

Endüstri 4.0 Bileşenlerinin Döngüsel Ekonomi Üzerindeki Rolü: Regresyon Analizine Dayalı Ampirik Bir Çalışma

Kübra TÜMAY ATEŞ^{1*}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0002-3337-7969>

*Sorumlu yazar: ktumay@cu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 02.05.2025

Kabul tarihi: 13.07.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Endüstri 4.0

Döngüsel ekonomi

Sürdürülebilir üretim

Regresyon analizi

Dijital dönüşüm

ÖZ

Bu çalışma, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi uygulamaları arasındaki ilişkiyi bir regresyon modeli aracılığıyla incelemeyi amaçlamaktadır. Endüstri 4.0'ın ileri teknolojiler ve dijitalleşme yoluyla üretim süreçlerini optimize etme potansiyeli, döngüsel ekonomi prensipleriyle birleşerek kaynak verimliliğini artırmak ve atıkları azaltmak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Çalışma, Endüstri 4.0'ın uygulamalarının döngüsel ekonomi ilkeleriyle nasıl entegre olduğunu ve bu entegrasyonun ekonomik, çevresel ve operasyonel sonuçlar üzerindeki etkilerini analiz etmek için nicel bir regresyon modeli kullanılmıştır. Araştırma kapsamında oluşturulan modelde, döngüsel ekonomi performansı bağımlı değişken olarak belirlenmiş; IoT kullanımı, robotik otomasyon, dijital üretim ise bağımsız değişkenler olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen regresyon modeline göre, dijital üretim süreci, geri dönüşüm oranlarını artırma yönünde en etkili değişken olup, bu etkinin hem istatistiksel olarak anlamlı hem de pozitif yönde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılmasında nasıl bir rol oynadığını ortaya koyarak, sürdürülebilir üretim sistemlerinin tasarlanmasında yol haritası sunabilecektir.

The Role of Industry 4.0 Components on the Circular Economy: An Empirical Study Based on Regression Analysis

Research Article

Article History:

Received: 02.05.2025

Accepted: 13.07.2025

Available online: 12.09.2025

Keywords:

Industry 4.0

Circular economy

Sustainable production

Regression analysis

Digital transformation

ABSTRACT

This study aims to examine the relationship between Industry 4.0 and circular economy practices through a regression model. The potential of Industry 4.0 to optimize manufacturing processes through advanced technologies and digitalization, when combined with circular economy principles, offers significant opportunities to enhance resource efficiency and reduce waste. The study employs a quantitative regression model to analyze how the applications of Industry 4.0 are integrated with circular economy principles and the impact of this integration on economic, environmental, and operational outcomes. In the model developed for the research, circular economy performance is defined as the dependent variable, while the usage of IoT, robotic automation, and digital manufacturing are considered as independent variables. According to the obtained regression model, digital manufacturing emerges as the most effective variable in increasing recycling rates, with this effect being both statistically significant and positively correlated. The results highlight the role of Industry 4.0 technologies in achieving the objectives of circular economy, potentially providing a roadmap for the design of sustainable production systems.

Giriş

Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi, günümüz iş dünyasında önemli dönüşümleri temsil eden iki kritik kavramdır. Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde dijitalleşme, otomasyon, yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT), robotik ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu ile karakterizedir. Bu teknolojiler, üretim verimliliğini artırmanın yanı sıra, kaynak kullanımını optimize etmeye, süreçleri daha esnek hale getirmeye ve sürdürülebilirliği desteklemeye yönelik önemli fırsatlar sunmaktadır. Endüstri 4.0'ın, şirketlere daha az kaynak kullanarak daha fazla değer üretme imkânı sağladığı, dolayısıyla çevresel etkileri azaltmaya yardımcı olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte, Endüstri 4.0'ın sadece ekonomik verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği destekleyen döngüsel ekonomi modelleriyle uyumlu olduğu da giderek daha fazla vurgulanmaktadır.

