulması önem arz etmektedir. Bu bölümde sosyal yardım kavramının kavramsal çerçevesi ve tarihi gelişim süreci ele alınmıştır.

Sosyal Yardım Kavramı ve Kapsamı

Sosyal yardım, bireylerin temel sosyal haklarını asgari düzeyde güvence altına almak amacıyla, düşük gelirli haneler, engelli vatandaşlar gibi gruplar için sağlanan mali destek türünü ifa eden; refah devletinin son güvenlik ağıdır (Bahle ve Wendt 2021; Kropyvnytskyi 2024). Sosyal yardım ve sosyal hizmetler, Türk sosyal güvenlik sisteminin temel düzeyde tamamlayıcı bileşenlerini ifade etmektedir. Sosyal yardımlar geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda boşlukları doldurarak bireylere destek sağlayan mekanizmalardır (Şenocak, 2009:410). Sosyal yardım, refah devletinde yoksullukla mücadele ve sosyal içerme açısından merkezi bir öneme sahip olup sosyal vatandaşlık haklarının hayati bir bileşenidir. Diğer yandan modern devletin gelişiminin bir parçası olarak ortaya çıkmıştır (Wang, J., ve Van Vliet; Leisering 2019).

Sosyal Yardımların Tarihsel Gelişimi

Sosyal yardımların tarih içindeki gelişimi ve değişimi, toplumların dayanışma anlayışlarıyla paralel olarak dönüşmüştür. Erken dönemlerde yardımlar, daha çok aile içi dayanışma, komşuluk ilişkileri ve dini temelli uygulamalar üzerinden yürütülmüştür (Okur Çakıcı, ve Çakıcı 2020:405-407). Bu yapı içerisinde vakıf sistemleri diğer hayır kurumları ihtiyaç sahiplerine sağlanan destekte kritik bir rol oynamıştır (Güler ve Ayata 2023:428). Dünyada yaşanan sanayileşmenin getirdiği sosyal riskler, sosyal yardım süreçlerinin kurumsal bir yapıya bürünmesini zorunlu kılarak refah devleti anlayışını ortaya koymuştur (Beken 2020:134). Bu dönem içerisinde devletler, sosyal güvenlik ve yardım sistemlerini daha düzenli bir yapıya kavuşturarak daha çok bireye ulaşmayı amaç edinmiştir. Son dönemlerde ise sosyal yardım sistemleri, sürdürülebilir politikalar doğrultusunda daha çok hedef ve veri odaklı hale gelmiştir. Günümüzde ise sosyal yardım sistemleri,

daha hedef odaklı, veri temelli ve sürdürülebilir politikalar doğrultusunda yeniden şekillenmektedir (Yolcuoğlu ve Özırmak 2025:77)

Özellikle dijitalleşme sürecinin sağlayacağı bir dizi fayda ile yardım dağıtımında şeffaflık ve izlenebilirlik kavramları ön plana çıkmıştır. Bilişim teknolojilerinin etkin ve verimli kullanımı sosyal yardım süreçlerinin daha etkin ve adil şekilde yönetilmesini mümkün kılar. Bu dönüşüm süreci, sosyal yardım sistemlerinin hem erişilebilirliğini artırıp hem de süreçler içerisinde yaşanabilecek suistimal risklerini azaltmaktadır.

Nakdî Sosyal Yardımlar

Geçim güçlüğü geçen kesimler parasal olarak yapılan yardım türünü ifade etmektedir. Bu yardım türü dönemsel olarak toplum dinamiklerine bağlı olarak farklı şekillerde sunulmaktadır. Bu yardımın başlıcaları; fakirlik maaşı, eğitim için verilen burslar ve afet yardımı ödemeleri olarak sayılabilir. Nakdî sosyal yardımların literatürde öne çıkan en önemli avantajları esneklik, maliyet etkinliği ve hanehalkı refahını artırma kapasitesidir. UNICEF (2016), raporunda nakit transferlerin tüketimi artırarak yoksulluğu azalttığı ifade edilmektedir (Tirivayi vd. 2021:1;UNICEF, 2026) Benzer şekilde World Bank ise nakdi yardımların yararlanıcılara seçim özgürlüğü sağlayarak bireysel güçlenmeyi destekleyen, insan onurunu koruyan, beslenme çeşitliliğini ve gıda güvenliğini artıran, yerel ekonomiyi canlandıran özellikleri nedeniyle daha verimli bir araç olduğunu belirtmektedir (WFP 2020:1-9).

Aynî Sosyal Yardımlar

Ayni sosyal yardımlar, nakit yardımlar dışında kalan; gıda, giyinme, barınma, eğitim destekleri, ısınma yardımları gibi sağlanan mal ve hizmet yardımlarını ifade etmektedir. Ayni yardımlar, faydaların gerçekten hedeflenen ihtiyaç sahiplerine ulaşmasını sağlayarak hedef-sonuç doğruluğunu artırır (Lockwood ve Lieber 2013:1). Diğer yandan bağışçı davranışları da ayni yardımları destekler niteliktedir; nitekim Liscow ve Pershing tarafından yapılan çalışmada, katılımcıların %72'sinin nakit yardımların uygunsuz kullanılabileceği endişesiyle ayni bağışı tercih ettiği tespit edilmiştir (Liscow ve Pershing, 2022: 315). Bununla birlikte, ayni yardımların en önemli dezavantajı; yüksek idari maliyetler ve kaynakların etkin olmayan şekilde dağıtılması nedeniyle hem alıcıların hem de bağışçıların elde ettiği faydanın azalabilmesidir (Bendick, 1978: 1).

