

# İnşaat Sektöründe Döngüsellik Teşvik Etmek için Dijital Teknolojilerin Kullanımına yönelik bir Araştırma

Nur Efşan ERUSTA<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Erzurum, Türkiye  
\* Sorumlu Yazar: nur.erusta@erzurum.edu.tr

Alındı: 28 Ocak 2026; Kabul edildi: 19 Mart 2026

## Özet

İnşaat sektörü, doğal kaynakları önemli ölçüde tüketmesi ve küresel ölçekte yüksek miktarda atık üretmesi nedeniyle döngüsel ekonomi ilkelerini dikkate alması gereken sektörlerden biridir. Döngüsellik, sınırlı kaynakların daha verimli ve yeniden kullanımı stratejileri ile ilişkilendirilmektedir. Dijital teknolojiler ise süreçleri iyileştirerek verimliliği artırma ve inşaat sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerini destekleme potansiyeline sahiptir. Süreçlerini dijital teknolojiler ile geliştiren organizasyonlar, inşaat sektöründe döngüsellik geliştirilmesine katkıda bulunabilir. Örneğin, YBM (*Yapı Bilgi Modelleme, BIM- Building Information Modelling*) ve dijital fabrikasyon, inşaat projelerinin verimliliğini artırma, maliyetleri düşürme, tasarım esnekliğini geliştirme gibi avantajlar sunmaktadır. Güncel literatür benzer şekilde sanal gerçeklik (*VR-virtual reality*), artırılmış gerçeklik (*AR-augmented reality*), yapay zeka (artificial intelligence), dijital ikiz (*digital twin*) vs. gibi diğer dijital teknolojilerin de inşaat sektöründe döngüsellik teşvik etme potansiyeli bulunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, güncel literatürü incelemeyi ve inşaat sektöründe döngüsellik teşvik etmek için dijital teknolojilerin kullanımına ilişkin bir araştırma yapmayı amaçlamaktadır. Çalışma, iki aşamalı olarak ele alınmış olup, ilk aşamada bibliyometrik analizlerle literatürün mevcut durumu ortaya konmuştur. Çalışmanın ikinci aşamasında ise kapsamlı bir içerik analizi yapılmıştır. Çalışmanın bulguları, dijital teknolojilerin inşaat sektöründe döngüsellik arttırmada çeşitli fırsatlar sunduğunu, ancak dijital teknolojilerin döngüsellik bağlamında benimsenmesinin önünde engeller bulunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, engellerin üstesinden gelmeyi hedefleyen uygun stratejilerin geliştirilmesinin, döngüsel inşaat 4.0'ın benimsenmesini kolaylaştırabileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca çalışma, sektör profesyonelleri, akademisyenler ve politika yapımcılar gibi inşaat sektöründeki çeşitli paydaşların iş birliği ve desteğinin önemine dikkat çekmiştir.

Dijital teknolojiler | Döngüsel ekonomi | Döngüsel inşaat sektörü 4.0 | Döngüsel inşaat proje yönetimi | İnşaat sektörü

## Abstract

The construction industry (CI) is one of the sectors that needs to adopt circular economy principles due to its significant consumption of natural resources and the high amount of waste it generates globally. Circularity involves more efficient and reusable strategies for limited resources. Digital technologies have the potential to improve processes, increase efficiency, and support the sustainability goals of the CI. Organizations that enhance their processes through digital technologies can contribute to the development of circularity in the CI. For example, BIM (Building Information Modeling) and digital fabrication have advantages such as increased construction projects efficiency, cost reduction, and improved design flexibility. Similarly, current literature shows that other digital technologies, including virtual reality (VR), augmented reality (AR), artificial intelligence (AI), and digital twins also have the potential to promote circularity in the CI. This paper aims to investigate the use of digital technologies to promote circularity in the CI. The research was conducted in two phases. The first phase has involved a bibliometric analysis to reveal the current state of the literature. The second phase has consisted of a comprehensive content analysis. The finding indicate that digital technologies provide various opportunities to promote circularity in the CI, but there are also barriers to their adoption. This study also emphasizes

## Çalışmanın Önemi

İnşaat sektörü, doğal kaynak tüketimi ve atık üretimi açısından küresel ölçekte önemli bir etkiye sahiptir; bu nedenle, döngüsel ekonomilerin ilkelerinin benimsenmesine ihtiyaç vardır. Döngüsellik yaklaşımı, sınırlı kaynakların daha etkin kullanımını sağlarken, dijital teknolojiler de inşaat proje yaşam döngüsü boyunca süreçleri optimize ederek verimliliği artırabilir. Bu çalışma, inşaat sektöründe döngüsellik teşvik etmek amacıyla dijital teknolojilerin kulanıma yönelik bir araştırma yapmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, ilgili engellerin üstesinden gelmek için stratejiler geliştirilmesinin önemini vurgulamakta ve bu stratejilerin geliştirilmesi sırasında tüm paydaşlar arasında etkili iletişim ve işbirliğinin gerekliliğini açığa çıkarmaktadır.

## Significance

The construction industry has a significant global impact in terms of natural resource consumption and waste generation; therefore, circular economy principles need to be adopted. The circularity approach enables the efficient use of limited resources, while digital technologies can enhance efficiency by optimizing processes throughout the construction project life cycle. This paper aims to investigate the use of digital technologies to promote circularity in the construction industry. This paper emphasizes the importance of

that developing appropriate strategies specifically aimed at overcoming barriers can facilitate the adoption of circular construction 4.0. Furthermore, the paper highlights the importance of collaboration and support from stakeholders in the CI, including industry professionals, academics, and policymakers.

developing strategies to overcome these barriers and reveals the need for effective communication and collaboration among all stakeholders during the development of these strategies.

Digital technologies | Circular economy | Circular construction industry 4.0 | Circular construction project management | Construction industry

## 1. Giriş

İnşaat sektörü, ulusal ekonomiler üzerindeki önemli katkısına rağmen, yüksek düzeyde kaynak ve enerji tüketimi ile ortaya çıkan atık miktarı nedeniyle çevresel açıdan ciddi olumsuz etkilere yol açmaktadır (Elmualim vd., 2018; Norouzi vd., 2021). Küresel ölçekte toplam atığın yaklaşık %50'sinin inşaat sektöründen kaynaklandığı bilinmektedir (Ayuk ve Jade, 2023). Yapım ve yıkım süreçleri, inşaat sektörünün çevresel etkilerini arttırmakta ve küresel düzeyde dikkate değer CO<sub>2</sub> emisyonlarına neden olmaktadır (Mohseni vd., 2023), ve böylece çevresel endişelere yol açmaktadır (Albsoul vd., 2024). Bu çevresel endişeler, sektörün yoğun doğal kaynak tüketimi ile birlikte değerlendirildiğinde daha da belirgin hale gelmektedir; inşaat sektörü mineraller, su ve kereste gibi büyük miktarda doğal kaynaklar tüketmekte ve bu durum çevresel bozulmayı derinleştirmektedir (Farhadi, 2024). Bu çerçevede doğal kaynakların yoğun kullanımı ve inşaat ile yıkım faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan atık miktarı dikkate alındığında, inşaat ve yıkım atıkları konusunda acil önlemler alınması gerekmektedir (Duran vd., 2024).

Artan çevresel zorluklar ve iklim değişikliğini hafifletme gerekliliği, inşaat sektörünü daha sürdürülebilir ve yenileyici uygulamalara yönlendirmektedir (Farhadi, 2024). İnşaat sektörü, döngüsel ekonomi stratejileri söz konusu olduğunda büyük bir potansiyele sahiptir (Chibesakunda, 2023). Bu bağlamda döngüsel inşaat, yapma çevreyi tasarlama, inşa etme ve yönetme biçimimizi iyileştirmek için umut verici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır (Farhadi, 2024). İnşaat sektörü, kaynak tüketimi ve atık üretimi açısından küresel ölçekte önemli bir rol oynamakta olup (Charef, 2024), artan çevresel baskılar nedeniyle döngüsel ekonomi ilkelerini benimsemesi gerekmektedir (Charef, 2024; Norouzi vd., 2021; Sajid vd., 2024; Topraklı, 2024). Bu bağlamda, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda sürdürülebilirlik önlemleri her düzeyde uygulanmalı ve döngüsellik benimsenmelidir (Sajid vd., 2024). Döngüsel ekonomi ilkeleri, etkili atık yönetimi, yeniden kullanım ve geri dönüşüm süreçleriyle birlikte inşaat sektörünün tasarım, inşaat ve yıkım aşamalarında uygulanabilir (Ayuk ve Jade, 2023). Bu yaklaşım, inşaat sektörünün sürdürülebilirliğini önemli ölçüde iyileştirme potansiyeline sahip olup, ağır sanayiden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarını %50'den fazla azaltabilir (SWECO, 2025). Buna rağmen, bir çok malzeme teknik olarak yeniden kullanılabilir olmasına karşın yapı bileşenlerinin yalnızca %1'i ilk kullanımlarından sonra tekrar kullanılmaktadır (Irish Green Building Council, 2025). Bu durum, döngüsel tasarım ve malzeme yeniden kullanımına vurgu yaparak

yapım yönetiminde kapsamlı bir değişiklik gerektirdiğini göstermektedir (Irish Green Building Council, 2025). Bu nedenle, geri dönüşüm ve yeniden kullanımı optimize eden daha sürdürülebilir yapım sistemlerinin kullanılması, doğal kaynak ihtiyacını önemli ölçüde azaltmakta ve sürdürülebilirlik yaklaşımlarının benimsenmesi yoluyla iklim değişikliğine karşı da uygulanabilir bir yanıt sunmaktadır (Finamore ve Dumbrava, 2024).

