

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNŞAAT SEKTÖRÜNDE BIM VE DİJİTAL ÜRETİM KAVRAMLARININ
BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebru İrem ÇETİNKAYA

Mimarlık Anabilim Dalı

Proje ve Yapım Yönetimi Programı

ARALIK, 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNŞAAT SEKTÖRÜNDE BIM VE DİJİTAL ÜRETİM KAVRAMLARININ
BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**EBRU İREM ÇETİNKAYA
(502141407)**

Mimarlık Anabilim Dalı

Proje ve Yapım Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. HAKAN YAMAN

ARALIK, 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 502141407 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ebru İrem ÇETİNKAYA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İNŞAAT SEKTÖRÜNDE BIM VE DİJİTAL ÜRETİM KAVRAMLARININ BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Hakan YAMAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Emrah ACAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Özlem TÜZ EBSEK
Mersin Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Kasım 2017
Savunma Tarihi : 14 Aralık 2017





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışması süresince göstermiş olduğu ilgi, sabır ve hoşgöründen dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Hakan Yaman'a,

Bu süreçte beni destekleyen, motive eden sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2017

Ebru İrem Çetinkaya
(Mimar)





İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	13
ŞEKİL LİSTESİ	15
ÖZET	17
SUMMARY	19
1. GİRİŞ	23
1.1 Problemin Belirlenmesi	24
1.2 Tezin Amacı	25
1.3 Tezin Yöntemi	26
1.4 Tezin Kapsamı	27
2. ENDÜSTRİ 4.0 VE İNŞAAT SEKTÖRÜ	29
2.1 İnşaat Sektöründe Endüstri 4.0 Kapsamında Ele Alınabilecek Teknolojiler	29
2.1.1 Akıllı Üretim Teknolojileri	34
Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID)	34
Nesnelerin İnterneti	36
Otomasyon	40
Modularizasyon / Prefabrikasyon	42
Eklemeli Üretim / Üç Boyutlu Baskı	43
Robotik	44
2.1.2 Simülasyon ve Modelleme	46
2.1.3 Dijitalleşme ve Sanallaşma	48
Bulut Bilişim	48
Büyük Veri	48
Mobil Hesaplama	49
Sosyal Medya	49
Dijitalizasyon	50
3. BIM TEKNOLOJİSİ	51
3.1 BIM Teknolojisi Tanımları	51
3.1.1 BIM’de Veri Akışı	54
3.1.2 BIM’de Detay Seviyeleri	59
3.1.3 Nesne Tabanlı Modelleme	60
3.1.4 BIM ve Algoritmik Tasarım	60
3.1.5 Dokümantasyon	62
3.1.6 Hata Öngörülleri ve Çakışma Analizleri	63
3.1.7 BIM’in Karar Vermeye Etkisi	63
3.1.8 Sanal Prototiplendirme	64
3.1.9 Enformasyonun Derinliği ve İçeriği	66
3.1.10 Modele Eklenen Boyutlar	68

3.2 Çeşitli Ülkelerde BIM Kullanımı	70
3.3 BIM'in Faydaları	71
4. BIM VE DİJİTAL ÜRETİM BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİĞİ.....	74
4.1 Dijital Üretimin İnşaat Sektörüne Sağlayabileceği Faydalar	75
4.2 Dijital Üretimin İnşaat Sektöründe Uygulanmasında Karşılaşılabilecek Zorluklar	77
4.3 Dijital Üretim Örnekleri	80
ETH Zürich – “dfab”	81
MX3D – MX3D Bridge	82
SOM – Amie 1.0 Pavilion	83
4.4 BIM ve Diğer Teknolojilerin İşbirlikteliği	85
4.4.1 Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) ve BIM İşbirlikteliği	85
4.4.2 Nesnelerin İnterneti ve BIM İşbirlikteliği	88
4.4.3 Modularizasyon ve BIM İşbirlikteliği	91
4.4.4 Robotik ve BIM	94
4.4.5 Simülasyonlar ve BIM	97
5. DİJİTAL ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE BIM BİRLİKTELİĞİ DEĞERLENDİRMESİNE İLİŞKİN KAVRAMSAL ÇERÇEVE	101
5.1 BIM'in Dijital Üretimdeki Rolü	101
5.2 Birlikte Çalışabilirliğin Değerlendirilmesine Yönelik Kavramsal Çerçeve ...	104
5.3 BIM Süreçlerinde Birlikte Çalışılabilecek Teknolojiler	106
5.3.1 Programlama	108
5.3.2 Konsept Tasarım	108
5.3.3 Detaylı Tasarım	109
5.3.4 Analiz	109
5.3.5 Dokümantasyon	109
5.3.6 Fabrikasyon	110
5.3.7 Yapım	110
5.3.8 İşletme ve Bakım	110
5.3.9 Renovasyon veya Yıkım	110
5.4 BIM Süreçleri Bağlamında Değerlendirme	111
5.5 Proje Paydaşları Bağlamında Değerlendirme	114
5.6 Proje Teslim Sistemleri Bağlamında Değerlendirme	117
5.7 BIM'in Özellikleri Bağlamında Değerlendirme	118
Veri Akışı	119
Detay Seviyeleri	120
Algoritmik Tasarım	121
5.8 BIM Özelliklerinin Teknoloji Birlikteliğinde Faydaları ve Zorlukları	121
5.9 BIM ve Dijital Üretim Teknolojileri Birlikteliği Sonucunda Proje Ve Yapım Yöneticilerine Görev Önerileri	124
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ.....	145

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AEC	: Architect, Engineering, Construction
AECOO	: Architect, Engineers, Consultancies, Operator, Owner
AIA	: The American Institute of Architects
AR	: Augmented Reality
BIM	: Building Information Modeling
BREEAM	: Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CAD	: Computer Aided Design
CAM	: Computer Aided Manufacturing
CIC	: Construction Industry Council
CNC	: Computer Numerical Control
COBie	: Construction Operations Building information exchange
ERP	: Enterprise Resource Planning
ETH	: Eidgenössische Technische Hochschule
GSA	: U.S. General Services Administration
GSMH	: Gayri Safi Milli Hasıla
HTML	: Hypertext Markup Language
iBIM	: Integrated Building Information Management
ICT	: Information and Communication Technologies
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFC	: Industry Foundation Classes
IoT	: Internet of Things
IPD	: Integrated Project Delivery
IT	: Information Technologies
JPEG	: Joint Photographic Experts Group
LEED	: Leadership in Energy and Environmental Design
LOD	: Level of Development
MIT	: Massachusetts Institute of Technology
MR	: Mixed Reality
NCCR	: The National Centre of Competence in Research
NIBS	: National Institute of Building Sciences
PAS	: Publicly Available Specifications
PIM	: Project Information Management
PLM	: Product Lifecycle Management
PMBOK	: Project Management Body Of Knowledge
RFID	: Radio Frequency Identification
VR	: Virtual Reality



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Endüstri 4.0 Bağlamında Teknoloji Konsept Grupları.....	34
Çizelge 3.1 : BIM proje süreçlerine göre sağladığı kazanımlar (Eastman ve diğ, 2011).	72
Çizelge 5.1 : BIM ve diğer teknolojilerin inşaat projeleri yaşam döngüsünde birlikte kullanım önerileri.....	106
Çizelge 5.2 : Teknoloji işbirlikteliğine yönelik proje yöneticisine ait görev önerileri.....	125



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Temel bölgelere göre seçilen Dünya'nın ilk 2500 firması verilerine göre endüstriyel sektörlerin Ar-Ge yatırım puanlaması.....	30
Şekil 2.2 : İnşaat sektörü ve imalat sanayi verimlilik indeksi.	30
Şekil 2.3 : Sensör verilerinin katmanları. Kaynak: Rehmat Ullah sunumu, 2015 (https://www.slideshare.net/RehmatMarwat/introduction-to-internet-of-things-45172425)	37
Şekil 2.4 : BIM yazılımında saha planlama. Kazumi Yajima sunumu, Graphisoft KCC2016, 2016	41
Şekil 2.5 : Eklemeli üretim bileşenleri.	44
Şekil 2.6 : ETH Zürich dFab ekibinin geliştirdiği “dimRob”	45
Şekil 2.7 : Giyilebilir teknolojiler yardımıyla sanal gerçeklik örneği.	46
Şekil 2.8 : Arttırılmış Gerçeklik görüntüsü.	47
Şekil 3.1 : BIM teknolojisi kullanan inşaat projeleri paydaşları ve yaşam döngüsü. Kaynak: www.excitech.co.uk	52
Şekil 3.2 : BIM’de proje paydaşları iş birlikteliği (Kensek, 2015).	54
Şekil 3.3 : Parametrik tasarım içeren bir proje sürecinde kullanılabilecek yazılımlar ve veri akışı. Kaynak: https://blogs.uoregon.edu/222s16/lectures/lecture-1-3b-workflow-parametric-design-bim/	55
Şekil 3.4 : Graphisoft ürünü Archicad BIM yazılımının diğer yazılım ve dosya formatları ile uyumluluğu. Kaynak: https://helpcenterint-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/05/Publish_Interoperabilitat2015-298x300.png	57
Şekil 3.5 : BuildingSMART Standart Üçgeni (http://www.buildingsmart-tech.org).	58
Şekil 3.6 : IFC bileşenleri altkümeleri. Kaynak: http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC2x4/rc2/html/schema/chapter-5.htm	59
Şekil 3.7 : Grasshopper-Rhinoceros-Archicad eş zamanlı, çift yönlü yazılım işbirlikteliği (Calvano ve Sacco, 2017). (http://www.graphisoft.com/users/bim-case-studies/archiradar-case-study.html)	61
Şekil 3.8 : BIM faydaları. Graphisoft KCC 2016, Patrick McLeamy sunumu, 2016	67
Şekil 3.9 : Modellere eklenen boyutlar ve sağladıkları faydalar. (Elsafadi, 2016 https://www.linkedin.com/pulse/bim-3d-7d-implementation-hani-elsafadi).....	69
Şekil 3.10 : 4B faz planlama (http://www.bina-i.com/project-management/4d-bim-project-planning/).....	69
Şekil 3.11 : Avrupa’da BIM adaptasyonu. Kaynak: Arch-Vision, European Architectural Barometer, 2016 ve 2014.....	70
Şekil 3.12 : Yüklenici Deneyimi Oranları. Kaynak: McGraw Hill Construction, 2013	71
Şekil 4.1 : FutureHome robotik sistemi, (Balaguer, 2003).	81

Şekil 4.2 : ETH Zürich MeshMould Robot Kol Örneği.	82
Şekil 4.3 : Amsterdam’da 3B Baskı yöntemi ile imal edilen köprü projesi.	82
Şekil 4.4 : Robot kolla 3B Baskı yöntemi ile yapılan köprü projesi imalat test aşaması.	83
Şekil 4.5 : Pavilyon projesinin prekast modüllerinin bir araya getirilişi.	84
Şekil 4.6 : Elektrik ve su şebekelerinden bağımsız bir alana yerleştirilen pavilyon.	84
Şekil 4.7 : RFID ve BIM teknolojileri konsept işbirliği şeması.	86
Şekil 4.8 : Proje süreçleri bağlamında BIM veritabanı ve veri etiketleri (Motemadi ve Hammad, 2009).	87
Şekil 4.9 : BIM teknolojisi ile yürütülen bir yapının yaşam döngüsünde Nesnelerin İnterneti teknolojisi kullanımı. Kaynak: https://fmsystems.com/blog/does-bim-have-a-role-in-the-internet-of-things/	89
Şekil 4.10 : Nesnelerin İnterneti ve BIM teknolojileri birlikteliği proje yaşam döngüsüne katkısı.	90
Şekil 4.11 : IoT ve BIM teknolojisi karşılıklı alışverişi.	90
Şekil 4.12 : Saha dışı imalat ve BIM faydaları (Ezcan ve diğ, 2012).	92
Şekil 4.13 : İsviçre’de The Monte Rosa Hut Projesi.	93
Şekil 4.14 : Gramazio Kohler Araştırma Merkezi, Quadrokopter.	95
Şekil 4.15 : 7 akslı robot yardımıyla üretilen girişler.	97
Şekil 4.16 : Daqri firmasına ait “Smart Helmet TM ” ürünü.	99
Şekil 5.1 : İnşaat sektörü dijital üretim teknolojilerine adaptasyonunda dört adet bileşen önerisi.	102
Şekil 5.2 : Kavramsal çerçeveyi oluşturan kapsamlar.	105
Şekil 5.3 : BIM ile yürütülen inşaat projesi yaşam döngüsü.	111
Şekil 5.4 : Tasarım süreci kendi içerisindeki süreç döngüsü.	113
Şekil 5.5 : BIM ile yürütülen inşaat projesinde anahtar paydaşlar ile ilişkisi.	114
Şekil 5.6 : BIM ve dijital üretim teknolojileri birlikteliğinde inşaat projesi anahtar paydaşlar önerisi.	116
Şekil 5.7 : BIM ve dijital üretim teknolojileri iletişimi.	119
Şekil 5.8 : Parametrik tasarımın üretime yönelik süreci.	121

İNŞAAT SEKTÖRÜNDE BIM VE DİJİTAL ÜRETİM KAVRAMLARININ BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

ÖZET

İnşaat sektöründe yapılan verimlilik üzerine yapılan araştırmalarda ekonomide en büyük paylardan birine sahip olmasına karşın verimliliğin giderek düştüğü görülmektedir. Verimliliğin düşük olması, projenin yaşam döngüsü içerisinde başlangıç aşamasından kapanış aşamasına kadar tüm süreçler üzerinden değerlendirilmelidir. İnşaat sektörünün üretim sürecinde ideal koşullara ulaşabilmesi için inşaat malzemeleri ve ürünleri üretiminde, tasarım ve uygulama yöntemlerinde, inşaat teknolojileri ve makinaların kullanımında revizyonlar yapılması gerekmektedir. Tüm süreçlerde inovatif teknolojilerin adaptasyonu ile inşaat sektöründe verimlilik artırılabilir. İnşaat sektöründe Dijital Üretim kavramı, verimliliği artırmaya yönelik inovatif gelişmelerin geleneksel üretim yöntemlerine adaptasyonu ile inşaat sektöründe sanayileşmeyi kapsamaktadır.

İnşaat sektörü kendine has özellikleri ve davranışı olan bir sektör olduğundan inovatif gelişmelerin adaptasyonu uzun sürmektedir. Buna bağlı olarak, dijitalize ve otomotize olmuş üretim süreçlerini öneren Endüstri 4.0 kavramı inşaat sektöründe yeterince dikkat çekmemiştir. Bunda inşaat projelerinin yerine özgü ve tekrarı olmayan projeler olması, ayrışık ve çok bilgi alanından paydaşı olması önemli bir etkidir. İnşaat sektörünün karakteristik zorluklarına yönelik tüm sektör paydaşlarını kapsayan iki adet yaklaşım sunulmuştur. Bunlardan biri modülerizasyon ve prefabrikasyon diğer ise BIM'dir.

Bir projenin, üretkenliği, verimi, değerini, kalitesini ve sürdürülebilirliğini artırmak ve projenin yaşam maliyetlerini, gecikmeler, teslim süreleri, tekrarları azaltmakla performansını artırmak hedeflenir. BIM modeli bu kriterleri etkili iletişim ve işbirliği ile sağlamayı amaçlar. BIM teknolojisini kullanıldığı projelerde olgunluk seviyelerinde 2. Seviyeden sonra geçilecek 3. Seviye, BIM'i merkeze alan entegre ağ sistemlerini hedefler. 3. Seviyedeki BIM teknolojisi ile yürütülen projeler, tamamen entegre olduğundan "iBIM" bir başka deyişle, Integrated BIM olarak adlandırılır. BIM teknolojisi ile yürütülen projelerin öngörülen son seviyesi olan bu seviyede, BIM, tüm boyutlarıyla işbirliğine olanak tanıyan bir model sunucusunda (model server), IFC standartlarıyla uyumlu bir web servisinden etkin kullanılan, açık üretim

süreci ve veri entegrasyonu ile kullanılır. BIM'in diğer dijital üretim teknolojileriyle entegrasyonu, verimli ve doğru bir şekilde işbirlikliği sağlaması, BIM 3. Olgunluk seviyesine geçiş çalışmaları arasında değerlendirilmesi gereken bir konudur.

Endüstri 4.0 konsepti kapsamında değerlendirilen ve inşaat sektöründe kullanılabileceği öngörülen teknolojilerin tamamı, çağın gereği olarak “dijitalleşme” üzerinedir. BIM teknolojisi, proje süreçlerinin en başından itibaren aktif olarak devreye girebildiğinden ve dijital veri üretme mantığına dayalı olduğundan tüm teknolojiler için veri kaynağı durumundadır. BIM projesi, tüm teknolojilerin inşaat sektöründe proje yaşam döngüsü süreçlerinde kullanılabilmesi için anahtar teknoloji konumundadır. Proje yaşam döngüsünün devamlılığı için dijital proje enformasyonunun kaynağını oluşturur. Bu sebeple BIM teknolojisinin diğer tüm teknolojilerle iletişim içerisinde bulunması çok önemlidir. İletişimle birlikte kesintisiz karşılıklı alışveriş devam edecektir. BIM sistemlerinin dijital üretim teknolojileriyle uyumluluğu ve işbirlikliği yetkinliği önemlidir.

Yapılan çalışmada, inşaat sektöründe verimliliği artırmaya yönelik, BIM sistemleri ve dijital üretim teknolojilerinin birlikte çalışabilirliğinin altı çizilmektedir. İşbirlikliğinde BIM projesi özellikleri üzerinden avantajlar ve dezavantajlar belirlenmiştir. Yapılan çalışmanın ileride yapılacak çalışmalara ve araştırmalara altlık olması hedeflenmiştir.