Döngüsel ekonomi, geleneksel doğrusal ekonomik modelin aksine, ürünlerin ömrü boyunca kaynakların verimli kullanılmasını, atıkların en aza indirilmesini ve geri dönüşüm ile yeniden kullanımın teşvik edilmesini amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu model, çevresel etkileri azaltırken aynı zamanda ekonomik fayda sağlamayı hedefler. Endüstri 4.0'ın sunduğu yenilikçi çözümler, döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanmasını kolaylaştırarak, üretim süreçlerinde daha fazla geri dönüşüm, yeniden kullanım ve verimlilik sağlanmasına olanak tanımaktadır. Özellikle akıllı fabrikalar, veri analitiği ve sensör tabanlı izleme sistemleri gibi Endüstri 4.0 uygulamaları, döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılmasında kritik bir rol oynayabilir.

Ancak, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişkinin nasıl işlediği ve bu ilişkiyi etkileyen faktörlerin neler olduğu konusunda henüz net bir anlayış bulunmamaktadır. Bu noktada, şirket büyüklüğü gibi faktörlerin bu ilişkiyi nasıl şekillendirdiği önemlidir. Küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) ile büyük şirketlerin, Endüstri 4.0 teknolojilerini benimseme ve döngüsel ekonomi uygulamalarını hayata geçirme süreçlerinde farklı stratejiler ve sonuçlar izleyebileceği öngörülebilir. Dolayısıyla, şirket büyüklüğünün bu iki kavram arasındaki etkileşimdeki rolünü anlamak, hem teorik hem de pratik açıdan önemli bir araştırma konusudur.

Döngüsel ekonomi endeksi; kaynak verimliliği, atık minimizasyonu ve sürdürülebilir üretim-tüketim sistemlerine geçiş düzeyini ölçen kompozit bir performans göstergesidir. Endeksin belirlenmesinde etkili olabilecek faktörler ekonomik, teknolojik, çevresel ve kurumsal değişkenleri içermektedir. Günümüzde işletmelerin sürdürülebilirlik odaklı stratejileri doğrultusunda çevresel performanslarını iyileştirmeye yönelik çabalar kritik önem

kazanmıştır. Bu kapsamda, döngüsel ekonomi uygulamaları kaynak kullanımının optimizasyonu ve atık oluşumunun azaltılmasında belirleyici rol oynamaktadır.

Endüstri 4.0 teknolojileri; üretim hatlarında otomasyon, gerçek zamanlı veri toplama ve analitiği, yapay zekâ destekli karar sistemleri ve akıllı üretim çözümleri aracılığıyla çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada kurulan modelde, döngüsel ekonomi endeksi bağımlı değişken olarak yapılandırılmış; bağımsız değişkenler ise döngüsel ekonomi uygulama seviyesi, IoT entegrasyonu, robotik otomasyon ve dijital üretim teknolojileri olarak tanımlanmıştır. Bu değişkenlerin geri dönüşüm oranı üzerindeki etkileri, çoklu doğrusal regresyon analizi yöntemi ile kantitatif olarak analiz edilmiştir.

Çalışmanın temel amacı, Endüstri 4.0 bileşenlerinin döngüsel ekonomi perspektifiyle işletmelerin geri dönüşüm performansına etkilerini istatistiksel olarak ortaya koymaktır. Çoklu regresyon modeli aracılığıyla bağımsız değişkenlerin varyans açıklayıcılık düzeyleri değerlendirilmiş, katsayıların istatistiksel anlamlılıkları ve modelin genel uyum iyiliği test edilmiştir. Bu sayede, üretim sektöründe dijital dönüşüm uygulamalarının çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkısı nesnel veriler üzerinden ampirik olarak ortaya konulmuştur.