Yüksek kaynak yoğunluğu nedeniyle inşaat sektörü, döngüsel ekonomiye geçiş açısından kritik bir öneme sahiptir; ancak kendine özgü endüstriyel özellikleri ve döngüsellik ilkelerinin karmaşıklığı, uygulamaların sınırlı kalmasına neden olmaktadır (Yu vd., 2022). Bununla birlikte, bilgi ve iletişim teknolojileri, döngüsellik odaklı karar alma süreçlerini destekleme potansiyeline sahiptir (Yu vd., 2022) ve inşaat sektörü dijital fabrikasyon ve YBM gibi teknolojileri benimseyerek sürdürülebilirliğine katkı sağlayabilir (Ayuk ve Jade, 2023; Fahfouhi vd., 2024; Charef, 2022; Elmualim vd., 2018; Kuzminykh vd., 2024). Doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamak ve atık ile çevresel etkileri azaltmak için dijital fabrikasyon teknolojilerinin teşvik edilmesi önemlidir; örneğin YBM, birçok hükümetin desteğiyle proje verimliliğini artırmak için giderek daha fazla kullanılmaktadır (Charef, 2022; Fahfouhi vd., 2024). Ayrıca, YBM ve üç boyutlu baskı gibi dijital teknolojiler, döngüsel ekonomiyi ilerletmek için bütünlük bir çerçeve sunabilir ve mevcut yıkım uygulamalarının döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu hale getirilmesini mümkün kılabilir (Elmualim vd., 2018; Kuzminykh vd., 2024). Son olarak, Endüstri 5.0 teknolojileri ve döngüsel ekonomi ilkelerinin entegrasyonu, sürdürülebilir, insan merkezli ve dayanıklı bir yapma çevre geliştirmek için eşsiz fırsatlar sunmaktadır (Wolf vd., 2024a; Wolf vd., 2024b). Endüstri 5.0'in amacı, sürdürülebilir, insan merkezli ve dayanıklı bir gelecek yaratmak için dijital teknolojileri etkin kullanmaktır (Wolf vd., 2024a; Wolf vd., 2024b).

Giderek yaygınlaşmasına rağmen, malzemelerin yeniden kullanımı, inşaat sektöründe hala nadir görülen bir uygulama olarak görülmektedir (Krajewska ve Siewczynska, 2025). Örneğin, YBM'nin döngüsel ekonominin benimsenmesini kolaylaştırma potansiyeli, nispeten yeni bir araştırma alanıdır (Charef, 2022). Bununla birlikte, YBM'nin bina tasarımının erken aşamalarında benimsenmesiyle döngüsellğe katkısı hâlâ sınırlıdır (Atik vd., 2024). Ayrıca, atık azaltımına katkıda bulunabilecek birçok teknolojinin varlığına rağmen, inşaat atık yönetimi henüz yeterince benimsenmemiştir (Li ve Leung, 2017). Dahası, inşaat sektöründe verimlilik ve sürdürülebilirliğin dijitalleşmeyle arttığı kabul edilse de, döngüsellüğün teşviki de henüz tam olarak yeterli düzeyde benimsenmiş değildir (Banihashemi vd., 2024). İnşaat

sektörünün karşı karşıya olduğu maliyet ve süre aşırımları, sağlık ve güvenlik, verimlilik ve işgücü kıtlığı gibi çok sayıda karmaşık problemler, büyüme kabiliyetini ciddi şekilde sınırlandırmaktadır; buna ek olarak; inşaat sektörü dünyada dijital olarak en az gelişmiş sektörlerden biridir (Abioye vd., 2021). Bu durum, bir çok sektör dijitalleşme yolu ile döngüsel ekonomi prensiplerini uygulamaya başlamış olsa da, mimarlık, mühendislik ve inşaat sektörünün geride kalmasına neden olmaktadır (Wolf vd., 2024a; Wolf vd., 2024b). Günümüzde döngüsel ekonomi düşüncesinin, inşaat sektöründeki pratik uygulamaları çoğunlukla yalnızca geri dönüşüm ve atık azaltma çabaları ile sınırlı kalmıştır (Adams vd., 2017), oysa inşaat sektörünün düşük karbonlu malzemeleri benimseyerek, atıklarını ve çevresel etkilerini azaltarak döngüsel ekonomiye geçiş için etkin adımlar atması gerekmektedir (Fereydooni vs., 2024; Fahfouhi vd., 2022; Fico vd., 2022). Döngüsel ekonomiye geçişin önemi bilinse de, sektörde ve akademide bunu belirlemek ve uygulamak için hala net ve ortak bir yol bulunmamaktadır (Atik vd., 2024). Bu durum, inşaat sektöründe dijital teknolojiler ile döngüsel ekonomi arasındaki ilişkiler üzerine daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir (Rigillo vd., 2024). Bu nedenle inşaat sektörü, döngüsel ekonomi yaklaşımlarını benimseyerek atık azaltımına yönelik stratejiler geliştirmelidir (Banihashemi vd., 2024). Belirtilen tüm bu nedenlerden dolayı, inşaat sektöründe döngüsellik teşvik etmek için dijital teknolojilerin kullanımına yönelik çalışmalar yapılmasına, dijital teknolojilerin inşaat sektöründe potansiyel avantajlarının ve zorluklarının ortaya konulmasına, gelecek stratejilerinin belirlenmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çerçevede bu çalışma, güncel literatürü eleştirel bir şekilde incelemeyi ve inşaat sektöründe döngüsellik teşvik etmek için dijital teknolojilerin kullanımına ilişkin bir araştırma yapmayı amaçlamaktadır.

## 2. Yöntem

Bu çalışmanın amacına ulaşabilmesi için iki aşamalı olarak mevcut literatür incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, literatürün güncel durumunu/ yönelimini ele almayı sağlayan ve şeffaf, güvenilir, bilgiye ulaşmayı amaçlayan bibliyometrik analiz yönteminden destek alınmıştır.

Bibliyometrik analiz, geniş hacimli bilimsel verileri sistematik ve ayrıntılı biçimde incelemek için yaygın olarak kullanılan güvenilir bir yöntemdir (Donthu vd., 2021). Belirli bir disiplinin zaman içindeki gelişimini ortaya koymaya yardımcı olurken, aynı zamanda o alandaki yeni eğilimlerin ve araştırma yönelimlerinin belirlenmesine de katkı sağlar (Donthu vd., 2021). Bibliyometrik analizin temel aşamaları arasında uygun veritabanlarından verilerin toplanması, bu verilerin temizlenip düzenlenmesi ve ardından çeşitli bibliyometrik analiz yöntemlerine uygulanması yer alır (Passas, 2024). Bu süreç, anlamlı ve yorumlanabilir bilgilerin elde edilmesinde önemli bir sonraki adımı oluşturur (Passas, 2024). *VOSviewer* ise, bibliyometrik ağların

oluşturulması, görselleştirilmesi ve daha anlaşılır şekilde sunulması amacıyla kullanılan en etkili yazılım araçlarından biri olarak öne çıkmaktadır (Dereli, 2024). Ayrıca *VOSviewer* yazılımının ücretsiz erişim imkanı sağlaması ve kolay bir arayüze sahip olması (Alkılınc ve Palabıyık, 2023), akademik çalışmalarda da yaygın kullanılmasının sebepleri arasındadır. Tüm bu nedenlerden ötürü, literatürdeki ilgili çalışmaların (örn. Dereli, 2024; Alkılınc ve Palabıyık, 2023) yöntemine benzer şekilde, bu çalışmanın amacına ulaşabilmesi için de *VOSviewer* yazılımından destek alınarak bibliyometrik analizler yapılmıştır.

“Proje ve yapım yönetimi” araştırma alanı, disiplinlerarası bir yapıya sahip olup, mühendislik, yönetim bilimleri ve tasarım literatürünü birlikte içermektedir. “*Scopus*” veri tabanı, bu disiplinlerarası yapıyı kapsayan geniş dergi portföyü, uluslararası yayın çeşitliliği ile kapsamlı ve güvenilir bir veri seti sunmaktadır. Bu nedenle çalışmada veri homojenliğini ve metodolojik tutarlılığı sağlamak amacıyla *Scopus*, tek bir veritabanı olarak tercih edilmiştir. Bununla birlikte, çalışmada, tek bir arama sorgusu “döngüsel inşaat-circular construction” ile arama yapılmıştır. Çalışma kapsamında ön taramalarda daha geniş anahtar kelime kombinasyonları denenmiş; ancak “proje ve yapım yönetimi” literatürünün disiplinlerarası yapısı nedeni ile konudışı çok sayıda yayına ulaşıldığı görülmüştür. Bibliyometrik analizlerde verisetinin kavramsal bütünlüğü önemli olduğundan, veri gürültüsünü azaltmak ve alanı doğrudan temsil eden bir örneklem oluşturmak amacı ile konuya odaklanan, filtrelenmiş tek bir arama sorgusu kullanılması tercih edilmiştir. Böylece, *Scopus* veritabanı ve “circular construction” arama sorgusu, çalışmanın dahil etme kriterleri arasında yer almış, diğer veri tabanları ve diğer arama sorguları ise hariç tutma kriterleri arasında yer almıştır. Böylece, belirtilen kriterler dahilinde, toplamda 490 yayına ulaşılmıştır. Daha sonra 2015-2025 yıllarının dışında kalan 24 yayın ve konferans incelemesi (*conference review*) (7), not (*note*) (5), kısa anket (*short survey*) (1), düzelme (*erratum*) (1), editöryal yazı (*editorial*) (1) yayınlar olmak üzere, toplamda 15 yayın hariç tutulmuştur. Makaleler (234), konferans bildirileri (126), derleme çalışmalar (52), kitap bölümleri (35) çalışmaya dahil edilmiştir. Kalan 451 yayının bilgileri, daha sonra “*VOSviewer*” yazılımına aktarılarak bibliyometrik analizler yapılmıştır. Bibliyometrik analizler, anahtar kelimelerin birlikte bulunması ile ilişkili olarak kümeleme analizlerini de içermiştir.