A RESEARCH ON INTEROPERABILITY BETWEEN BIM AND DIGITAL FABRICATION CONCEPTS IN CONSTRUCTION INDUSTRY

SUMMARY

Researches show us, construction industry has even biggest concern, and its productivity is the lowest. Low productivity must be criticised in the lifecycle of project, from start to end off it. After all when we compromise all industries, construction industry has lowest budget for research and development. If industry wants to catch perfect conditions, all manufacturing of construction materials and outputs, all design and applications methods, construction technologies, usage of machines must be rebuilt. With adaptation of innovative technologies, productivity of construction industry could be increase. Digital fabrication concept at construction industry extends, adaptation of innovative progress, which uses for the high productivity to conventional methods and the industrialisations of the construction works.

Construction industry has its own characteristics, because of, adaptations of innovations takes longer time than the other industries. That's why, Industry 4.0 is the concept which offers digitalised and automatized production processes, could not get enough attention of construction industry. Being unique and non-repetitive projects, and characteristics of sector has role on that. According to characteristic difficulties of construction industry, two attitudes have recommended by researchers and they are including all stakeholders. One of them is modularisation and prefabrication, and the other one is BIM technologies.

BIM technology aims to keep this criteria's with strong communication and collaboration. The third level of BIM projects aim to integrate connecting systems that are centralise BIM. Third level of BIM technology is defined as "iBIM" means Integrated BIM because of all the elements of this techonogy will be fully integrated. At this last level of BIM projects, it has reached from fully integrated and

collaborated model server with IFC standard compatible web services. Integration and collaboration of BIM with other digital fabrication technologies is the topic, which must criticise with transition to 3rd Level of BIM.

All technologies, which could find use in construction industry and seen as a part of Industry 4.0 concept, have connection with the main idea of digitalisation and integration. Industry 4.0 related technologies are robotics, cyber physical systems, Internet of things, additive manufacturing, simulations, cloud computing, mobile computing, big data etc. BIM technology has active role from start to end of the project, because of it has mental of digital data production. It is the key technology in for use to all other technologies in the lifecycle of construction industry. For continuous of projects lifecycle, BIM is the source of digital project information. That is why BIM technology must communicate with all other technologies. With communication, transaction will always be continuing. Compatibility and collaboration of BIM technology with other digital fabrication technologies are important.

In this study, with a literature review of background of Industry 4.0 and construction sector related technologies, the relationship between BIM technology and other technologies was investigated. For analysing the capability of BIM technology in a right way, a conceptual framework has been created. The conceptual framework based on process within the lifecycle of construction projects, key stakeholders, data flow between the stakeholders, data type, regulations and standards. With the help of the conceptual framework, first, BIM capabilities and characteristics have been examined within the lifecycle of construction projects and the results have revised in the context of digital fabrication technologies. After that, a proposal of workflow within the lifecycle of construction projects has developed. Key stakeholders of construction projects, which use BI technology, have analysed within the context of digital fabrication technologies. Therefore, not only the new stakeholders have suggested, but also existing key stakeholders have highlighted, which will be important hence the interoperability of technologies. The collaboration was investigated against the backdrop of project delivery systems. Through the inferences, advantages and disadvantages of collaboration have showed by perspective of BIM technology.

This practice aims to emphasise collaboration of BIM systems with digital fabrication technologies for the rise of efficiency in construction industry. In addition to this, this study has aimed to be a base for future researches.





1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe başarılı bir sonuç ürün, birçok farklı uzmanlık alanına ait çalışmaların bir araya gelmesiyle ortaya çıkmaktadır. Sonuç üründe, her üretim alanında olduğu gibi süre, maliyet, kalite gibi işin başarısını belirleyen kavramlar ön plandadır. Bir inşaat projesinin yaşam döngüsü incelendiğinde, genellikle projenin operasyon ve işletme maliyetinin tasarım ve inşaat maliyetlerinden çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sebeple, doğru kurgulanmış projelerde teknolojinin yardımıyla birlikte operasyon ve işletme maliyetlerini düşürebilecek ve kaliteyi artırabilecek çözümler aranmakta ve geliştirilmektedir. Bu noktada işbirliktelik / işbirliği / birlikte çalışabilirlik ön plana çıkmaktadır. “İşbirliktelik” (interoperability) kavramı IEEE tanımına göre, ‘iki ya da daha fazla sistemin ya da bileşenin aralarındaki bilgi alışverişinin sağlanması ve bu bilginin kullanılması’ anlamına gelmektedir (IEEE Standart Computer Dictionary, 1990). İşverenler, tedarikçiler, iş ortakları vb. gibi paydaşlar arasında bilgi sistemlerinin işbirliği halinde olması, işin değerini ve işverliğini artırmaktadır.

Endüstride su ve buhar gücünün kullanılmasıyla başlayan ve Endüstri 1.0 adı verilen endüstri devrimi, elektrik gücünün yardımıyla seri üretime geçilmesiyle Endüstri 2.0, bilgi ve bilişim teknolojilerinin gelişmesi, bilgisayar kullanımı ve otomasyon süreci ile Endüstri 3.0, sonrasında da günümüzde 4. Sanayi Devrimi, bir başka deyişle Endüstri 4.0 olarak anılmaktadır. Endüstri 4.0 dönemi, siber fiziksel sistemler, nesnelerin İnterneti, İnternet hizmetleri konseptine dayanmaktadır. Söz konusu gelişmeler otomasyonda yenilikleri, üretim teknolojilerinin gelişmesini ve veri alışverişinde gelişmeleri de beraberinde getirmektedir.

Yapı üretiminde ise BIM, sahip olduğu mantık gereği bir yapının tüm yaşam döngüsünü kapsayacak şekilde süreçteki tüm paydaşlar arasında işbirliğine olanak tanımaktadır (Barnes ve Davies, 2014). Endüstri 4.0 kapsamında değerlendirilen teknolojilerden biri olan BIM’in, dijital üretim kavramı içerisindeki tüm teknolojiler arasında kilit bir noktada olduğu görülmektedir.

1.1 Problemin Belirlenmesi

Dijital üretim kavramının temeli olarak kabul edilen Endüstri 4.0 dönemi, inşaat sektörü içerisinde çeşitli sebeplerden dolayı tam olarak karşılığını bulamamıştır. Buna karşın BIM teknolojisi, öncü devletlerin de bu konudaki destekleri ile inşaat sektöründe giderek artan bir eğilim olarak değerlendirilmektedir. Dünya genelinde bakıldığında, henüz yaygın olarak kullanıldığını söyleyemesek de, inşaat sektöründe BIM teknolojisine adaptasyon çalışmalarının hızlandığını gözlemleyebiliriz.

Endüstri 4.0 konsepti kapsamında değerlendirilen ve inşaat sektöründe kullanılabileceği öngörülen teknolojilerin tamamı, çağın gereği olarak “dijitalleşme” üzerine bina edilmiştir. Söz konusu teknolojiler; siber fiziksel sistemler, nesnelerin İnterneti, otomasyon, modularizasyon ve prefabrikasyon, eklemeli üretim, robotik gibi akıllı üretim teknolojileri, simülasyon ve modelleme teknolojileri, bulut bilişim, büyük veri, Mobil Hesaplama, sosyal medya, dijitalizasyon gibi dijitalleşme ve sanallaşma teknolojileridir. BIM teknolojisi de Endüstri 4.0 kapsamında modelleme teknolojileri başlığı altında yer alır ve proje süreçlerinin en başından itibaren aktif olarak devreye girebildiğinden ve dijital veri üretme mantığına dayalı olduğundan, diğer tüm teknolojiler için bir veri kaynağı durumundadır.

Literatürde inşaat sektöründe düşen verimliliği arttırmaya yönelik olarak, Ar&Ge yatırımlarının diğer sektörlere göre az olması gibi ekonomik sektör verilerinden de yola çıkarak, BIM teknolojilerinin kullanılması önerilmektedir. Ancak BIM teknolojisinin henüz yeterli olgunluk seviyesinde olmaması sebebiyle, geliştirilmesi gereken nitelikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, BIM teknolojisinin niteliklerini oluşturduğu düşünülen bir kavramsal çerçeve üzerinden Endüstri 4.0 konseptli teknolojiler değerlendirilmiştir.

Literatür taraması aracılığıyla, BIM teknolojisinin diğer teknolojiler için kaynak veri oluşturmasındaki uyumluluk denetlenmiştir. BIM’in 3. olgunluk düzeyine ulaşması için yapılan çalışmalar incelenmiş, BIM’in eksik ve yetersiz kaldığı yönler belirlenmiştir. Bazı çalışmalarda yer alan iletişim kopukluğu sorunu değerlendirilmiştir. Dijital üretim ve BIM teknolojileri birlikteliğinde karşılaşılabilecek kopukluklar ve geliştirilmesi gereken konular belirlenmiştir.

Teknolojinin gelişimine paralel olarak, otomotiv, endüstri ürünleri gibi imalat sanayinin gelişmesine karşın, inşaat sektörünün inovatif teknolojilere adaptasyon

konusunda yetersiz kaldığı görülmektedir. İnşaat projelerinin tüm süreçlerinde inovatif teknolojilerin adaptasyonu ile inşaat sektöründe verimlilik artırılacağı düşünülmektedir. İnşaat sektöründe düşük verimliliğe yönelik “Dijital Üretim” kavramı, teknolojideki gelişmeler ile birlikte gitgide önem kazanmakta olan bir kavramdır.

1.2 Tezin Amacı

Dijital üretim, inşaat sektöründe verimliliği artırmaya yönelik olarak BIM’i arayüz olarak kullanır ve proje süreçlerini bütünleşik hale getirmeye çalışır. Bu sebeple BIM sistemlerinin dijital üretim teknolojileriyle uyumluluğu ve birlikte çalışabilirliğinin yetkinliği önemlidir. Çalışmada bu ilişki, inşaat sektöründe verimliliğin neden düşük olduğundan başlayarak, BIM teknolojisi özelliklerine doğru genelden özele ilerleyen sorular bütünüyle sorgulanmış ve çalışmanın amacını belirlemek üzere şu sorular üzerinde durulmuştur:

- İnşaat sektöründe verimliliğin düşük olmasının sebepleri nelerdir?
- İnşaat sektörünün inovasyon yetkinliği nedir?
- İnşaat projelerinin özellikleri nelerdir ve ne sebeple yeni teknolojilere karşı direnç göstermektedir?
- BIM teknolojisine olan adaptasyon süreci nasıl ilerlemektedir?
- BIM teknolojisi kullanan inşaat projelerinin özellikleri nelerdir?
- Endüstri 4.0 konseptinde inşaat sektörüne uygun olabilecek/kullanılabilecek teknolojiler nelerdir?
- Söz konusu teknolojilerin sektörde kullanım örnekleri var mıdır?
- Endüstri 4.0 teknolojileri ve BIM teknolojisi arasında birlikte çalışma örnekleri var mıdır?
- Birlikte çalışabilirlikte BIM özelliklerinde eksik kalan yönler nelerdir? BIM teknolojisinin faydalı olan ve ileride de faydalı olabilecek nitelikleri nelerdir?
- Teknoloji birlikteliğinin BIM teknolojisi ile yürütülen inşaat projesi süreçleri, paydaşları üzerine etkileri nelerdir?

- Yakın gelecekte sektörde üzerinde durulması ve geliştirilmesi gereken konular nelerdir?

Bu çalışmanın amacı, inşaat sektöründe verimliliği artırmaya yönelik olarak, BIM teknolojisi ve dijital üretim teknolojilerinin birlikte çalışabilirliğinin altını çizmektir. Çalışmanın ileride yapılacak çalışmalara altlık oluşturması hedefi bulunmaktadır. Bu hedefle birlikte, çalışmanın amaçları şu şekilde sıralanabilir:

- Endüstri 4.0 konseptinin inşaat sektöründeki etkilerini incelemek.
- BIM teknolojisinin dijital üretime yönelik özelliklerini belirlemek.
- BIM ve dijital üretim kavramlarının arasındaki ilişkiyi sorgulamak.
- İnşaat projesi süreçlerinde BIM teknolojisi paralelinde kullanılabilecek teknolojileri belirlemek.
- BIM teknolojisinin çeşitli niteliklerinin, dijital üretim teknolojileri ile birlikte çalışabilirliğine yönelik fayda ve zorluklarını belirlemek.
- BIM teknolojisinde dijital üretim teknolojileri birlikteliğine yönelik geliştirilmesi gereken konuları belirlemek.

1.3 Tezin Yöntemi

Belirlenen amaçlara yönelik olarak, inşaat sektöründe dijital üretim kapsamında BIM teknolojisinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için bir kavramsal çerçeve oluşturulmuştur. Söz konusu kavramsal çerçeve kapsamında genelde işbirlikteliği örnekleri, özelde ise BIM teknolojisi ile yürütülen inşaat projelerinin özellikleri değerlendirilmiştir.

Kavramsal çerçevenin oluşturulabilmesi için öncelikle literatür araştırması yapılmıştır. Endüstri 4.0 konseptinin inşaat sektörüne yansımaları incelenmiştir. Endüstri 4.0 döneminde inşaat sektörüne yönelik dijital üretim teknolojileri belirlenmiştir. BIM teknolojisinden bağımsız olarak dijital üretim teknolojileri genelde kavramsal olarak incelenmiştir. İşbirlikteliğine yetkinliğinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için, BIM teknolojisi konusunda yapılan tanımlamalar incelenmiş ve buna göre BIM teknolojisi ile yürütülen inşaat projelerinin özellikleri belirlenmiştir. BIM teknolojisi ile yürütülen inşaat projelerinin özellikleri üzerinden inşaat projelerinin temel bileşenleri ile birlikte kavramsal çerçeve oluşturulmuştur.

Belirlenen kavramsal çerçeve kapsamında, dijital üretim teknolojilerinin inşaat sektörüne adaptasyonunun incelenmesine yönelik, BIM teknolojisi ve Endüstri 4.0 konseptli ve inşaat sektörüne yönelik olarak belirlenen teknolojiler bir arada değerlendirilmiştir.

Yapılan literatür araştırması inşaat sektöründe teknoloji kullanımına yönelik tutulmuş olup öncelikle 2012-2017 yılları arasındaki araştırmalar değerlendirilmiştir. Bunun sebebi teknolojinin hızlı gelişmesidir. Verilen yıllarda içerik bulunmayan teknolojiler ve mevcut teknolojilerin geçmişlerini incelemek adına en erken 1985 yılındaki çalışmalar değerlendirilmiştir. Yapılan literatür araştırmasında anahtar kelimeler; BIM, Endüstri 4.0, endüstri devrimleri, inşaat sektörünün endüstrileşmesi, sanallaşma, dijitalleşme, insan-bilgisayar etkileşimi, bilgi teknolojileri, enformasyon sistemleri, akıllı şehirler, akıllı binalar şeklinde olmuştur.

1.4 Tezin Kapsamı

Bu çalışma, ileride yapılacak akademik araştırmalara altlık oluşturmak amacıyla oluşturulmuştur. Çalışmanın kapsamı dâhilinde yapı üretim ortamlarında Endüstri 4.0'ın etkileri, genelde ve inşaat sektöründe dijital üretime geçiş ve BIM teknolojisi kullanımı araştırılmıştır. Araştırma, inşaat sektöründe belirlenen diğer üretim sektörlerine oranla verimlilik düşüklüğü ve Ar&Ge yatırımı eksikliği üzerinden yola çıkarak teknoloji kullanımı ve inovasyonun Ar&Ge yatırımlarını destekleyeceği ve verimliliğin artabileceği fikri üzerinden yürütülmüştür.

Çalışma kapsamında belirlenen kavramsal çerçeve dâhilinde ele alınan yapı üretim ortamları şunlardır:

- Tasarım ve mühendislik büroları,
- Malzeme firmaları,
- İnşaat firmaları.

Yapı üretim ortamları içerisinde inşaat firmaları, geleneksel üretimin yanında prefabrikasyon kullanan, yerinde makina kullanımı olan firmalar olarak değerlendirmeye alınmıştır.

Yapı üretim ortamlarının yanında, inşaat sektörüne yönelik araştırma ve geliştirme yapan eğitim ve araştırma kurumları da değerlendirme kapsamında yer almıştır.

Bunun sebebi belirlenen yapı üretim ortamlarının yeterli Ar&Ge yatırımının olmamasıdır.



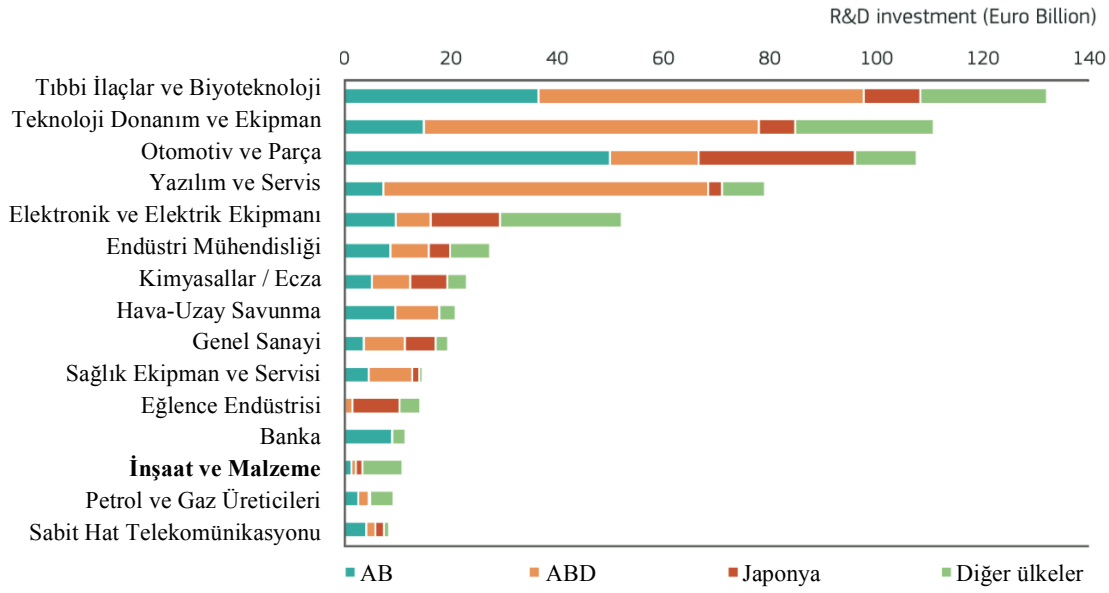
2. ENDÜSTRİ 4.0 VE İNŞAAT SEKTÖRÜ

Bu bölümde, yapılan literatür araştırmasının sonuçlarına yer verilmiştir. Öncelikle BIM kavramı ile ilgili akademik çalışmalar taranmış ve çeşitli ülkelerin BIM teknolojisi hedefleri incelenmiştir. Sonrasında yapı üretiminde kullanılan teknolojiler ve yeni sistemler üzerine kavramsal araştırma yapılmış ve süreç içerisinde geline durum incelenmiştir.