Karşılaştırmalı Değerlendirme

Çalışmamızın önceki bölümünde tanımlandığı üzere; ayni ve nakdi sosyal yardımların, sosyal politika aracı bakımından farklı birçok avantaj ve sınırlandırmaları bulunmaktadır. Nakdi yardımlarda bireylerin anlık olarak en ihtiyaçlı oldukları şeyi karşılamaya yönelik bir çözüm sağlamaktadır. Diğer yandan nakdi yardımlarda ise belirli mal ve hizmetin doğrudan sunulması daha kontrollü ve sonuç odaklılığı temin etme özelliği sunmaktadır. Nakit yardımının para biriminde ödenmesinin, yararlanıcılar için önemli bir avantaj sağlayabileceğini, eşitsizliği, riski ve kırılganlığı azaltmaya katkıda bulunabileceğini, tüketim alışkanlıklarını yerel satın almaya yönlendirebileceğini, yerel işletmeleri destekleyerek yerel ekonomiyi canlandırabileceğini göstermektedir (Belmonte vd. 2021:14). Bununla birlikte nakdi yardımların amaçları dışında kullanım durumları da yardım hedeflerine ulaşım noktasında sapmalara neden olabilmektedir. Öte yandan ayni yardımlar belirli bir amaca yönelik gerçekleştirilmesi bakımından yüksek doğruluk sağlayabilmektedir. Ancak bu yardım türünde yüksek lojistik maliyetler ve kaynakların etkin kullanımı gibi sorunsallara neden olabilmektedir (Alderman vd. 2017:1). Dolayısıyla ayni ve nakdi yardım türlerinin her biri kendi içinde bir takım avantajlar ile dezavantajlar barındırmaktadır.

Temel Sorunlar

Yardım süreçlerinde ihtiyaç sahibinin doğru ve tutarlı şekilde belirlenerek önceliklendirilmesi temel bir sorunsal olarak karşımıza çıkmaktadır (Baum vd., 2016: xvii). Uygulamada ihtiyaç sahiplerinin hızlı ve etkin şekilde belirlenmesine yönelik bütünleşik bir sistem yer almamaktadır. Bu durum, hak sahibi bireylerin atalet, bilgi eksikliği, damgalanma endişesi ve uyum sorunları gibi nedenlerle sosyal yardım programlarına çoğu zaman katılım göstermelerini engellemektedir (Ribar, 2014:1). İhtiyaçlı kişilere yardım ulaştırılmasında diğer bir sorun ise mükerrer (tekrarlı) yardım sorunudur (Çınar ve Özaydın, 2025:1235); bu, kaynakların etkin ve verimli kullanımının önünde büyük bir engel oluşturmaktadır. Bu sorunlar sadece yararlanıcıların tespitinde değil, aynı zamanda şeffaflık (Kaje, 2024:787) ve denetim mekanizmaları ile kurumsal ve operasyonel süreçlerde de aksamalara yol açmaktadır.

Mevcut sistemlerin parçalı bilgi altyapısı, veri entegrasyonu eksiklikleri, izleme ve koordinasyon sorunları bu aksaklıkları derinleştirmekte; süreçlerin etkin yönetimini güçleştirmektedir (World Bank, 2025). Bu durum, sosyal yardım süreçlerinde dijital teknolojilerin sunduğu imkanların kullanılmasını ve entegre bir dijital dönüşümün gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Veri paylaşımı, süreç takibi, şeffaflık ve koordinasyon gibi alanlarda dijital çözümler, kaynakların etkin kullanımını artırmak ve yardım süreçlerini daha hızlı, doğru ve güvenilir hâle getirmek için kritik öneme sahiptir (Kshetri, 2017:1711).

METAVERSE VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM ALTYAPISI

Metaverse Kavramı

Kullanıcıların VR ve AR teknolojilerini kullanarak, oyun, sosyal ağ, eğitim, sağlık ve pazarlama gibi farklı alanlarda 3 boyutlu ortamlar oluşturmasına ve bu ortamları keşfine olanak tanıyan sanal gerçeklik simülasyon evrenidir (Farooq vd. 2023:1; Johri vd. 2024:1; Jain 2023:37).

Metaverse sanal ve gerçek dünyanın birleşmesini sürükleyici şekilde temsil ederek sosyal etkileşim kavramını yeniden yazmaktadır. Bu teknoloji sadece bir sanal alanı ifade etmeyip birbirleriyle bağlantılı ekosistemler bütünüdür (Pradeep vd. 2024:67)

İlişkili Teknolojiler

Metaverse kavramının ilişki içinde bulunduğu teknolojiler aşağıda kısaca tanıtılmıştır.

Blokzincir: Blokzincir, 2008 yılında yayınlanan bir makale ile adını duyurmuş (Nakamoto 2008:1); merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymadan güvenli ve şeffaf şekilde eşler arası işlemleri mümkün kılan dağıtılmış bir defter teknolojisidir (Nidhieaswar 2023:4864). Blockchain, Metaverse'de kullanıcıların dijital varlıklarını güvenli ve merkeziyetsiz şekilde yönetmelerini sağlarken, kimlik doğrulama ve adil yönetişim imkanı sağlamaktadır (Pandey vd. 2025:4).