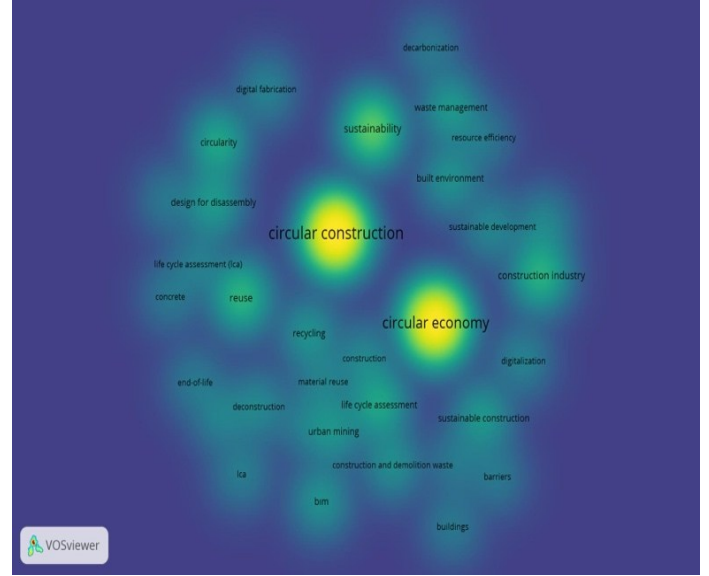
Çalışmanın ikinci aşamasında ise dahil etme ve hariç tutma kriterlerine uygun olarak elde edilen toplam 451 yayın, özet ve hızlı okuma yapılarak çalışmanın kapsamına uygun olup olmamasına göre elenmiştir. Böylece, 451 yayın arasından belirli ölçütler doğrultusunda, son durumda 120 makale seçilerek içerik analizine dahil edilmiştir. Seçim sürecinde, yalnızca inşaat sektöründe döngüsellik arttırmaya yönelik ve dijital teknolojilerle doğrudan ilişkili olan özgün araştırma veya kavramsal katkı sağlayan çalışmalar değerlendirmeye

alınmıştır. Doğrudan inşaat sektörü ile bağlantısı bulunmayan, inşaat sektöründe döngüsellik vurgusu içermeyen ve dijital teknolojiler ile ilişkisi olmayan, özgün araştırma ya da kavramsal katkı sunmayan yayınlar ise değerlendirme dışı bırakılmıştır. Bu kriterler, içerik analizinin daha odaklı ve sistemli bir şekilde yürütülebilmesine olanak sağlamıştır. Böylece, toplamda 120 makalenin detaylı içerik analizi yapılmış, bulgulara dayalı olarak, mevcut literatür tartışılmış ve gelecek çalışma önerileri sağlanmıştır.

### 3. Bulgular

#### 3.1 VOSviewer Yazılımı Aracılığı ile Yapılan Bibliyometrik Analizlere Yönelik Bulgular

VOSviewer yazılımı aracılığı ile anahtar kelimelerin birlikte bulunma (*co-occurrence*) analizi yapılmıştır. Bir anahtar kelimenin minimum geçme sayısı 5 olarak alınmış olup, 1222 anahtar kelimedenden 34'ü eşik değeri karşılamıştır. Şekil 1, ağ görselleştirme analizini (*network visualization*), Şekil 2, çakışma/katman görselleştirmesini (*overlay visualization*), Şekil 3 ise yoğunluk görselleştirmesini (*density visualization*) göstermektedir.



Şekil 3. Yoğunluk görselleştirmesi (*density visualization*).

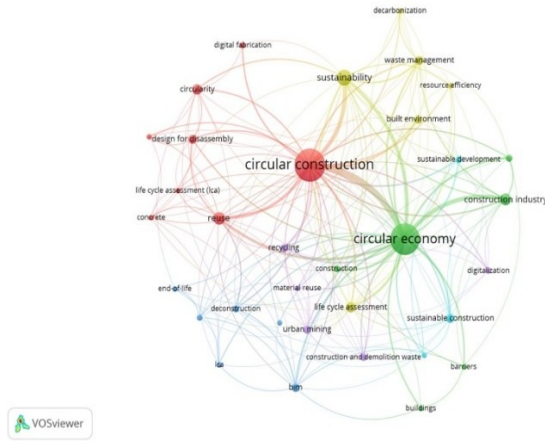
Kriterleri karşılayan 34 anahtar kelime, 6 küme altında sınıflandırılmış olup, en sık kullanılan anahtar kelimeler kırmızı, yeşil, mavi, sarı, mor ve turkuaz kodlarıyla, her küme içinde verilmiştir (Tablo 1-7).

Tablo 1. Kümeleme analizine yönelik bulgular.

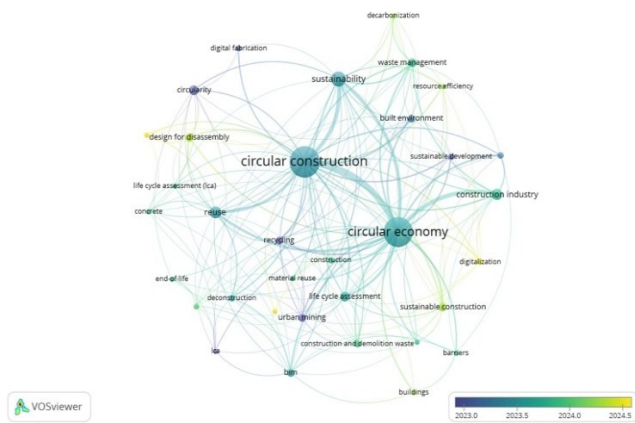
Toplam öge/anahtar kelime sayısı (items)	Toplam küme sayısı (clusters)	Bağlantılar (links)	Toplam bağlantı gücü (Total link strength)
34	6	182	539

Tablo 2. Kırmızı kodlu küme (birinci) yönelik bulgular.

Kırmızı kodlu (birinci) küme (Cluster 1-red) Toplam öge/anahtar kelime sayısı: 8	Küme (cluster)	Bağlantılar (links)	Toplam bağlantı gücü (Total link strength)	Bulunma sıklığı (occurrences)
Döngüsel inşaat (Circular construction)	1	32	183	160
Döngüsellik (Circularity)	1	12	19	18
Beton (Concrete)	1	11	13	5
Sökülebilir tasarım (Design for disassembly)	1	9	20	14
Dijital Fabrikasyon (Digital fabrication)	1	3	7	7
Yaşam döngüsü değerlendirilmesi (Life cycle assessment)	1	7	10	6
Modüler inşaat (Modular construction)	1	6	10	5
Yeniden kullanım (Reuse)	1	18	55	25



Şekil 1. Ağ görselleştirme analizi (*network visualization*)



Şekil 2. Çakışma/katman görselleştirmesi (*overlay visualization*)

**Tablo 3.** Yeşil kodlu kümeye (ikinci) yönelik bulgular.

Yeşil kodlu (ikinci) küme (Cluster 2-green) Toplam öge/anahtar kelime sayısı: 6	Küme (cluster)	Bağlantılar (links)	Toplam bağlantı gücü (Total link strength)	Bulunma sıklığı (occurrences)
Engeller (Barriers)	2	6	13	5
Yapılar (Buildings)	2	4	10	5
Döngüsel ekonomi (Circular economy)	2	32	217	147
İnşaat (Construction)	2	7	14	8
İnşaat sektörü (Construction industry)	2	12	49	23
Sistemantik literatür taraması (Systematic review)	2	8	20	8

**Tablo 4.** Mavi kodlu kümeye (üçüncü) yönelik bulgular.

Mavi kodlu (üçüncü) küme (Cluster 3-blue) Toplam öge/anahtar kelime sayısı: 6	Küme (cluster)	Bağlantılar (links)	Toplam bağlantı gücü (Total link strength)	Bulunma sıklığı (occurrences)
Yapı Bilgi Modelleme (BIM)	3	14	29	11
Seçici söküm (Deconstruction)	3	11	22	8
Dijital dönüşüm (Digital transformation)	3	3	5	5
Gömülü karbon (Embodied carbon)	3	9	13	7
Yaşam döngüsü sonu (End-of-life)	3	6	8	5
Yaşam döngüsü değerlendirme (lca)	3	9	12	6

**Tablo 5.** Sarı kodlu kümeye(dördüncü) yönelik bulgular.

Sarı kodlu (dördüncü) küme (Cluster 4-yellow) Toplam öge/anahtar kelime sayısı: 6	Küme (cluster)	Bağlantılar (links)	Toplam bağlantı gücü (Total link strength)	Bulunma sıklığı (occurrences)
Yapma çevre (Built environment)	4	13	26	11
Karbonsuzlaştırma (Decarbonization)	4	7	12	5
Yaşam döngüsü analizi (Life-cycle assessment)	4	15	38	18
Kaynak verimliliği (Resource efficiency)	4	8	15	5
Sürdürülebilirlik (Sustainability)	4	22	81	40
Atık yönetimi (Waste management)	4	13	35	13

**Tablo 6.** Mor kodlu kümeye (beşinci) yönelik bulgular.

Mor kodlu (beşinci) küme (Cluster 5-purple) Toplam öge/anahtar kelime sayısı: 5	Küme (cluster)	Bağlantılar (links)	Toplam bağlantı gücü (Total link strength)	Bulunma sıklığı (occurrences)
Yapım ve yıkım (Construction and demolition)	5	10	19	10
Dijitalleşme (Digitalization)	5	7	15	7
Malzeme yeniden kullanımı (Material reuse)	5	6	11	6
Geri dönüşüm (Recycling)	5	9	22	11
Kent madenciliği (Urban mining)	5	11	21	11