2.1 İnşaat Sektöründe Endüstri 4.0 Kapsamında Ele Alınabilecek Teknolojiler

Teknolojinin gelişimine paralel olarak otomotiv, endüstri ürünleri vb. gibi sanayi sektörleri gelişmesine karşın, inşaat sektörünün inovatif teknolojilere adaptasyon konusunda yetersiz kaldığı görülmektedir (Kraatz ve diğ, 2014). Ülkelerin yıllık GSMH (gayri safi milli hâsıla) raporlarına bakıldığında, inşaat ve inşaat malzemeleri sektörü, çoğunlukla en büyük paya sahip sektör olmaktadır. Bu durum kıta bazında değerlendirildiğinde, örneğin Avrupa’da en büyük paya sahip sektörlerden biri olmaktadır. Bu duruma karşıt olarak, “2016 Avrupa Birliği Ar-Ge Raporu”na bakıldığında, inşaat sektörü son sıralarda yer almaktadır (Şekil 2.1). İnşaat sektöründe verimliliğin düşük olmasıyla birlikte bir diğer konu da, diğer sektörlerle oranla emek verimliliğinin neredeyse yarı yarıya düşük olmasıdır (Teicholz, 2013).

BuildingSmart’ın kurucularından Patrcik McLeamy yapmış olduğu sunumda, “imalat sanayiinde verimlilik yüksek oranda artış gösterirken, inşaat sektöründe verimliliğin gelişen teknolojiye karşın düşmekte olduğunu” belirtmiştir (Şekil 2.2). Benzer bir çalışma Teicholz’un 2004 yılında inşaat sektörü verimlilik indeksini belirlemek üzere ABD Ticaret Bakanlığı verileriyle yapmış olduğu analizdir. Bu analize göre, inşaat ve tarım sektörü dışındaki tüm üretim alanlarında verimlilik 1964-2004 yılları arasında %80 artış gösterirken, inşaat sektöründe %20 düşüş görülmüştür. Bu durum, inşaat sektörü üretim alanları için çok önemli bir veridir.



Şekil 2.1 : Temel bölgelere göre seçilen Dünya’nın ilk 2500 firması verilerine göre endüstriyel sektörlerin Ar-Ge yatırım puanlaması.

İnşaat sektöründe verimliliğin düşük olması, projenin yaşam döngüsü içerisinde başlangıç aşamasından kapanış aşamasına kadar tüm süreçler üzerinden değerlendirilmelidir. İnşaat sektörünün üretim sürecinde ideal koşullara ulaşabilmesi için inşaat malzemeleri ve ürünleri üretiminde, tasarım ve uygulama yöntemlerinde, inşaat teknolojileri ve makineleri kullanımında revizyonlar yapılması gerekmektedir (Sardroud ve diğ., 2016). Tüm süreçlerde inovatif teknolojilerin adaptasyonu ile inşaat sektöründe verimlilik artırılabilir. İnşaat sektöründe düşük verimliliğe yönelik “Dijital Üretim” kavramı önemli bir kavramdır. Dijital Üretim, inşaat sektöründe verimliliği artırmak üzere BIM sistemleri aracılığıyla üretim süreçlerini bütünleştirmeyi araştırır (Mihindu ve Arayıcı, 2008).



Şekil 2.2 : İnşaat sektörü ve imalat sanayi verimlilik indeksi.

“Dijital Üretim” kavramı ilk olarak Gershenfeld (2012) tarafından MIT’in ilk sayısal kontrollü fabrikasının devamı olarak gelişen bilgisayar kontrollü üretim gereçleri için kullanılmıştır. Burada kullanılan üretim sözcüğü tüm tasarım ve fabrikasyon süreçlerini kapsamaktadır. Bilgisayar kontrollü üretim, tüm endüstrilerde üretim alışkanlıklarını değiştirmekte ve geliştirmektedir. Üretilecek ürünün doğrudan tasarım bilgisiyle üretilebilme potansiyeli birçok tasarım ve üretim disipliniyi değiştirmiştir (Dunn, 2012). Üretim yöntemlerine otomasyonun entegrasyonu birçok farklı yardımcı teknolojiyi de beraberinde getirmiştir. Üretim yöntemleri malzemeyi şekillendirme biçimleri bağlamında genel olarak, eksiltmeli (reductive) ve eklemeli (additive) olarak sınıflandırılır. Eksiltmeli üretim, kesme, freze ve aşındırma şeklindedir. Otomatize edilmiş eksiltmeli üretim yöntemleri lazer kesim, CNC frezeleme ve robot kollu sıcak tel kesimi olarak örneklendirilebilir. Eklemeli üretimde üç-boyutlu-baskı yönteminin çeşitli formları, laminasyon, otomatik montaj şeklindedir. Üretimde kullanılan teknolojilerin sınıflandırmasına otomasyon ve robotik bağlamında bakıldığında uygulamalar; fiziksel bağlantılı araç kullanımı, uzaktan algılama, analog veya dijital telekomünikasyon, optik veri transferi (lazer, kızılötesi ve fiber-optik), mikro-bilgisayar bazlı araçların izlenmesi, kontrolü ve kayıtları, yerinde-tesislerin sahada kurulumu ve kontrolü, mobil ekipmanın kısmi ya da tam otomatik kontrolü, ankastre manipülatör (fixed-based manipulators), mobil robotlar, otomotize cihazla saha bilgisayarı arasındaki iletişim, elektronik mesafe ölçme ve tespit ve son olarak imaj veya video bazlı şekil tanımlama teknolojilerini içermektedir (Paulson, 1985).

Üretimde teknolojinin gelişimi, konvansiyonel yapım tekniklerinin gelişimiyle ayrı tutulmamalıdır. Mimaride dijital üretimin kullanılması özelleşmiş kompleks strüktürlerin seri üretimine olanak tanır (Gramazio ve diğ, 2014). Eklemeli üretim yöntemlerinden üç-boyutlu baskı yöntemi çeşitli projelerde inşaat malzemeleri üretiminde kullanılmaktadır. Eklemeli üretimin daha büyük ölçekli olarak kullanılması potansiyeli inşaat ve mimari uygulamalarda önem taşımaktadır. Örneğin, Lim ve diğerlerinin (2012) yapmış olduğu çalışmalarda, son dönemlerde beton dökümü konusunda üç-boyutlu-baskı yöntemleriyle entegrasyonu sağlanan gelişmeler maliyet, süre, israf ve kalıp işçiliğinin düşürülmesindeki potansiyeli ortaya çıkarmıştır. Bir diğer çalışmada, kompleks beton strüktürlerin robotik inşaat yöntemleriyle uygulanması yönünde gelişmeler sağlamıştır (Lloret ve diğ, 2014 ve

Hank ve Lauer, 2014). ETH Zürich tarafından 2014 yılında kurulan “The National Centre of Competence in Research (NCCR) Digital Fabrication” araştırma kurumu, dijital teknolojilerin mimariyle entegrasyonu konusunda çeşitli çalışmalar yürütmektedir.

İnşaat sektörü kendine has özellikleri ve davranışı olan bir sektör olduğundan, inovatif gelişmelerin adaptasyonu uzun sürmektedir. Buna bağlı olarak, dijitalize ve otomotize olmuş üretim süreçlerini öneren Endüstri 4.0 kavramı inşaat sektöründe yeterince dikkat çekmemiştir. Bunda inşaat projelerinin yerine özgü ve tekrarı olmayan projeler olması, ayrışık ve pek çok bilgi alanından paydaşı olması önemli bir etkindir. Bir diğer etken ise, inşaat firmalarının büyük bir bölümünün, yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması konusunda sınırlı kabiliyetleri olan küçük-orta büyüklükte firmalar olmasıdır.  sterreich ve Teuteberg (2016) yapmış olduğu araştırmada, inşaat sektörünün diğer sektörlerden farklı olmasının sebeplerini şu şekilde belirlenmiştir:

Karmaşıklık: İnşaat projeleri, birbiriyle ilişkisi olmayan çok fazla üretim kaleminin ve alt- retimnin olması, yüksek sayıda ve farklı aşamalarda farklı lokasyonlarda proje paydaşının olması sebebiyle kompleks işlerdir (Dubois ve Gadde, 2002 ve Arayıcı ve Coades, 2012).

Belirsizlik: Her proje yerine özgü ve kendi zaman çizelgesine sahip olması sebebiyle, belirlenmiş üretime yönelik tam bir spesifikasyon, malzeme istikrarı, tekrar eden iş ve ekip bulunmamaktadır (Dubois ve Gadde, 2002).

Parçalı tedarik zinciri: Farklılaşmamış  r n ve hizmet kapsamıyla yeni teknolojilere yatırım için sınırlı kapasiteye sahip çok sayıda küçük-orta büyüklükte firma olması (Kraatz ve diğ, 2014).

Kısa zamanlı düşünme: İnşaat sektörünün yapısı, bireysel projelerde sıkı bağlarla fakat işin bütününde bakıldığında gevşek bağlarla oluşturulmuş bir sektör olarak tanımlanır. Bu durum kısa düşünme sürelerini destekler, h lbuki uzun vadede bakıldığında inovasyon ve öğrenmeyi olumsuz olarak etkiler. İnşaat firmalarının merkezci olamayan organizasyon yapıları ve inşaat projelerinin geçici doğası inovasyon konusunda bariyer oluşturmaktadır.

Kültür: İnşaat sektörü kültürüne bakıldığında güçlü ve rijit yapısı ve değişikliklere karşı direnç ön plana çıkar (Arayıcı ve Coades, 2012).

Endüstri 4.0 konsepti kapsamında inşaat sektörüyle ilişkili olabilen teknolojiler Çizelge 3.1’de belirtilmiştir. Belirlenen teknolojiler Österreich ve Teuteberg (2016) çalışmalarında yer alan Endüstri 4.0 ve inşaat teknolojileri üzerinden akademik yayınlarda makaleler ve konferans içerikleri, akademik olmayan pratik yayınlarda blog yazıları, dergi makaleleri, konferans içerikleri, raporlar, gazeteler gibi dokümanlarda yapılan sıklık (frequency) analizleri doğrultusunda derlenerek gruplandırılmıştır (Österreich ve Teuteberg, 2016).

Endüstri 4.0 konsepti kapsamında gelişen ve gelişmekte olan teknolojiler, inşaat sektörünün karakteristik özellikleri olan inşaat projelerinin karmaşıklığı ve belirsizliğini azaltacak, proje paydaşları arasında iletişimi ve işbirliğini artıracak ve tüm bunlarla birlikte projelerin kalite ve verimliliğini artıracak vaatlere sahip görünmektedir.

İnşaat sektörünün yukarıda özetlenmiş olan karmaşıklık, belirsizlik, parçalı tedarik zinciri, kısa zamanlı düşünme, kültür karakteristikleri bağlamında, sektörün değer zincirini geliştirmek üzere, Endüstri 4.0 konseptinin inşaat sektörüne yönelik anahtar özellikleri üç ayrı boyutta incelenmiş ve olası teknolojik çözümler aşağıda sıralanmıştır:

- i. Değer zinciri ve değer zincirinde yer alan proje paydaşlarının (işveren, yüklenici, mimar, alt yüklenici, tedarikçiler) artan sayısına bağlı değer ağı arasında yatay entegrasyon: Büyük ölçekli inşaat projelerinde proje paydaşı sayısı yüzün üzerine çıkabilmektedir. Endüstri 4.0 kapsamında simülasyon ve modelleme grubu ve dijitalizasyon ve sanallaştırma grubu teknolojileri kullanılarak oluşturulacak merkezileşmiş bulut bazlı iletişim ortamı sayesinde, inşaat projesinde iyileştirilmiş iletişim ve işbirliği ortamı sağlanabilir (Microsoft, 2014) Bu ortama BIM (Velocloud, 2015), Mobil Hesaplama (Mobile Computing) ve Arttırılmış Gerçeklik (Augmented Reality) (IET, 2012) eklenerek verim artırılabilir.
- ii. Tüm gruptaki teknolojilerin kullanımı yoluyla mühendislik ve değer zincirinin uçtan uca dijital entegrasyonu: Örnek olarak BIM (Arayıcı ve Coates, 2012), Siber Fiziksel Sistemler (Akanmu ve Anumba, 2015) ve Mobil Bilgi İşlem (Microsoft, 2014) teknolojilerinin dijital mühendisliğin projenin tüm fazlarına (başlangıç, tasarım, planlama, ihale, yapım, kullanım ve işletme) entegrasyonu sağlanabilir.

- iii. Dijitalleştirme ve sanallaştırma teknolojileri (Grup 3) ya da otomasyon (Grup 1) teknolojileri kullanılarak, IT (Enformasyon Teknolojileri) sistemi, üretim süreçleri ve veri akışlarının şirket içinde bütünleştirilmesi sonucunda dikey entegrasyonun sağlanması ve ağı bağlı üretim sistemlerinin kullanılması.

Çizelge 2.1 : Endüstri 4.0 Bağlamında Teknoloji Konsept Grupları.

Gruplar	Endüstri 4.0 Bağlamında Anahtar Teknolojiler ve Konseptler
1-Akıllı Üretim	Siber-Fiziksel Sistemler / Gömülü Sistemler / RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama) Nesnelerin İnterneti / Hizmetlerin İnterneti Otomasyon Modularizasyon / Prefabrikasyon Eklemeli Üretim Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) Robotik İnsan-Bilgisayar Etkileşimi
2-Simülasyon ve Modelleme	Simülasyon Gereçleri / Simülasyon Modelleri BIM (Yapı Enformasyon Modellemesi) Arttırılmış Gerçeklik (Augmented Reality) / Sanal Gerçeklik (Virtual Reality) / Karma Gerçeklik (Mixed Reality)
3-Dijitalleşme ve Sanallaştırma	Bulut Bilişim (Cloud Computing) Büyük Veri (Big Data) Mobil Hesaplama (Mobile Computing) Sosyal Medya Sayısallaştırma (Digitisation)

Çizelge 2.1’de görülen her bir grup kapsamındaki anahtar teknolojiler ve konseptler aşağıda daha ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

2.1.1 Akıllı Üretim Teknolojileri

Bu başlık altında Österreich ve Teuteberg tarafından ilk grup olarak değerlendirilen akıllı üretim grubu teknolojileri inşaat sektörüne yönelik kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Temel olarak öncelikle teknolojilerin kavram ve genel konseptleri incelenmiş, sonrasında ise inşaat sektörüne yönelik özellikleri ele alınmıştır.

Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID)

Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) teknolojisi, temel olarak radyo dalgaları yardımıyla veri tanıma yöntemidir. Sistem bir kaynağa yerleştirilen verici ya da etiket ve bir okuyucudan oluşur. Domdousis ve diğerlerinin yapmış olduğu

tanımlamaya göre elektromanyetik sinyaller aracılığıyla veri alışverişine dayalı bir teknolojidir (Domdouzis ve diğ, 2007).

Temel bir RFID sistemi üç bileşenden oluşur. Bunlar anten, alıcı-verici ve elektromanyetik taşıyıcı bir başka deyişle, radyo frekans etiketidir. Bu bileşenler elektronik olarak programlanmış bilgiyi taşır. Bu üç bileşen okuyucuyu oluşturur ve bu okuyucu monte edilerek ya da gömülü olarak yapılandırılabilir. RFID etiketleri, güç kaynağı, frekans, okunabilirlik aralığı, veri aktarım hızı, veri depolama kapasitesi, bellek türü, boyut, işletim ömrü ve maliyet gibi birçok açıdan farklılık gösterir (Meints, 2007). RFID sistemi, insan ve hayvan takibi, kartsız ödeme sistemleri, kartlı kilit sistemleri, pasaportlar gibi günlük hayatı etkileyen konulardan, havalimanı bagaj yönetim sistemleri, hastahane ve kütüphanelerde güvenlik önlemleri gibi daha geniş çaplı konulara kadar birçok alan ve sektörde kullanılmaktadır.

RFID teknolojisinin inşaat sektörüne adaptasyonu 1990'lardan beri araştırılan bir konudur. RFID tabanlı sistemler, inşaat projesinin yapım ve bakım süreçlerinde; bileşen taşınma ve yerleştirilmesi, envanter yönetimi, ekipman izleme, gelişme yönetimi (progress management), işletme ve bakım yönetimi, gereç takibi ve kalite yönetimi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Motemadi ve Hammad, 2009). Ergen ve Akıncı 2007 yılında yayınlamış oldukları çalışmada, RFID sistemlerinin boru makaraları ve prekast elemanların takibinde kullanımını önermektedir. Son yapılan çalışmalar RFID teknolojisinin inşaat sektöründe iş güvenliği konusunda da kullanılabileceğini, böylelikle işgücü kullanımının da optimize edilebileceğini, iş kazalarının azaltılabileceğini göstermektedir (Lu ve diğ, 2011). Örneğin inşaat sahasında ve depoda kaynakların ve malzemelerin konumlarını, sayılarını kontrol ederek genel olarak saha depolarının ve saha içi malzeme kullanımı organizasyonunun sağlanabilmesi, yapım sürecindeki üretkenliği ve iş güvenliğini artıracaktır (Wu ve diğ, 2013).