Dijital ikiz: Dijital ikiz, gerçek dünyadaki bir nesne ya da sistemin; simülasyon, makine öğrenimi ve mantık yoluyla karar verme amacıyla kullanılan birebir dijital kopyası olan sanal bir versiyonunu temsil eder (Saravanan vd. 2022:742). Metaverse ile dijital ikizin birlikte kullanımıyla

fiziksel dünya ve sanal dünya arasında bağlantı kurulması sorunsalları giderilebilir (Elias vd. 2023:1)

Büyük veri : Büyük veri, geleneksel işleme yöntemleri için çok karmaşık ve hızlı üretilmiş, büyük hacimli yapılandırılmış ve yapılandırılmamış verileri ifade eder. Metaverse'deki büyük veri, yenilikçi uygulamalar ve yapay zeka destekli şekilde iş değeri yaratmak için sanal ve artırılmış gerçeklik ortamlarından elde edilen devasa veri miktarlarından yararlanmaktadır (Schmitt 2023:1).

METAVERSE'İN SOSYAL YARDIMLARDA KULLANIMI

Metaverse sanal bir dünya olmakla kalmayıp, erişilebilirlik ve insani değerler açısından gerçek dünyaya önemli katkılar sağlamaktadır (Piñeiro-Chousa 2025:198). Coğrafi engelleri ortadan kaldırarak düşük maliyetli şekilde etkinlikleri sanal ortama taşıyabilir (Duan vd., 2021: 154). Bu doğrultuda metaverse, sosyal yardım sistemlerinin dijitalleşmesi ve daha şeffaf hale getirilmesinde önemli bir çözüm aracı olarak ön plana çıkmaktadır.

Başvuru ve Hak Sahipliği

Metaverse dünyası, sosyal yardım başvuru takip ve eşleşme gibi süreçlerin dijitalleşerek daha erişilebilir ve kapsayıcı hale gelmesine olanak tanımaktadır. Süreçlerde yer alan ilgililer fiziki olarak kurumlara gitmeden başvurularını yapabilir ve başvuru süreçlerini metaverse ortamından anlık olarak takip edebilir (Wang vd. 2022:21). Ayrıca blokzincirle desteklenen dijital kimlik doğrulama sistemleri hak sahipliği konusunu daha şeffaf ve izlenebilir hale getirebilir. Bu durum özellikle dezavantajlı grupların sisteme erişimini sağlayarak daha adil sistemler kurulmasına katkı sağlamaktadır.

Nakdî Yardımların Yönetimi

Metaverse ve blokzincir temelli ekosistemlerin birleştirilmesi dağıtım ve izleme süreçlerinin daha hızlı ve güvenli şekilde yürütülmesine olanak sağlar. Özellikle blokzincir temelli güvenli altyapıların sistemle entegre eden metaverse uygulamaları sayesinde ödemelerin hiçbir aracıya gerek kalmaksızın ilgililerin cüzdanlarına doğrudan aktarılması mümkün hale gelir (Umar 2022:160). Bu sayede aracı kurumlara olan bağımlılık azalmakta ve işlem maliyetleri düşmektedir. Diğer yandan, akıllı sözleşmeler aracılığıyla önceden tanımlanan şartların otomatik olarak kontrol edilmesi, yardım

dağıtım süreçlerinde insan kaynaklı hataları ve gecikmeleri en aza indirmektedir (Shahrukh ve Mansoor 2025:993).

Aynî Yardımların Lojistiği

Aynî yardımların planlanması, dağıtımı ve izlenmesi süreçlerinde metaverse teknolojisi önemli avantajlar sunmaktadır. Sanal ortamda oluşturulan dijital ikizler (digital twins) sayesinde depo, dağıtım merkezi ve lojistik ağları simüle edilebilmekte, bu da kaynakların daha etkin planlanmasını sağlamaktadır (Lee vd., 2021: 5). Metaverse tabanlı sistemler, yardım malzemelerinin hangi bölgelerde yoğunlaştığını ve hangi noktalarda eksiklik bulunduğunu görselleştirerek karar vericilere gerçek zamanlı veri sunmaktadır. Bu durum, özellikle afet sonrası süreçlerde lojistik koordinasyonun daha etkin yürütülmesine katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, blokzincir entegrasyonu ile aynî yardımların tedarik zinciri boyunca izlenebilirliği sağlanmakta, ürünlerin kaynağından ihtiyaç sahibine ulaşana kadar tüm süreç şeffaf hale getirilmektedir (Kshetri, 2021: 12). Böylece hem kaynak israfı azaltılmakta hem de yardım süreçlerine duyulan güven artırılmaktadır.