**Tablo 7.** Turkuaz kodlu kümeye (altıncı) yönelik bulgular.

Cyan kodlu (altıncı) küme (Cluster 6-cyan) Toplam öge/anahtar kelime sayısı: 3	Küme (cluster)	Bağlantılar (links)	Toplam bağlantı gücü (Total link strength)	Bulunma sıklığı (occurrences)
İnşaat atığı (Construction waste)	6	6	12	5
Sürdürülebilir inşaat (Sustainable construction)	6	13	27	13
Sürdürülebilir kalkınma (Sustainable development)	6	5	15	8

Kümeleme analizinin bulguları, farklı küme gruplarının farklı çalışma konularına odaklanabildiğini açığa çıkarmıştır. Örneğin, kırmızı kodlu birinci kümenin (Tablo 2), inşaat sektöründe döngüsellik teşvikine yönelik olarak modüler tasarım, yeniden kullanım gibi konulara odaklandığı görülmüştür. Yeşil kodlu ikinci kümenin (Tablo 3), inşaat sektöründe döngüsellik teşvikine yönelik daha sistemantik analizlere, entegrasyona yönelik engellere odaklandığı açığa çıkmıştır. Mavi kodlu üçüncü kümenin (Tablo 4), daha çok YBM ve yaşam döngüsü değerlendirmelerine odaklandığı görülmüştür. Sarı kodlu dördüncü kümenin (Tablo 5), kaynak verimliliği, karbonsuzlaştırma ve atık yönetimi gibi konulardaki çalışmalara yer verildiği görülmüştür. Mor kodlu beşinci kümeye dahil olan çalışmaların (Tablo 6), inşaat sektöründe geri dönüşüm odaklı olarak ve proje yaşam döngüsünün yapım ve yıkım atıklarına odaklandığı söylenebilir. Turkuaz kodlu altıncı küme ise (Tablo 7), sürdürülebilir inşaat için sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda çalışmalar ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında anahtar kelime analizinden elde edilen bulgular (Tablo 1-7), inşaat sektöründe döngüsellik teşviki için YBM ve dijital fabrikasyon teknolojilerinin öne çıkabildiğini göstermiştir.

### **3.2 Güncel Literatürün İçerik Analizine Yönelik Bulgular**

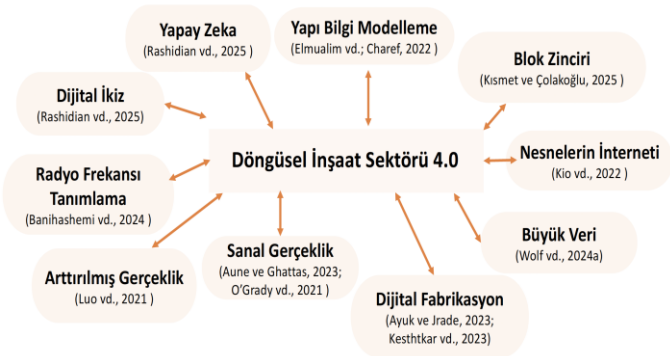
Çalışmanın ikinci aşamasında, güncel literatürün derinlemesine içerik analizi gerçekleştirilmiş ve inşaat sektöründe doğrusal ekonomik modellerden döngüsel ekonomik modele geçişin gerekliliği ortaya koyulmuştur. Literatürde, inşaat sektörünün doğal kaynakların önemli bir tüketicisi olması ve çevresel bozulmaya büyük ölçüde katkıda bulunması nedeniyle mevcut uygulamaların yeniden gözden geçirilmesi gerektiği (Keshtkar vd., 2023) vurgulanmaktadır. Bu bağlamda döngüsel ekonomi yaklaşımı, bir binanın tasarım ve inşaat aşamasından işletme ve yıkım aşamasına kadar tüm inşaat proje yaşam döngüsü boyunca kaynak verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı ve atık oluşumunu en aza indirmeyi hedeflemektedir (Irish Green Building Council, 2025). Geleneksel “al, kullan, at” doğrusal modelinde malzemelerin genellikle tek kullanım sonrasında atık haline gelmesi (Irish Green Building Council, 2025; Benachio vd., 2020; Chibesakunda, 2023), sektörün dünya genelindeki doğal kaynakların %30’undan fazlasını tüketmesine ve katı atıkların yaklaşık %25’ini üretmesine neden olmaktadır (Benachio vd., 2020). Ayrıca doğrusal ekonomi anlayışında inşaat ve yıkım atıklarının sıfır değere sahip olduğu varsayıldığından bu malzemelerin büyük bir bölümü çöplüklerde son bulmaktadır (Purchase vd., 2022). Ancak, sürdürülebilirlik ve kaynak yönetimi konusundaki farkındalığın artmasıyla birlikte pek çok ülke, aşırı kullanılan ve hızla tükenen kaynakların tüketimini azaltmaya yönelik alternatif modeller geliştirmeye yönelmiştir (Purchase vd., 2022). Bu doğrultuda, bina yaşam döngüsü boyunca atıkların ve süreç verimsizliklerinin azaltılması yoluyla kaynak verimliliğinin artırılması, yapma çevrede sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kritik görülmektedir (Hernandez, 2025). Döngüsel inşaat yaklaşımları, inşaat sektörünün bu doğrultudaki gerekli dönüşümü için tamamlayıcı stratejiler sunarken (Hernandez, 2025), döngüsel ekonomi ilkeleri kaynak verimliliğini arttırmayı, atıkları azaltmayı ve malzemelerin yeniden kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır (Chibesakunda, 2023; Eftekhari vd., 2024).

Güncel literatür, inşaat sektöründe döngüsellik teşvik edilmesinde dijital teknolojilerin kritik bir rol üstlendiğini göstermektedir. Çalışmalar (örn; Eftekhari vd., 2024), gelişmiş dijital araçların sürdürülebilir uygulamalarla bütünleştirilmesinin, doğrusal üretim anlayışından rejeneratif ve kapalı sistemlere geçişi desteklediğini ortaya koymaktadır (Eftekhari vd., 2024; Rashidian vd., 2025). Mimarlık, mühendislik ve inşaat sektöründe mühendislik ve tasarım verilerini somut ürünlere dönüştüren dijital üretim teknolojilerinin giderek yaygınlaşması da bu dönüşümün önemli göstergelerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Keshtkar vd., 2023). Bu kapsamda YBM, nesnelerin interneti, blok zinciri, dijital ikizler, robotik ve yapay zeka gibi inşaat 4.0 teknolojileri, süreçlerin dijitalleştirilmesi ve otomatikleştirilmesi

yoluyla döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanmasına katkı sağlamaktadır (Rashidian vd., 2025; Elghaish vd., 2022). Literatürde söz konusu teknolojilerin kaynak optimizasyonu, atık azaltımı, yaşam döngü değerlendirmelerinin iyileştirilmesi ve karar süreçlerinin desteklenmesi gibi alanlarda döngüsellik güçlendirdiği vurgulanmaktadır (Kısmet ve Çolakoğlu, 2025; Keles vd., 2025). Ayrıca dijital araçların yönetsel, çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarda döngüsellik hedeflerine ulaşmayı desteklediği ve inşaat sektörünün sürekli üretim anlayışına geçişini hızlandırdığı belirtilmektedir (Askar vd., 2024a; Askar vd., 2024b). Benzer şekilde, dijitalleşmenin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada hayati bir unsur olduğu ve doğrusal üretim sistemine bağlı atık ve verimsizliklerin azaltılmasına katkı sağladığı ifade edilmektedir (Eze vd., 2025; Chibesakunda, 2023). Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, dijital teknolojilerin inşaat sektöründe döngüsel ekonomiye geçişi destekleyen stratejik bir araç niteliği taşıdığı anlaşılmaktadır. İncelenen mevcut proje ve yapım yönetimi literatüründe döngüsellik artırma potansiyeline sahip teknolojilerin yapay zeka (örn. Rashidian vd., 2025), büyük veri (örn. Wolf vd., 2024a), YBM (örn. Charef, 2022; Elmualim vs., 2018), blok zinciri (örn. Wolf vd., 2024a; Wolf vd., 2024b; Kısmet ve Çolakoğlu, 2025), nesnelerin interneti (örn. Kio vd., 2022; Wolf vd., 2024a; Wolf vd., 2024b), dijital fabrikasyon (örn. Ayuk ve Jade, 2023; Elmualim vd., 2018; Fico vd., 2022; Li ve Leung, 2017; Mohseni vd., 2023; Keshtkar vd., 2023), dijital ikiz (örn. Chibesakunda, 2023; Rashidian vd., 2025), sanal gerçeklik (örn. Aune ve Ghattas, 2023; O’Grady vd., 2021; Sahebzamani ve Forcada, 2025), artırılmış gerçeklik (örn. Luo vd., 2021), radyo frekansı ile tanımlama (örn. Banihashemi vd. 2024; Byers vd., 2022) olduğu görülmüştür.

