

METRO İSTASYONLARINDA SÜRDÜRÜLEBİLİR TESİS YÖNETİMİ: BIM DESTEKLİ DİJİTAL İKİZ UYGULAMALARI

Emre AKDENİZ (ORCID: 0000-0002-7307-951X)^{1*}, Salih OFLUOĞLU (ORCID: 0000-0002-3185-8275)²

1*.Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Enformatik Bölümü

2.Antalya Bilim Üniversitesi, Mimarlık Bölümü

e-posta: 20202109004@ogr.msgsu.edu.tr, salih.ofluoglu@antalya.edu.tr

ÖZET

Bu makale, metro istasyonu yapılarında, sürdürülebilirlik odaklı tesis yönetimi (TY) üzerine yoğunlaşmaktadır. BIM (Yapı Bilgi Modelleme) destekli dijital ikiz (digital twin) yaklaşımının, sürdürülebilir tesis yönetiminde kullanımı ele alınmıştır. Çalışmada, metro istasyonlarının mimari tipolojisi ve kullanılan elektro-mekanik işletme sistemleri hakkında bilgi verilmiş olup, bu sistemlerin BIM ve tesis yönetimi birlikteliği araştırılmıştır. Buna ek olarak; sürdürülebilirlik bakımından başarılı görülen tesis yönetimi vakalarına yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dijital İkiz, Sürdürülebilirlik, Tesis Yönetimi, Karbon salımı, Raylı sistemler, Metro Yapıları

ABSTRACT

This article focuses on sustainability in facilities management in metro station buildings. The contributions of BIM (Building Information Modeling) supported digital twin approach to sustainable facility management was investigated. In the study, information about the architectural building typology of metro stations and the supporting electro-mechanical operating systems used are examined, and the interoperability of these systems with BIM and facility management is proposed. In addition, relevant facility management cases from the various sources in terms of sustainability were included.

Keywords : Digital Twin, Sustainability, Facility Management, Carbon Emission, Railway Systems, Metro Stations

1. GİRİŞ

Gelişen şehir yapısında, kent içi ulaşımında metroların tercih edilmesi, şehir sakinlerine zaman ve hız kazandırması sebebiyle önemlidir. Kentin

büyüklüğüne göre, metro sistemindeki hatların ve istasyonların sayısı artış gösterebilmektedir. Metro ile yolcu taşınması, karayolu ve deniz hatları trafiğinin hafifletilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca fosil yakıt ile çalışan kara ve denizyolu taşıtlarının daha az tercih edilmesi yakıt tüketiminin düşmesini ve egzoz gazlarının atmosfer üzerindeki olumsuz etkilerinin azalmasını sağlamaktadır. Bu yönüyle metro sistemi, kent için sürdürülebilirlik açısından önemli bir değerdir.

Metro istasyonlarında, bir kısmı tüm hattın araç trafiğini sağlayan sinyalizasyon sistemi ile tümleşik çalışan, bazıları ise yalnızca istasyonun elektro-mekanik ve emlak işletmesini sağlayan sistemler bulunmaktadır. Mimarlık ve inşaat faaliyetlerinin yürütülmesi için kullanılan BIM süreci metro istasyonlarının tasarım ve imalat (3D,4D,5D,6D) aşamalarında kullanılmakta ve uygulama sonrasında BIM ile tesis yönetimine (7D) yönelik örnekler de bulunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. BIM Boyutları (Autodesk, 2022)

Farklı disiplinlerde elektro-mekanik sistem bileşenlerini tek bir merkezde toplayan metro istasyonlarının tasarım kriterlerinden bir tanesi ISO 14001 standardı olan Çevresel Yönetim Sistemi'dir ve yönetilen tesisin sürdürülebilirlik özellikleri sağlama yönünde bazı düzenlemeler getirmektedir (metroistanbul, 2021). Raylı sistem yapılarında, sürdürülebilir tesis yönetimi niteliklerinin artırılabilmesi amacıyla, BIM destekli dijital ikiz yaklaşımının uygulandığı örnekler görülmektedir.

1.1. Sürdürülebilirlik

Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'nün 2014 yılı raporuna göre 2012 yılında dünya üzerinde 7 milyon

insan, hava kirliliği ile ilişkili sebeplerle yaşamını yitirmiştir (KTÜ, 2018). Isınma, motorlu taşıtlar ve sanayi kaynaklı karbon salımına bağlı olarak artan hava kirliliği, insan sağlığına ve ekolojik dengeye zarar vermektedir. Doğal düzenin korunması ve aynı zamanda insan toplumuna ait gereksinimlerin doğa ile uyum içinde sürdürülmesinin sağlanabilmesi amacıyla Birleşmiş Milletler Çevre ve Dünya Gelişim Komisyonu tarafından 1987 yılında uluslararası bir girişim başlatılmıştır. Adını, dönemin Norveç Başbakanı Gro Harlem Brundtland'ın girişimi olması sebebiyle kendisinin soyadından alan Brundtland Raporu ile "sürdürülebilirlik" kavramı ilk kez ortaya atılmış ve uygulanması yönünde kararlar alınmıştır (Brundtland Report, 1987). Almanya, Japonya, Kanada, Zimbabve, Hindistan, Suudi Arabistan, İtalya, Çin ve diğer bazı ülke temsilcileri tarafından kabul edilen rapor; sürdürülebilirlik (sustainability) sözcüğünün sembol haline gelmesini sağlamıştır.

Şekil 2'de 1987 Brundtland Raporu'nda yer alan sürdürülebilirlik ölçütleri, şema olarak verilmiştir. Toplum, çevre ve ekonomi bileşenlerinin, birbirlerini -olumsuz yönde- etkilemeyecek şekilde varlıklarını sürdürmesi esasına dayanmaktadır.

- **Toplum**, yaşadığı çevreye zarar vermeden yaşanabilirlik sınırlarını sağlamalıdır.
- **Ekonomi**, imalat ve gelirler dengesi, çevreye zarar vermeyecek şekilde tasarlanmalıdır.
- **Toplumda, ekonomik** açıdan eşitlik sağlanmalıdır.

Bu dengelerin sağlanması durumunda küresel ısınma, çevre ve hava kirliliği, karbon salımı gibi olumsuz sonuçların engellenebileceğine dikkat çekilmektedir (Brundtland Raporu,1987).



Şekil 2. Sürdürülebilirlik ölçütleri (Saad ve ark.,2014)

1.2. Tesis Yönetimi

Tesis yönetimi, bir yapının, ait olduğu organizasyonun amaçlarına en uygun şekilde hizmet edebilmesi için uygulanan kurallar bütünüdür (YKS,2020). 1960'lı yıllarda önem kazanmaya başlayan tesis yönetimi olgusu, kamusal yapılarda

verimliliğin artırılması gereksiniminden doğmuştur (Nor ve ark.,2014). Tesis Yönetimi kavramı, söz konusu tesisteki **emlak**, **varlık/mekan** ve **bakım** bileşenlerinin yönetimini gerçekleştirmektedir (Ofloğlu,2020). Şekil 3'te söz konusu bileşenler ve ilişkileri görülmektedir.

- **Emlak:** Tesisin mimari ve yapısal sistem olarak fiziksel bütünlüğünü kapsar.
- **Varlık-mekan:** Tesisin barındırdığı mahaller ve bu mahallerdeki elektro-mekanik ekipmanlar ile teknik olmayan tüm varlıkların nitelik/nicelik bakımından tüm özelliklerini ve kontrolünü içerir.
- **Bakım:** Tesiste bulunan elektro-mekanik olan ve olmayan tüm varlıklara ait verimliliğin sağlanması konularını içerir.