Suistimalin Önlenmesi

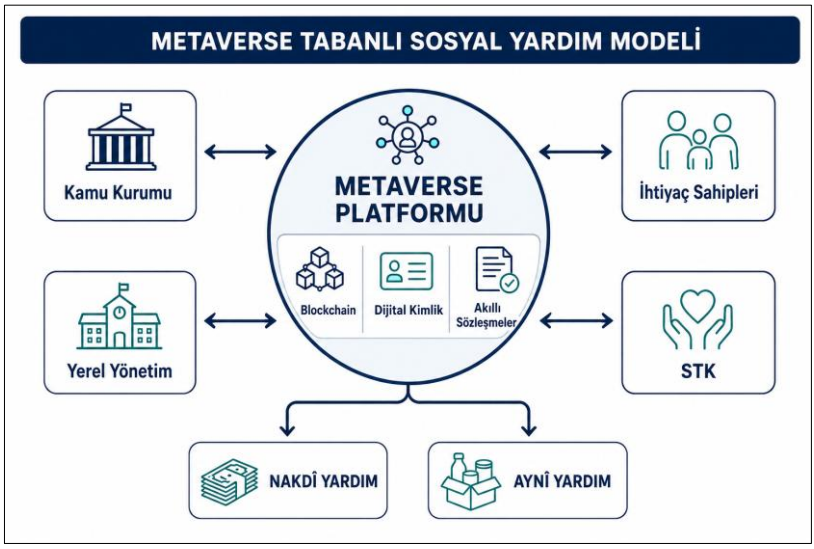
Sosyal yardım sistemlerinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri suistimal ve kötüye kullanımdır. Metaverse ve blokzincir teknolojilerinin birlikte kullanımı, bu sorunun önlenmesinde etkili bir çözüm sunmaktadır. Blokzincirin değiştirilemez kayıt yapısı sayesinde gerçekleştirilen tüm işlemler şeffaf ve denetlenebilir hale gelmektedir (Casino vd., 2019: 8).

Metaverse ortamında gerçekleştirilen işlemlerin kayıt altına alınması ve dijital kimlik doğrulama sistemleri ile desteklenmesi, sahte başvuru ve mükerrer yardım gibi sorunların önüne geçilmesine yardımcı olmaktadır (Wang vd., 2022: 26). Ayrıca, yapay zekâ destekli analiz sistemleri ile anormal davranışlar tespit edilerek olası suistimaller erken aşamada belirlenebilmektedir.

Bu teknolojik yapı hem kamu kurumlarının hem de bağışçıların sisteme olan güvenini artırmakta ve sosyal yardım süreçlerinin sürdürülebilirliğini desteklemektedir. Böylece daha adil, şeffaf ve hesap verebilir bir sosyal yardım ekosistemi oluşturulması mümkün hale gelmektedir.

METAVERSE TABANLI SOSYAL YARDIM MODELİ

Önerilen Metaverse Tabanlı Sosyal Yardım Modeli; kamu kurumları, yerel yönetimler, STK'lar ve ihtiyaç sahiplerini ortak bir dijital platformda buluşturmaktadır. Modelde blockchain, dijital kimlik ve akıllı sözleşmelerden yararlanılarak nakdî ve aynî yardım süreçlerinin şeffaf, izlenebilir ve güvenilir biçimde yürütülmesi amaçlanmaktadır. Böylece paydaşlar arasındaki koordinasyonun güçlendirilmesi ve yardımların ihtiyaç sahiplerine daha etkin şekilde ulaştırılması hedeflenmektedir.



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Şekil 1. Önerilen sosyal yardım modeli

Sistem Aktörleri

Modelde yer alan tüm aktörlerin birbirleriyle etkileşime girdiği **Metaverse Platformu,** veri yönetimi, doğrulama ve şeffaflığa ilişkin işlem süreçlerinin yürütüldüğü temel yapıyı oluşturmaktadır**. Kamu kurumu**, platform üzerindeki politikaları belirlemekte, yardım alacak kişilere ilişkin kriterleri sağlayarak düzenleyici bir görev üstlenmektedir. **Sivil toplum kuruluşları** (STK'lar), yardımların toplanması ve dağıtılması gibi kritik süreçlerde aktif saha görevlerini yürütmektedir. **Bağışçı**, aynî veya nakdî bağışlarını platform üzerinden sağlayan aktörü; hak sahibi ise belirli bir ihtiyaç puanı doğrultusunda yardımlardan faydalanacak kişileri temsil etmektedir. **Yerel**

yönetimler de sahadaki ihtiyaç sahiplerinin belirlenmesi, yerel verilerin sağlanması ve yardım dağıtım süreçlerinin organize edilmesi görevlerini yerine getirmektedir.

Süreç Akışı

Metaverse tabanlı sosyal yardım modelinde yürütülen süreç klasik yardım benzer yakınlıkta ilerlemekle birlikte dijitalleşmenin sağladığı şeffaflık ve izlenebilirlik sayesinde yapıyı daha verimli kılmaktadır. Süreç; başvuru, değerlendirme, tahsis, dağıtım ve denetim gibi temel aşamalardan oluşmaktadır.

Başvuru Aşaması: Yardıma ihtiyacı olan hak sahipleri platform üzerinden dijital kimlikleri ile giriş yaparak başvurularını gerçekleştirirler. Bu sürecin yönetim ve denetim gibi aşamaları yerel yönetim ve STK'lar ile sağlanabilir.

Değerlendirme Aşaması: Hak sahiplerinin yaptıkları başvurular daha önce belirlenmiş ve müdahale bulunmayan bir takım kriter dahilinde bir ihtiyaç puanına dönüştürülür. Puan sıralamasına göre en çok ihtiyaçlı olan kişiye en çok ihtiyacı olan yardım bu değerlendirmeden geçerek eşleştirilir. Sisteme kamu kurumlarından sağlanacak veri akışları ile daha tutarlı ve daha ihtiyaçlı kişilerin belirlenmesi sağlanabilir.