İncelenen güncel literatürde, inşaat sektöründe döngüsellik artırabilme potansiyeline sahip dijital teknolojilere odaklanan çalışmalar özetlenmiştir. Örneğin, Oluwapelumi vd. (2024), Endüstri 4.0 teknolojilerinin sistematik bir şekilde benimsenmesinin akıllı döngüsel inşaata geçişi kolaylaştırabileceğini belirtirken, Adekunle vd. (2023), büyük veri ve nesnelerin interneti teknolojilerinin kullanımının küresel ölçekte giderek daha önemli hale geldiğini ifade etmiş ve büyük verinin nesnelerin internetiyle birleştirilmesinin doğru kullanıldığında, profesyonellere ve diğer inşaat sektörü paydaşlarına %90’ın üzerinde doğruluk sağlayabileceğini vurgulamıştır. Bilal vd. (2016), tüm önlemlere rağmen inşaat sektöründe atık miktarının artmaya devam ettiğini ve konuya yönelik çalışmalar yapılmasının gerekli olduğunu vurgulamış, ayrıca inşaat atıklarının büyük veri ve YBM tabanlı analizine yönelik bir model önermiştir. Akanbi vd. (2018), YBM tabanlı bir toplam ömür performans tahmincisinin, bir binadaki geri kazanılabilir malzemelerin faydalı ömürleri sonunda geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilir miktarını hesaplamada bir yöntem sunmuştur. Yu vd. (2022) ise dijital teknolojilerin sektördeki karar alma süreçlerini

destekleme potansiyeline sahip olmasından dolayı döngüselliği arttırabileceğini vurgulamıştır. Malzeme stoklarının yönetimi bağlamında, Jegen vd. (2025), sanayileşmiş toplumlarda en büyük malzeme envanterlerinin inşaat sektörü tarafından biriktirildiğini öne sürmüş, Almanya'da malzeme stoklarını ölçme yöntemlerini incelemiş ve Ruhr bölgesindeki tahmini 1160 milyon tonluk yapı malzemesinin çoğunluğunu mineral malzemelerin oluşturduğunu belirtmiştir. Bölgede yaklaşık 530 milyon tonluk beton geri dönüşüm potansiyeli, yenileme veya yıkım projeleri yoluyla önemli miktarda malzemenin geri kazanılabileceğini göstermiştir (Jegen vd., 2025). Jegen vd. (2025), malzeme stoku analizini bölgesel şehir planlama prosedürlerine dahil ederek ve kaynak geri kazanımı için teşvikler sunarak bölgesel döngüsel inşaatın uygulanmasına yönelik öneriler geliştirmiştir. Dijital fabrikasyon ve yenilikçi malzemeler bağlamında, Fahfouhi vd. (2022), verimlilik, otomasyon ve güvenliğin iyileştirilmesiyle daha sürdürülebilir bir gelecek oluşturulabileceğini belirtmiş, Mohseni vd. (2023), bazı miselyum bazlı kompozitler gibi çeşitli yenilikçi biyomalzemelerin inşaat sektöründe dijital fabrikasyon için kullanılmasının döngüsel ekonomiye destekleyebileceğini öne sürmüştür. Bununla birlikte, Khan vd. (2023), dijital üretimin atıkları azaltmaya, enerji tüketimini düşürmeye ve inşaat projelerinin çevresel etkisini en aza indirmeye yardımcı olabileceğini vurgularken, Albsoul vd. (2024), atık azaltma, prefabrikasyon, atık miktar belirleme, üç boyutlu baskı ve BM gibi sürdürülebilir uygulamaların inşaat atığını etkili bir şekilde azaltabileceğini ifade etmiştir. Wolf vd. (2024a), Wolf vd. (2024b), dijital dönüşüm ile döngüsel inşaat uygulamalarının kesişiminin optimize edilmiş malzemenin yeniden kullanımı yoluyla çevresel etkileri azaltma konusunda önemli bir potansiyel taşıdığını göstermiştir. Tam vd. (2022) ise YBM'nin yaşam döngüsü değerlendirmesinde uygulanmasının önemli faydalar sağladığını ve YBM-yaşam döngüsü entegrasyonu alanındaki çalışmaların artmasına yönelik ihtiyaca dikkat çekmiştir. Bu bağlamda, Şekil 1-3 ve Tablo 1-7, YBM ve dijital fabrikasyonun, incelenen çalışmalar arasında inşaat sektöründe döngüselliği teşvik etme konusunda öne çıktığını; Şekil 4 ise dijital teknolojilerin döngüselliği artırma potansiyeline vurgu yaptığını göstermektedir.



Şekil 4. Döngüsel inşaat sektörü 4.0.

## 4. Tartışma

Sürdürülebilir inşaat proje yönetimi günümüzde bir zorunluluk haline gelmekte olup inşaat sektörü, işletmelere ve topluma önemli avantajlar sağlayan döngüsel ekonomi uygulamalarını geliştirmek için dijital araçların entegrasyonunu benimsemelidir (Sul vd., 2025). İnşaat sektörü dünya çapında en büyük enerji tüketicilerinden biri olmasına rağmen, döngüsel inşaat prensiplerinin uygulanması ile birlikte önemli bir karbonsuzlaştırma potansiyeline sahip olabilir (European commission, 2024). Ayrıca, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'ne ulaşmada, endüstriler genelinde daha sürdürülebilir üretim ve tüketim uygulamalarının benimsenmesi, temel bir hedef olarak öne çıkmakta ve bu durum, döngüsel ekonomiye yönelik artan ilgi ile mümkün olmaktadır (Gasparri vd., 2023).

İnşaat sektörünün dijital teknolojiler desteğiyle döngüsel ekonomiye geçişi gerekli ve fırsatlarla dolu olsa da, sektör çeşitli engellerle karşı karşıyadır. Bu nedenle, döngüsel inşaat sektörü 4.0'ın önündeki engellerin belirlenmesi ve bu engelleri aşmaya yönelik stratejilerin tüm inşaat proje yaşam döngüsü boyunca geliştirilmesi önemlidir.

### 4.1 Döngüsel İnşaat 4.0'ın Önündeki Engeller

İnşaat sektörünün geleneksel yapısı ve kendine özgü özellikleri göz önüne alındığında, döngüsel modellere geçişi karbon emisyonlarını ve kaynak tüketimini azaltmak için hayati önem taşımakta, bununla birlikte önemli karmaşıklıklar ve zorluklar da içermektedir (Gasparri vd., 2023). Döngüsel ekonomide, yapı malzemelerinin yeniden kullanımı geri dönüşümden daha değerli bir süreç olarak kabul edilse de, kavramın başarılı bir şekilde entegre edilmesinin önünde hala birçok engel bulunmakta ve bu nedenle yaygın olarak benimsenmemektedir (Anastasiades vd., 2023). Anastasiades vd. (2023), inşaat sektörü paydaşlarının, bileşenlerin ve malzemelerin yeniden kullanımı için yasal bir çerçevenin eksikliğine dikkat çekmektedir. Diğer taraftan, örneğin YBM'nin tek bir veri modeli veya yakından ilişkili birleşik modellerden oluşan yaklaşımı, sektörün YBM kullanımını arttırmada ortak bir hedef olsa da, veri sahipliği belirsizliği, veri güvenliği ve gizliliği konusundaki endişeler ile veri depolamasının "dış kaynak kullanımına" karşı direnç gibi ele alınması gereken önemli zorluklar bulunmaktadır (Beach vd., 2017). Akinade vd. (2018), inşaat ve yıkım atıklarını en aza indirmek için YBM kullanmanın gerekliliği iyi bilinse de, YBM işlevselliğinin hâlâ mevcut yönetim araçlarının çoğunda sınırlı olduğunu belirtmiştir. Diğer bir örnek olarak, Al-Raei (2024), yapay zekânın sürdürülebilir kentsel kalkınma için önemli bir potansiyeli bulunmasına rağmen, benimsenmesine karşı engeller arasında algoritma yanlılığı, veri gizliliği, etik konuların varlığının bulunduğu dikkat çekmiştir. Banihashemi vd. (2024) ise, dijital araçların, tasarım ve inşaat aşamalarında kritik

önemde olduğunu belirtmiş, ancak yıkılmış yapılar için dijital ikizlerin eksikliği, iyileştirme dijitalleşmesinin yüksek maliyeti ve çevresel faydaların pratik uygulamaya göre daha ağır basması gibi engellerle karşılaştığını vurgulamıştır. Güncel literatür incelendiğinde, inşaat sektöründe dijital teknolojilerin henüz yeterince benimsenmediği, dijitalleşmeye yönelik çeşitli direnç gruplarının bulunduğu, veri güvenliği ve etik kaygılar gibi engellerin mevcut olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar belirli teknolojilere odaklandığı için, her bir teknolojinin döngüsel inşaat kullanımını engelleyen faktörler özelinde gelecek araştırmaların yapılması önerilmektedir.