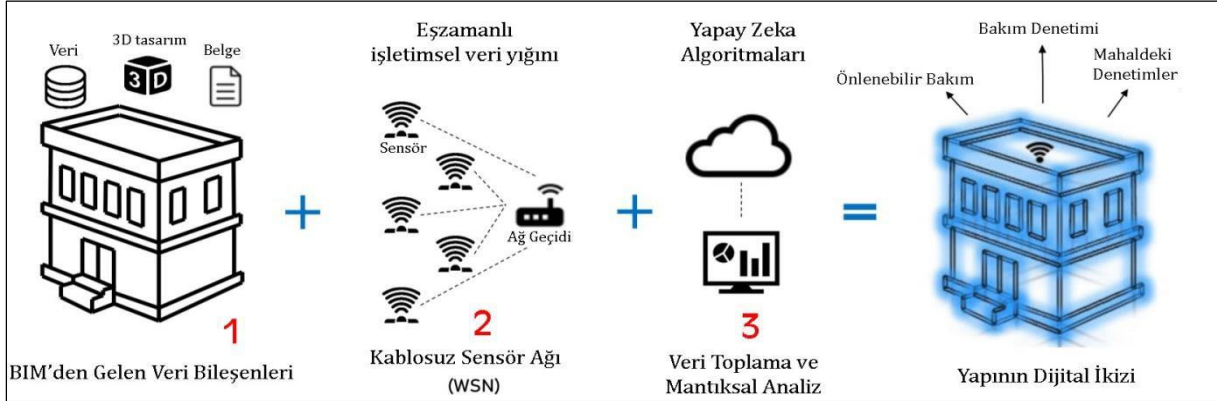
Şekil 3. Tesis Yönetimi Şeması (Windesk, 2020)

1.3. Tesis Yönetiminde Sürdürülebilirlik

Dünya genelinde oluşan karbon salımının %66'dan fazlası binaların işletme sürecinde ortaya çıkmaktadır (Li ve ark.,2013) ve karbon salımı, iklim değişikliğinin en etkin sebeplerinden biridir (Watson,2001). Tesis yönetimi verimli bir şekilde yapılamadığı durumda enerji tüketimi artmakta ve karbon salım değerlerinin yükselmesine sebep olmaktadır. BIM ile tesis yönetimine geçilmesiyle, harcanan enerji miktarının düştüğü gözlemlenmiştir (Motawa ve Almarshad, 2012). Tesisler tarafından üretilen gaz ve atıkların olumsuz etkilerinin önlenmesi amacıyla çok sayıda kuruluş üretim ve işletme tekniklerinde bir takım düzenlemeler gerçekleştirmişlerdir. Bu yaklaşımla, BIM öncesi uygulanan tesis yönetimi faaliyetlerinin nitelikleri artırılmış ve sürdürülebilirlik şartlarını kapsamı sağlanmıştır (Teicholz,2020). 1980 yılında kurulan, Uluslararası Tesis Yönetimi Derneği IFMA (International Facility Management Association), dünyada faaliyet gösteren önemli tesis yönetimi kuruluşlarından biridir. IFMA, 2020 yılında yayınladığı bir raporda; 20.yy.ın son çeyreğinden itibaren meydana gelen küresel ısınma ve hava

kirliliğine dikkat çekerek, bu olumsuz sonuçların, fosil yakıt temelli enerji tüketiminin artışından kaynaklandığını belirtmiştir. IFMA, bünyesinde bir sertifika programı başlatarak veri tabanlı sistemlerin

kullanıldığı ve detaylı bir sürdürülebilirlik yaklaşımı içeren bir tesis yönetimi hedeflendiğini açıklamıştır (IFMA,2020).



Şekil 4. BIM destekli dijital ikizin temel bileşenleri (Khajavi ve ark.,2019)

1.4. BIM Destekli Dijital İkiz

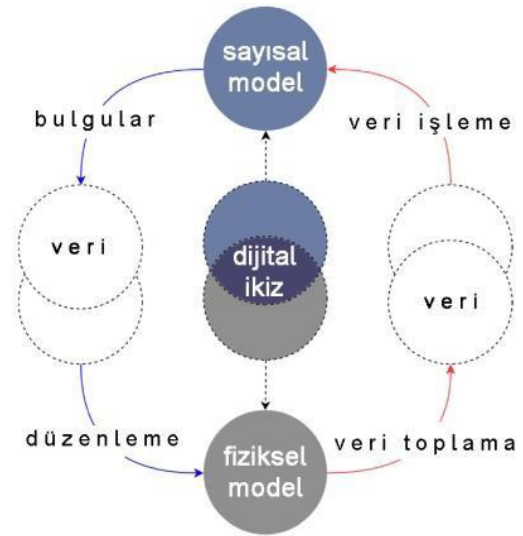
BIM destekli dijital ikiz, içinde barındırdığı tüm varlıklarla birlikte BIM modeli üretilmiş bir tesisin sayısal ortamda, dijital ikizi destekleyen yazılımlarla birlikte, fiziksel aslı gibi davranmasını konu alır. Fiziksel modeller üzerine yerleştirilen sensörlerin, o varlıktan olabildiğince yüksek yoğunlukta veriyi toplaması ve yapay zeka yazılımına göndermesi sağlanmaktadır. Yapay zeka, veri analizinden elde edilen bilgiyi, gerçek dünyadaki sistemin etkin şekilde çalışabilmesi için kullanır. Özet olarak sistem **önleyici bakım**, **bakım denetimi** ve **mahaldeki denetimler** gibi işlevleri gerçekleştirmekte ve meydana gelebilecek herhangi bir arızanın öngörüsünü yapabilmektedir (Ofluoğlu,2020). Dijital ikizin verdiği geri beslemeler ile aşağıda listelenen çıkarımlara ulaşılabilmektedir.

- Sistemin yapısını kavramak
- Sistem optimizasyonunu sağlamak
- Enerji tüketimini düşürmek
- Atık yönetimini oluşturmak
- Bakım-onarım maliyetlerini düşürmek
- Kullanıcı etkileşimini arttırmak
- Bilgi teknolojilerini kaynaştırmak
- Yaşam döngüsünü uzatmak

Bu sonuçlar -dolaylı olarak- sürdürülebilir bir tesis yönetimi yapılabilmesi için önemli geri beslemelerdir (Tao ve ark., 2019).

Şekil 4'te BIM destekli dijital ikiz bileşenlerine ait öğeler gösterilmiştir. Yapının imalat sürecinde oluşturulan üç boyutlu bilgi modeli, dijital ikizin birinci bileşenidir. Tesis içinde yer alan elektromekanik olan ve olmayan tüm varlıklara eklenen sensörler ile elde edilen veri yığını ikinci bileşen

olarak değerlendirilmektedir. Veri yığını, bir ağ geçidi (gateway) kanalı ile üçüncü bileşen olan ve yapay zeka algoritmalarının çalıştığı sunucuya (server) aktarılır. Yapay zeka yazılımı veriyi toplar ve bilgi model ile eşleştirerek mantıksal analizler gerçekleştirir. Bu sistemin dinamik bir şekilde çalışmaya devam etmesi dijital ikizi meydana getirmektedir. Elde edilen bilgi, fiziksel modelin işletme ve bakım programında kontrol amaçlı kullanılır. Gerektiğinde fiziksel modelin sisteminde düzenlemeler yapılır ve fiziksel-dijital arası veri akışı tekrarlanır. Şekil 5'te ifade edilen bu döngü aralıksız devam eder.