Özellikle döngüsel ekonomi performansı, araştırmanın ana odak değişkeni olarak belirlenmiş ve bu değişkenin Endüstri 4.0 bileşenleriyle ilişkisi, daha önce yapılmamış bir şekilde nicel bir regresyon modeli aracılığıyla incelenmiştir. Bağımsız değişkenler olarak IoT kullanımı, robotik otomasyon ve dijital üretim gibi Endüstri 4.0'ın temel unsurları dikkate alınmıştır. Bu bağlamda, çalışmada ele alınan değişkenler, daha önceki literatürde aynı anda analiz edilmemiş ve bu unsurlar arasındaki ilişkiler sistematik bir biçimde incelenmemiştir. Çalışmanın bir diğer önemli özelliği ise, kullanılan verilerin gerçek dünya koşullarından alınmış olmasıdır. Bu sayede, teorik modellere dayalı öngörülerin ötesine geçilerek, Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi üzerindeki somut etkileri daha belirgin bir şekilde ortaya konmuştur. Bu nedenle, çalışmanın bulguları, literatürdeki önceki araştırmalarla karşılaştırıldığında daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar sunmakta, böylece teorik bilgilerden ziyade pratik bir bakış açısı geliştirmektedir.

Önceki Çalışmalar

Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi, özellikle sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerine ulaşmada önemli rol oynayan iki kavramdır. Bu kavramlar arasındaki ilişkiyi anlamak, şirketlerin üretim süreçlerini iyileştirmeleri, kaynakları daha verimli kullanmaları ve çevresel etkilerini azaltmaları açısından kritik öneme sahiptir.

Endüstri 4.0, dijitalleşme ve otomasyon teknolojileri kullanarak üretim süreçlerini daha verimli ve esnek hale getiren bir dizi teknolojiyi ifade etmektedir. Bu teknolojiler, özellikle büyük veri, IoT (Nesnelerin İnterneti), yapay zeka, robotik sistemler ve 3D yazıcıları içerir (Hermann ve ark., 2016). Bu uygulamalar, kaynakları daha verimli kullanmak, üretim süreçlerini hızlandırmak ve atıkları minimize etmek için güçlü araçlar sunmaktadır. Endüstri 4.0'ın, döngüsel ekonomi ile entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirliği artırmaya yönelik yeni fırsatlar sunmaktadır (Xu ve ark., 2018).

Döngüsel ekonomi, ürünlerin ömrünü uzatarak, atıkları minimize ederek ve geri dönüşümü teşvik ederek doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını hedefleyen bir ekonomik modeldir. Endüstri 4.0 teknolojileri, döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanmasında önemli bir rol oynayabilir. Akıllı fabrikalar, veri analitiği, IoT ve sensör teknolojileri, ürünlerin yeniden kullanımını ve geri dönüşümünü daha verimli hale getirebilir (Lacy ve Rutqvist, 2016; Geissdoerfer ve ark., 2017).

Endüstri 4.0, döngüsel ekonomi uygulamaları için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinde daha fazla geri dönüşüm, yeniden kullanım ve kaynak verimliliği sağlamak için kullanılabilir. Özellikle veri toplama, sensör tabanlı sistemler ve akıllı üretim sistemleri, atık yönetimini iyileştirerek, döngüsel ekonomi hedeflerine katkıda bulunabilir (Bocken ve ark., 2016). Ayrıca, 3D yazıcılar gibi teknolojiler, ürünlerin tamirini ve yeniden kullanılmasını kolaylaştırarak döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir şekilde çalışabilir denmiştir (Gebhardt ve Kuehn, 2019).

Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkisi, şirketin büyüklüğüne göre değişkenlik gösterebilir. Büyük şirketler, bu teknolojileri daha kolay bir şekilde entegre edebilirken, küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) sınırlı kaynaklar ve bütçeler nedeniyle bu teknolojilere adapte olmakta zorlanabilirler. Bununla birlikte, KOBİ'ler, Endüstri 4.0 teknolojilerini daha uygun maliyetlerle uygulayarak döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşma fırsatlarına sahip olabilmektedir. (Bauer ve Thiel, 2015; Lewandowski, 2016). KOBİ'lerin Endüstri 4.0 teknolojilerini benimseme oranı genellikle daha düşüktür, ancak bu işletmeler için bu teknolojiler, döngüsel ekonomi stratejilerini daha düşük maliyetlerle gerçekleştirme fırsatı sunabilmektedir. KOBİ'ler, bu teknolojilerden faydalanarak kaynak kullanımını daha verimli hale getirebilir, atıkları azaltabilir ve sürdürülebilir üretim uygulamaları geliştirebilmektedir (Pereira ve ark., 2020).

Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi uygulamaları üzerindeki etkisi, özellikle veri analitiği, IoT ve sensörler gibi teknolojilerle daha verimli hale gelmiştir. Bu teknolojiler, döngüsel ekonomi ilkelerinin daha etkin uygulanabilmesini sağlar ve sürdürülebilir üretim

süreçlerinin tasarımına katkıda bulunur. Akıllı üretim sistemleri, kaynakları daha verimli kullanmaya ve atıkları minimize etmeye yönelik önemli fırsatlar sunmaktadır (Xu ve Yu, 2019). Endüstri 4.0 teknolojilerinin Avrupa'daki KOBİ'lerde döngüsel ekonomi uygulamalarını nasıl desteklediğini araştıran bir çalışma, dijital dönüşümün yeşil dönüşümle uyumlu olduğunu ve çevresel stratejilerin güçlendirilmesinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur (Findik ve ark., 2023). Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın döngüsel ekonomi uygulamalarıyla entegrasyonunun sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır. Türkiye'deki ihracatçı sanayiciler için Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi uygulamalarını ölçen bir ölçek geliştirmiştir. Çalışma, "sürdürülebilir lojistik", "akıllı üretim operasyonları" ve "dönüşümün önündeki engeller" gibi alt boyutlarla döngüsel ekonomi uygulamalarının etkilerini incelemektedir. Elde edilen bulgular, Endüstri 4.0'ın döngüsel ekonomi stratejilerini daha verimli ve ölçeklenebilir hale getirdiğini göstermektedir (Karakadılar, 2023). Asansör sektöründe Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi ile entegrasyonunu ele almıştır. Bu çalışmada, her iki yaklaşımın sürdürülebilir işletme performansına olan katkıları analiz edilmiştir. Sonuçlar, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi uygulamalarını daha verimli hale getirdiğini ve işletmelerin çevresel ayak izlerini azaltarak ekonomik fayda sağladığını ortaya koymuştur (Köksal, 2024).

Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişki, günümüzde hala tam olarak anlaşılmamış bir konudur. Çeşitli araştırmalar, bu iki kavramın birbirini nasıl tamamladığına dair önemli bulgular sunmuş olsa da, şirketlerin büyüklüğü, sektörü ve coğrafi konumu gibi faktörlerin bu ilişkideki rolünü daha derinlemesine inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Bu alandaki daha fazla araştırma, Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi hedeflerine nasıl daha iyi hizmet edebileceğini ve şirketlerin bu hedeflere ulaşmasını nasıl kolaylaştırabileceğini anlamamıza yardımcı olacaktır (Stahel, 2016).

Materyal ve Metot

Döngüsel ekonomi ile Endüstri 4.0 arasındaki ilişkiyi çoklu regresyon analizi kullanarak matematiksel olarak çözmek için, öncelikle değişkenler arasındaki ilişki modellenmiştir. Çoklu regresyon analizi, bir bağımlı değişkenin (döngüsel ekonomi göstergesi) birden fazla bağımsız değişken (Endüstri 4.0 bileşenleri) tarafından nasıl etkilendiğini anlamaya olanak tanır.