#### **4.2 Döngüsel İnşaat Sektörüne Dijital Teknolojilerin Adaptasyonuna Yönelik Strateji Önerileri**

İnşaat sektöründe döngüsellik benimsenmesinde dijital teknolojilerin stratejik kullanımı, sektördeki engelleri aşmak ve sürdürülebilirliği arttırmak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Kio vd. (2022), son on yılda döngüsel ekonomi ve dijital dönüşümün inşaat sektöründe giderek önem kazandığını vurgulamıştır. İnşaat sektörü, dünya çapında malzemelerin en büyük kullanıcılarından biri ve önemli bir atık kaynağı olarak öne çıktığından, atıkların ve bina yaşam döngüsü maliyetlerinin azaltılmasıyla döngüsel ekonomi prensiplerinin uygulanması çevresel açıdan anlamlı bir etki yaratabilir (Al Jaber vd., 2023; Nourjalili ve Forouzannia, 2025). Bununla birlikte, döngüsel ekonomi uygulamaları ve trendleri hakkında halihazırda kapsamlı bir anlayışın sınırlı kaldığı görülmektedir (Chibesakunda, 2023). Chibesakunda (2023)'ün çalışması, döngüsellik ulaşmak için süreç optimizasyonu, atık azaltma ve kaynak verimliliğinin üç temel tema olarak öne çıktığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Timm vd. (2023), çevresel tasarım ve eko-tasarım stratejilerini incelemiş ve yeniden kullanım, geri dönüşüm, söküm için tasarım ve kullanım ömrünü uzatmaya yönelik tasarım gibi temel stratejileri belirlemiştir. Al Jaber vd. (2023) ise yapı sökümüne yönelik tasarım, adapte edilebilirlik ve esnekliğin döngüsel ekonomi kavramını inşaat sektöründe uygulamanın yolları olarak görülebileceğini, stratejileri uygularken karşılaşılabilecek engellerin tanımlanmasının ve bu engellere karşı stratejiler geliştirilmesinin önemini vurgulamıştır. Aynı çalışmada, YBM'nin belirlenen engelleri aşmada nasıl destek sağlayabileceğine dair öneriler de sunulmuştur. Sanchez vd. (2023) ise, bina sistemlerinin ve bileşenlerinin yeniden kullanımında, standart prosedürlerin eksikliği ve demontaj planlamasına dair kısıtlar gibi uygulamaya yönelik engelleri işaret ederek, stratejilerin pratik sınırlamalarla uyumlu olacak şekilde tasarlanmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

İnşaat sektöründe döngüsel ekonomiye geçiş, çevresel ve ekonomik fırsatlar sunmasına rağmen çeşitli sınırlamalar ve engellerle karşı karşıyadır; bu nedenle dijital teknolojilerin stratejik bir araç olarak konumlandırılması önemlidir. Dijital fabrikasyon gibi teknolojiler, atık azaltımı ve kaynak verimliliğine katkı

sağlayarak döngüsellik desteklemekte (Li ve Leung, 2017), YBM ile entegre malzeme pasaportları ise bina yaşam döngüsü boyunca, malzeme takibini güçlendirerek yeniden kullanım ve geri dönüşüm kararlarının iyileştirilmesine imkan tanımaktadır (Topraklı, 2024). Bu nedenle, döngüsel inşaat sektörüne dijital teknolojilerin adaptasyonuna yönelik strateji önerilerinden biri de malzeme pasaportlarının etkin kullanımı olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, dijital teknolojilerin benimsenmesi; örgütsel, ekonomik, çevresel, sosyal, kültürel, teknolojik ve kurumsal faktörlerden etkilenmekte olup, bu durum strateji geliştirme süreçlerinde çok boyutlu bir yaklaşımı gerekli kılmaktadır (Eze vd., 2025). Döngüsellik için stratejiler yalnızca teknolojik araçların kullanımı değil, aynı zamanda mevcut yapılardan değerli yapı malzemelerinin yeniden kullanımını (Byer vd., 2022), proje yaşam döngüsü kapsamında çevresel ve ekonomik göstergelerin bütüncül bir biçimde ele alınmasını (Liu vd., 2024; Mandicak vd., 2024), ve inşaat öncesi aşamada atıkların belirlenmesi ile sökme ve dekonstrüksiyon (yapısöküm) tasarımının planlanmasını (Nie vd., 2024) içermelidir. Artan nüfus ve kentleşme bağlamında, inşaat sektörünün döngüsel ekonomi prensiplerini benimsemesi, sürdürülebilir inşaatın desteklenmesi açısından stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Nourjalili ve Forouzannia, 2025; Sudarsan ve Gavali, 2024). Bu çerçevede süreç optimizasyonu, atık azaltma ve kaynak verimliliği gibi stratejik temalar (Chibesakunda, 2023), çevresel tasarım ve eko-tasarım yaklaşımlarıyla entegre edilmeli, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve kullanım ömrünü uzatmaya yönelik tasarım stratejileri ile birlikte bütüncül düşünülmelidir (Al Jaber vd., 2023; Sanchez vd., 2023; Timm vd., 2023). Ayrıca politika girişimleri, akademik çerçeveler ve kapsamlı yol haritaları, sektörün dijitalleşme ve döngüsellik hedeflerini eş zamanlı olarak desteklemelidir (Askar vd., 2024a; Askar vd., 2024b; Kısmet ve Çolakoğlu, 2025). Bununla birlikte, yerleştirilmiş malzeme bankalarının kurulması, Radyo frekansı tanımlama (RFID) kullanımı, sökülebilir tasarım araçlarının geliştirilmesi, mevcut binaların dijital envanterlerinin çıkarılması, yaşam döngüsü değerlendirmelerinin yapılması ve veritabanlarının döngüsellik için uygun biçimde yapılandırılması gibi stratejiler, dijital teknolojilerin adaptasyonunu kolaylaştırmakta ve döngüsel ekonomi uygulamalarının etkinliğini arttırmaktadır (Banihashemi vd., 2024; Kio vd., 2022). Bu bütüncül ve stratejik yaklaşım, dijital teknolojilerin etkin kullanımını sağlayarak inşaat sektöründe döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmasına olanak tanımakta ve gelecekteki uygulama ve araştırmalar için güçlü bir temel sunmaktadır.

Çalışma kapsamında yapılan bibliyometrik ve içerik analizleri, YBM ve Dijital fabrikasyon teknolojilerinin çalışma kapsamında incelenen literatürde diğer teknolojilere kıyasla nispeten öne çıktığını göstermektedir. Bu durum, söz konusu teknolojilerin inşaat sektöründe döngüsellik artırma potansiyeli

açısından daha fazla araştırma ve uygulamaya konu olmaları, somut faydalarının (atık azaltımı, kaynak verimliliği, tasarım optimizasyonu) ölçülebilir olması ve veri erişiminin analiz için daha elverişli olması gibi sebeplerden kaynaklanabilir. Dolayısıyla, bu öne çıkışın literatürdeki mevcut yoğunlaşmayı ve uygulamadaki öncelikleri yansıttığı söylenebilir. Bu bulgu, gelecekteki araştırmaların, diğer dijital teknolojilerin potansiyelini daha derinlemesine incelemesi gerekliliğine işaret edebilir. Bu durum, inşaat sektöründe döngüsellik arttırabilmeye yönelik stratejiler oluşturulurken göz önünde bulundurulabilir.

## 5. Sonuç

İnşaat sektörü, yüksek düzeyde atık üretimi ve yoğun kaynak tüketimi nedeniyle döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanmasını gerekli kılan sektörler arasında değerlendirilmekte olup, dijital teknolojiler bu dönüşüm sürecinde önemli bir kolaylaştırıcı unsur olarak ele alınabilmektedir. Bu bağlamda bu çalışma, iki aşamalı bir araştırma tasarımı çerçevesinde yürütülmüş; ilk aşamada bibliyometrik analizler gerçekleştirilmiş, ikinci aşamada ise seçilen çalışmalar üzerinden kapsamlı içerik analizi yapılarak dijital teknolojilerin döngüsellik bağlamındaki potansiyelleri, karşılaşılan engeller ve bu engeller ile bağlantılı olarak geliştirilebilecek strateji önerileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, dijital teknolojilerin döngüsellik süreçlerine entegrasyonunun; maliyet ve süre kayıplarının azaltılması, kaynak verimliliğinin artırılması ve karar alma süreçlerinin daha izlenebilir hale getirilmesi gibi bakımlardan çeşitli fırsatlar sunduğunu ortaya koymakla birlikte, benimsenme oranlarının halen sınırlı olması ve çok boyutlu engellerin bu potansiyelin sektör genelinde etkin bir biçimde hayata geçirilmesini güçleştirdiğini göstermektedir. Çalışma kapsamında incelenen güncel literatür, dijital teknolojilerin inşaat sektöründe döngüsellik için yüksek potansiyel taşıdığını gösterirken, uygulamada karşılaşılan engellerin aşılması için gelecekteki çalışmaların önemine işaret etmektedir. Bu bağlamda, inşaat proje yaşam döngüsünün tüm aşamalarını kapsayan, engel temelli çözüm önerilerine dayalı ve sistematik/stratejik yol haritalarının geliştirilmesi önemli olabilir. Ayrıca, söz konusu yol haritalarının endüstri-akademi işbirlikleri, destekleyici kamu politikaları, standartlaşma çalışmaları ve eğitim programları ile bütüncül bir çerçevede ele alınmasının önemli olabileceği görülmüştür. Çalışmanın sonuçları, YBM ve dijital fabrikasyonun çalışma kapsamında incelenen literatürde görece daha sık ele alındığını ve bu bağlamda diğer dijital teknolojilere kıyasla nispeten öne çıktığını göstermektedir. Bu bulgu, araştırmacılar ve uygulayıcılar için literatürdeki yoğunlaşmayı ve teknolojilerin mevcut faydalarını anlamada yol gösterici olabilir. Bununla birlikte, çalışmanın yalnızca “Scopus” veritabanı ve “döngüsel inşaat” arama sorgusu ile yürütülmüş olmasının bulguların kapsamı açısından bir sınırlılık teşkil ettiği unutulmamalıdır. Dolayısıyla gelecekteki araştırmaların diğer veritabanlarını da

kapsayacak şekilde ve çeşitlendirilmiş diğer arama sorgularını da dahil edecek biçimde geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca gelecek çalışmaların, döngüsellik benimsenmesinin önündeki engellerin sistematik olarak belirlenmesi, anket, delphi çalışması gibi çeşitli nicel yöntemler ile önceliklendirilmesi, öne çıkan engellere karşı uygulanabilir stratejilerin geliştirilmesi doğrultusunda şekillenmesi faydalı olabilir. Sonuç olarak, bu çalışmanın literatürdeki mevcut bilgi birikimini, bibliyometrik ve içerik analizi temelli bulgular aracılığıyla, inşaat sektöründe döngüsellik 4.0’ın sağlanmasına yönelik teşvik edici uygulamalara yol gösterici nitelikte olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmanın, inşaat sektöründe döngüsellik hedefleyen araştırmacılar ve inşaat sektörü profesyonelleri için faydalı olacağı beklenmektedir.