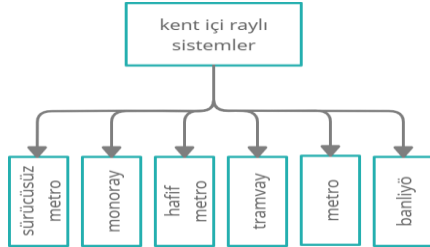


Şekil 5. Dijital ikiz iş döngüsü (Boje ve ark., 2020)

2. KENT İÇİ RAYLI SİSTEMLER

Kent sınırlarının zaman içinde genişlemesi, şehir nüfusunun artması ve şehir sakinlerinin trafik sorunu

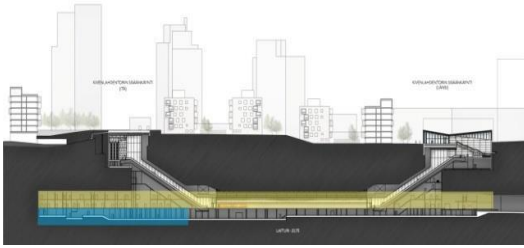
yaşamadan taşınabilmesi; raylı sistemlerin tercih edilme sebebi olmuştur. Kent içi yolcu taşımada kullanılan sistemler; metro, tramvay, hafif metro, banliyö, monoray ve sürücüsüz metrolar (AGT-Automated Guideway Transit) olarak 6 başlıkta toplanmaktadır (Şekil 6). Bu makale, kent içi raylı sistemler dahilinde metro istasyonları üzerine odaklanmaktadır.



Şekil 6. Kent için raylı sistemler (Öztürk,2017)

2.1. Metro İstasyon Mimarisi

Metro hatları ve istasyonları genellikle yer altında uygulanırlar (Şekil 7). Metro hattındaki araçların sayısı, sefer sıklığı, taşıma kapasitesi ve süresi; hattın tasarım aşamasında yapılan yolcu projeksiyonları ile belirlenmektedir. Metro istasyonlarının tasarımındaki en önemli veri yolcu sayılarıdır. Kent içi raylı sistem binaları, mimari ve estetik özelliklerinden çok, elektro-mekanik ekipmanlar için tasarlanmış tesislerdir. Buna bağlı olarak yapı içindeki alanların büyük kısmı; elektrik ve mekanik sistemlerin yürütüldüğü mahallerdir. Raylı sistem istasyon mimarisi yolculu alanlar, personel mahalleri ve ekipman mahalleri olmak üzere temelde üç bölümden oluşmaktadır.



Şekil 7. Örnek Metro İstasyonu kesiti (Lansimetro.fi,2018)



Şekil 8. Expo Metro İstasyonu Bilet Holü, Singapur (Archnet.com, 2000)



Şekil 9. Bank Station Peronu Londra (Wilksoneyre.com, 2011)

2.1.1. Yolculu Alanlar

Yolcuların istasyona girişi, tren ile taşınması ve ulaşmak istediği istasyondaki çıkış noktasına kadar kullandığı mahaller yolculu alanlardır. Şekil 8'de görülen Bilet Holü Katı ve Şekil 9'de yer alan Peron Kat mahalleri yolculu alanlar kapsamındadır. Çıkış yapıları ile bilet turnikeleri (Şekil 8) arasında bulunan bölge *Kontrolsüz Alan* olarak nitelendirilmektedir. Bilet / kart satış gişeleri veya otomatik bilet makineleri ile yolcu tuvaletleri genellikle *Kontrolsüz Alan*'da yer alır. Turnikeden ödemesini yaparak geçen yolcu *Kontrollü Alan*'a ulaşmaktadır. Acil bir tıbbi gereksinim durumunda kullanılmak üzere sağlık odası ve çocuklu annelerin ihtiyaç duyabileceği bebek odası gibi mahaller *Kontrollü Alan*'da bulunurlar.

2.1.2. Personel Mahalleri

İstasyonda çalışan teknik personelin kullanımına açık olan mekanlardır. Personel Dinlenme Odası, Personel Tuvaletleri, Temizlik Odası, Ofis, Personel Soyunma Odaları, İstasyon Kontrol Odası bu gruba dahildir. Her metro istasyonunda o istasyona ait tüm işletim sistemlerinin gözlemlendiği bir *İstasyon Kontrol Odası* bulunmaktadır. Yalnızca yetkili teknik personelin erişim izni olan bu mahal, istasyona ait CCTV (Kapalı devre tv sistemi) kayıtlarının, perona yaklaşan ve ayrılan araçlara ait sinyalizasyon sisteminin, tesise ait tüm elektrik ve mekanik verilerin izlendiği SCADA sisteminin takip edildiği bir merkez birimdir. Bilet Holü Katı'nda, *Kontrollü* ve *Kontrolsüz Alanları* aynı anda görebilecek şekilde konumlanmıştır. Tüm istasyonun kontrolü, izlenmesi ve tesis yönetimi bu mahalden yapılmaktadır.

2.1.3. Ekipman Mahalleri

Yalnızca teknik personel tarafından erişim izni bulunan havalandırma odaları, fanlar, trafolar, akü, elektrik pano odaları, pompa odaları, sinyalizasyon ve haberleşme sistemlerine ait cihazların yer aldığı

odalar, ekipman mahalleri kapsamındadır. Şekil 10'da trene güç sağlayan trafoların bulunduğu mahal görülmektedir. Şekil 11'de görülen TVF (Tunnel Ventilation Fan-Tünel Havalandırma Fanı) Odası, metro istasyonunda temiz-kirli hava dengesini sağlayan fanların yer aldığı mahaldir. İşletme ve bakım güvenlik kuralları sebebiyle yukarıda bahsi geçen teknik mahallere yalnızca o mahal için erişim izni tanımlanmış statüdeki teknik personel ulaşabilmektedir. Her bir personelin sahip olduğu kişiye özel manyetik kartlar ile mahallere giriş sağlanmaktadır. Tüm mahal erişimleri, SCADA sistemi tarafından izlenmekte ve yürütülmektedir.



Şekil 10. Trafo Odası, Washington DC/ABD
(c3mpowersystems.com, 2019)

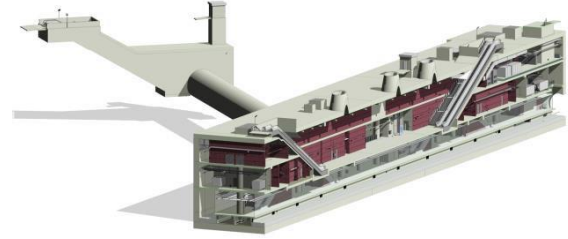


Şekil 11. Fan Odası, Spadina, Toronto, Kanada
(blogto.com, 2015)

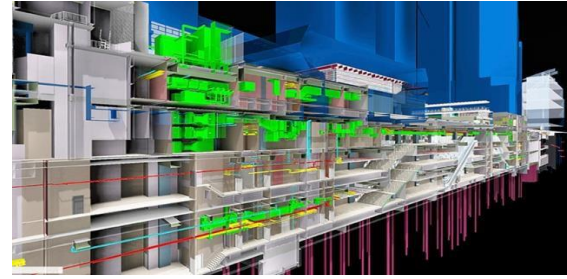
2.2. Metro İstasyon Mimarisi ve BIM

Türkiye'de 2022 yılı itibarıyla tüm ulaşım projeleri için BIM uygulama zorunluluğu getirilmiştir (UAB, 2022). BIM kullanımlarının 2022 yılı öncesinde, İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından metro inşaatı projelerinde kullanılması kararlaştırılmıştır (İBB, 2017). Türkiye'de BIM uygulaması yapılan ilk raylı sistem projesi, 2013 yılında başlayan Mecidiyeköy-Mahmutbey ve 2016'da uzatılan (Şekil 12) Kabataş Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Hattı'dır (Öner,2019). BIM uygulanan raylı sistem bina projelerinde, hazırlanan üç boyutlu modellerin büyük bir bölümünü elektro-mekanik cihazlar ve buldukları mahaller oluşturmaktadır. Yapının tasarım sürecinde eş zamanlı olarak üretilen elektrik ve mekanik projelerde; havalandırma fanları, elektrik trafoları ve sinyalizasyon sistemine ait

cihazlar gibi teknik donanım modelleri de hazırlanmaktadır (Şekil 13).