Yapım sürecini tamamlayan bir binada bileşenlerin durumlarını ve performanslarını izlemeyi amaçlayan etiketler, binanın işletme ve bakım aşamalarında kullanılabilir (Cheng ve diğ, 2007). Valero ve Adan, yapmış oldukları araştırma sonucunda, RFID teknolojisinin, önemli miktarda çeşitliliğe sahip verinin dijitalleştirilmesi yoluyla inşaat sektöründe verimliliğin artırılması ve ilgili maliyetlerin düşürülmesine katkı sağladığı tespit etmişlerdir (Valero ve Adan, 2016).

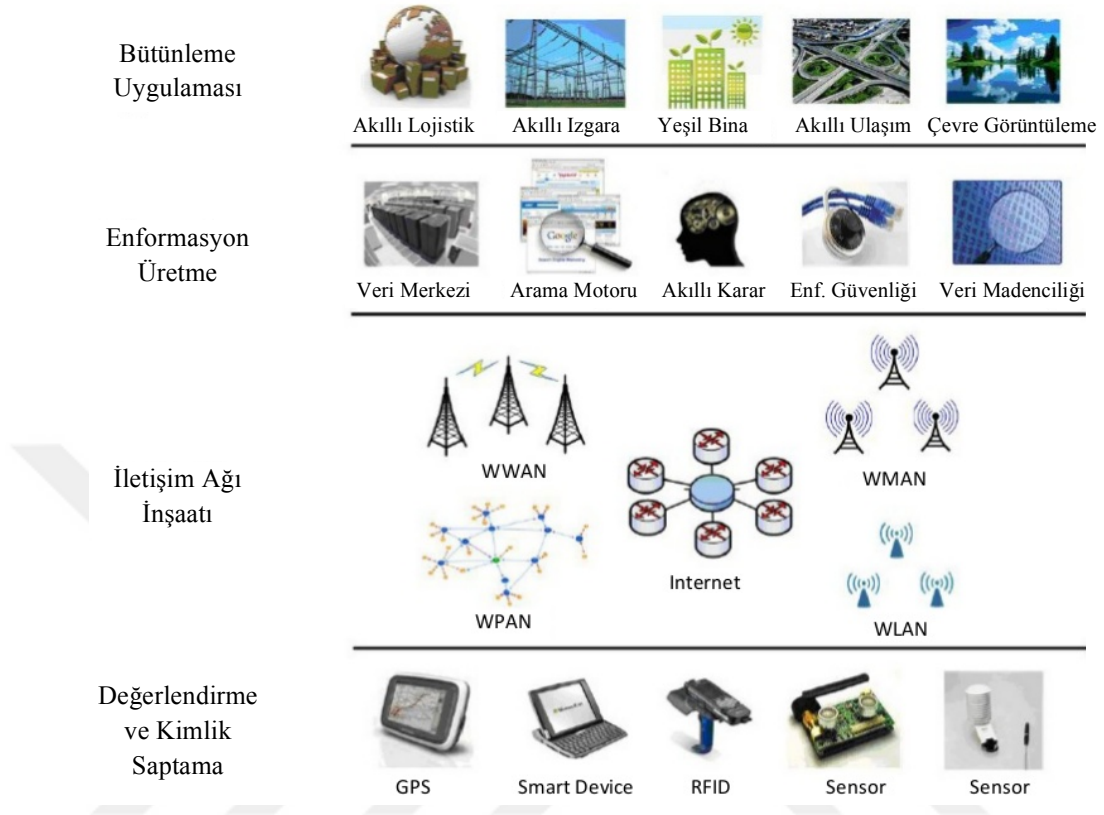
Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin İnterneti kavramı (Internet of Things), temel olarak fiziksel nesnelerin birbirleriyle ya da daha büyük sistemlerle bağlantılı olduğu iletişim ağını ifade eder. Amerikan Federal Ticaret Komisyonu Nesnelerin İnterneti kavramını “günlük kullanımımızda olan nesnelerin İnternet’e bağlanarak veri gönderip alması” olarak tanımlamaktadır. Akıllı nesneler, akıllı telefonlar, akıllı evler, akıllı şehirler kavramlarıyla bire bir bağlantılıdır. Günlük hayattan iş yapma modellerine, teknoloji yatırımlarına kadar birçok konuyu değiştiren bir teknoloji gelişimidir. Nesnelerin İnterneti, herhangi bir şeye herhangi bir zamanda ve yerde bağlanabilme konseptine dayanan ve bilgi işlem ve iletişim sektörleri geleceğinde önemli bir devrim olarak geçmektedir (International Telecommunication Union, Internet Reports, 2005). Nesnelerin İnterneti, nanoteknoloji, elektronik ev aletleri, her türlü sensör ve gömülü sistemler ve kişisel mobil cihazlar gibi İnternet tarafından etkinleştirilmiş gerçek dünya nesnelerinin bir ağını temsil eder. Bu iletişim ve kontrol ağı, üzerinde sensörler, RFID etiketleri gibi alıcı-vericiler bulunan fiziksel nesneler üzerinden veri toplamaya, kontrol etmeye yarar. Nesnelerin İnterneti kavramında yer alan “nesne”nin akıllı olabilmesi için sensörünün olması, tanımlanabilir ve kendine özgü bir kimliğe sahip olması (unique id) ve içeriğindeki enformasyona ulaşabilmek için bağlanılabilir olması gerekmektedir. Teknik açıdan Nesnelerin İnterneti, RFID, diğer iletişim cihazları, bulut uygulamaları, ERP entegrasyonu ve iş zekâsı teknolojisi gibi sensörlerin birleşimi olarak tanımlanmaktadır.

Nesnelerin İnterneti ağı, Şekil 2.3’de tariflendiği gibi sensör ve kimlik saptama cihazlarından veriyi alarak enformasyonu toplama, depolama, analiz etme ve kullanma olarak katmanlara ayrılmaktadır. Nesneden edinilen enformasyonun verimli hale gelebilmesi için “bilgi işleme” katmanı çok önemlidir. Bu katmanda, hangi enformasyonun hangi amaçla kullanılacağı ayrımı yapılarak, hedef sektöre ya da sisteme fayda sağlanır. IBM firması, Nesnelerin İnterneti’nin sağlayacağı olanakları şu şekilde sıralamıştır:

- i. Milyonlarca nesneyi ve olayı bağlama.
- ii. Kayıt sistemlerinde bilgileri açığa çıkarma.
- iii. Kişiler, mobil aygıtlar, algılayıcılar, makineler ve uygulamaların yeni etkileşim sistemlerini destekleme.

- iv. Bütün aygıtları kullanarak hemen her yerde ve her an işleri yürütme.
- v. Olayları gerçek zamanlıya yakın olarak alma ve bunlara yanıt verme.



Şekil 2.3 : Sensör verilerinin katmanları. Kaynak: Rehmat Ullah sunumu, 2015

(<https://www.slideshare.net/RehmatMarwat/introduction-to-internet-of-things-45172425>)

Teknolojinin kullanılacağı alanlar lojistik, yeşil binalar, akıllı şebeke, toplu taşıma, akıllı şehirler, sağlık, doğa gözlemlene, yer altı / yer üstü kaynak gözlemlene, askeriye, acil durum müdahalesi gibi çeşitli alanlar olabilir. Akıllı şebeke (smart grid) konseptinde elektrik dağıtım şebekesine akıllı cihazlar bağlanarak, enerjinin efektif kullanılması hedeflenmektedir. Örneğin, evlerde yer alan çamaşır makinasına belirli saat aralığında çalışma komutu verildiğinde makina, dağıtım şebekesiyle iletişime geçerek enerji kullanımının en düşük olduğu saat aralığını seçip çalışarak enerji tasarrufu sağlayacaktır. Nesnelerin İnterneti teknolojisinin faydalarıyla birlikte üzerinde düşünülmesi gereken iki büyük konu vardır; bunlardan ilki, bu teknolojinin diğer teknolojilerle işbirliği yapabilmesi, diğeri de güvenlik ve mahremiyettir (Macaulay, 2017). Nesnelerin İnterneti teknolojisi geliştirilmeye devam ederken, bu iki temel zorluk da giderek ön plana çıkmaktadır.

İnşaat sektöründe incelendiğinde, Nesnelerin İnterneti teknolojisi inşaat firmaları tarafından henüz adapte edilmemiştir ve bu alandaki çalışmalar da oldukça sınırlıdır (Österreich ve Teuteberg, 2016). İnşaat sektörüne sağlayacağı faydalar konusunda blog yazısı, haber, köşe yazısı, akademik literatürde yer alan makalelerden daha fazladır. IBM firması yayınladıkları blog yazılarında Nesnelerin İnterneti kavramının tasarım ve yapımı, yapım yönetimini, bina deneyimini nasıl etkileyebileceği hakkında fikirler paylaşmaktadır. Bu yazılara bakıldığında Nesnelerin İnterneti kavramının, bu çalışmanın “Endüstri 4.0 ve İnşaat Sektörü” başlıklı bölümünde yer verilen diğer teknolojilerle işbirliği yaparak, sürdürülebilirlik, esneklik, düşük maliyet, yüksek kalite gibi birçok konuda inşaat sektörüne fayda sağlayacağı görülmektedir.

Yapım aşaması kapsamında, sensörler araçlara ve ağır ekipmana (vinçler, dozerler, yükleyiciler), makinalara, robotlara veya İnternet'e bağlanma yeteneğine sahip yapı bileşenlerine benzer fiziksel nesnelere yerleştirilerek, performans verilerini analiz edilmek üzere mühendislere gönderebilir. Örneğin araç ve ağır ekipmanlarda yapılacak analizlere bağlı olarak arıza noktaları tahmin edilerek, mühendislerin hasar oluşmadan önce makina ve ekipmanı onarmasına olanak vererek maliyetleri düşürmeye yardımcı olabilir (Österreich ve Teuteberg, 2016).

Yine yapım aşamasında, büyük araçlar ve vinç gibi ağır ekipmanla iletişime geçilebildiğinde saha planını oluşturmak, özellikle kazı sürecinde cihazların ve ekipmanın konumlarını belirlemek için kullanılabilir. RFID etiketleriyle birlikte Nesnelerin İnterneti teknolojisinin sağlanmasının, inşaat sektöründe malzeme ve tedarik yönetimi, atık yönetimi gibi alanlarda maliyeti düşürerek performansı artıracığı öngörülere bulunmaktadır. Giyilebilir teknoloji örneği olarak, bilgisayarlı bileklikler aracılığıyla işçilerin sağlığı ve dinçliği gözlemlenebilir, alınan verilere göre çalışma sınırı belirlenebilir (Burger, 2016). Bu konu özellikle tünel yapımlarında, deniz altı inşaatlarda bir başka deyişle, tehlikeli sınıflandırılacak imalatlar için iş güvenliği açısından faydalı olacaktır.

Firmalar tarafından Nesnelerin İnterneti konusunda inşaat sektörüne yönelik geliştirilmiş cihaz örnekleri bulunmaktadır. Bunlardan biri, Daqri firmasına ait “Smart HelmetTM” ürünüdür. Akıllı olarak nitelendirilen bu baret, ön tarafında bulunan gözlük sayesinde örneğin saha kontrolü sırasında, bakıldığı yönde perspektifi projeye sanal olarak birleştirerek katmanlı bir görünüm oluşturmakta,

böylelikle projeye uyuşmayan imalat üç boyutlu olarak ve yerinde görülebilmektedir. Buna ek olarak, bakıldığı imalat birimi için gerekli kontrolleri sağlayabilmektedir. Bu teknoloji giyilebilir teknolojiler kapsamında da değerlendirilebilir. Ek olarak, bu ürün BIM modelleriyle de birebir bağlantılı olarak çalışmaktadır.

İnşaat firmaları bazında bakıldığında bu alanda herhangi bir adaptasyon çalışması göze çarpmazken, gelişmiş devletlerin şehircilik bağlamında yayınladıkları strateji planları ışığında Nesnelerin İnterneti konusunun ön planda tutulduğu ve hedef olarak belirlendiği görülmektedir. Bu durum dolaylı olarak inşaat sektörünü bağlamaktadır. Nesnelerin İnterneti, günlük hayatta kullanımı olan cihazlardan alacağı muazzam büyüklükteki veri çeşitliliğini kullanan uygulamaların geliştirilmesiyle vatandaşlara, firmalara ve kamu idarelerine yeni hizmet olanakları sağlayacaktır (Zanella ve diğ, 2014).

Nesnelerin İnterneti paradigmasının şehircilik bağlamında kullanılması aslında, birçok ulusal yönetimin Bilişim ve İletişim Teknolojilerini (ICT) kamu idaresine entegre etmesiyle ortaya çıkan Akıllı Şehirler konsepti ile örtüşmektedir (Schaffers ve diğ, 2011). Akıllı Şehir kavramının literatürde henüz tam bir tanımlaması yapılmamıştır. Fakat genel olarak bakıldığında, amacı, daha düşük operasyonel maliyetlerle kentlilere daha iyi ve daha kaliteli bir şehircilik hizmeti sunmaktır. Kentsel Nesnelerin İnterneti, ulaşım ve otopark, aydınlatma, gözetim ve kamu alanlarının bakımı, kültürel mirasın korunması, çöp toplama, hastaneler ve okul gibi geleneksel kamu hizmetlerinin yönetimi ve optimizasyonunda birtakım faydalar sağlayabilir. Bununla birlikte, daha şeffaf bir yönetim şeklini teşvik edecektir (Cuff ve diğ, 2008). Akıllı Binalar, Akıllı Yönetim, Akıllı Ulaşım, Akıllı Çevre gibi temel sanayi ve hizmet sektörlerinin bir bütünüyle oluştuğu söylenebilir. Akıllı şehir konsepti milyar dolarlık yatırımların olduğu bir pazar olarak literatürde yer almaktadır. Avrupa Birliği ve Birleşik Krallığın bu konuda 5 yıllık planları arasında ön planda olduğu bilinmektedir. Avrupa’da Akıllı Şehirler projesi kapsamında birçok şehir yönetimi bu konuda çalışmalar yürütmektedir (<http://www.smart-cities.eu>). Yine de politik, ekonomik ve teknik nedenlerden Akıllı Şehir pazarından tam olarak verim alınmış değildir (Dohler ve diğ, 2011).

Otomasyon

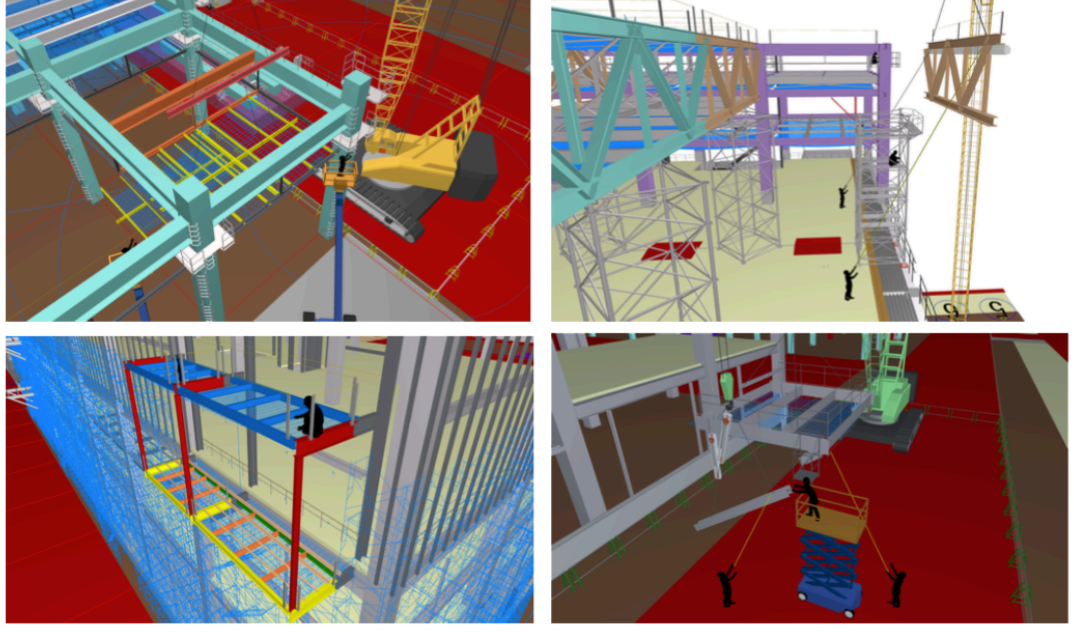
İnşaat sektöründe verimsizliğin ve süre kayıplarının azaltılabilmesi için diğer sektörlerde olduğu gibi, otomasyon konusunun üretimi sistemlerine girmesi ve sistemle entegre olması önemli bir etkindir. İnşaat sektöründe üretim alışkanlıklarına entegre olan otomasyon sistemleri önemli faydalar sağlamaktadır.

İnşaat sektöründe otomasyon konusunda bu çalışmada “Endüstri 4.0 ve İnşaat Sektörü” başlığı altında listelenen teknolojiler çeşitli işbirliktelikleriyle karşımıza çıkmaktadır. Otomasyonun yapı üretim sürecinin farklı aşamalarında sunduğu farklı faydalar bulunmaktadır. Örneğin, bilgisayar yazılımlarıyla saklanan veriler sayesinde bir sonraki projenin maliyet tahminlerini yapmak kolaylaşabilir. İnşaat sektörünün bilgi ve iletişim teknolojilerine olan gereksiniminin sebebi, inşaat sektöründe bilgi çeşitliliği ve miktarının çok olması ve bu bilgilerin bir bütünlük sağlaması gereksinimi olarak belirlenebilir (Yılmaz ve diğ, 2015).