Tahsis Aşaması: Kaynakların kıt ihtiyaçlıların fazla olması sistemde kaynak tahsisi konusunu gereklilik noktasında ön plana çıkartmaktadır. Sistemin dijitalleşme ve izlenebilirlik yapısı sayesinde daha çok bağışçı güveni sağlanarak sisteme kaynak tahsis amaçlanmaktadır.

Dağıtım Aşaması: Yardımlar metaverse platformu üzerinden ayni ve nakdi olarak dağıtılır. Nakdi yardımlar doğrudan hesap cüzdanlarına, ayni yardımlar ise aracıyı ortadan kaldırarak anlaşma sağlanan firmalardan hak sahibinin doğrudan teslim alması ile sağlanmaktadır. Aracısız ayni yardımlar sayesinde lojistik maliyetler ortadan kaldırılmakta. Kırılgan grupların kendine uygun bir ihtiyacı almaları sağlanmaktadır. Örneğin; kıyafet bağışı alan bir hak sahibi ilgili firmadan kendi beğendiği bir ürünü seçerek alabilir.

Denetim Aşaması: Sürecin tüm aşamaları bağışçılar tarafından izlendiğinden denetim yetkisi bir kurumda değil tüm bağışçılardadır. Yani bağış yapan ilgili sistemdeki tüm aşamaları izleyerek yaptığı bağışın en başından hak sahibine teslimine kadar geçen tüm süreyi değişmez blokzincir ağında izleyebilir.

Şeffaflık ve İzlenebilirlik

Metaverse tabanlı yardım modeli, blokzincir teknolojisi entegrasyonu sayesinde yüksek düzeyde şeffaflık ve izlenebilirlik sağlamaktadır. Tüm başvuru, değerlendirme ve dağıtım süreçleri değiştirilemez blokzincir ağına yazılır. Bu kayıtlar değiştirilemez yapıda olduğundan, sistemde geriye dönük manipülasyon riski minimize edilir. Bağışçılar yaptıkları yardımların hangi aşamalardan geçtiğini ve kimlere ulaştığını izleyebilirken kamu kurumları ve STK'lar da sistemdeki tüm işlemleri eş zamanlı olarak gözlemleyebilir. Böylece yapı, yardım süreçlerinde şeffaflık, güven ve hesap verebilirlik ilkelerini güçlendirir.

Modelin Katkısı

Önerilen model, geleneksel sosyal yardım sistemlerine kıyasla çeşitli yenilikler sunmaktadır. Blockchain teknolojisine dayanan **merkezi olmayan yapı** sayesinde veriler tek bir otoritenin kontrolünde tutulmamakta ve böylece sisteme duyulan güven artırılmaktadır. **Gerçek zamanlı izleme** özelliği, sosyal yardım süreçlerinin anlık olarak takip edilebilmesine imkân sağlamaktadır. Modelin sunduğu **şeffaflık**, bağışçıların, STK'ların ve kamu kurumlarının yardım süreçlerini izleyebilmesini mümkün kılmaktadır. **Dijital kimlik entegrasyonu** sayesinde hak sahiplerinin kimlik ve uygunluk bilgilerinin daha güvenilir biçimde doğrulanması amaçlanmaktadır. Ayrıca **Metaverse etkileşimi**, yardım süreçlerini yalnızca teknik açıdan değil, kullanıcı deneyimi bakımından da daha etkileşimli hâle getirmektedir.

DENETİM VE KAMU GÜVENİ

Metaverse tabanlı sistem, denetim mekanizmalarını dijitalleştirerek kamu güvenini artırmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda modelin denetim ve güven açısından sunduğu temel özellikler aşağıda açıklanmaktadır:

Dijital Denetim: Tüm işlemler blockchain üzerinde kayıtlı olduğu için denetim süreçleri manuel denetimden otomatik ve sürekli hale gelir. Yani sistem sürekli bir denetim içerisinde kendi kendine güveni tesis eder.

Hesap Verebilirlik: Sistemde gerçekleştirilen her işlem izlenebilir olduğundan, aktörlerin sorumluluğu artar. Kamu kurumları, STK'lar ve diğer paydaşlar yaptıkları işlemlerden doğrudan sorumlu hale gelir. Sistemde hesap verebilirlik konusunda en önemli paydaş sürekli değişen bir grupta yer alan bağışçılardır.

Güven İnşası: Şeffaf ve izlenebilir yapı sayesinde hem yardım alanlar hem de bağışçılar sisteme daha fazla güven duyar. Bu durum, sosyal yardım sistemlerine katılımı da artırabilir.

SINIRLILIKLAR VE RİSKLER

Önerilen model birçok açıdan birçok avantaj sunmasının yanında bir takım sınırlılık ve riskler de içermektedir. Metaverse ve blockchain tabanlı sistemlere erişim için gerekli dijital okuryazarlığa sahip olmayan bireyler sistem dışında kalabilir. Bu durum da dijital eşitsizliğe neden olur. Tüm bilgiler değişmez blokzincir ağına kaydedildiği için kişisel veri niteliğinde bulunan birtakım verilerin blokzincir ağına yazılırken herhangi bir ihlal oluşturmamasına dikkat edilmelidir. Zira ağda kayıtlı hiçbir bilgi değiştirilemez durumdadır ve aynı zamanda herkes tarafından erişilebilir yapıdadır. Mevcut mevzuat yapısının dijital sistemlere uyum sağlaması zaman alabilir bu durum kurumsal ve yasal zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda yasal düzenlemeler yapılmalı ve kurumsal uyum süreçleri tesis edilmelidir. Son olarak sistem tamamen dijitalleşmeyi sağlayacağından siber riskler, teknik arızalar ve sistemin sürekli çalışabilirliği gibi riskler içermektedir.