Şekil 12. Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey projesine ait bir istasyon BIM modeli (Prota,2016)



Şekil 13. Exhibition Metro İstasyonu, Hong Kong
(ARUP, 2015)

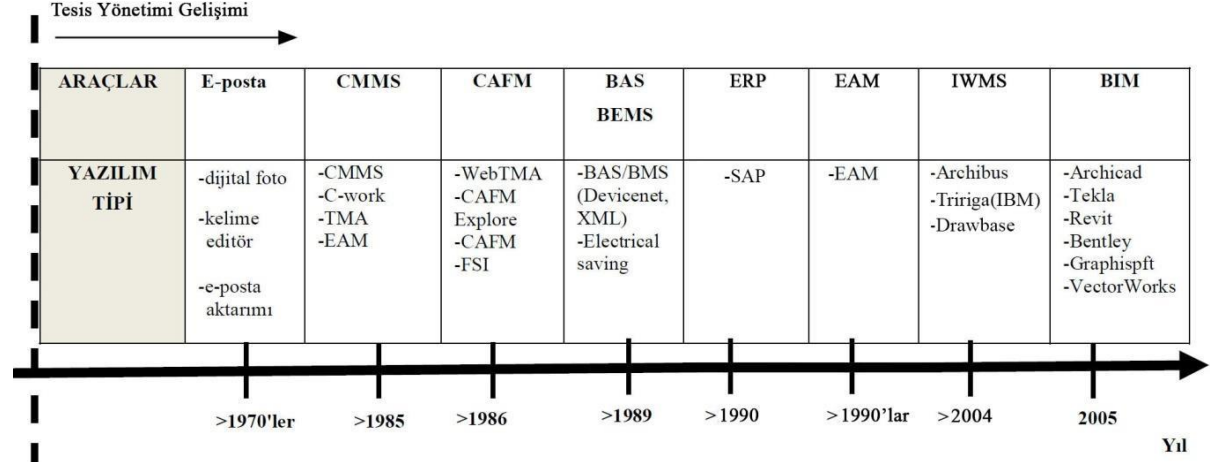
3. METRO İSTASYONLARINDA SÜRDÜRÜLEBİLİR TESİS YÖNETİMİ

1960-1970 yılları öncesinde yürütülen tesis yönetimi, işletme faaliyetlerinin amacına uygun bir şekilde yürütülmesi hedefini kapsamaktaydı. Buna bağlı olarak varlık, enerji, maliyet kontrolleri gibi kavramlar henüz oluşmamıştı. Sayısal teknolojinin gelişmesiyle birlikte tesislerin etkin kullanım ölçütleri oluşturulmuş ve buna bağlı olarak bölüm 1.2.de detaylandırılan *emlak yönetimi*, *varlık yönetimi*, *mekan yönetimi* ve *bakım yönetimi* bileşenleri, terimsel olarak tanımlanmıştır. Sayılan bu öğelerin her biri için ayrı ya da tümüne birden hizmet edebilecek türde tesis yazılımları mevcuttur.

E-posta: 1970'li yıllarda, tesis yönetimi kapsamında, *e-posta* kullanıldığı görülmektedir (Aziz ve ark., 2016). Varlık ve mekan yönetiminde, testisteki arıza tespitinin kayıt altına alınabilmesi amacıyla, yazım programı ve dijital fotoğraf kullanılmıştır. Bildirimler e-mail ile yapılmıştır.

CMMS: Computerized Maintenance Management Software (Bilgisayarlı Bakım Yönetimi). 1960'lı yılların ortalarında görülmeye başlanmıştır. Cihaz ve varlıkların işletme ve bakım (O&M) faaliyetlerine yönelik kullanılan bir tesis yönetim türüdür ve tablo tabanlı bir arayüzle aşağıdaki işlemleri yürütür (O'Brien, 2014).

- Cihaz/varlık bakım kayıtlarının açılması
- Cihaz/varlığın yedek parça temini ve bakımı
- Cihaz/varlık çalışma düzeni ve arşivi
- Envanter kontrolü
- Çalışma düzeni, iş takvimi, faaliyet programı
- Proje yönetim planı geliştirilmesi
- Teknik Personel yönlendirilmesi
- Satın alma
- Tablo ve rapor oluşturulması



Şekil 14. Tesis Yönetimi Programları Tarihçesi (Aziz ve ark., 2016)
(Makalede bahsi geçen sayısal tesis yönetim sistemleri orijinal tabloya eklenerek güncelleştirilmiştir)

CAFM: Computer Aided Facility Management (Bilgisayar Destekli Tesis Yönetimi). Yazım programı, çizelge hazırlama, e-posta desteği ve veri tabanı sorgulama özellikleri destekler Birlikte çalışabilirlik özelliği yüksek bir tesis yönetim türüdür ve aşağıdaki işlemleri yürütür (Elmualim ve ark.,2009).

- Cihaz/varlık bakım ve onarım organizasyonu
- Tesis bütçe hesaplaması
- İnşaat ve proje yönetim desteği vermesi
- Mahal envanter ve yönetimi
- Mimari ve iç mekan planlaması
- Mekan öngörüsü yapması
- İletişim ve kablolama yönetimi
- Kiralama ve emlak yönetimi
- Varlık yönetimi

BEMS: Building Energy Management (Bina Enerji Yönetimi). Elektro-mekanik işletmeye,

BAS: Building Automation System (Bina Otomasyon Sistemi). Elektro-mekanik ve otomasyona yönelik tesis yönetim türüdür ve aşağıdaki işlemleri yürütür (Elmualim ve Pelumi-Johnson, 2009).

- Isıtma, havalandırma ve soğutma (HVAC) işlevlerini ve zamanlamasını sağlar.
- Binalardaki enerji tüketim miktarı ve konfor koşullarını düzenler.
- Bina otomasyonu
- Telekomünikasyon
- Bilgisayarlı bina yönetimi

ERP: Enterprise Resource Planning (Kurumsal Kaynak Planlama). Bir işletmenin tüm kaynaklarının birleştirilerek verimli bir şekilde kullanılması için tasarlanmış sistemlere denir. Veritabanı üzerinden sürekli ve güncel iş yönetim planlaması gerçekleştiren bir yönetim sistemidir ve aşağıdaki işlemleri yürütür (Bahadır, 2021).

- İş emri yönetimi
- Envanter yönetimi
- Faaliyet yönetimi

EAM: Enterprise Asset Management (Kurumsal Varlık Yönetimi). Tesisteki varlıkların (ekipman, araç, bina ve altyapı) yaşam döngüsü boyunca bakım ve yönetimini kapsayan bir yönetim sistemidir ve aşağıdaki işlemleri yürütür (Wang ve ark., 2015).

- Varlık yönetimi
- Kullanıcı-işçi yönetimi
- Önleyici bakım yönetimi
- Onarım ve işletme yönetimi
- Maliyet yönetimi
- Güvence yönetimi
- Servis-kontrat yönetimi

IWMS: Integrated Workplace Management System (Tümleşik İşyeri Yönetim Sistemi). İşyeri kaynaklarını düzenlenmesi, emlak yönetimi, alt yapı ve tesis varlıkları yönetimini sağlayan, işveren odaklı ve paydaşlar için geniş kapsamlı bir tesis yönetim sunan bir sistemidir. Aşağıdaki işlemleri yürütür (Knops, 2014; Mehdi, 2019; Verdantix, 2020).