Otomatik veri yakalama sistemleri ve bilgisayar destekli simülasyon tekniklerindeki son gelişmeler, nihai proje (as-built) verilerinin toplanması gereken zamanı kısaltarak, güvenilir bir biçimde veri toparlayarak ve söz konusu veri üzerinden projede olması gerekeni analiz edip raporlayarak, efektif proje izleme ve kontrolü için güvenilir bir platform sunar (Azimi ve diğ, 2009). Otomatik veri yakalama sistemleri (Automatic Data Capturing) yapım projelerinin performansını yürütme süresi boyunca izlemek için kullanılmaktadır. Örneğin, yüksek yapıların yapım kontrollerinde RFID teknolojisi 4B modellerle entegre edilerek çelik işlerinin izlenmesinde kullanılmıştır (Chin ve diğ, 2008).

Bilgisayar destekli simülasyon sistemleri ile 4B modellerin saha ekipmanı ile simüle eden firmalar bulunmaktadır. Kajima Corporation firması, yüklenici olarak tasarımcıdan gelen projenin kontrolü, maliyet takibi, saha takibi, saha ekipmanının yerleşimini, ekipmanın sahaya ne zaman geleceği, ne kadar kalacağı bilgisini, 4B modeller üzerine işleyerek gerçeğe uygun saha planlaması yapmaktadır (Şekil 2.4).

smartCON Planner



Şekil 2.4 : BIM yazılımında saha planlama. Kazumi Yajima sunumu, Graphisoft KCC2016, 2016

Yükleniciler BIM modellerini kullanarak saha kontrolü ve ekipman yönetimi yapabilmektedirler. Örneğin, bir yapım projesi sahasında büyük ekipman arasında en çok kullanılan ortak kaynak vinçtir. Vincin saha içerisinde kullanım optimizasyonunu 3B simülasyonlar aracılığıyla yapmak, zaman ve maliyet açısından avantaj sağlayacaktır. Ek olarak vinçte yer alacak sensörler aracılığıyla olası çarpma tehlikelerinin önüne geçilebilmektedir. BIM modelini kullanan simülasyonlar ayrıca, yapım sırasında oluşabilecek riskleri gösterebilmektedir. Bu konu özellikle yüksek yapılar ve büyük projelerin yapım aşamaları için önemlidir (TheBIMHub, 2016 - <https://thebimhub.com/2016/12/19/integration-of-bim-crane-automation-in/#.WQS8b1LB1p9>).

BIM teknolojisi projelendirme sürecinin otomasyonunu belirli standartlar sayesinde kolaylaştırmaktadır. Dijital ortamda gerçekleştirilen yapı modelleri, projenin yapım sürecinde kontrolü, takibi, yapım sonrasında ise bakım, onarım, işletme konularında bir başka deyişle, projenin yaşamı boyunca farklı paydaşların kullanımına yönelik otomasyon için kaynak veri sağlamaktadır. BIM teknolojisi inşaat öncesinde harcanan emeği verimli hale getirdiğinden ve yapım aşaması öncesi bir çeşit yapım

simülasyonu gerçekleştirdiğinden, yapım aşamasına geçmeden var olan birçok sürecin otomasyonuna katkıda bulunmaktadır (Işıkdağ ve Underwood, 2010).

Günümüzde gelişmekte olan prekast sistemler, üretim ve montajda robot kullanımı, RFID etiketlerinin kullanımı gibi inşaat üretim teknolojileri, projenin ilk aşamasında devreye giren BIM teknolojisiyle iş birlikteliği yapabilir ve inşaat sektörünün otomasyonuna katkı sağlayabilir durumdadır.

Modularizasyon / Prefabrikasyon

Prefabrikasyon kavramı inşaat sektörü için sanayileşmeyi ifade eder. Türkiye Prefabrik Birliği tanımına göre “prefabrikasyon, binayı oluşturan taşıyıcı veya taşıyıcı olmayan elemanların fabrika ortamında üretilmesi ve bir koordinasyon planı dâhilinde şantiyeye nakledilerek birleştirilmesidir.”

İnşaat sektöründe prefabrikasyonun gelişimi, 2. Dünya Savaşı ardından endüstrinin, geleneksel inşaat yöntemlerine destek olarak kullanılmak istenmesiyle hız kazanmıştır (Taylor, 2009). Teknolojinin gelişimiyle birlikte ise, günümüzde prefabrikasyonun kullanımı artmakta ve gelişmektedir.

Prefabrikasyonun geleneksel inşa yöntemlerine göre zaman, maliyet, kusur, risk ve çevresel etkileri düşürürken kalite, dayanıklılık, öngörülebilirlik, üretkenlik, performans ve rantabiliteyi artırdığı çeşitli araştırmalarda yer almaktadır (Ezcan ve diğ, 2013). Bunlara karşın, prefabrikasyonun inşa yöntemlerinde az kullanılmasında belirlenen bariyerler yararlarının belirlenme zorluğu, prefabrike ya da modüler konutlar üzerindeki olumsuz imaj, düşük kalite, düşük estetik, başarısız girişimlerdir (Nadim ve Goulding, 2010). Yerinde imalatlara kıyasla prefabrikasyonun maliyeti ve karmaşıklığı; uygun fabrika sahalarının kurulması ve buradan sahaya ulaşım, sahada dikey ulaşım, işçi eğitimleri ve eklemlenme problemleri sebebiyle yüksek olabilir (Chiang ve diğ, 2006).

Bir yerleşimde cephe modülleri, ıslak hacimler, otel odaları vb. gibi tekrar eden birçok konuda saha dışı imalat kullanılabilir. Burada konuyu verimli hale getirecek nokta, tasarım aşamasında yapım yöntemlerinin belirlenmesi ve buna uygun tasarımın yapılmasıdır. Örneğin, tasarım aşamasında ıslak hacimlerin modüler tasarlanması, yalnızca tesisat duvarlarının prefabrikasyonundan tüm modülün saha dışı imalatına kadar farklı olanaklar sunabilir.

Prefabrikasyon, inşaat sektörüne diğer üretim sektörlerinin Ar-Ge'sini ve teknoloji kullanımındaki esnekliği getirebilecek potansiyele sahiptir. Birçok akademik çalışma, inşaat sektöründe verimliliği ve kaliteyi artırmaya yönelik, teknoloji transfer potansiyeli yüksek olan imalat sanayisine yönelmiştir (Chiang ve diğ, 2006). Bu çalışma kapsamında da yer alan Eklemeli Üretim, Robotik, RFID gibi teknolojilerle entegrasyonu ve işbirliği, örneklerde görülmektedir.

Eklemeli Üretim / Üç Boyutlu Baskı

Üç boyutlu baskı teknolojileri, 1980'lerde ürün imalat sanayiinde prototiplerin daha verimli ve hızlı üretilmesi gereksinimine karşılık geliştirilmiştir (Agusti-Juan ve diğ, 2017). İnşaat sektörüne yönelik olarak ise, son on yıl içerisinde üç boyutlu baskı teknolojilerinde hızlı gelişmeler kaydedilmiştir.

İnşaat sektöründe geçtiğimiz yıllarda, 3B baskı teknolojileri konusunda küçük ölçekli yapı bileşenlerinden tüm binanın üretimine kadar çeşitli ölçeklerde denemeler yapılmakta ve gelişmeler görülmektedir. İspanya, Rusya, Çin, Dubai, Hollanda gibi ülkeler, büyük ölçekli 3B baskı ile üretim konusunda projeler geliştirmiş ve uygulamışlardır. Dubai Şeyhi, 2030'a kadar yapıların %25'inde 3B baskı teknolojisi kullanımına yönelik hedef belirlemiştir (Tom Ravenscroft, www.bimplus.co.uk, 2017).

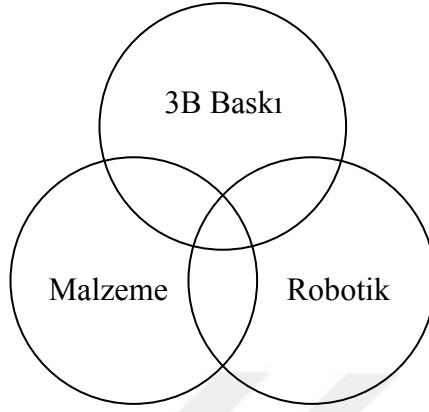
3B yazıcıların kullanılan hammadde, eksen sayısı, yazıcı şase yapısı ve hammadde eriticisine göre farklı çeşitleri bulunmaktadır. 3B yazıcılar, katmanlama tekniğine göre stereolitografi (SLA), birleştirmeli yığma modellemesi (FDM), toz püskürtmeli yazıcılar, seçkili lazer sinterleme (SLS), doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) olarak tiplendirilmiştir. Kullanılacak 3B yazıcı tipi, kullanılacak malzemeye, istenen detay seviyesine göre seçilmektedir.

İnşaat sektörüne özel olarak Behrokh Khoshnevis tarafından geliştirilen 3B yazıcı yöntemi, "Contour Crafting" yöntemidir. Bu sistem, bilgisayar kontrollü bir gezer vinç ve püskürtücü nozuldan oluşur. Kullanılan malzeme betona benzer bir malzemedir. Kalıp gerektirmemesi, tesisatın katmanlama sırasında oluşturulması sebebiyle süreç geleneksel bina yapım yöntemlerine göre daha hızlı ilerlemektedir. Tek bir malzeme ile tüm yapı kaba imalatı tamamlanmaktadır.

Verilen linkten sistemin çalışma mantığına bağlı videolar izlenebilir:

https://www.youtube.com/watch?v=M_LLSsNnHn8

İnşaat sektöründe 3B yazıcı ile üretimin, seri üretime yatkınlığı sebebiyle toplu konut gereksinimi olan az gelişmiş ülkelerde hızlı ve çoklu, dolayısıyla ucuz üretim mantığıyla gereksinimi karşılayabileceği yönünde görüşler vardır (Hedwig Heinsman, DUS Architects).



Şekil 2.5 : Eklemeli üretim bileşenleri.

Özellikle inşaat sektörünün doğası gereği, zorlu hava ve zemin koşullarında bu teknolojinin kullanılabilmesi adına 3B yazıcı teknolojisi robotik teknolojisi ile birebir ilişki içerisinde. Bu ilişkiye bağlı olarak baskı boyutu, şekli konusunda çalışmalar sürekli gelişmeler kaydetmektedir. Bu teknolojilerin hızlı gelişmesinde en önemli etken, tüm firmaların açık kaynak olarak Ar&Ge çalışmalarını yürütmeleridir. Bu iki teknoloji ile birlikte gelişen bir diğer alan da malzeme sektörüdür (Şekil 2.5).

İnşaat sektöründe tasarım konusunda sınırları genişleten bu teknoloji, serbest formlar, irrasyonel tasarımların imalatını kolaylaştırmaktadır. Parametrik tasarıma katkısı dışında seri üretime ve prefabrikasyona yönelik katkıları da görülmektedir.

Robotik

Robotik teknolojisinin inşaat sektöründe imalat işlerini kolaylaştıracağı, daha güvenli hale getireceği, daha efektif ve ilgi çekici yapacağı bilinmektedir (Son ve diğ, 2010). Bock ve Linner, “Yapım Otomasyonu” için gelecekte üzerinde çalışılması gereken teknolojileri; robot odaklı tasarım, robotik endüstrileşme, yapım robotları, saha otomasyonu ve çevre koşullarına uyumlu robotlar olarak belirlemiştir (Bock ve Linner, 2015).

İnşaat sektöründe kullanılabilecek robotlar için Japon Obayashi, Shimizu, Kajima, Taisei gibi inşaat firmaları prototipler geliştirip denemeler yapmışlardır.

Robotlar inşaat sektöründe temel olarak sahada kullanılacak ve saha dışı prefabrikasyonda kullanılacak robotlar olarak ayrılabilir. Saha robotları, imalat yapabilen robot kollar, büyük yapı bileşenleri montajı yapabilen büyük robotlar, Contour Crafting yöntemiyle 3B baskı yapabilen robotlar, inşaat atıklarında ayrıştırma yapabilen vb. gibi birçok çeşide sahip olabilir.

Örneğin, uzaktan kumandalı pilotsuz uçaklar (drone), dijital olarak saha kontrolü ve iş güvenliği kontrolü yapılmasını sağlamaktadır. İmalat kalemine uygun üretilmiş robot kollar sıva imalatı, boya, tuğla örme gibi çeşitli kalemlerde sahada devreye girerek bir işçinin bir günde yapabileceğinin çok daha fazlasını yapabilmektedir.



Şekil 2.6 : ETH Zürich dFab ekibinin geliştirdiği “dimRob”.

ETH Zürich dFab ekibinin geliştirdiği “dimRob” sahada standart tuğla örümünün komplike halini doğrudan tasarım üzerinden okuduğu algoritma ile gerçekleştirebilmektedir (Şekil 2.6). Parametrik tasarımların, geleneksel yöntemle imalatı zor olan yapıların robotik teknolojilerle yapımı kolaylaşmaktadır.

Dijital üretimde ön plana çıkan otomotiv sektörü, robotik teknolojisinin en çok kullanıldığı sektörlerden biridir. Bu teknolojinin inşaat sektörüne uyarlanması konusunda yapılan denemelerde kullanılan robotlar genelde otomotiv sektöründen gelen robotlar olmuşlardır. Fakat otomotiv sektöründe kullanılan robotlar belirli hava koşulları içerisinde çalışan stabil robotlardır. İnşaat sektöründe sahada kullanılacak

robotlar ise, zorlu hava ve zemin koşullarına uyumlu olmak zorundadır. İnşaat projelerinin tek sefere has olması ve saha koşullarının zorlu olması sebebiyle robotların inşaat sektörüne adaptasyonu otomotiv sektörüne kıyasla daha zor ve farklı bir Ar&Ge gerektirmektedir.

Robotik teknolojinin inşaat sektörüne adaptasyonu; yatırım maliyetleri, Ar&Ge gerekliliği, kullanımı için kalifiye eleman gerekliliği, sahada kullanılacak sistemlerin ağırlığı, büyüklüğü, kurulma-kaldırılma gerekliliği gibi sebeplerden ötürü, diğer sektörlere göre daha yavaş olabilmektedir.

2.1.2 Simülasyon ve Modelleme

İnşaat projeleri, benzersiz ve karmaşık girişimlerdir ve hava koşulları, işçi performansı, tedarikçi değişkenleri gibi dış etkenlerden etkilenmektedir. Bu sebeple simülasyonlar yapım operasyonlarının tasarımında fayda sağlamaktadır (AbouRizk ve diğ, 2011). Proje planlama, kaynak planlama ve proje yönetimi için çok çeşitli simülasyon araçları ve modelleri bulunmaktadır.

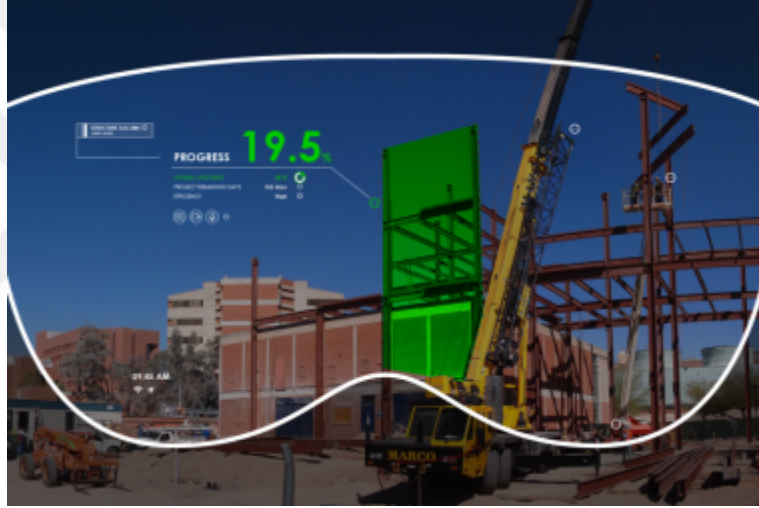
Projenin çeşitli süreçlerinde kullanılabilecek simülasyon modelleri bulunmaktadır. Tasarım aşamasında kullanılabilecek enerji etkinlik, aydınlık düzeyi gibi testler simülasyonlar yardımıyla yapılmaktadır. Risk yönetimi için çeşitli simülasyon modelleri yapılan araştırmalarda önerilmektedir. İş güvenliğinin sağlanması ve standart güvenlik önlemleri dışında, proje özelinde simülasyonlar iş güvenliğinin tasarlanması için de kullanılabilmektedir.



Şekil 2.7 : Giyilebilir teknolojiler yardımıyla sanal gerçeklik örneği.

Simülasyonları giyilebilir teknolojilerle farklı bir boyuta taşıyan sanal gerçeklik, inşaat sektörü için farklı kullanım alanlarında fayda sağlamaktadır. Sanal Gerçeklik (VR), çeşitli gözlük ve kulaklık gibi araçlarla bilgisayar ortamında üretilmiş ve bilgisayara bağlı mekânların sanal olarak gezilebilmesidir (Şekil 2.7). Mimari tasarımda bu teknoloji, tasarımın geliştirilmesinde, tasarımın anlatılmasında katkı sağlamaktadır. Sanal gerçeklik, tasarımın ötesinde satış aşamasında da kullanılan ve etkileyici olabilen bir teknolojidir.

Sanal gerçekliğin geliştirilmiş halleri olan Arttırılmış Gerçeklik (AR) ve Karma Gerçeklik (MR) teknolojileri de mevcuttur. Arttırılmış Gerçeklik, bilgisayar ortamında üretilen verilerin fiziksel ve gerçek dünya ortamı ile birleştirilmesiyle oluşturulan yeni bir algı ortamının doğrudan ya da dolaylı görünümüdür (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 : Arttırılmış Gerçeklik görüntüsü.

Arttırılmış gerçeklik inşaat sektöründe özellikle yapım kontrolünde, yapım yönetiminde fayda sağlamaktadır. Daha önceki bölümlerde verilen akıllı baret örneği, bu teknolojiyi kullanarak projede yer alan verilerin fiziksel saha ortamında ölçekli ve olması gereken yerde görünmesini sağlamaktadır. Yansımalar üzerinden, izlenen elemana ait verilere de ulaşılabilmektedir. İnşaat sektöründe iş güvenliği eğitimleri için bu teknolojilerin kullanımı önerilmektedir (Chun ve diğ, 2012).