SONUÇ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Bu çalışma dijital dönüşüm sürecinde nakdi ve ayni sosyal yardımların temel sorunlarını ele alarak metaverse temelli bir yardım mekanizması önermiştir. Mevcut sosyal yardım sistemlerinde hak sahipliği, mükerrer yardımlar ve özellikle kaynak tahsisi ve şeffaf bir mekanizma ile iletilmesi konusunda yer alan sorunlar dijital dönüşüm teknolojileri dahilinde incelenmiştir. Metaverse blokzincir ve dijital ikiz gibi önemli aktörler ile birlikte değerlendirildiğinde yardım süreçlerinin sadece dijitalleşme için katkı sağlamakla kalmayıp aynı zaman güvenilir ve izlenebilir bir modelin yapılandırılmasında önemli bir araç olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada önerilen metaverse tabanlı sosyal yardım modeli, yardımlara başvuru aşamasından tahsis, dağıtım ve özellikle bütünleşik denetim mekanizmalarına alternatif yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Blokzincirin sağladığı değişmez kayıt yapısı ile bağışçı güveninin sağlanması aşamasında, dijital kimlik tabanlı doğrulama ile hak sahipliği tespitinde doğruluk sağlanması ve dijital ikizler aracılığıyla aynî yardımların lojistik planlamasının iyileştirilmesi modelin öne çıkan katkıları arasında yer

almaktadır. Bu doğrultuda önerilen model güçlü bir dönüşüm sunsa da modelin uygulanabilirliği yalnızca teknolojik kapasiteyle değil, kurumsal altyapı, hukuki düzenlemeler, veri yönetişimi ve dijital kapsayıcılık boyutlarıyla birlikte değerlendirilmelidir. Özelikle veri mahremiyeti, siber güvenlik, dijital okuryazarlık gibi hususlar bu dönüşüm sürecinin dikkatle yönetilmesi gereken kritik boyutları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda aşağıdaki politika önerileri geliştirilebilir:

Sosyal yardım süreçlerinde blokzincir tabanlı izlenebilir altyapıların pilot uygulamalarla test edilmesi ve özellikle aynî yardım tedarik zincirlerinde kullanımı lojistik maliyetlerin azaltılması için büyük önem arz etmektedir. Metaverse tabanlı sosyal yardım platformlarının kamu kurumları, yerel yönetimler ve sivil toplum kuruluşlarının ortak veri paylaşımı ve koordinasyon sağlayabileceği çok paydaşlı veri aktarımı sağlayacak şekilde tasarlanması ve bu konuda hukuki düzenleme yapılması gerekmektedir. Diğer yandan hak sahipliği tespiti ve yardım tahsis süreçlerinde dijital kimlik doğrulama, büyük veri analitiği ve yapay zekâ destekli karar destek sistemlerinin entegre edilmesiyle ihtiyaç odaklı ve adil kaynak dağıtımının güçlendirilmesine katkı sağlayabilir. Bu kapsamda da kişisel verilerin korunması, akıllı sözleşmelerin hukuki statüsü ve merkeziyetsiz yardım sistemlerinin regülasyonu konusunda yeni mevzuat düzenlemelerinin sağlanması önem arz etmektedir.

Sonuç olarak, metaverse temelli sosyal yardım yaklaşımı, sosyal yardımların yalnızca dijital ortama taşınmasını değil; daha şeffaf, güvenilir, katılımcı ve dayanıklı bir sosyal yardım sistemi oluşturulmasını hedeflemektedir. Bu yaklaşım, sosyal politika ile dijital teknolojilerin kesişiminde geleceğin sosyal yardım sistemleri için yeni bir perspektif sunmaktadır.

Kaynakça

Alderman, H., Gentilini, U., & Yemtsov, R. (Eds.). (2017). *The 1.5 billion people question: food, vouchers, or cash transfers?*. World Bank Publications. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1087-9

Atatanır, H. (2020). Hak temelli yaklaşım bağlamında vakıfların sosyal yardımları: Ankara ve İstanbul örnekleri. *Vakıflar Dergisi*, (53), 221-245. https://doi.org/10.16971/vakiflar.621851

Bahle, T., & Wendt, C. (2021). Social assistance. In D. Béland, K. J. Morgan, H. Obinger, & C. Pierson (Eds.), *The Oxford handbook of the welfare state* (2nd ed., pp. 624–640). Oxford: Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198828389.013.36

Baum, T., Mshvidobadze, A., & Posadas, J. (2016). Continuous improvement: strengthening Georgia's targeted social assistance program. World Bank Publications. http://dx.doi.org/10.1596/978-1-4648-0900-2

Beken, HG (2020). Yeni toplumsal riskler üzerinden refah devleti analizi denemesi. Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 18 (4), 132-150. https://doi.org/10.11611/yead.804542

Bendick Jr, M. (1978). Wic and the Paradox of in-Kind Transfers. *Public Finance Quarterly*, *6*(3), 359-380. https://doi.org/10.1177/109114217800600308

Colvin, A. D., Jackson, M. S., & Bullock, A. N. (2024). Beyond limits: Exploring the possibilities for using the metaverse to teach social work practice skills. *Advances in Social Work*, *24*(1), https://doi.org/10.18060/27053