- Emlak yönetimi
- Bakım yönetimi
- Maliyet ve bütçe planlaması
- Sürdürülebilirlik ve enerji yönetimi
- Tesis yönetimi

Tablo 1. Tesis Yönetim Sistemleri ile BIM + Dijital İkiz karşılaştırması

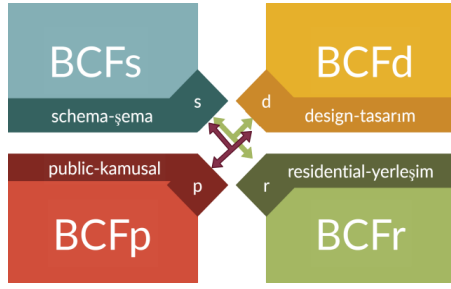
Yöntemler	Olumlu Özellikleri	Olumsuz Özellikleri	Emlak	Varlık	Mekan	Bakım	Sürdürülebilirlik
e-mail	"eski sistem"	"eski sistem"	✓	✓	✓	✓	X
CMMS	BIM'den aldığı tesis verilerini veritabanına işleyebilmektedir (Akcamete ve ark.,2010)	istenilen çalışma alanını görüntüleme ve görselleştirme özelliği yoktur (Akcamete ve ark.,2010)	X	✓	X	✓	X
CAFM	BIM ile birlikte çalıştığı durumda; farklı onarım faaliyetinin yapıldığı mekanları ilişkilendirerek ortaya çıkabilecek sorunlar hakkında tesis yöneticisine analitik arar verme desteği sunar. (Golabchi ve Akula,2013)	2D (iki boyutlu) çizim ve görselleştirme açısından tesis yöneticisini kısıtlamaktadır. (Golabchi ve Akula,2013)	✓	✓	✓	✓	X
BEMS BAS	CMMS, CAFM ve BIM ile entegre olabilmektedir. (Elmualim & Pelumi-Johnson, 2009)	Yalnızca elektro-mekanik ve otomasyon disiplinlerini yönetir	X	✓	X	✓	✓
ERP	Geniş kapsamlı bir uygulama ağı mevcuttur.	Tamamen bir tesis yönetim disiplini olarak kabul edilemez. Destek bir uygulamadır.	-	-	-	-	-
EAM	RFID tabanlı IoT ile birlikte çalışabilmektedir	Yalnızca elektro-mekanik ve otomasyon disiplinlerini yönetir	X	✓	X	✓	✓
IWMS	Çok geniş kapsamlı bir yazılım platformudur	X	✓	✓	✓	✓	✓
BIM Dijital İkiz	Bütün disiplinler ile tümleşik çalışabilmektedir	X	✓	✓	✓	✓	✓

Sayılan tesis yönetimi türleri için sürdürülebilirlik, tesis yöneticilerinin uyguladıkları politikalar ile cihazların çalışma programlarında yapılan düzenlemelere bağlı olarak sağlanabilmektedir. BIM ile dijital ikiz yaklaşımında tüm tesisin verimli ve sürdürülebilirlik protokollerine bağlı olarak çalışabilen yapay zekaya dayalı sistemler önemli katkı sağlamaktadır.

4. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÖLÇÜTLERİ

1992 yılında Birleşmiş Milletler (BM) tarafından imzalanan İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nde (UNFCCC – United Nation Framework Convention on Climate Change) temel olarak, İnsan Kaynaklı Sera Gazları'nın küresel olarak kontrol edilmesi görüşülmüştür (UNFCCC,

1992). BM'e bağlı üye ülkeler tarafından kabul gören ortak karar ise tüm dünyada enerji verimliliğinin sağlanması ve insan kaynaklı karbon üretiminin düşürülmesi yönünde olmuştur. Ayrıca, UNFCCC'de alınan kararlara göre bir 'Karbon Ayak İzi Değerlendirme Metodolojisi'nin (BCF-Building Carbon Footprint Assesment Methodology) hazırlanmasının önemi üzerinde durulmuştur (UNFCCC,1992). Bu yaklaşıma göre bir yapım sürecinde kullanılan malzemelerin üretim-tüketim döngüsü boyunca ortaya çıkan karbon miktarının hesaplanması gereklidir. Örneğin, İngiltere'deki King's Cross İstasyonu'na ait değerlendirmeyi yapan Kaewunruen ve Xu'nun, makalelerinde alıntılama yaptığı Dr. Lin Hsien-Te'ye göre bir inşaat projesinin gelişim aşamalarına göre meydana çıkan karbon ayak izi (BCF – Building Carbon Footprint) için 4 faz tanımlanmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. Yapı Karbon Ayak İzi Fazları
(Chiu ve Chen,2017)

- Şema fazı (BCFs)** : projenin çok-erken mali planlama aşamasıdır.
- Tasarım fazı (BCFd)** : mimari tasarımın devam ettiği fakat imalata ait malzeme ve elektro-mekanik ekipmanların henüz hesaba katılmadığı aşamadır.
- Barınma yapıları fazı (BCFr)** : konut türü yapılar için imalat, malzeme ve ekipmanların değerlendirilmeye katılarak detaylı karbon ayak izi hesaplamalarının yapıldığı aşamadır.
- Kamu yapıları fazı (BCFp)** : kamusal yapılar için imalat, malzeme ve ekipmanların değerlendirilmeye katılarak detaylı karbon ayak izi hesaplamalarının yapıldığı aşamadır.

Yapının işlevine göre **a** ve **b** fazlarından sonra **c** veya **d** fazlarına geçiş yapılmaktadır.

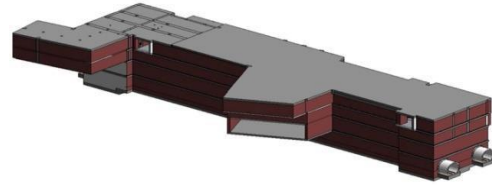
5. VAKA ÇALIŞMALARI

Makalenin bu bölümünde benzer çalışmalardan derlenen ve sürdürülebilirlik özelliklerini sağlayan raylı sistem işletmelerinden örnekler verilerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

5.1. Dadongmen Metro İstasyonu – Hefei (Çin) (Kaewunruen ve ark., 2020)

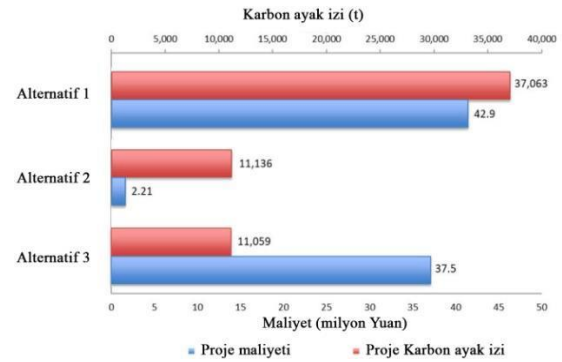
Çin'in Hefei kentindeki Dadongmen istasyonu için Revit model ve dijital ikiz kullanılarak enerji tüketimi ve karbon salım değerlerinin düşürülmesi, böylece sürdürülebilir bir tesis oluşturulması amaçlanmıştır (Şekil 16). Projenin inşaat aşamasındaki maliyeti en yüksek oran olup, toplam bütçenin % 78'ini oluşturmaktadır. Ancak işletme ve bakımdaki karbon salım miktarı, inşaat malzemeleri üretimi sırasındaki miktar,% 67'dir. Bunların arasında yer alan beton malzemenin yalnızca temel imalatında kullanılmasına rağmen, yapı malzemelerinin karbon üretiminin % 43.66'sını oluşturmaktadır. Dijital ikiz, ortaya çıkabilecek risklere yönelik olası çözümlere hazırlanmak için kullanılmıştır. Bu sayede yaşam döngüsü maliyeti ve karbon ayak izi ölçümleri yoluyla, tesisin sürdürülebilirlik ölçütlerine olan uygunluğu değerlendirilmiştir. BIM destekli dijital ikiz

yaklaşımının, yapının yaşam döngüsüne olumlu yönde katkı sağlaması ve küresel ölçekte, raylı sistemlerin dayanıklılığının artırılması düşünülmektedir.