Karma Gerçeklik (MR) kavramı, Sanal Gerçeklik ve Arttırılmış Gerçekliğin en iyi özelliklerinin birleşmiş halini temsil eder. Fiziksel ve sanal nesneler ve ortamlar bir aradadır ve etkileşim halindedir.

Simülasyonlar, modelleme, deney ve gözlem ve optimizasyon olarak üç aşamada değerlendirilir. AR, VR, MR teknolojileriyle deney ve gözlem aşaması deneyimle desteklenmekte ve optimizasyona fayda sağlamaktadır.

2.1.3 Dijitalleşme ve Sanallaşma

Bu başlıkta üçüncü grup olan dijitalleşme ve sanallaşma teknolojileri kapsamlı olarak incelenmiştir. Temel olarak öncelikle teknolojilerin kavram ve genel konseptleri incelenmiş, sonrasında ise inşaat sektörüne yönelik özellikleri ele alınmıştır.

Bulut Bilişim

Bulut Bilişim (Cloud Computing) teknolojisi genel olarak, bir kaynaktaki verinin bulut sistemlerle İnternet üzerinde bulundurulması ve bu veriye kaynaktan farklı konumlarda da ulaşabilme ve müdahale edebilme olanağı sağlar (Kumar ve diğ., 2009). Bulut Bilişim, diğer teknolojilerle birlikte bütün bir konseptin bir parçası olarak ele alınır. Proje yönetim araçları, hakediş çözümleri, ERP sistemleri, dijital doküman yönetim sistemleri ve BIM teknolojisi için anahtar rolündedir (Merschbrock ve Munkvold, 2015). Tüm bu sistemler için gerçek doğru veri kaynağını oluşturur (Groves-Delphos, 2014).

Çeşitli BIM yazılımlarının Bulut Bilişim için ürettiği çeşitli uygulamalar mevcuttur. Örneğin Graphisoft ürünü Archicad'de üretilen bir BIM projesine BIMcloud üzerinden sahadan ulaşılabilir, üzerine not düşülebilir, üzerinden ölçü alınabilir.

Bulut Bilişim'in düzgün bir şekilde kullanılabilmesi İnternet bağlantısına bağlıdır. İnternet bağlantısı problemlili olan ülkelerde Bulut Bilişim teknolojisinin kullanımı zorlaşmaktadır.

Büyük Veri

Büyük Veri (Big Data), İnternet istatistikleri, sosyal medya yayınları, iklim algılayıcıları, GSM operatör verileri gibi birçok farklı alandan gelen verilerin anlamlı ve işlenebilir biçime dönüşmüş halidir. Doğru analiz yöntemleri ile yorumlandığında şirketlerin stratejik kararlarını doğru bir biçimde almalarına, risklerini daha iyi yönetmelerine ve inovasyona olanak sağlayabilmektedir. Büyük Veri'yi oluşturan beş adet bileşeni vardır bunlar; Çeşitlilik, Hız, Veri Büyüklüğü, Doğrulama ve Değerdir.

BIM modelleri, gömülü sensörler, bilgisayarlar, makinalar veya insanlar hepsi birer veri kaynağıdır. Büyük Veri sistemleri, proje paydaşları tarafından doğru kaynaktan doğru verinin toplanması ve ulaşılması konusunda onlara yardımcı olur (McMalcolm, 2015). İklim, trafik, gün ışığı, hava kirliliği gibi veriler proje tasarımında, yapım aşamasında risk yönetiminde, satış sürecinde kaynak veri olarak kullanılabilir, karar sürecini hızlandırabilir.

Mobil Hesaplama

Mobil Hesaplama (Mobile Computing) teknolojisi, bilişim teknolojilerinin telefon, tablet, dizüstü bilgisayarlar, giyilebilir bilgisayarlar gibi mobil cihazlarla kullanımını ifade eder. İnşaat sektöründe Mobil Hesaplama konusuna giderek artan bir ilgi vardır (Son ve diğ, 2012).

Günümüzde kullanılan nesne tabanlı modelleme yazılımlarının tablet uygulamaları bulunmakta ve tablet üzerinden proje dokümantasyonu okunabilmekte, ölçü alınabilmektedir. Bulut Bilişim teknolojisi ile birlikte kullanıldığında, güncel veya eşzamanlı olarak projeye ulaşmak mümkündür. Böylelikle projede olan değişikliklerin sahaya ve imalata aktarımı hızlanmaktadır.

RFID gibi gömülü sensörler aracılığıyla mobil cihazlarla sahada kaynak yönetimi yapmak, imalat kontrolü yapmak mümkündür.

Sosyal Medya

Sosyal medya, Web 2.0'ın kullanıcı hizmetine sunulmasıyla birlikte, tek yönlü enformasyon, veri ve bilgi paylaşımından, çift taraflı ve eş zamanlı paylaşıma ulaşılmasını sağlayan medya sistemidir. Sosyal medya insanların ilişkiler kurmalarını, enformasyon, veri ve bilgi paylaşımını, işbirliği yapmalarını, ortak çıkarımları tartışmalarını sağlar. Bu bağlamda sektörler ve firmalar, sosyal medyanın yalnızca pazarlama aracı olarak kullanılmasını değil, işletme etkileşiminin artırılması, inovatif, yenilikçi üretim sürecinin geliştirilmesi için kullanılabilirliğini keşfetmektedirler (Azhar ve Abeln, 2014).

Davis ve diğerlerinin 2014 yılında yaptığı araştırmada, sosyal medya kullanımının ortak çalışma, paylaşma ve üretme maliyetlerini düşürdüğü ve yeni etkileşim şekilleri ve problem çözme tekniklerinin gelişimine sebep olduğu iddia edilmektedir (Davis ve diğ,2014)

İnşaat sektörü, sosyal medya kullanımı açısından diğer birçok sektörün gerisinde kalmaktadır. Bununla birlikte, Azhar ve Abeln'in çalışmaları, işe alım, şirketin ve / veya projelerin haberlerinin yaygınlaştırılması, istemci ağı, marka bilinirliği ve yenilikleri paylaşmak için inşaat firmalarının sosyal medyayı kullandığını göstermektedir (Azhar ve Abeln, 2014)

Dijitalizasyon

Dijitalizasyon, Bilgi ve İletişim Teknolojileri'nin kapsamlı kullanımına bağlı dijital değer zinciri oluşturmak için kullanılır. Bilgi çeşitliliğinin ve miktarının çok olması ve bilgilerin bütünlük oluşturmasını sağlamak gereksinimi, birçok sektörde olduğu gibi, inşaat sektörünün de bilgi ve iletişim teknolojilerine olan gereksinimini arttırmaktadır (Yılmaz ve diğ, 2015).

Bilgi ve İletişim Teknolojileri ve önceki bölümlerde açıklanan teknolojilerin inşaat sektörü içerisinde yer almasıyla, inşaat sektöründe dijitalleşme sürecinin hızlanacağı, verimlilik artışı sağlanacağı düşünülmektedir.

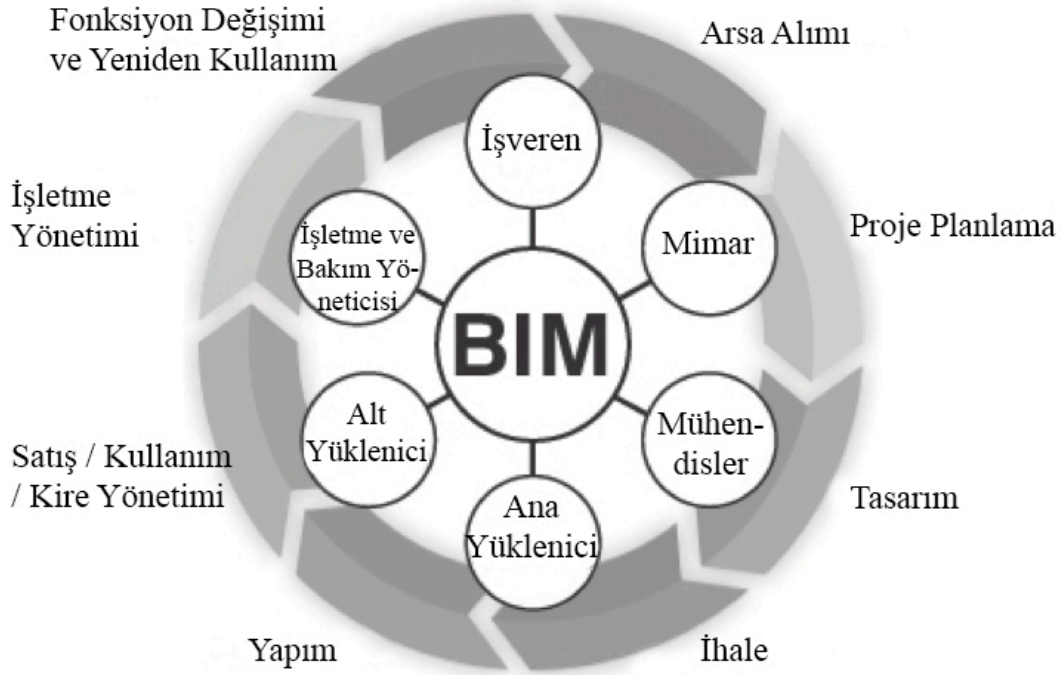
3. BIM TEKNOLOJİSİ

Bu bölümde, BIM teknolojisi, dijital üretim teknoloji işbirlikliği konusuna yönelik olarak incelenmiştir. Öncelikle BIM teknolojisinin literatürde yer alan tanımları ele alınmıştır. Daha sonra söz konusu tanımlardan yola çıkarak, BIM teknolojisinin nitelikleri belirlenmiş ve çeşitli ülkelerde BIM teknolojisi kullanımı değerlendirilmiştir. BIM teknolojisinin niteliklerinden yola çıkarak, BIM + dijital üretim teknolojisinin inşaat sektöründe faydalı olacağı düşünülen konular derlenmiştir.

3.1 BIM Teknolojisi Tanımları

Yapı Enformasyonu Modellemesi (Building Information Modeling - BIM), dijital ortamda yapının üretilmesi, diğer tüm paydaş çalışmalarıyla bir araya getirilmesi, yönetilmesi, enformasyon alışverişinin yapılması ve paylaşılması olarak açıklanabilir (Vanlande ve diğ, 2008). Bu paylaşım ve üretim mantığı, bir projenin yaşam döngüsü içerisinde tüm süreçleri kapsamaktadır (Şekil 3.1). Bir projenin planlanması, tasarımı, inşaat ve operasyon süreçlerinin bilgisayar ürünü bir model yardımıyla simüle edilmesi hedeflenmektedir (Azhar ve diğ, 2008).

BIM modeli, tüm paydaşların ortak ve bütünleşik çalışmasıyla, bir ya da birden fazla yapının dijital olarak inşa edilmesiyle birlikte, imalat, fabrikasyon ve tedarik süreçleri ile ilgili tüm enformasyonu içermektedir. Eastman'a göre BIM modeli ve süreci doğru kurgulandığında yapı üretiminde kalite, maliyet ve süre konusunda daha iyi sonuçlara ulaşılabilecektir. Bu sebeple BIM yalnızca enformasyon içeren bir model çalışması ya da bir teknoloji değişimi olarak değil, üretim mantığının değişimi olarak değerlendirilmelidir (Eastman ve diğ, 2011).



Şekil 3.1 : BIM teknolojisi kullanan inşaat projeleri paydaşları ve yaşam döngüsü. Kaynak: www.excitech.co.uk

BIM teknolojisine ilişkin tek bir tanım bulunmamaktadır. Her bir proje paydaşı için kullanım amacına bağlı olarak BIM farklı tanımlanmaktadır (Aranda-Mena ve diğ., 2009). Bununla birlikte, BIM tanımlarında tutarsızlıklar ve yanlış yorumlamalar da görülmektedir (Jerningan, 2008). Bu tanımlardan birkaç tanesi aşağıdaki gibi listelenebilir:

- BIM bir yazılımdır.
- Proje paydaşları arasında yeni kuralları, sözleşmeleri ve ilişkileri gerektiren, bina enformasyonunun tasarım ve dokümantasyon sürecidir.
- Nesne tabanlı modelleme, sanal tasarım, sanal yapım, sanal prototip yapımı, proje modelleme, entegre proje veri tabanı aracıdır (Amor ve Farag, 2001).
- Bir tesisin fiziksel ve işlevsel özelliklerinin sayısal bir gösterimidir (AIA The Architect's Handbook of Professional Practice, 2002).
- Projenin yaşam döngüsü boyunca karar verme için güvenilir bir bilgi merkezi oluşturmak üzere bilginin paylaşılmış referansıdır.
- Sanal ortamlarda inşaat projelerinin simülasyonudur. Tamamlandıktan sonra, inşaatın uygulanması için tasarım, tedarik, yapım ve yapım faaliyetlerini

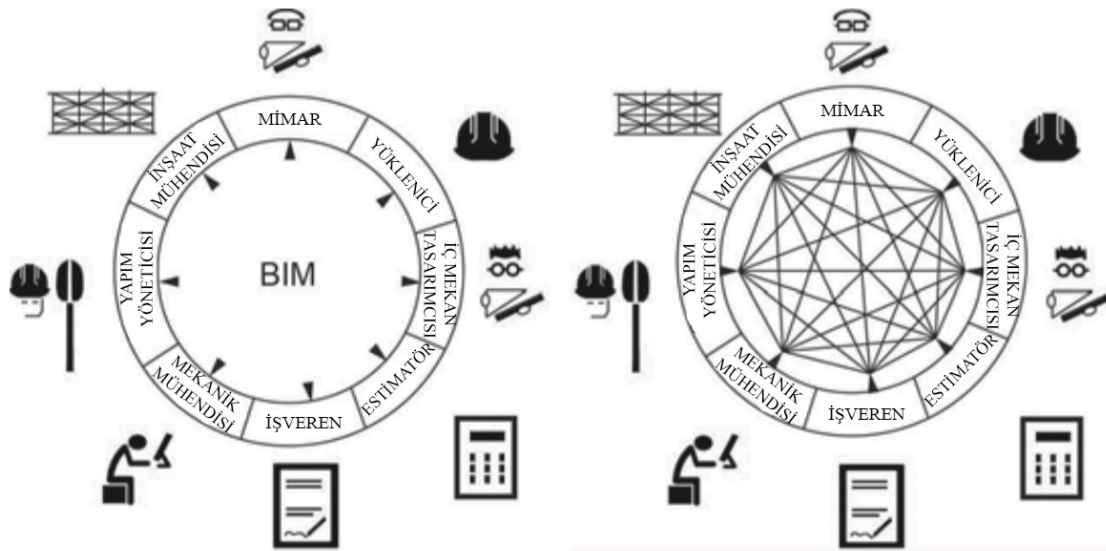
desteklemek için gerekli hassas geometri ve ilgili verileri içeren bina enformasyon modelidir (Eastman ve diğ, 2011).

- “Tüm yaşam döngüsü süreçlerini desteklemek üzere, bilgisayar uygulamaları tarafından doğrudan yorumlanabilecek, eksiksiz ve yeterli enformasyonu içermektedir. Yapı kendi enformasyonu bir başka deyişle, sıra bileşenleri hakkında da enformasyon içerir ve yapı ömrüne yönelik işlev, şekil, malzeme ve süreç gibi özellikler hakkında enformasyon içerir” (Nederveen ve diğ, 2009).
- “İlgili taraflar, aralarındaki koalisyonu desteklemek için süreç boyunca gereksinim duyulan her aşamada, yapının fiziksel ve işlevsel karakterini yansıtacak, eklenen, çıkartılan, güncellenen ya da değişen parametrik modeli geliştirir” (NIBS, 2007).
- “Planlama aşamasından sonuna kadar olan tüm adımları kapsamlı bir şekilde yönetmek ve kullanmak, proje ile ilgili enformasyon alışverişi yapmak ve paylaşmak üzere inşaatın tüm yaşam döngüsü süresince enformasyonun karşılıklı işleyişine odaklanan süreçtir” (Cheol ve Shik, 2007).
- “Nesneye yönelik yapay akıllı enformasyon modeli aracılığıyla, bina ömrü boyunca üretilen enformasyonun alışverişi, yeniden kullanımı, denetimi ve kontrolü ile ilgili tüm süreçleri ifade eder” (GSA, Building Information Modeling Guide Series 01- GSA BIM Guide Overview, 2006).
- “İnşaat planlama aşamasından tasarım, yapım, bakım ve yıkım döngüsüne kadar gereken tüm enformasyon ve organizasyon, görev ve işlemleri kapsamlı bir şekilde kontrol eder” (Gang, 2006).

BIM tanımlarının farklılığı kullanıcı beklentilerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Söz konusu beklentiler, BIM olanaklarının tam olarak kullanılmasını engelleyebilir ya da BIM teknolojisinin potansiyeli kullanıcı beklentileri altında gizli olabilir. Literatürde bu fenomen “BIM Değerlendirmesi (BIM Consideration)” olarak geçer (Jung ve Gibson, 1999).