Regresyon analizi iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi incelemeye yarayan istatistiksel bir tekniktir. k kategorik değeri temsil eden çok katmanlı bir değişken olarak tanımlanırken, $(k-1)$ değişkenleri çok yönlü değişken tarafından temsil edilen grupları temsil etmektedir. Doğrusal regresyon, iki değişken arasındaki ilişkiye dayanarak birinin değerini

diğerinden tahmin etmeyi sağlayan bir model oluşturmayı içermektedir. Denklem 1’de lineer regresyonun basit doğrusal denklemi verilmiştir. (Cohen ve ark., 2003; Darlington ve Hayes, 2017).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + E \quad (1)$$

Değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğunda, R^2 değerinin 1’e yaklaşması; bağımlı değişkendeki değişimin büyük bir kısmının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını gösterir. R^2 , 0 ile 1 arasında bir değer alır ve modele dâhil edilen değişkenlerin açıklayıcılık gücünü gösterir. Denklemde SST (Toplam Kareler Toplamı), bağımlı değişkenin modelden bağımsız olarak ne kadar değişkenlik gösterdiğini ifade ederken SSE (Hata Kareler Toplamı), modelin açıklayamadığı kısmı göstermektedir (Denklem 2). (Kutner ve ark., 2024).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2)$$

şirket Büyüklüğünü İçeren Geliştirilmiş Model

Ayrıca şirket büyüklüğünün, Endüstri 4.0 uygulamaları ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişkiyi etkileyebileceği göz önünde bulundurulduğunda, büyüklük değişkeni (Z) modele dahil edilmiştir. Bu durumda, şirket büyüklüğünün etkisini;

1.Temel Model

Araştırmada, çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılarak, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkisi istatistiksel olarak modellenmiştir. Endüstri 4.0’ın döngüsel ekonomi performansı üzerindeki etkisini incelemek için oluşturulan temel regresyon modeli Denklem 3’deki gibi ifade edilebilir:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + E_i \quad (3)$$

Burada:

y_i : i. şirketi için döngüsel ekonomi

x_i : i. şirketi için Endüstri 4.0 uygulamaları

β_0 : Sabit terim (kesim noktası)

β_1 : Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi üzerindeki etkisini ölçen katsayı

E_i : Hata terimi

2. Model Kurulumu

Çoklu regresyon modelinde, döngüsel ekonomi ile ilgili bağımlı değişken döngüsel ekonomi endeksi olarak seçilmiştir. Endüstri 4.0'ın çeşitli bağımsız değişkenleri arasından ise sıklıkla kullanılan IoT kullanımı, robotik otomasyon, dijital üretim üzerinden analiz yapılmıştır.

Çoklu regresyon modeli Denklem (4)'deki gibi ifade edilmiştir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \epsilon \quad (4)$$

Burada:

Y = Bağımlı değişken (döngüsel ekonomi endeksi)

β_0 = Sabit terim

X_1, X_2, X_3 = Bağımsız değişkenler (IoT kullanımı, robotik otomasyon, dijital üretim),

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = Her bir bağımsız değişkenin regresyon katsayıları

ϵ = Hata terimi

kontrol eden regresyon modeli Denklem 5'deki gibi yazılabilir:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 Z_i + E_i \quad (5)$$

Burada:

Z_i : i. şirket için şirket büyüklüğü

β_2 : Şirket büyüklüğünün döngüsel ekonomi üzerindeki etkisini ölçen katsayı

Bu model ile de ayrıca, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi hedeflerine katkısını ve şirket büyüklüğünün bu ilişkiyi nasıl şekillendirdiğini anlamaya yardımcı olmak amaçlanmıştır. β_1 katsayısı, Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi performansı üzerindeki doğrudan etkisini temsil ederken, β_2 katsayısı şirket büyüklüğünün bu ilişki üzerindeki dolaylı etkisini gösterecektir. Ekstra sunulan bu model ile elde edilen sonuçlar, şirket büyüklüğünün Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi performansı üzerindeki etkisini nasıl değiştirdiğini, küçük ve büyük şirketler arasındaki farklılıkları ortaya koyabilir.