Şekil 16. Dadongmen Metro İstasyonu Revit Modeli
(Kaewunruen ve ark., 2020)

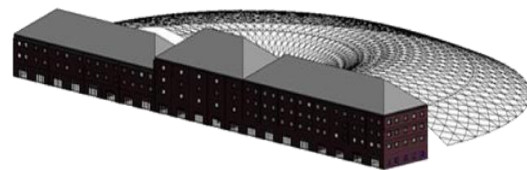
Revit model yardımıyla, yapıda bulunan inşaat malzemelerinin metrajı yapılmış ve her bir malzemenin 1 kg'ının ürettiği karbon miktarı değeri ile çarpılmış ve sonuçlar toplanmıştır. Projede 3 adet tadilat alternatifinin tümü için ayrı revit modeller çalışılmıştır ve maliyet analizi ile birlikte yapının sahip olduğu karbon ayak izleri hesaplanmıştır. Oluşturulan değerler bir karşılaştırma tablosunda sunulmuştur (Şekil 17).



Şekil 17. Dadongmen Metro İstasyonu 3 alternatif
(Kaewunruen ve ark., 2020)

5.2. King Cross Tren İstasyonu – Londra (BK) (Kaewunruen ve Xu, 2018)

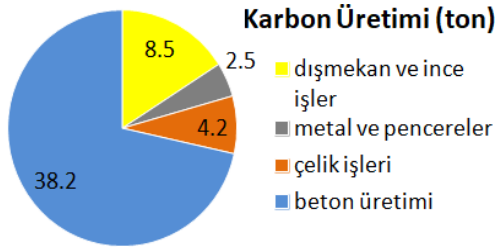
Dijital ikiz ile tesis yönetimi uygulamasının kullanıldığı örneklerden biri de 1852 yılından bu yana kullanılan Londra King Cross Tren İstasyonu'na ait renovasyon projesidir. Yapının taşıyıcı sistemi, mimarisi ve tüm ekipmanlar dahil olmak üzere elektro-mekanik projeleri Revit programı ile hazırlanmıştır (Şekil 18). BIM süreci ile yürütülen projede öncelikli amaç sürdürülebilirliğin sağlanması olmuştur (Kaewunruen ve Xu, 2018).



Şekil 18. King's Cross Tren İstasyonu - Londra

İstasyonun dijital ikizi üretildikten sonra, sürdürülebilirlik şartlarına bağlı olarak karbon salımının ölçüm tahmin çalışmaları yapılmıştır. King's Cross projesinde, bölüm 3'te bahsi geçen aşamalardan ikincisi olan BCFd (Building Carbon Footprint design) fazı, ölçüm için esas alınmıştır. Kaewunruen ve Xu, BCFd'yi tercih etmelerinin sebebi; BIM tabanlı tesis yönetiminde, *anlık karbon salım* değerinin hesaplanabilir olması şeklinde açıklamışlardır. İstasyonun karbon salım hesaplamaları için Revit API yazılımı kullanılmıştır.

King's Cross İstasyonu tesis yönetimi kapsamında, sayısal modele uygulanan testler sonucunda, gerekli görülen noktalarda yangın dayanımlı kapı ve pencereler yerleştirilmesi, iç meknlarda çift katman giydirme cam cephe oluşturulması, boşluklu duvarlarda yangın bariyeri uygulanması kararları alınmıştır. Gerçekleştirilen enerji analizlerinde, istasyonun yenilenmiş, var olan ve yıkılmış bölümleri modellenerek enerji kaybına sebep olan bölgeler belirlenmiş, tadilat projesinde en düşük değerlerde karbon üretimi yapacak çözümler aranmıştır. Karbon salım hesaplamalarında, İngiltere kaynaklı Department of Business Innovation & Skills tarafından hazırlanan rapor kullanılmıştır (BIS,2010). Şekil 19.'de yer alan pasta grafikte, dış mekan ile ince işler, metal doğramalar ve pencereler, çelik işleri ve beton malzemenin ürettiği karbon miktarı ton biriminde paylaşılmıştır.



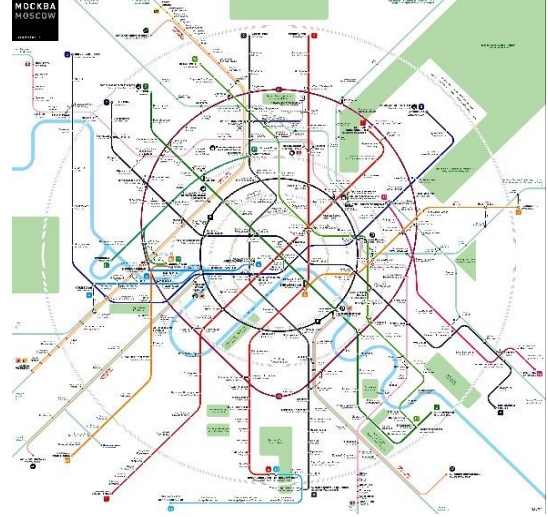
Şekil 19. Malzemelerin Ton Biriminde Karbon Salımları (Kaewunruen ve Xu, 2018)

5.3. Moskova Metrosu – Moskova (Rusya Fed.) (Pokusaev ve ark., 2021)

2021 yılında yapılan çalışmada, Moskova'daki Metro hatları için hazırlanmış bir dijital ikiz uygulamasına yer verilmiştir. Araştırmada, Moskova Metrosu bünyesindeki tüm istasyonlar ve ray hatları sayısallaştırılarak hatlardaki yolcu yüklerinin tespit edilmesi ve yolcu sayılarında ileriye yönelik öngörüde bulunulması amaçlanmıştır.

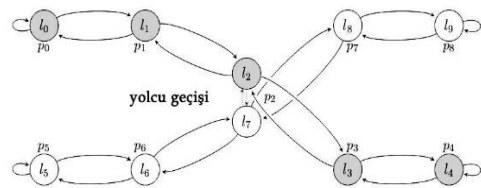
Ulaşım ağında, farklı hatları birbirine bağlayan iç ve dış çember hatlar bulunmaktadır (Şekil 20). Metro hatları ile çember hatların kesişim noktaları, birer istasyon değil, aktarma durakları olarak nitelendirilmektedir (Şekil 21). Her bir istasyon ve

aktarma durağında, yolcuların cep telefonlarına sinyal hizmeti veren baz istasyonları bulunmaktadır. Bu sinyaller takip edilerek, istasyon ya da durak noktalarındaki yolcu sayılarına ulaşılabilir. Bu veri yardımıyla, farklı istasyonlarda, saatlere göre yolcu sayısı grafikte görülmektedir (Şekil 22).

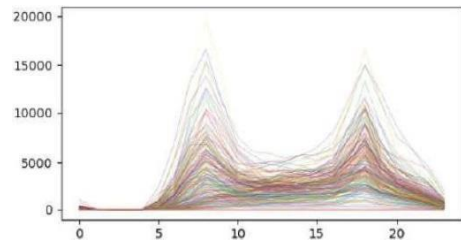


Şekil 20. İç ve Dış Çember hatları ile Moskova Metrosu (inat.fr, 2023)

Metro hatları ile çember hatların kesişim noktaları, birer istasyon değil aktarma durakları olarak nitelendirilmektedir (Şekil 21). Her bir istasyon ve aktarma durağında, yolcuların cep telefonlarına sinyal hizmeti veren baz istasyonları bulunmaktadır. Bu sinyaller takip edilerek istasyon ya da durak noktalarındaki yolcu sayılarına ulaşılabilir. Toplanan veri yardımıyla, farklı istasyonlarda, saatlere göre yolcu sayısı grafikte görülmektedir (Şekil 22).