### Yazar Katkı Beyanı

Yazar-1: Kavramsallaştırma, araştırma, metodoloji ve yazılım, görselleştirme ve yazım – orijinal taslak.

### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyebilecek bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedir.

### Veri Erişilebilirlik Beyanı

Bu çalışma sırasında üretilen veya analiz edilen tüm veriler, yayımlanan bu makale içinde yer almaktadır.

## Kaynaklar

Alkılınc, E. & Palabıyık, S. (2023). Bibliyometrik Analiz Yöntemi Üzerinden Yer Seçimi ile İlgili Karar Destek Sistemi Yöntemlerinin İncelenmesi, *International Journal of Social and Humanities Sciences Research*, **10**(98), 2016-2026.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.8306910>

Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Delgado, J. M. D., Bilal, M., Akinade, O. O., ve Ahmed, A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges, *Journal of Building Engineering*, **44**.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103299>

Adams, K. T., Osmani, M., Thorpe, T., ve Thornback, J. (2017). Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers, *Waste and resource management*, **170**, WR1, 15-24.  
<https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00011>

Adekunle, P., Aigbavnoa, C., Oke, A., Akinradewo, O., ve Otasowie, O. (2023). *Application of big data and internet of things in the built environment: a bibliometric review*, Proceedings of the 31st Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 50–58.  
<https://doi.org/10.24928/2023/0138>

Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Ajayi, A. O., Delgado, M. D., Bilal, M., ve Bello, S. A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator, *Resources, conservation and recycling*, **129**.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>

Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., ve Arawomo, O. O. (2018). Designing out construction waste using BIM technology: Stakeholder's expectations for industry deployment, *Journal of cleaner production*, **180**, 375-385.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.022>

Al Jaber, A., Alasmari, E., Martinez-Vazquez, P., ve Baniotopoulos, C. (2023). Life Cycle Cost in Circular Economy of Buildings by Applying Building Information Modeling (BIM): A State of the Art, *Buildings*, **13**(7), 1858.

<https://doi.org/10.3390/buildings13071858>

Al-Racei, M. (2024). The smart future for sustainable development: Artificial intelligence solutions for sustainable urbanization, *Sustainable development*, **33**(1), 508-517.

<https://doi.org/10.1002/sd.3131>

Albsoul, H., Doan, D. T., Aigwi, I. E., ve Ghaffaria, H. A. A. (2024). Review of extant literature and recent trends in residential construction waste reduction, *Waste Management and Research*.

<https://doi.org/10.1177/0734242X241241607>

Anastasiades, K., Dockx, J. V. B. M., Rinke M, Blom J, ve Audenaert A. (2023). Stakeholder perceptions on implementing design for disassembly and standardisation for heterogeneous construction components, *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, **41**(8):1372-1381.

<https://doi.org/10.1177/0734242X231154140>

Askar, R., Karaca, F., Bragança, L., ve Gervásio, H. (2024a). The Role of BIM in Supporting Circularity: A Conceptual Framework for Developing BIM-Based Circularity Assessment Models in Buildings. In: Ungureanu, V., Bragança, L., Baniotopoulos, C., Abdalla, K.M. (eds) 4<sup>th</sup> International Conference "Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience" & Midterm Conference of CircularB Implementation of Circular Economy in the Built Environment, *Lecture Notes in Civil Engineering*, **489**. Springer, Cham.

[https://doi.org/10.1007/978-3-031-57800-7\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-031-57800-7_60)

Askar, R., Karaca, F., Salles, A., Lukyanenko, A., Puma, G. C. C., Tavares, V., Khaidarova, A., Nadazdi, A., Martos, R. P., Cabrera, J. M. D., Honic, M., Wolf, C., Resulogulari, E. C., Karatas, I., Gervasio, H., ve Bragança, L.(2024b). Driving the built environment twin transition: synergising circular economy and digital tools, *Circular economy design and management in the built environment*, 459-505.

[https://doi.org/10.1007/978-3-031-73490-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-73490-8_17)

Atik, Ş., Aparisi, T. D., ve Raslan, R. (2024). Mind the gap: Facilitating early design stage building life cycle assessment through a co-production approach, *Journal of Cleaner Production*.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142803>

Atta, I., Bakhaum, E. S., ve Marzouk, M. M. (2021). Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM, *Journal of building engineering*, **43**.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103233>

Aune, K. ve Ghattas, S. (2023). Sustainability and virtual reality: the impact of immersive technology on behaviours and attitudes, Son erişim tarihi: 24.12.2025.

<http://hdl.handle.net/20.500.12380/307081>

Ayuk, M. N., ve Jrade A. (2023). Integrating Building Information Modeling (BIM), GIS, and Circular Economy (CE) for the Construction and Deconstruction Waste Based on Construction Methods at the Conceptual Design Stage of Buildings. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **498**, 343-356.

[https://doi.org/10.1007/978-981-19-0968-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0968-9_6)

Banihashemi, S., Meskin, S., Sheikhhoskar, M., Mohandes, S. R., Hajirasouli, A. ve LeNguyen, K. (2024). Circular economy in construction: The digital transformation perspective, *Cleaner engineering and technology*, **18**.

<https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100715>

Beach, T., Petri, I., Rezgui, Y., ve Rana, O. (2017). Management of collaborative BIM data by federating distributed BIM Models, *Journal of computing civil engineering*, **31** (4).

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000657](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000657)

Benachio, G. L., Freitas, M. C. D., ve Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review, *Journal of cleaner production*, **260**.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>

Bilal, M., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Ajayi, S. O., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Quadir, J., Pasha, M., ve Bello, S. A. (2016). Big data architecture for construction waste analytics (CWA): A conceptual framework, *Journal of Building Engineering*, **6**, 144-156.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.03.002>

Byers, B., Cheriyaulla, S., Ewason, J., Hall, D., ve Wolf, C. D. (2022). *Using engraved QR codes to connect building components to materials passports for circular construction*, European conference on computing in construction, Ixia, Rhodes, Greece.

<http://doi.org/10.35490/EC3.2022.226>

Charef, R. (2022). The use of Building Information Modelling in the circular economy context: Several models and a new dimension of BIM (8D), *Cleaner Engineering and Technology*, **7**.

<https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100414>

Charef, R. A. (2024). A Digital Framework for the Implementation of the Circular Economy in the Construction Sector: Expert Opinions, *Sustainability*, **16**(14).

<http://doi.org/10.3390/su16145849>

Chibesakunda, E. (2023). Circular strategies for sustainable construction and building management, son erişim tarihi: 19.12.2025.

<https://www.pwc.de/en/sustainability/circular-economy/circular-strategies-for-sustainable-construction-and-building-management.html>

Dereli, A. B. (2024). WOSviewer ile Bibliyometrik Analiz. *Communicata*, **28**, 1-7.

<https://doi.org/10.32952/communicata.1517725>

- Duran, V. N., Garcia, R. A., ve Vega, M. C. (2024). Integration of circularity strategies into architectural design through BIM, *Habitat Sustentable*, **14**(1), 118-131.  
<https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.01.09>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines, *Journal of Business Research*, **133**, 285-296.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Eftekhari, A. F., Khodabakhshian, A., Cecconi, F. R., ve Daniotti, B. (2024). Earth and Environmental Science Reviewing the critical factors for circular building design and construction, *Improving Circularity in Construction Through a BIM-Based Waste Management Framework Reviewing the critical factors for circular building design and construction*.  
<http://doi.org/10.1088/1755-1315/1363/1/012042>
- Elghaish, F., Matarneh, S. T., Edwards, D. J., Pour, Rahimian, F., El-Gohary, H., ve Ejohwomu, O. (2022). Applications of Industry 4.0 digital technologies towards a construction circular economy: gap analysis and conceptual framework, *Construction Innovation: Information Process Management*, **22**(3), 647-670.  
<https://doi.org/10.1108/CI-03-2022-0062>
- Elmualim, A., Mostafa, S., Chileshe, N., ve Rameezdeen R. (2018). Construction and the circular economy: Smart and industrialised prefabrication. *Unmaking Waste in Production and Consumption: Towards The Circular Economy*, 323-336.  
<http://doi.org/10.1108/978-1-78714-619-820181025>
- European comission. (2024). *Circular construction and materials for a sustainable building sector*, son erişim tarihi: 10.12.2025.  
<https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/circular-construction-and-materials-sustainable-building-sector>
- Eze, E. C., Sofolahan, O., Omoboye, O. G., ve Ameyaw, E. E. (2025). Drivers of digital technologies-driven circular economy in the Nigerian construction industry: a PLS-SEM approach, *Smart and Sustainable Built Environment*.  
<https://doi.org/10.1108/SASBE-10-2024-0438>
- Fahfouhi, K., Craveiro, F., ve Bartolo, H. (2024). The Role of Construction 3D Printing in Advancing Sustainability and Digitalization in Africa, *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-48532-9\\_57](https://doi.org/10.1007/978-3-031-48532-9_57)
- Fahfouhi, K., Freitas, D., Poullain, P., Craveiro, F., ve Bartolo, H. (2022). *Digital Fabrication in Construction Industry in Africa*, Proceedings of the 2nd International Conference on Water Energy Food and Sustainability, 470-479.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6_48)
- Farhadi, F. (2024). What is Circular Construction?, son erişim tarihi: 20.12.2025.  
<https://neuroject.com/circular-construction/>
- Fereydooni, E. A., Khodabakhshian, A., Iuorio, O., Re, C. F. ve Daniotti, B. A. (2024). A New Building Information Modelling-Based Approach to Automate Recyclability Rate Calculations for Buildings, *Buildings*, **14**(6).  
<https://doi.org/10.3390/buildings14061521>
- Fico, D., Rizzo, D., Carolis, V., Montagna, F., Palumba, E. ve Corcione, C. E. (2022). Development and characterization of sustainable PLA/Olive wood waste composites for rehabilitation applications using Fused Filament Fabrication, *Journal of Building Engineering*, **56**.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104673>
- Finamore, M., ve Dumbrava, C. O. (2024). Circular economy in construction- findings from a literature review. *Heliyon*, **10**.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34647>
- Gasparri, E., Arasteh, S., Kuru, A., Stracchi, P., ve Brambilla, A. (2023). Circular economy in construction: A systematic review of knowledge gaps towards a novel research framework, *Frontiers in built environment*, **9**.  
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1239757>
- Hernández, H. (2025). Circular Industrialized Construction: A Perspective Through Design for Manufacturing, Assembly, and Disassembly, *Buildings*, **15**(13), 2174.  
<https://doi.org/10.3390/buildings15132174>
- Irish Green Building Council. (2025).Circularity in the built environment. son erişim tarihi: 20.12.2025.  
<https://www.igbc.ie/circularity-built-environment/>
- Jegen, P., Huber, O., Gast, L., ve Faulstich, M. (2025). Mapping urban building material stocks to understand potentials for circular construction: A case study in Germany'S Ruhr area, *Sustainable cities and society*, **135**,  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106942>
- Keles, C., Cruz, R. F., ve Hoque, S. (2025). Digital Technologies and Circular Economy in the Construction Sector: A Review of Lifecycle Applications, Integrations, Potential, and Limitations, *Buildings*, **15**(4), 553.  
<https://doi.org/10.3390/buildings15040553>
- Keshtkar, M., Danies, E., ve Gyoh, L. (2023). *The impacts of digital fabrication on the construction industry: a systematic review*, Proceedings of the 23rd International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, 605-615.  
<https://doi.org/10.36253/979-12-215-0289-3.59>
- Khan, S. A., Jassim, M., Ilcan, H., Sahin, O., Bayer, I. R., Sahmaran, M., ve Koc, M. (2023). 3D printing of circular materials: Comparative environmental analysis of materials and construction techniques, *Case Studies in Construction Materials*, **18**.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02059>
- Kio, P. N., Anumba, C. J., ve Ali, A. K. (2022). Circular Economy Trends- Potential Role of Emerging Technologies. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 1101.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/6/062005>
- Kısmet, B. ve Çolakoğlu, M. B. (2025). Circular Built Environment During the Digital Age: A Systematic Review, *Journal of Computational Design*, **6**(2), 365-390.  
<https://doi.org/10.53710/jcode.1618537>