3.1.1 BIM’de Veri Akışı

BIM teknolojisini kullanıldığı projelerde, proje paydaşları arasında işbirliği sağlanması, kullanılan birbirinden farklı yazılımların ürettiği yapı bileşenlerinin ortak bir modelde toplanabilmesi, dosya uzantıları arasında da işbirliğinin olması önemlidir. Proje paydaşlarının farklı yazılımlar kullanıyor olması, projenin parametrik tasarımlar içeriyor olması, projenin ilerleyen aşamalarında iş birlikteliğinde aksamalara yol açabilir. Bu sebeple, projenin ilk aşamalarından itibaren bir “BIM Uygulama Planı” hazırlanarak, hangi dosya formatlarının kullanılacağını belirlenmesi BIM uygulamasında önemli bir adımdır. Örneğin, tasarımcının hazırlayacağı model enerji testleri için enerji danışmanına aktarılacak ve danışman, bu model üzerinden testleri gerçekleştirecekse, bu durumda tasarımcıdan giden BIM modelinin içinde enerji danışmanının değerlendireceği doğru enformasyonun bulunması ve danışmanın bu enformasyona ulaşabilir olması gerekmektedir. Veri paylaşımında ve depolanmasında önemli bir diğer kriter, projenin ilk aşamalarında gereksinim duyulan veri tipi (dinamik) formatı ile, son aşamalarında kullanılacak veri tipinin (statik) farklı olmasıdır (Kensek, 2015). Tasarım aşamasında hazırlanan BIM modeli yapım aşamasında Yapım Modeli olarak güncellenebilir. Fakat bu modelin işletme aşamasında da kullanılacağı öngörüsüyle 10 yıl sonra da kullanılabilir dokümantasyonu içermesi gerekir.



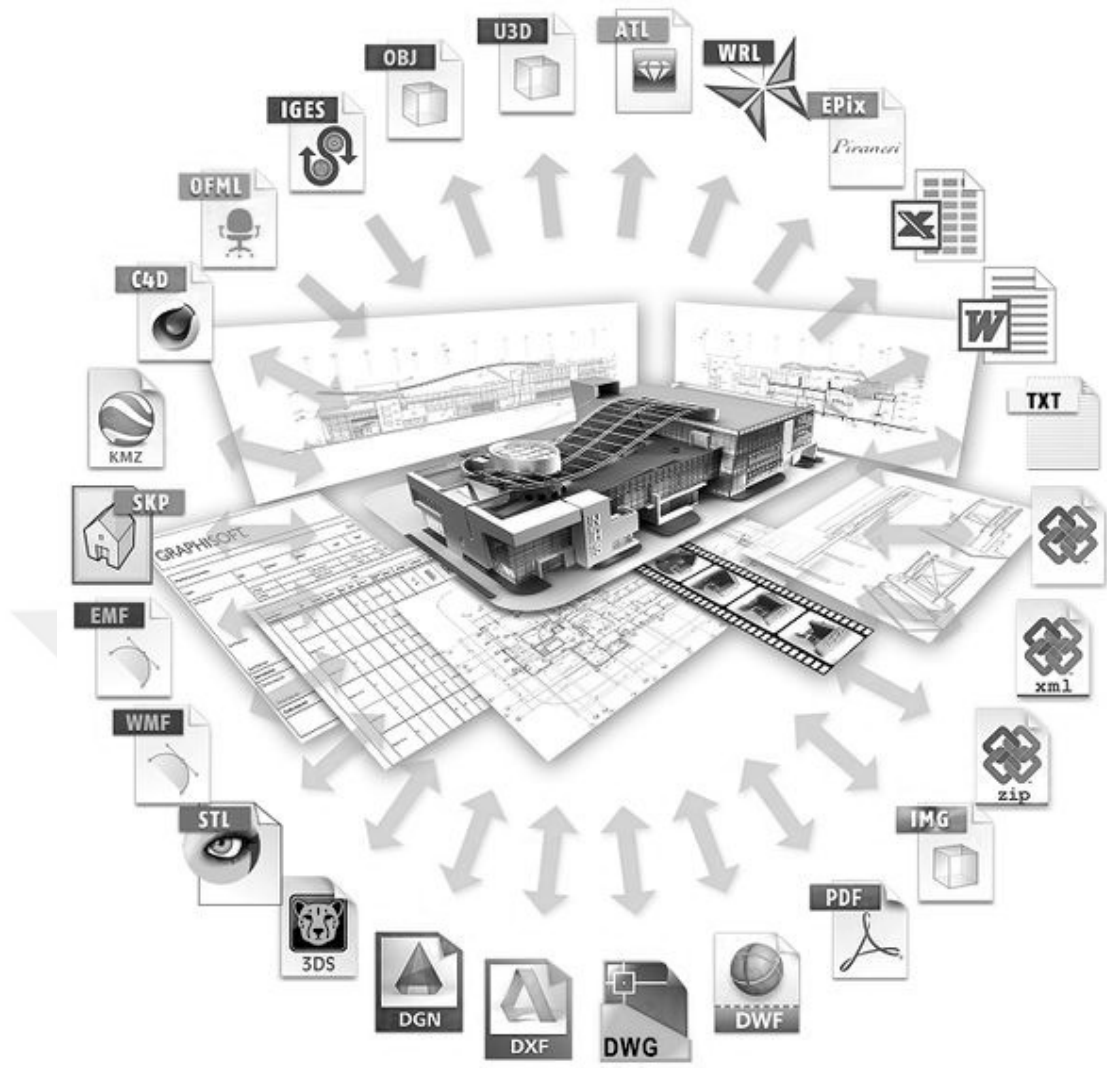
Şekil 3.2 : BIM’de proje paydaşları iş birlikteliği (Kensek, 2015).

BIM teknolojisini kullanıldığı projelerde iki tip çalışma yöntemi vardır. Bunlardan biri, tek bir interaktif modelin olması ve tüm proje paydaşlarının bu modele katılarak

Proje paydaşlarının kullanıldığı farklı yazılımlar arasında ortak bir dil oluşturmak adına geliştirilen IFC (Industry Foundation Classes) dosya formatı, BIM konusunda gereksinim kapsamında geliştirilen bir ortak noktadır. IFC formatına benzer şekilde bu alana yönelik geliştirilen bir diğer format, CIS/2 formatıdır, fakat çoğunlukla kullanılan IFC formatıdır. Her iki format da EXPRESS veri tanımlama sistemini ISO10303 kapsamında kullanır. IFC formatı, buildingSMART organizasyonu tarafından geliştirilmiştir. BuildingSMART organizasyonu 1995 yılında Autodesk firmasının liderliğinde 12 firmanın katılımıyla, dosya formatlarının uyumu için çalışmak üzere kurulmuştur. Kurulduğu dönemden 2008 yılına kadar International Alliance Interoperability (IAI) adını kullanan organizasyon, 2008 yılından bu yana buildingSMART adı altında çalışmalarına devam etmektedir. Organizasyon, aynı zamanda bu konuda ülkeler bazında standartlar geliştirmektedir.

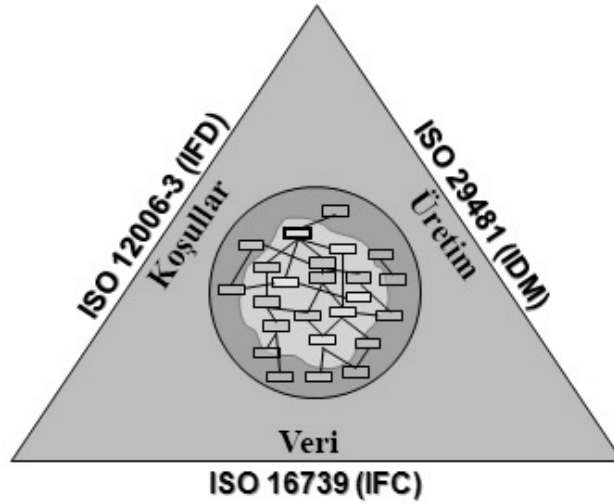
IFC dosya formatı ilk kullanımından itibaren, IFC 1.0, IFC 1.5, IFC 1.5.1, IFC 2.0, IFC 2x (2000), IFC 2x2 (2003), IFC 2x3 (2006), IFC 4 (2013) olarak her seferinde geliştirilerek yayınlanmıştır. IFC4 formatı ile birlikte ifcXML formatı olan kodlama sistemine uygun format ile tam uyumlu hale gelmiştir. Son yayından sonra planlanan IFC5 formatıyla parametrik tasarımlara daha uygun hale getirilmesi planlanmaktadır (<http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases/summary>). IFC formatı 2005 yılında ISO Halka Açık Şartnameleri arasına girmiştir.

BuildingSMART organizasyonu, IFC dosya formatı ile birlikte uluslararası standartların ve ortak tedarik zinciri verilerinin kullanımıyla proje paydaşları arasında ortak dil geliştiren “openBIM” kavramını ortaya koymuştur. Bu kavram IFC formatıyla yapılan proje çalışmalarına üretimi entegre etmeyi hedefler. OpenBIM, açık standartlar ve iş akışları bağlamında binaların işbirliğine dayalı tasarımı, gerçekleştirilmesi ve işletilmesi için evrensel bir yaklaşımdır. OpenBIM, açık buildingSMART Veri Modeli'ni kullanan önde gelen yazılım üreticilerinin girişimidir. Graphisoft ve Tekla gibi önde gelen yazılım üreticileri ve diğer firmalar tarafından openBIM konseptinin yaygınlaştırılması için openBIM Programı geliştirilmiştir (Şekil 3.4). Bu program, AEC endüstrisinde OPEN BIM konseptinin küresel olarak eşgüdümlü olarak tanıtımını teşvik etmek ve kolaylaştırmak için başlatılan, program katılımcıları için hizalı iletişim ve ortak markalaşma olanağı sağlayan bir pazarlama kampanyasıdır (http://www.graphisoft.com/archicad/open_bim/).



Şekil 3.4 : Graphisoft ürünü Archicad BIM yazılımının diğer yazılım ve dosya formatları ile uyumluluğu. Kaynak: https://helpcenterint-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/05/Publish_Interoperabilitat2015-298x300.png

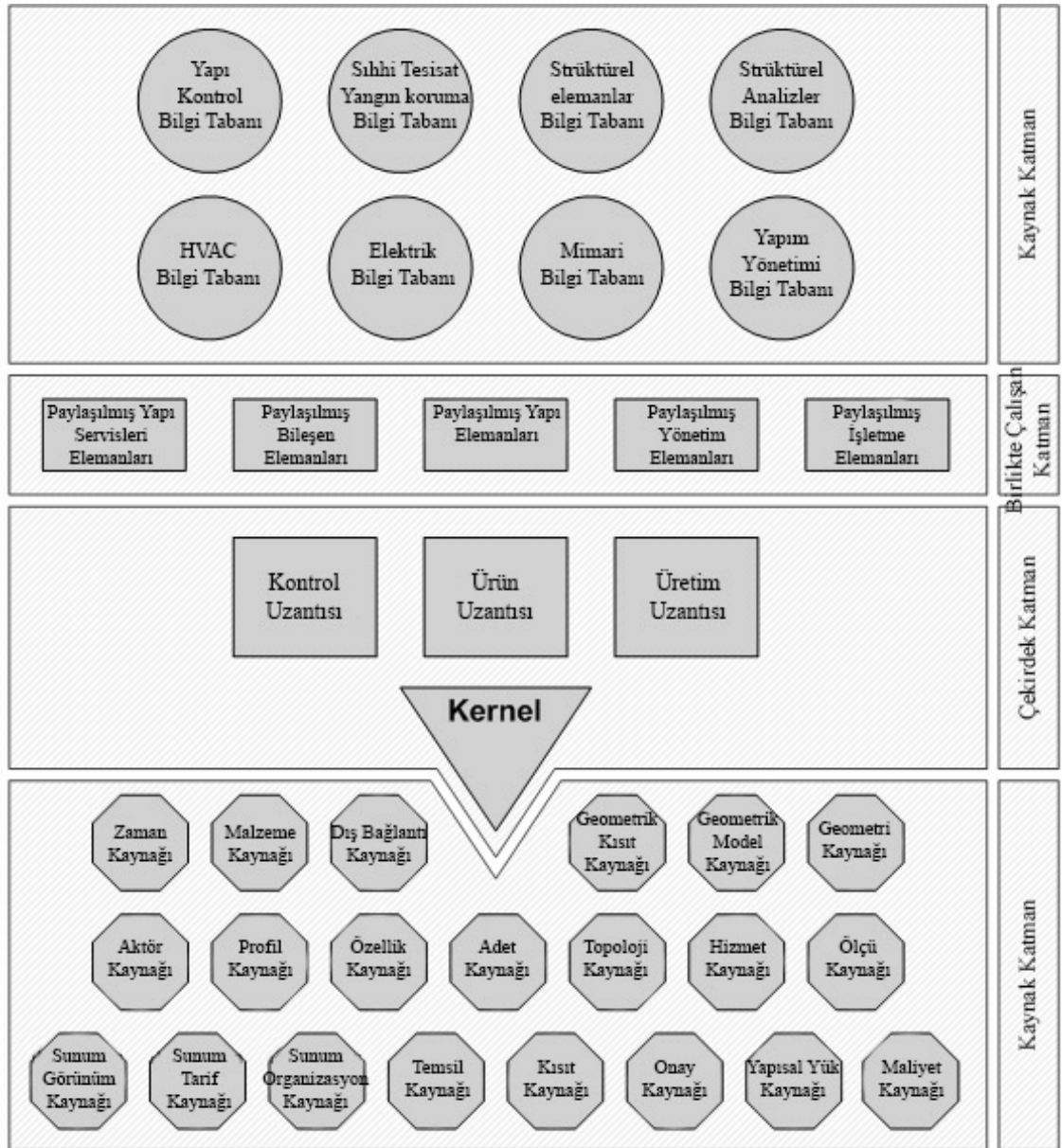
BuildingSMART, BIM'in rolünü, terminoloji, üretim süreçleri ve veri olarak üç boyutta tanımlar (Şekil 3.5). İnşaat projelerinde verimliliğin artırılması için bu üç boyutun doğru bir şekilde tanımlanması ve tüm boyutlardaki enformasyonun doğru bir şekilde paylaşılması gerekmektedir (Işıkdag, 2015).



Şekil 3.5 : BuildingSMART Standart Üçgeni
(<http://www.buildingsmart-tech.org>).

IFC dosya formatı temel mantık olarak sınıflandırma ilkesine dayanır. Her bir proje bileşeni için belirli sınıflandırmalar sunar (kapılar, pencereler, taşıyıcılar, sıhhi tesisat boruları vb. gibi). Bu mantık, proje paydaşlarının BIM modelinde kendi uzmanlık alanıyla ilgili proje bileşenlerini ayrıştırarak görebilmelerini sağlar. IFC modeli mimarisi gereği “model taslaklar” kullanılarak model bileşenlerinin geliştirilmesi için modüler bir yapı sunar. Bu mimaride sıkı bir referans ilkesi kullanan dört kavramsal katman vardır. IFC 2x4 dosya formatında, her kavramsal katmanda bir dizi model şeması tanımlanmıştır (Şekil 3.6).

İlk katman daha üst seviyelerde kullanılacak sınıflandırmaya kaynak oluşturacak sınıflandırmayı belirler. İkinci katman bir çekirdek proje modeli ortaya koyar, çekirdek sistemini ve çekirdek uzantılarını içerir. Üçüncü katman konsepti, çoklu uygulama türleri veya inşaat sektörü alanlarında ortak olan kavramları veya nesneleri tanımlayan bir dizi modül sağlar. Dördüncü ve en yüksek katman, spesifik inşaat endüstrisi kaynağına veya uygulama türüne göre hazırlanmış modüller setini içerir. Strüktür aşağıdan yukarıya katmanlarda oluşan bilgilerin aktarılmasıyla oluşur (Işıkdag, 2015).



Şekil 3.6 : IFC bileşenleri altkümeleri. Kaynak: <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC2x4/rc2/html/schema/chapter-5.htm>

Enerji analizleri için dosya aktarımında kullanılan formatlar ise ifcXML ve gbXML formatları kullanılmaktadır. Formatla birlikte mimari BIM modellerinin bu hesaplarda kullanılacak hacim bilgilerini de içermeleri gerekmektedir.

3.1.2 BIM’de Detay Seviyeleri

BIM teknolojisini kullanıldığı projelerde proje aşamalarına ve kullanım amaçlarına göre detay seviyelerinin belirlenmesi işbirliği açısından önem taşımaktadır. American Institute of Architects (AIA), proje sahipleri, mimarlar ve yükleniciler için

E202 (2013 yılından itibaren G202 olarak geçmektedir) gibi standartları geliştirmektedir. Bu standartlar arasında projelerde kullanılabilecek detay seviyeleri de sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma Level of Development (LOD) olarak geçmektedir. LOD genel olarak modelin ne amaçla kullanılacağını ve analiz programlarında beklenen doğruluk derecesini belirler (Kensek, 2015). LOD seviyeleri 100, 200, 300, 400 ve 500 olarak belirlenmiştir. LOD100 minimum detay seviyesi iken LOD500 maksimum detay seviyesini ifade eder. LOD500 seviyesindeki bir modelde yapı bileşeninin spesifikasyonunun, üretime yönelik enformasyonun ve fiyatının bulunması beklenir.

İngiltere’de model detay seviyeleri, 2012’de yayınlanan AEC UK BIM Protocol’le birlikte G0, G1, G2 ve G3 olarak belirlenmiştir. G0 şematik gösterim iken, G3 gerçekçi gösterimi ifade eder.

BIM modelinde detay seviyeleri üretim alanına yönelik diğer teknolojilerin kullanımında önemli bir konu haline gelmiştir. Örneğin, üç boyutlu yazıcılar yardımıyla bir yapı bileşeni ya da yapı bileşenleri için aktarılan model bilgisinde detay seviyesinin yüksek olması gerekmektedir.

3.1.3 Nesne Tabanlı Modelleme

BIM modelleri mantık olarak nesne tabanlı modellerdir. CAD sisteminde alışık olunan çizgi, nokta gibi geometrik elemanların ötesinde kapı, duvar, pencere gibi yapı bileşenlerinin kullanılmasıyla modeller oluşturulur. Bir başka deyişle, modeller bir sınıflandırma mantığına dayalıdır. BIM modelleri söz konusu nesnelerin ve hacimlerin birbirleriyle nasıl bir ilişkide olduklarını tanımlar.