Çınar, F., & Özaydın, M. M. (2025). Türkiye'de Kamusal Sosyal Yardım Uygulamaları Sürecinde Ortaya Çıkan Sorunlar: Bir Olgubilim Araştırması. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, *21*(3), 1235-1267. https://doi.org/10.17130/ijmeb.1666129

Duan, H., Li, J., Fan, S., Lin, Z., Wu, X., & Cai, W. (2021, October). Metaverse for social good: A university campus prototype. In *Proceedings of the 29th ACM international conference on multimedia* (pp. 153-161). https://doi.org/10.1145/3474085.3479238

Elias, D., Ziegenbein, D., Mundhenk, P., Hamann, A., & Rowe, A. (2023). The cyber-physical metaverse-where digital twins and humans come together. In *2023 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)* (pp. 1-2). IEEE. https://doi.org/10.23919/DATE56975.2023.10137285

Farooq, M. S., Ishaq, K., Shoaib, M., Khelifi, A., & Atal, Z. (2023). The potential of metaverse fundamentals, technologies, and applications: a systematic literature review. *IEEE Access*, *11*, 138472-138487. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3338627

Güler, A. ve Ayata, A. (2023). Türk idaresinin tarihinde sosyal devlet anlayışının yansıtılması açısından vakıf medeniyetinin yeri. Hitit Sosyal Bilimler Dergisi , 16 (2), 426-441. https://doi.org/10.17218/hititsbd.1325325

Jain, D. (2023). *A review of metaverse*. *International Journal of Computer Science, 8*(1). https://doi.org/10.17010/ijcs/2023/v8/i1/172683

Jin, B., Kuang, H., & Li, X. (2025). Blockchain application in metaverse: A review. *arXiv preprint arXiv:2504.11730*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.11730

Johri, A., Sayal, A., Jha, J., Aggarwal, N., Pawar, D., Gupta, V., & Gupta, A. (2024). Crafting the techno-functional blocks for Metaverse-A review and research

agenda. *International Journal of Information Management Data Insights*, *4*(1), 100213. https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2024.100213

Kaje, N. (2024). Peran Petugas dalam Penyaluran Bantuan Sosial di Desa Tamaila Kecamatan Tolangohula Kabupaten Gorontalo. *Publik: Jurnal Manajemen Sumber Daya Manusia, Administrasi dan Pelayanan Publik*, *11*(2), 787-797. https://doi.org/10.37606/publik.v11i2.1285

Kropyvnytskyi, M. (2024). Social assistance in ukraine: concepts, types and conceptual characteristics. *Baltic Journal of Legal and Social Sciences*, (4), 52-58. https://doi.org/10.30525/2592-8813-2024-4-7

Kshetri, N. (2017). Will blockchain emerge as a tool to break the poverty chain in the Global South? *Third World Quarterly*, *38*(8), 1710–1732. https://doi.org/10.1080/01436597.2017.1298438

Leisering, L. (2019). Basic Social Security: From Poor Relief to Social Assistance, to Social Cash Transfers. *The Global Rise of Social Cash Transfers: How States and International Organizations Constructed a New Instrument for Combating Poverty (Oxford, Oxford University Press) pp*, 64-104. https://doi.org/10.1093/oso/9780198754336.003.0003

Lieber, E. M., & Lockwood, L. M. (2013). Costs and Benefits of In-Kind Transfers: The Case of Medicaid Home Care Benefits. *Ann Arbor MI: University of Michigan Retirement Research Center (MRRC) Working Paper, WP*, *294*, 5.

Liscow, Z., ve Pershing, A. (2022). Why is so much redistribution in-kind and not in cash? Evidence from a survey experiment. National Tax Journal, 75(2), 313-354. https://doi.org/10.1086/719402

Martín Belmonte, S., Puig, J., Roca, M., & Segura, M. (2021). Crisis mitigation through cash assistance to increase local consumption levels—a case study of a bimonetary system in Barcelona, Spain. *Journal of Risk and Financial Management*, *14*(9), 430. https://doi.org/10.3390/jrfm14090430

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. https://bitcoin.org/bitcoin.pdf Erişim Tarihi: 30/03/2026

Nidhieaswar, S. (2023). Internet technology: Blockchain. *International Journal of Research Publication and Reviews,* *4*(4), 4864-4865. https://doi.org/10.55248/gengpi.234.4.38397

Okur Çakıcı, F. ve Çakıcı, AB (2020). Sosyal Yardımlaşma Bağlamında Sivil Toplumun Rolü: Sosyal Dayanışma ve Yardımlaşma Örnekleri. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Dergisi, 5 (3), 203-208. https://izlik.org/JA54SZ34MP

Özdemir, A. F., & Engin, C. (2024). Depremin sosyal, ekonomik ve iç göçe etkileri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *14*(1), 15-26. https://doi.org/10.47147/ksuiibf.1469029

Pandey, A., Obaidat, M. S., Kushwaha, A., Dwivedi, S. K., & Amin, R. (2025, July). Exploring Blockchain in the Metaverse: Review of State-of-the-Art Frameworks and Future Research Challenges. In *2025 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)* (pp. 1-6). IEEE.