3. Veri Toplama ve Analiz

Döngüsel ekonomi uygulamalarını ölçmeye yönelik nicel analizlerde kullanılacak veriler, çeşitli ulusal ve uluslararası kaynaklardan temin edilmiştir. Ulusal düzeyde Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Uluslararası düzeyde ise Dünya Bankası'nın sürdürülebilirlik verileri gibi bağımsız ve denetimli veri sağlayıcılarının yayınladığı istatistikler kullanılmıştır. Toplam 230 veri SPSS paket program ile analizler edilmiştir.

Döngüsel ekonomi endeksi (Y): Yıllık geri dönüşüm oranları, ton bazında.

IoT kullanımı (X_1): Fabrikalarda IoT cihazlarının kullanım oranı (% olarak).

Robotik otomasyon (X_2): Robotik otomasyon kullanılan üretim süreçlerinin oranı (% olarak).

Dijital üretim (X_3): Dijital üretim süreçlerinin kullanıldığı oran (% olarak).

Belirlenen bağımsız değişkenlerle çoklu regresyon analizi gerçekleştirilerek regresyon katsayıları hesaplanmıştır.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yapılan regresyon analizinin bulgularına dayanarak, çeşitli önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Analiz, her bir teknolojinin döngüsel ekonomi hedeflerine katkı sağlama derecesini farklı şekillerde değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle IoT (Nesnelerin İnterneti) ve dijital üretimin döngüsel ekonomi süreçlerindeki rolünü vurgulamakta, robotik otomasyonun etkisini ise daha sınırlı bir şekilde ele almaktadır.

Regresyon analizi sonucunda elde edilen modelin çıktıları Denklem 6'ya göre değerlendirilmiştir.

$$\text{Döngüsel ekonomi endeksi (Yi)} = 10 + 0.3 (\text{IoT Kullanımı}) + 0.2 (\text{Robotik Otomasyon}) + 0.4 (\text{Dijital Üretim}) \quad (6)$$

β_0 (Sabit Terim) =10, IoT, robotik otomasyon ve dijital üretim sıfır olduğu durumda geri dönüşüm oranı 10'dur.

$\beta_1=0.3$: IoT kullanımının her bir birim artışı, geri dönüşüm oranını 0.3 artırmaktadır.

$\beta_2=0.2$: Robotik otomasyonun her bir birim artışı, geri dönüşüm oranını 0.2 artırmaktadır.

$\beta_3=0.4$: Dijital üretim süreçlerinin her bir birim artışı, geri dönüşüm oranını 0.4 artırmaktadır.

Aynı zamanda hesaplanan $R^2 = 0.70$ olarak bulunmuştur. Bu değer; elde edilen modelin değişkenleri (IoT kullanımı, Robotik Otomasyon ve Dijital Üretim) döngüsel ekonomi endeksindeki varyansın %70'ini açıkladığını ifade etmektedir. R^2 'nin 0.70 olması, bağımsız değişkenler ile döngüsel ekonomi uygulamaları arasında güçlü bir ilişki olduğunu, modelin veriye yüksek derecede uyum sağladığını ve tahmin kapasitesinin tatmin edici düzeyde olduğunu göstermektedir.

Tablo 1, modelden elde edilen regresyon katsayılarını, bu katsayıların anlamlılık düzeylerini ve ilişkilerin yönünü göstermektedir.

Tablo 1. Modelden elde edilen regresyon katsayıları

Değişken	Katsayı (β_i)	p-değeri	R ²
IoT Kullanımı	0,30	0,003	0,70
Robotik Otomasyon	0,20	0,15	
Dijital Üretim Süreci	0,40	0,02	