- Krajewska, A., ve Siewczyńska, M. (2025). Circular Economy in the Construction Sector in Materials, Processes, and Case Studies: Research Review, *Sustainability*, **17**(15).  
<https://doi.org/10.3390/su17157029>
- Kuzminykh, A., Granja, J., Parente, M., ve Azenha, M. (2024). Promoting circularity of construction materials through demolition digitalisation at the preparation stage: Information requirements and open BIM-based technological implementation, *Advanced Engineering Informatics*, **62**.  
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102755>
- Li, R. Y. M., ve Leung, T. H. (2017). *Sustainable construction waste management in Adelaide*, Proceedings of 22nd International Conference on Advancement of Construction Management and Real Estate, 1138 – 1146.
- Liu, Z., Liu, Y., ve Osmani, M. (2024). Integration of Smart Cities and Building Information Modeling (BIM) for a Sustainability Oriented Business Model to Address Sustainable Development Goals, *Buildings*, **14**(5).  
<https://doi.org/10.3390/buildings14051458>
- Luo, J., Yu, B., Jiang, Y. (2021). Upcycling of regular wood trunks and logs using wave function collapse (WFC), augmented reality (AR), and mixed reality (MR) technologies for circular design, *Sci Rep.*, **15**, 36599.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-20398-8>
- Mandicak, T., Spisakova, M., ve Mesaros, P. (2024). Sustainable Design and Building Information Modeling of Construction Project Management towards a Circular Economy, *Sustainability*, **16**(11).  
<https://doi.org/10.3390/su16114376>
- Mohseni, A., Vieira, F. R., ve Pecchia, J. A. (2023). Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: Material Compositions, Workflows, and Ways to Mitigate Contamination, *Biomimetics*, **8**(2).  
<https://doi.org/10.3390/biomimetics8020257>
- Nie, P., Dahanayake, K. C., ve Sumanarathna, N. (2024). Exploring UAE's transition towards circular economy through construction and demolition waste management in the pre-construction stage—A case study approach, *Smart and Sustainable Built Environment*, **13**(2), 246-266.  
<https://doi.org/10.1108/SASBE-06-2022-0115>
- Norouzi, M., Chafer, M., Cabeza, L. F., Jimenez, L., ve Boer, D. (2021). Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis, *Journal of building engineering*, **44**.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102704>
- Nourjalili, S., ve Forouzannia, F. (2025). *The role of BIM in sustainable construction Project delivery methods with focus on circular economy*, Engineering reports 2025;  
<https://www.researchgate.net/deref/https%3A%2F%2F>
- O'Grady, T. M., Brajkovich, N., Minunno, R., Chong, H. Y., ve Morrison, G. M. (2021). Circular Economy and Virtual Reality in Advanced BIM-Based Prefabricated Construction, *Energies*, **14**(13), 4065.  
<https://doi.org/10.3390/en14134065>
- Oluwapelumi, A., Mohamed, A., Obuks, E., ve Patrick, M. (2024). *Dimensions of maturity model for institutionalising smart circular construction: A systematic literature review*, Association of researchers in construction management, Proceedings of the 40th annual conference, London, UK.  
<https://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/87c4eab8ba77d475a96e63d42be2107e.pdf>
- Passas, I. (2024). Bibliometric Analysis: The Main Steps, *Encyclopedia*, **4**(2), 1014-1025.  
<https://doi.org/10.3390/encyclopedia4020065>
- Purchase, C. K., Al Zulayq, D. M., O'Brien, B. T., Kowalewski, M. J., Berenjian, A., Tarighaleslami, A. H., ve Seifan, M. (2022). Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, *Challenges, and Benefits*. *Materials*, **15**(1), 76.  
<https://doi.org/10.3390/ma15010076>
- Rashidian, S., Hossain, S. K. T., Volz, K., ve Teo M. (2025). Enabling circularity in construction: A technology-phase alignment of construction 4.0 and circular economy, *Sustainable production and consumption*, **60**, 245-259.  
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.10.004>
- Rigillo, M., Galluccio, G., ve Paragliola, F. (2024). Digital and circularity in building: KETs for waste management in European Union, *Agathon*, **13**, 247-258.  
<https://doi.org/10.19229/2464-9309/13212023>
- Sahebzamani, E., ve Forcada, N. (2025). Enhancing sustainable construction decisions: integrating BIM and VR for circular economy assessment, *Building Research & Information*, 1–21.  
<https://doi.org/10.1080/09613218.2024.2449441>
- Sajid, Z. W., Hussian, A., Khan, M. U. A., Alqahtani, F. K., ve Ullah, F. (2024). Technical, Economic, and Environmental Sustainability Assessment of Reclaimed Asphalt and Waste Polyethylene Terephthalate Pavements, *Sustainability*, **16**(12).  
<https://doi.org/10.3390/su16124911>
- Sanchez, B., Herthogs, P., ve Stouffs, R. (2023). *Identifying for BIM-based disassembly planning*, 40th international symposium on automation and robotics in construction.  
<https://doi.org/10.22260/ISARC2023/0007>
- Sudarsan, J. S., ve Gavali, H. (2024). Application of BIM in conjunction with circular economy principles for sustainable construction, *Environment, Development and Sustainability*, **26**(3), 7455-7468.  
<https://doi.org/10.1007/s10668-023-03015-4>
- Sul, B., Fawad, M., Chen, Q., ve Salamak, M. (2025). Mixed reality-based digital twinning of building circularity: A co-design approach for sustainable buildings, Waterloo: IAARC Publications.  
<https://www.proquest.com/conference-papers-proceedings/mixed-reality-based-digital-twinning-building/docview/3240509079/se-2>
- SWECO. (2025). Circular construction-an opportunity we can't waste, son erişim tarihi: 20.12.2025.

<https://www.swecogroup.com/urban-insight/circularity/circular-construction-an-opportunity-wecant-waste/>

Tam, V. W., Zhou, Y., Illiankoon, C., ve Le, K. N. A (2022). Critical review on BIM and LCA integration using ISO 14040 framework, *Building and environment*, **213**, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108865>

Timm, J. F. G., Maciel, V. G., ve Passuello, A. (2023). Towards Sustainable Construction: A Systematic Review of Circular Economy Strategies and Ecodesign in the Built Environment, *Buildings*, **13**(8), 2059. <https://doi.org/10.3390/buildings13082059>

Topraklı, A. Y. (2024). Enabling circularity in Turkish construction: a case of BIM-based material management utilizing material passports, *Smart and Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/SASBE-05-2024-0199>.

Wolf, C. D., Byers, B. S., ve Raghu, D. (2024a). A 5D Digital Circular Workflow: Digital Transformation Towards Matchmaking of Environmentally Sustainable Building Materials through Reuse from Disassembly. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4349460/v1>

Wolf, C. D., Çetin, S., ve Bocken, N. A. (2024b). Circular built environment in the digital age. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-39675-5>

Yu, Y., Yazan, D. M., Junjan, V., ve Iacob, M. E. (2022). Circular economy in the construction industry: A review of decision support tools based on Information&communication Technologies, *Journal of cleaner production*, **349**. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131335>