Piñeiro-Chousa, J., López-Cabarcos, M. Á., VittoriRomero, V., & Pérez-Pérez, A. (2025). Evolution and trends of the metaverse in business and management: A bibliometric

analysis. *Review of Managerial Science*, *19*(1), 197-222. https://doi.org/10.1007/s11846-024-00741-5

Pradeep, V., Rao, L., Manya, M., & Mithun, H. (2024). The Metaverse: A Transformative Digital Frontier. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 66-73. https://doi.org/10.48175/IJARSCT-22812

Saravanan, S. K., Muthusenthil, B., & Gurusubramani, S. (2022, November). A review of digital twin leveraging technology, concepts, tools and industrial applications. In *2022 1st International Conference on Computational Science and Technology (ICCST)* (pp. 742-748). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCST55948.2022.10040359

Schiffhauer, B., & Seelmeyer, U. (2021). Responsible digital transformation of social welfare organizations. In *Digital transformation of learning organizations* (pp. 131-144). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55878-9_8#DOI

Schmitt, M. (2023). Creating Value with Artificial Intelligence and Big Data Analytics in the Metaverse: Conceptual Framework and Research Agenda. *Available at SSRN 4385347*. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4385347

Schöbel, S. M., & Leimeister, J. M. (2023). Metaverse platform ecosystems. *Electronic markets*, *33*(1), 12. https://doi.org/10.1007/s12525-023-00623-w

Shahrukh, M. R. H., & Mansoor, N. (2025, October). Decentralized Cross-Border Financial Aid Distribution Utilizing Blockchain-Based Tokenization. In *TENCON 2025-2025 IEEE Region 10 Conference (TENCON)* (pp. 993-997). IEEE. https://doi.org/10.1109/TENCON66050.2025.11375041

Şeker, B. D. (2023). Doğal Afetlerin Göç Üzerindeki Etkileri: Depremler ve Türkiye. *Göç Dergisi (GD)*, *10*(2), 173-187. Şeker

Şenocak, H. (2009). Sosyal Güvenlik Sistemini Oluşturan Bileşenlerin Tarihi Süreç Işığında Değerlendirilmesi. *Sosyal Siyaset Konferansları Dergisi*, (56).

Tirivayi, N., Waidler, J., & Otchere, F. (2021, Temmuz). *Cash transfers: Past, present and future: Evidence and lessons learned from the Transfer Project* (Innocenti Research Brief No. 2021-07). Florence, İtalya: UNICEF Office of Research – Innocenti. https://www.unicef.org/innocenti/media/5101/file/UNICEF-Cash-Transfer-Project-Research-Brief-2021.pdf adresinden erişildi. Erişim Tarihi: 24/03/2026

Toper, F., Aslan, H., & Özpolat, A. O. (2023). Türkiye'deki Sosyal Hizmet Kurumlarının Tarihsel Gelişimi. *Journal of History School*, *16*(LXII), 125-158.

Umar, A. (2022, October). Metaverse for public welfare and the united nations sustainable development goals. In *2022 International conference on cloud computing, big data and internet of things (3CBIT)* (pp. 160-165). IEEE. https://doi.org/10.1109/3CBIT57391.2022.00040

URL-1: UNICEF. Humanitarian cash transfers explained. Erişim adresi: https://www.unicef.org/stories/humanitarian-cash-transfers-explained. Erişim Tarihi: 24/03/2026

Uslu, H. (2023). Dijital Dönüşüm ve Kamu Hizmetleri Yönetimde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Zorluklar. Uluslararası Politik Araştırmalar Dergisi, 9(3), 15-31. https://doi.org/10.25272/icps.1354693

Uzun, A. M., & Aykın, S. M. (2024). Değişen Dünyada Sosyal Refah Devletinin Engelli/Dezavantajlı Gruplara Yaklaşımı. *Hak İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi*, *13*(36), 265-286. https://doi.org/10.31199/hakisderg.1516011

Varriale, V., Cammarano, A., Michelino, F., & Caputo, M. (2024). Exploring the environmental, economic, and social implications of metaverse adoption in business and management. *European Management Journal*. https://doi.org/10.1016/j.emj.2024.09.007

Wang, J., & Van Vliet, O. (2014). *Social assistance and minimum income benefits: Benefit levels, replacement rates and policies across 33 countries, 1990–2009*. SSRN Electronic Journal. https://doi.org/10.2139/ssrn.2535232

Wang, Y., Su, Z., Zhang, N., Xing, R., Liu, D., Luan, T. H., & Shen, X. (2022). A survey on metaverse: Fundamentals, security, and privacy. *IEEE communications surveys & tutorials*, *25*(1), 319-352. https://doi.org/10.1109/comst.2022.3202047 3

World Food Programme. (2020). WFP evidence summary: Cash-based transfers - Lessons from evaluations. Erişim Adresi: https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000124601/download/ Erişim Tarihi: 25/03/2026

Xu, X., Zhou, X., Bilal, M., Zeadally, S., Crowcroft, J., Qi, L., & Xue, S. (2025). Socially beneficial metaverse: Framework, technologies, applications, and challenges. *Computer Networks*, *263*, 111198. https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.17260

Yolcuoğlu, İ. G., & Özırmak, F. T. (2025). Sosyal Koruma Sisteminin Sosyal Yardımlarla Etkili Yönetimi: Sorunlar Ve Stratejiler. Sosyal Politika ve Sosyal Hizmet Çalışmaları Dergisi, 6(1), 65-80. https://doi.org/10.61861/spshcd.1712971