Şekil 21. İki Ayrı Hat ve İstasyonların Gösterimi (Pokusaev ve ark., 2021)



Şekil 22. Farklı İstasyonlara Göre Saatlik Kullanım (Pokusaev ve ark., 2021)

Dijital ikiz uygulamasıyla, aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Seçilen herhangi bir alandaki yolcu sayısının tespit edilmesi
- İstasyon giriş ve çıkış noktalarındaki yolcu sayısı
- Seçilen bir istasyondaki yolcu sayısı
- Belirlenen bir aktarma noktasındaki yolcu sayısı

Elde edilen bulguların acil durum anında kriz yönetimi için kullanılması planlanmaktadır. Buna ek olarak hatların mevsimlere göre kullanım durumları hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Örneğin, yaz aylarında çok sayıda şehir sakini banliyölerdeki yerleşim yerlerine taşınmakta ve böylece metro istasyonlarının kullanım sıklığı değişim göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İncelenen benzer çalışmalar ve yapılan araştırmalar sonucunda uygulama sayısı azlığına rağmen, BIM destekli dijital ikiz yaklaşımının, sürdürülebilir tesis yönetimini sağlamada başarılı olduğu görülmektedir. Fiziksel modelin yapısına uygun sensörlerin seçilmesi ve sanal model ile ilişkilendirilmesi sonucunda; sürdürülebilirlik hedeflerine yaklaşılacağı kanıtlanmıştır. Konu ile ilgili olarak, daha fazla çalışmanın yapılması gereklidir.

Bina ve İnşa Edilmiş Varlıklar İçin Hizmet Ömrü Planlaması standardı olan ISO 15686 içeriğinde yer alan Bölüm 5, Yaşam Döngüsü Maliyeti hakkındadır. Bu standarda göre, bir yapının işletme ve bakım maliyetleri, inşaat maliyetlerinden daha yüksektir (Ofloğlu, 2020). Ayrıca işletme esnasında açığa çıkan karbon miktarının, inşaat sırasında oluşan karbon üretiminden yüksek olması, bu konuda daha çok çalışma yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. Dijital ikiz uygulamaları ile sürdürülebilirliğin önemi, devletler tarafından özendirilmeli ve teşvik edici politikalar ile yaygın hale getirilmelidir.

Kısa adı GSA olan Amerika Birleşik Devletleri Genel Hizmetler İdaresi, devlet binalarının uygulama ve işletmesinden sorumlu bir devlet kurumudur (GSA, 2023a). GSA, iklim kriziyle mücadele amacıyla atmosfere salınan inşaat kaynaklı zehirli gaz miktarının düşürülmesi için BIM destekli çalışmalar yapmaktadır. Bu hedefe ulaşılabilmesi için 2030 yılına kadar yeni binalarda, 2050 yılına kadar ise tüm yapılarda ve işletmelerde gerekli önlemlerin alınması için bir Federal Sürdürülebilirlik Planı yayınlamıştır (GSA, 2023b).

Avrupa Birliği, üye ülkeler ile Destination Earth (Hedef Dünya) adlı bir proje geliştirmektedir. İklim

değişikliği konusunda çalışmalar yapabilmek, doğayı koruyabilmek ve sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, dünyanın bir dijital ikizinin yaratılması planlanmaktadır. Bu sayede doğal yaşam ve insan etkinlikleri hakkında öngörüler yapılabileceği düşünülmektedir (EC, 2023).

Türkiye Cumhuriyeti 22 Nisan 2016 tarihinde imzaladığı Paris Anlaşması ile sürdürülebilirlik konusunda belli adımlar atmaya başlamıştır. Türkiye, sıfır emisyon hedefi için 2053 yılı belirlediğini açıklamıştır (MFA, 2023). Buna ek olarak, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistemler İşletmesini yapan Metroİstanbul kuruluşu, 2022 yılı faaliyet raporunda, İstanbul'daki raylı sistem ağını kapsayan bir dijital ikiz projesi başlattığını duyurmuştur (metroistanbul, 2022). Yayımlanan raporda dijital ikiz uygulamalarının SCADA sistemi ile entegre edileceği ve önleyici bakım, öngörülebilir bakım gibi işlemlerde kolaylıklar sağlanacağı belirtilmiştir.

Dünyadan ve ülkemizden verilen örnekler, bu konulardaki çalışmaların arttığını göstermektedir. 2030 ve 2050 hedeflerine ulaşılabilmesi için BIM destekli uygulamaların yalnızca devlet projelerinde değil, tüm kamusal ve özel işletme faaliyetlerinde zorunlu hale getirilmesi gerekmektedir. Dijital ikiz, Tesis Yönetimi ve sürdürülebilirlik uygulamalarının gelişen teknolojilerle daha verimli kullanılması sağlanmalıdır. Bu sayede doğal yaşamın korunacağı ve insanlığa ait olan kültürel birikimin gelecek nesillere faydalı bir şekilde aktarılacağı düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

Akcamete, A., Akinci, B., Garrett, J. H., & Jr., 2010. Potential utilization of building information models for planning maintenance activities. In W. Tizani (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (p. 151). UK: Nottingham Uni Press

Archnet.org, 2000. Expo Metro İstasyonu, Singapur.
https://archnet.org/sites/5120/media_contents/3853_0, Son Erişim Tarihi: 20.06.2023

ARUP, 2015. 2015 Autodesk Excellence in Infrastructure Global Winners, Exhibition Metro Station-1st Prize
<https://informedinfrastructure.com/17410/2015-autodesk-excellence-in-infrastructure-global-winners-announced/>
Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Autodesk, 2022. Digital Project Management: Lean, Integrated Project Delivery Process, 7 Dimensions of BIM Execution Plan, <https://www.autodesk.com/autodesk-university/de/node/130694>, Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Aziz, N.D., Nawawi, A.H., Ariff, N.R.M., 2016. ICT Evolution in Facilities Management (FM): Building Information Modeling (BIM) as the Latest Technology, *ASEAN Turkey ASLI Conferences on Quality of Life 2016*

Bahadır, T., 2021. Metro İstanbul (İBB) Çalışanı ile Kişisel Görüşme

BIS, 2010. Estimating the Amount of CO2 Emissions that the Construction Industry Can Influence. *London: Department for business innovation and skills*

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., Rezgui, Y., 2020. Towards A Semantic Construction Digital Twin: Directions For Future Research, *Automation In Construction*, 2020. 114/103179

Brundtland Report, 1987. Report of the World Commission on Environment Development: *Our Future*

BS EN 50126-1, 2017. British Standards, *Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)*, BSI Standards Publication

C3mpowersystems.com, 2019. Cer Gücü Odası – Trafolar, Washington DC, ABD. <https://www.c3mpowersystems.com/metro-traction-power>, Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Chiu, Y.C., Chen, P.H., 2017. Building Carbon Footprint (BCF) Evaluation for Social Amenities and Education Center Taipei, *IAARC Publications*, 2017. Proceedings of the 34rd ISARC, Taipei, Taiwan, ISBN 978-80-263-1371-7, pp.560-564

EC, 2023. Avrupa Birliği Faaliyetleri resmi internet sayfası, Shaping Europe's Digital Future, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/destination-earth-new-digital-twin-earth-will-help-tackle-climate-change-and-protect-nature>
Son Erişim Tarihi: 03.07.2023

Elmualim, A., Pelumi-Johnson, A., 2009. Application of computer-aided facilities management (CAFM) for intelligent buildings operation. *Facilities*, 27(11/12), 421–428. doi:10.1108/02632770910980718

Ermehan, C., 2018. SCADA Sistemi Nedir ?, *HMI Blog*. <https://www.hmi.com.tr/10-scada-sistemi-nedir?-blog-detay> , Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Golabchi, A., Akula, M. V. R. K., 2013. Leveraging BIM for automated fault detection in operational. *In Proceedings of the 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), International Association for Automation and Robotics in Construction* (pp. 1–11). Montreal.