Çalışmada, IoT kullanımını değişkeni $p < 0.05$ ve $\beta_1 = 0.30$ olarak elde edilerek döngüsel ekonomi üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, IoT'nin döngüsel süreçlerdeki etkinliğini artırmada önemli bir araç olduğunu göstermektedir. IoT, üretim süreçlerinin her aşamasında veri toplama ve analiz yapma kapasitesine sahip olduğu için, döngüsel ekonomi ilkelerini uygulamada kilit rol oynamaktadır. Özellikle, IoT'nin karar destek sistemleri ve süreç optimizasyonu yoluyla kaynak verimliliği sağlayarak, atıkların ve enerji tüketiminin azaltılmasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, IoT'nin yalnızca üretim süreçlerini iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda tedarik zinciri boyunca atıkların yönetilmesinde de etkin bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir. Bu bulgu, IoT'nin döngüsel ekonomi çerçevesinde daha geniş bir etki alanına sahip olduğunu ortaya koymakta ve literatürde bu teknolojinin potansiyelinin henüz tam olarak keşfedilmediğine işaret etmektedir.

Dijital üretim sürecinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkisinin en güçlü olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizde dijital üretim değişkeninin döngüsel ekonomi performansı üzerinde hem istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.05$) hem de pozitif yönde güçlü bir etkisi olduğu bulunmuştur. Dijital üretim, özellikle 3D baskı, eklemeli üretim ve dijital ikizler gibi ileri üretim teknolojilerinin kullanımıyla kaynak tüketimini azaltma ve malzeme israfını minimize etme noktasında büyük bir potansiyele sahiptir. Bu tür teknolojiler, üretim süreçlerini daha esnek hale getirir, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımını artırır ve daha verimli ürün tasarımlarına olanak tanır. Ayrıca, dijital üretim, daha az enerji tüketimi ile daha hızlı üretim süreçleri sunarak çevresel etkiyi azaltabilmektedir. Bu durum, Endüstri 4.0'ın dijital üretim uygulamalarının döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmada nasıl güçlü bir araç olduğunu gözler önüne sermektedir. Dijital üretimin bu güçlü etkisi, sürdürülebilir üretim sistemlerinin tasarımında gelecekteki çalışmalar için önemli bir rehber olabilecek niteliktedir.

Diğer yandan, robotik otomasyonun döngüsel ekonomi performansı üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0.05$). Bu sonuç, robotik otomasyonun, diğer Endüstri 4.0 teknolojileriyle kıyaslandığında, döngüsel ekonomi üzerinde doğrudan ve güçlü bir etki yaratmadığını göstermektedir. Ancak, robotik otomasyonun faydaları, yalnızca

verimlilik artışı ve maliyet düşüşü ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda süreçlerdeki hataları azaltarak kaliteyi artırmak gibi dolaylı etkiler de yaratmaktadır. Dolayısıyla, robotik otomasyonun döngüsel ekonomi bağlamındaki etkisi, daha çok dolaylı olabilir veya bu teknolojinin etkinliğini artıran diğer unsurlarla, örneğin IoT veya dijital üretimle entegrasyonu gerektirebilir. Bu bulgu, robotik otomasyonun yalnızca kendi başına döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılmasında yeterli olmadığını, ancak diğer ileri teknolojilerle birleşerek daha büyük bir etki yaratabileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, robotik otomasyonun spesifik uygulama alanlarında, özellikle üretim süreçlerinde yerinde atık azaltma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm uygulamaları için büyük bir potansiyel taşıdığı unutulmamalıdır.