GSA, 2023a. U.S. General Services Administration resmi internet sayfası, About Us, <https://www.gsa.gov/about-us?topnav=about-us>
Son Erişim Tarihi: 03.07.2023

GSA, 2023b. U.S. General Services Administration resmi internet sayfası, Federal Sustainability Plan, <https://www.gsa.gov/system/files/EO14057%20Overview%20for%20GAP%20FAC%20Acquisition%20Workforce%20Subcommittee.pdf>
Son Erişim Tarihi: 03.07.2023

Gündoğdu, F., Açıkbaş, S., 2007. Raylı Sistemlerde Emniyet Standartları ve Makas Otomasyon Sistemi Uygulanması, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi ve Fuarı Bildirileri*,

İBB, 2017. Yapı Bilgi Modellemesi YBM Teknik Şartname Taslağı. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul

IFMA, 2020. IFMA Foundation Launches Eric Teicholz Sustainability Facility Professional (SFP) Scholarship Program. <https://foundation.ifma.org/6266-2/> ,
Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

inat.fr, 2023. INAT Mapping and Wayfinding Consultancy, *Moscow Metro Map*, <http://www.inat.fr/metro/moscow/>, Son Erişim Tarihi: 02.07.2023

Jayasena, N., Mallawarachchi, H., 2019. Environmental Sustainability of Facilities Management: Analytical Hierarchy Process (AHP) Based Model For Evaluation, *Built Environment Project And Asset Management*, 2019/10

Kaewunruen, S., Xu, N., 2018. Digital Twin Sustainability Evaluation of Railway Station Buildings. *Transportation and Transit Systems: A Section Of The Journal Frontiers In Built Environment*

Kaewunruen, S., Peng, S., Phil-Ebosie, O. 2020. Digital Twin Aided Sustainability and Vulnerability Audit for Subway Stations, *Sustainability* 12, no. 19: 7873. <https://doi.org/10.3390/su12197873>

Khajavi, S.H., Motlagh, N.H., Jaribon, A., Werner, L.C., Holmström, J., 2019. Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries and Creation for Buildings, *IEEE Access Journal*, DOI:10.1109/Access.2019.2946515

Khalvati, M., 2019. What An Integrated Workplace Management System Needs To Have. *Axxerion USA*. <https://axxerionusa.com/software/iwms/> Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Knops, J., 2014. What is IWMS? Planon Software <https://planonsoftware.com/us/glossary/iwms/> , Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

KTÜ, 2018. Orman Koruma Ders Notları, Orman Mühendisliği Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Lansimetro.fi, 2018. How is a metro station built ? <https://www.lansimetro.fi/en/construction/construction-phases/how-is-a-metro-station-built/>, Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Li, D., Chen, H., Hui, E.C., Zhang, J., Li, Q., 2013. A Methodology for Estimating the Life-Cycle Carbon Efficiency of a Residential Building, *Building and Environment*, vol. 59, pp. 448-455

Metroİstanbul, 2021. İstanbul Belediyesi Kent İçi Raylı Sistemler İşletmeciliği, Sürdürülebilirlik Raporu, pp. 36-37, https://www.metro.istanbul/Dosyalar/efqm/surdurebilirlik_raporu.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.06.2023

Metroİstanbul, 2022. İstanbul Belediyesi Kent İçi Raylı Sistemler İşletmeciliği, 2022 Faaliyet Raporu, pp. 75-76, https://www.metro.istanbul/Content/assets/uploaded/2022_faaliyetraporu.pdf Son Erişim Tarihi: 03.07.2023

MFA, 2023. Ministry of Foreign Affairs, T.C. Dış İşleri Bakanlığı resmi sitesi, *Paris Anlaşması*, <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa#:~:text=Anla%C5%9Fma%2C%2005%20Ekim%202016%20itibariyle,y%C3%BCr%C3%BCr%C4%9Fe%20giren%20ilk%20k%C3%BCresel%20anla%C5%9Fmad%C4%B1r>, Son Erişim Tarihi: 03.07.2023

Motawa, I., Almarshad, A., 2012. A Knowledge-Based BIM System for Building Maintenance, *Automation in Construction*, pp. 173-182

Nor, N.A.M., Mohammed, A.H., Alias, B., 2014. Facility Management History and Evolution, *International Journal of Facility Management* vol:5, No:1-Nov 1014.

O'Brien J., 2014. The evolution of Affordability and Accessibility in CMMS Software <https://www.americanmachinist.com/enterprise-data/article/21898450/the-evolution-of-affordability-and-accessibility-in-cmms-software#:~:text=The%20evolution%20of%20CMMS%20started,those%20with%20the%20biggest%20computers>. Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Ofluoğlu, S., 2020. BIM ve Tesis Yönetimi, *Bimfili Webinar*, 2020/08. <https://www.youtube.com/watch?v=FsrST5LWz8E&t=3272s> , Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Öner, F., 2019. İBB Raylı Sistem Projelerinde BIM Uygulamaları sunumu. <https://www.ibb.istanbul/Uploads/2019/10/1.-FAHRETTİN-ÖNER---İBB-RAYLI-SİSTEM-PROJELERİNDE-BİM-UYGULAMALARI.pdf> , Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Öztürk, Ö., 2017. Raylı Sistemler Araçları ve Özellikleri. <https://www.muhandisbeyinler.net/rayli-sistem-araclari-ve-ozellikleri/> , Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Pokusae, O., Chekmarev, A., Namiot, D., 2021. On Digital Twin for Metro System, 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia, 2021, pp. 1-5, DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581028

Prota, 2016. Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey <http://bim.prota.com.tr/design-services-istanbul-kabatas-mahmutbey-metro-line-project-pick-speed/> Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Saad, S.M., Adnan, Y.M., Hamzah, H., Daud, N., Alias A., Dali, M., 2014. City Development Concepts for Sustainable Development, *International Surveying Research Journal*, Vol.4 No:2, 2.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Değerlendirme Raporu, 2019. TC Strateji ve Bütçe Başkanlığı 2019 Raporu

Tao, F., Zhang, M., Nee, A.Y.C., 2019. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. eBook ISBN:9780128176313, Academic Press Publishing

Tay, L., Ooi, J.T.L., 2001. Facilities Management: Jack of All Trades, *Facilities Journal* 2001/19, pp.357-362

Teicholz, E., 2020. IFMA Foundation Launches Eric Teicholz Sustainability Facility Professional (SFP) Scholarship Program.
<https://foundation.ifma.org/6266-2/>
Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Turan, B., 2020. Dijital İkiz Teknolojisi, *İTÜ Arı Teknokent Webinar*, 2020/06.
<https://www.youtube.com/watch?v=jwTYEtzVfv8&t=1109s>
Son Erişim Tarihi: 06.06.2023

UAB, 2022. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, *BIM Teknik Şartnamesi ve İhale Dokümanları*,
<https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/stratejik-yonetim/bim-teknik-sartnamesi-rev-no-03-02-09-2022.pdf>, Son Erişim Tarihi: 26.06.2023

UNFCCC, 1992. United Nation Framework Convention on Climate Change.
https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convention.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Verdantix, 2019. Green Quadrant Integrated Workplace Management Systems.
<https://research.verdantix.com/report/smart-buildings/green-quadrant-integrated-workplace-management-systems>
Son Erişim Tarihi: 28.06.2023

Wang, M., Tan, J., Li, Y. 2015. Design and Implementation of Enterprise Asset Management System Based on IOT Technology. *2015 IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*.
doi:10.1109/iccsn.2015.7296188

Watson, R.T., 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report, *International Panel on Climate Change*.

Wilkinsonyre.com, 2011. Bank Station Peron Katı, Londra, İngiltere.
<https://www.wilkinsonyre.com/projects/bank-station-capacity-upgrade>
Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

Windesk, 2020. Signumtte Tesis Yönetimi Bilişim Hizmetleri Şti.
<http://www.signumtte.com/en/service-and-facility-management> , Son Erişim Tarihi: 27.06.2023

YKS, 2020. Tesis Yönetimi Nedir ?
<http://www.yks.com.tr/tr/kurumsal/4/tesis-yonetimi-nedir> , Son Erişim Tarihi: 27.06.2023