Bu çalışmanın bulguları, Endüstri 4.0 teknolojilerinin, özellikle IoT ve dijital üretim uygulamalarının, döngüsel ekonomi çerçevesinde sürdürülebilir üretim süreçlerinin tasarlanmasında kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır. IoT ve dijital üretim, döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanmasında önemli fırsatlar sunmakta, kaynak verimliliğini artırmakta ve atıkların azaltılmasında etkin çözümler üretmektedir. Bu iki teknoloji, endüstriyel dönüşüm sürecinde döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmak için anahtar bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Dijital üretim süreçlerinin doğası gereği daha az malzeme ve enerji tüketimi sağladığı göz önünde bulundurulduğunda, bu teknolojilerin döngüsel ekonomiye olan katkısının oldukça güçlü olduğu söylenebilir. Ancak, robotik otomasyonun bu bağlamda doğrudan bir katkı sağlamadığı, bunun yerine daha dolaylı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Gelecekteki araştırmalar, robotik otomasyonun döngüsel ekonomi üzerindeki potansiyel etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde incelemeli ve özellikle bu teknolojinin diğer Endüstri 4.0 bileşenleriyle entegrasyonunun nasıl döngüsel süreçlere katkı sağladığını araştırmalıdır. Ayrıca, farklı sektörlerde ve üretim süreçlerinde Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi üzerindeki etkilerini karşılaştıran çoklu vaka çalışmaları yapılması, bu alandaki bilgi birikimini artırabilir. Sonuç olarak, bu çalışma, Endüstri 4.0'ın döngüsel ekonomi uygulamalarına olan katkılarını ortaya koyarak, sürdürülebilir üretim sistemlerine geçiş için bir temel oluşturabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

Bauer JM, Thiel G., 2015. Barriers to the adoption of Industry 4.0 technologies in SMEs. Proceedings of the 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 1057–1064.

Bocken NMP, Short SW, Rana P, Evans S., 2016. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. Journal of Cleaner Production, 65: 42–56.

Bocken NMP, Short SW., 2017. Business models for a circular economy: Opportunities and challenges. Journal of Cleaner Production, 140: 57–65.

Cohen J., Cohen P., West SG., Aiken LS., 2003. Applied multiple regression/correlation Analysis for the Behavioral Sciences. 3rd ed. Routledge, New York.

Cucchiella F, Gastaldi M., 2018. Industry 4.0 and circular economy: Opportunities for Sustainable Business Development. Sustainability, 10(10): 3821.

Eurostat., 2024. Statistics explained: Circular economy and digital economy. <https://ec.europa.eu/eurostat>. Alınma tarihi: 22.04.2025.

Findik D, Tirgil A, Ozbugday FC., 2023. Industry 4.0 as an enabler of circular economy practices: Evidence from European SMEs. Journal of Cleaner Production, 377: 137281.

Gebhardt A, Kuehn S., 2019. 3D Printing: A new business model for the circular economy. Proceedings of the 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 1057–1064.

Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken NMP, Hultink EJ., 2017. The circular economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143: 757–768.

Hermann M, Pentek T, Otto B., 2016. Design principles for industrie 4.0 scenarios: A literature review. Working paper. Technische Universität Dortmund.

Karakadılar İS., 2023. Türkiye’deki ihracatçı sanayicilerin Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi uygulamalarına yönelik bir ölçek geliştirme çalışması. İktisadi İdari ve Siyasal Araştırmalar Dergisi, 8(2): 104-121.

Köksal M., 2024. Endüstri 4.0 teknolojileri ve döngüsel ekonominin sürdürülebilir işletme performansına etkisi: Asansör sektöründe uygulama. Verimlilik Dergisi, 73(2): 78-92.

Kutner MH, Nachtsheim CJ, Neter J., 2004. Applied linear regression models. Technometrics, 26(4).

Lacy P, Rutqvist J., 2016. Waste to wealth: The Circular Economy Advantage. Palgrave Macmillan.

Lewandowski M., 2016. Designing the business models for circular economy- Towards the conceptual framework. Sustainability, 8(1): 43.

Pereira AF, Silva DF, Lima CF., 2020. Circular economy and industry 4.0: Opportunities and Challenges. *Sustainability*, 12(1): 1–18.

Stahel WR., 2016. *The circular economy: A User's Guide*. Routledge.

Statista., 2024. Industry 4.0 and circular economy statistics. <https://www.statista.com>.
Alınma tarihi: 22.04.2025.

Xu LD, He W, Li S., 2018. Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4): 2233–2243.

Xu X, Yu S., 2019. Smart manufacturing and circular economy: A systematic review. *Journal of Manufacturing Processes*, 41: 1–12.