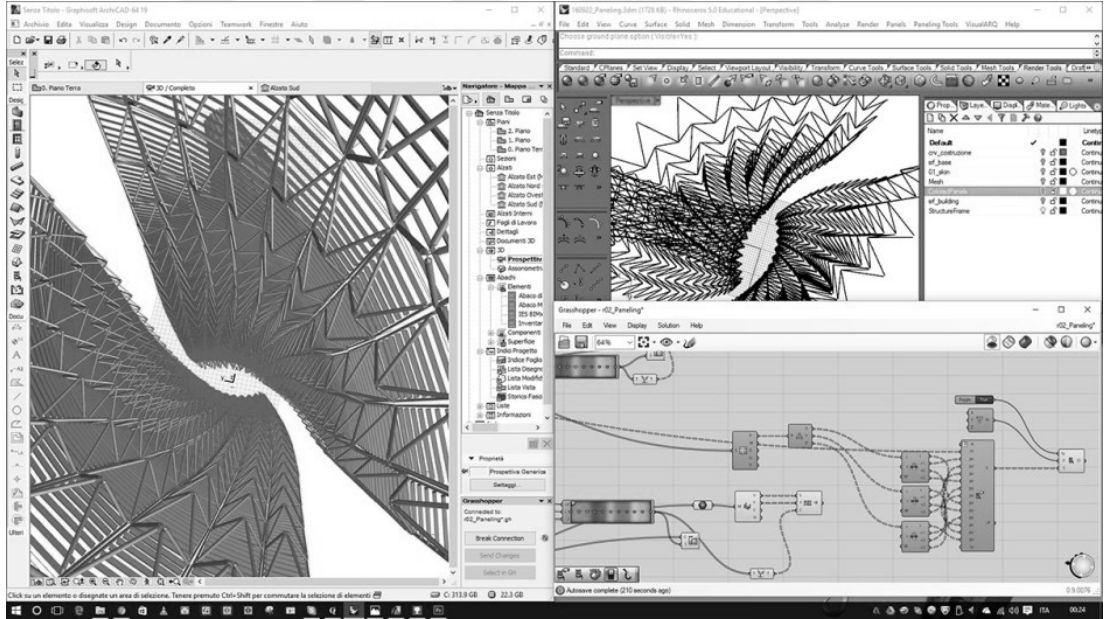
Succar (2009)’a göre BIM, olgunluk evreleri bileşenlerine bölünerek analiz edilmiştir. İlk aşama BIM’in “nesne tabanlı modelleme” olmasıdır. İkinci aşama “model tabanlı işbirliği”, üçüncü aşama ise “ağ tabanlı entegrasyondur”. Bu analiz, BIM uygulama planlarının oluşturulmasında altlık oluşturmuştur.

3.1.4 BIM ve Algoritmik Tasarım

Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) sistemleri ile birlikte mimarlık ve tasarım rasyonellik sınırlarından dışarı çıkmıştır. Mimari ürün üretme süreci, tasarım sürecinin devamında üretim sürecinde de parametrik, topografik, amorf tasarımlar,

hesaplamalı düşünceyle çalışan sayısal ortamlar aracılığıyla uygulanabilir hale gelmiştir. Parametrik tasarım, tasarımı kurallara, ifadeler ve değişkenlere bağlayarak matematiksel bir form ortaya koyar. Sayısal ortamlar sayesinde mimari tasarıma, sayısal tasarım, Öklid dışı geometrik uzay, topolojik düşünce biçimi, kinetik ve dinamik tasarım, parametrik tasarım, türetici tasarım, genetik algoritmalar gibi birçok yeni kavram katılmıştır (Kolaveric, 2001). Mimari tasarımlar, parametrik modelleme ve dijital hesaplamaların araç olarak kullanıldığı dinamik ve geometrik ilişkilere dönüşmüştür (Hensel ve Menges, 2008).

Kolaveric'in açıklamasına göre "Parametrikler ise mimari tasarımda sabit ve değişebilen, tekil ve çoğul işlemlerinin yerini değiştirerek yapar. Tasarımcı üreteceği mekâna ilişkin değişken bilgileri sabitlere bağlı olarak değiştirerek tasarım yapılabilir." (Kolaveric, 2003). Parametrelerin değişimiyle sayısız algoritma üretilebilir. Bu algoritmalar tasarımcıya bir tasarım aracı olarak alternatifler sunar. Bu durum tasarım sistematığına kökten eklemeler ve biçimlenme değişimleri getirebilir (McCullough 2006).



Şekil 3.7 : Grasshopper-Rhinoceros-Archicad eş zamanlı, çift yönlü yazılım işbirlikliği (Calvano ve Sacco, 2017).

(<http://www.graphisoft.com/users/bim-case-studies/archiradar-case-study.html>)

BIM yazılımları, Rhinoceros gibi parametrik tasarım yazılımları ve buradaki parametreleri kodlama diliyle denklemlere dönüştüren Dynamo, Grasshopper gibi yazılımlarla canlı bağlantılar (live connection) kurarak yapı enformasyonu

atanabilecek formlar haline dönüştürmektedir (Şekil 3.7). Bu bağlantı, amorf tasarımların daha kolay uygulanabilir hale getirilmesinde önemli bir adımdır. BIM modeline alınan algoritmik tasarım elemanı / elemanları, dijital üretimin herhangi bir alanına aktarılabilir. Söz konusu yapı bileşenleri cephe elemanları, taşıyıcılar hatta havalandırma sistemleri gibi birçok türü içerebilir.

Örneğin, özel tasarım olarak şekillenen her yapı elemanı, BIM ortamında modellenerek dijital fabrikasyon sürecine kadar enformasyonu aktarabilir. Yapı simülasyonunda yerine uygun olarak belirlenen yapı elemanı, eklemeli üretim, otomasyon sistemleriyle üretilebilir, robotik teknolojilerle saha montajı yapılabilir.

3.1.5 Dokümantasyon

İngiltere ve Amerika gibi gelişmiş ülkelerde mimari temsiller ve dokümantasyon, standartlarla belirlendiğinden, BIM özelinde de bu konu yine CIC, AIA gibi kurumlar tarafından mevcut standartların BIM'e uygun olacak şekilde güncellenmesi ve yeni standartların yazılmasıyla kullanıcılara bir çerçeve oluşturulmuştur.

İngiltere'de proje paydaşlarının ortaklaşa iş üretmesi için var olan uygulama kurallarını içeren BS 1192: 2007 standardı üzerinden PAS 1192-2 standardı oluşturulmuştur. Bu standart "Proje Enformasyon Modeli" (PIM) olarak bilinen grafiksel ve grafiksel olmayan verilerin ve belgelerin çoğunun tasarım ve inşaat faaliyetlerinden toplandığı belirli proje sunumlarına odaklanmaktadır (PAS 1192-2, 2013). Bu tip standart ve kılavuzlar BIM detay seviyelerine göre belirlenmiştir.

Amerika'da kullanılan kılavuzlar, standartlar ve prosedürler BIM kullanım amaçlarına ve aşamalarına göre belirlenmiştir.

Finlandiya, Almanya, Fransa, Avustralya, Singapur, Çin ve Japonya gibi ülkelerde de BIM'e uygun olarak mimari temsiller ve teslim formatları için kılavuzlar bulunmaktadır.

BIM kullanımını daha üst seviyelere taşımak için yeni standartlar ve prosedürler geliştirilmek üzere çalışılmaktadır (Modrue ve diğ, 2016).

3.1.6 Hata Öngörülleri ve Çakışma Analizleri

BIM modelleri, projenin ilk aşamalarından itibaren proje paydaşları ile ortak çalışma alanı sunduğundan, üç boyutlu olarak takip edilen ve yapıma uygun olarak modellenen yapı, bir çeşit yapım simülasyonu olarak şekillenmektedir. Koordine olarak çalışılan bu model, belirli sürelerde yapılan çakışma analizleriyle yapım sırasında karşılaşılabilecek hataların önüne proje aşamasında geçmeye yardımcı olur.

Projenin çeşitli aşamalarında yapılacak çakışma analizleri BIM Koordinatörü'nün görevidir. Bunun için çeşitli yazılımlar kullanılabilir. Koordinasyon araçları; Solibri, Tekla Bimsight, Autodesk Navisworks gibi yazılımlardır. Graphisoft yazılımı Archicad kendi içerisinde basit anlamda çakışma analizleri de yapabilmektedir.

Çakışma analizleri yapıldıktan sonra çakışma raporları yayınlanır ve koordinasyon toplantıları yapılarak bu çakışmalar giderilir.

Solibri gibi bazı koordinasyon yazılımları Amerika, İngiltere gibi ülkelerde kullanılan standartlar ve yönetmeliklere bağlı olarak da analiz yapabilmektedir. Örneğin yangın kaçış mesafelerinin kontrolü, engelli rampalarının meyillerinin standartlara uyup uymaması gibi.

Koordinasyon yazılımlarından Autodesk'e ait Navisworks programı, MS Project ya da Primavera gibi iş programı için olan yazılımlarla iletişim sağlayarak Faz Planlama için altlık oluşturabilmektedir.

Çakışma analizleri yapılırken yüklenici bünyesinde bulunan BIM Koordinatörü'nün, analiz yapılacak mekanik, elektrik, statik ve mimari modellerin belirli bir detay seviyesinde olmasına dikkat etmesi gerekir. Yeterli detay seviyesinde olmayan modeller, çakışma analizleri sırasında karşılaşılmayan, fakat yapım sırasında ortaya çıkacak hata veya problemler çıkarabilir (Eastman ve diğ, 2011). Bu sebeple, BIM Koordinatörü'nün projeye mümkün olan en erken aşamalarda katılması gerekir.

3.1.7 BIM'in Karar Vermeye Etkisi

BIM, karar verme sürecini destekler ve bu konuda olanaklar sunar (Dossick ve Neff, 2010). Proje paydaşları tarafından projenin ilk aşamalarından itibaren üç boyutlu olarak çalışılan BIM modeli, mal sahibi ve diğer tüm proje paydaşları için daha efektif bir karar verme ortamı sunar.

Azhar (2011), yapmış olduğu araştırmada, vaka çalışmalarından birinde Savannah Üniversitesi Yüksek Öğrenim Tesisi projesinde ön tasarım aşamasında genel yüklenici, mimar ve mal sahibiyle birlikte çalışmıştır. Ön tasarım aşamasında mimardan üç adet tasarım alternatifi istenmiştir. Bu alternatifler BIM teknolojisiyle oluşturulmuş olup, tahmini maliyet bilgileri girilmiştir. Mal sahibi üç alternatif model içerisinde sanal ortamda gezerek gereksinimlerine göre en uygun alternatifi seçme olanağı bulmuştur. Bu süreç toplamda 2 hafta sürmüş olup, mal sahibi ön tasarım aşamasında yaklaşık 1,995,000\$ tasarruf etmiştir. Bu vakada, BIM teknolojisi mal sahibine hızlı, efektif ve iyi bilgilendirilmiş bir şekilde karar verme olanağı sunmuştur (Azhar, 2011).

Yapım aşamasından önce çakışma analizleri gibi çeşitli kontroller yoluyla hataların ve eksikliklerin mümkün olduğunca erken bir şekilde giderilmesi hedeflenmektedir. Bu sebeple, verilecek kararların büyük bir bölümünün yapım aşamasından önce verilmesi, böylelikle yapım sürecinin mümkün olan en az gecikme ve tekrar işlerle bitirilmesi gerekmektedir.

3.1.8 Sanal Prototiplendirme

İnşaat sektörü üretiminin seri üretim mantığından farklı olmasının sebebi, her projenin kendine özgü özellikleri, boyutları ve gerekliliklerinin olmasıdır. Bu durum herhangi bir seri üretimde Ar-Ge aşamasında yapılan prototip çalışmalarının inşaat sektöründe fiziksel olarak uygulanamamasına sebep olmaktadır.

İnşaat sektöründe prototip çalışmaları fiziksel ve sanal olarak iki bölümde incelenebilir. Fiziksel prototip çalışmalarına maketler örnek verilebilir. Maketler projenin belirli bir aşamasından sonra yapılırsa da, ölçek ve detay seviyeleri konusunda sınırlı prototiplerdir. Projenin ilerleyen aşamalarında yapılan bir değişiklik fiziksel prototipe hızlı bir şekilde yansıtılamaz.

İnşaat sektöründe sanal prototipler, bilgisayar destekli tasarımın (CAD) inşaat sektörüne entegre olmasıyla birlikte prototip çalışmaları sanal olarak uygulanabilir hale gelmiştir. BIM teknolojisiyle birlikte yapım süreci öncesinde oluşturulan yapım modelleri, sanal ortamda projenin konumundan, alacağı gün ışığına, rüzgâra kadar gerçekçi prototipler üretilmesini sağlamıştır.

Hızlı Prototip Üretme (Rapid Prototyping) teknolojileri neredeyse her geometrik formu kısa bir zaman içerisinde prototiplendirme yetisine sahiptir (Iliescu ve diğ, 2009). Hızlı Prototip Üretme teknolojisi kapsamında mimaride fiziksel ve sanal modelleri bir arada kullanabilecek teknolojiler araştırılmaktadır (Zee ve diğ, 2014). Bu çalışmalar içerisinde Üç Boyutlu Baskı teknolojisi bu alan için önemli bir gelişmedir. Üç Boyutlu Baskı, 3B dijital modelden fiziksel bir model çıkarabilen dijital ve fiziksel dünya arasında kesintisiz bir şekilde köprü kurmak için ortaya çıkan bir Hızlı Prototip Üretme teknolojisidir (Rayna ve Striukova, 2016). Hızlı Prototip Üretme teknolojisinde, baskı süreleri uzun olsa da kısa sürede geliştirilecek bir konu gibi görünmektedir.

Sanal Prototip konusu BIM teknolojisi, Sanal Gerçeklik teknolojileri, Eklemeli Üretim teknolojileri, Lazer teknolojileriyle birçok farklı yönde işbirlikteği sunabilir. Örneğin Nagakura ve Oishi (2006), mimari tasarımlar için interaktif bir alan tarayıcısı geliştirmiştir. Bu tarayıcıyla hafif LCD paneli bir bina planının üzerinde hareket ettirerek, binanın 3B iç görünümü görüntülenebilmektedir (Nagakura ve Oishi, 2006).

Giyilebilir Teknolojiler konusunda bir Nesnelerin İnterneti teknolojisi olan Daqri firmasına ait “Smart HelmetTM” ürünü de bu alanda benzer bir teknoloji sunmaktadır. Baret sayesinde saha kontrollerinde, Sanal Gerçeklik teknolojileri kapsamında BIM modeli sanal olarak bakılan yönde yer alan yapı bileşenlerine uyumlu olarak örtüşmektedir.

Sanal Prototipleme teknolojisi ön tasarım aşamasında mimara farklı tasarımları form olarak deneme olanağı sunar. Parametrik tasarım programlarıyla veri alışverişinde bulunabilen üç boyutlu yazıcılar, sanal ortamda üretilen form alternatiflerini ölçekli fiziksel modellere dönüştürülmesini sağlar. Günümüzde büyük ölçekli mimari bürolarda üç boyutlu yazıcıların kullanıldığı bilinmektedir.

Parametrik yazılımın özellikleri mimara, düzensiz eğriler içeren geometrinin şekil, ebat ve eğrilik dereceleri değişkenlere bağlı olduğundan deneyler yapma olanağı sunar (Aish ve Woodbury, 2005). Bu teknoloji dijital üretim teknolojileriyle işbirlikteği yaparak tasarlanan prototip formunun fiziksel olarak yeniden düzenlenmesini sağlar (Kolaveric, 2003). Modelleme araçlarındaki hızlı gelişmeler ve prototip imalatı için uygun malzemelerdeki gelişmeler, ölçekli prototiplerin

yapımında mimarlar ve tasarımcılar için yeni iş akışları sunmaktadır (Datta ve diğ, 2016).

İnşaat sektöründe prototip çeşitleri; ön tasarım aşaması için kaba kitle modelleri, uygulama projelerinde cephe elemanlarında malzeme ve sistem seçimi için yüzey prototipleri, taşıyıcılık ve sistem kontrolleri için strüktür prototipleri, yapım sırasında sonuçlanacak kararlar için mock-up'lar olarak sıralanabilir. Tüm bu prototiplerin sağlanmasında BIM modelleri karar verme süreçlerinde, Sanal Gerçeklik kullanımlarında, Eklemeli Üretim prototipleri için altlık veri oluşturma gibi konularda faydalar sağlayacaktır.

3.1.9 Enformasyonun Derinliği ve İçeriği

BIM modellerine kullanım amaçlarına yönelik eklenecek enformasyon ABD ve İngiltere tarafından yayınlanan standartlar tarafından önerilmiştir. Bununla beraber, tedarikçi firmalar yavaş yavaş BIM modellerine malzemeye veya yapı bileşenine ait spesifikasyon bilgilerini içeren nesne kütüphaneleri oluşturmaktadırlar.

Alışık olunan bilgisayar destekli tasarım sistemlerinden farklı olarak BIM modelinde isminde de yer alan “enformasyon” gereksinime göre eklenebilir olmasıdır. Bir BIM modelinde herhangi bir yapı bileşenine eklenecek enformasyon, model analizleri, ürün seçimi, maliyet tahmini, spesifikasyon, işletme yönetimi, fabrikasyon ve yapım için kullanılmak üzere eklenebilir. Enformasyon proje sürecine göre eklenebilir, manipüle edilebilir, ayrıştırılabilir ya da kullanılmıyorsa silinebilir (Weygant, 2011). Enformasyonun eklenmesi ve kullanılması kullanıcı beklentilerine bağlıdır. Bu beklentiler “BIM Değerlendirmesi (BIM Consideration)” fenomenini ortaya çıkarır (Jung ve Gibson, 1999). Dolayısıyla BIM modeline eklenecek enformasyonun derinliği, proje özelinde gereksinimlere göre, kullanım amaçlarına göre farklılık gösterebilir. Bu beklentilerin düzenli bir şekilde, karışıklığa yol açmadan karşılanabilmesi için proje başlamadan BIM Uygulama Planı'nın (BIM Execution Plan) hazırlanması gerekir.

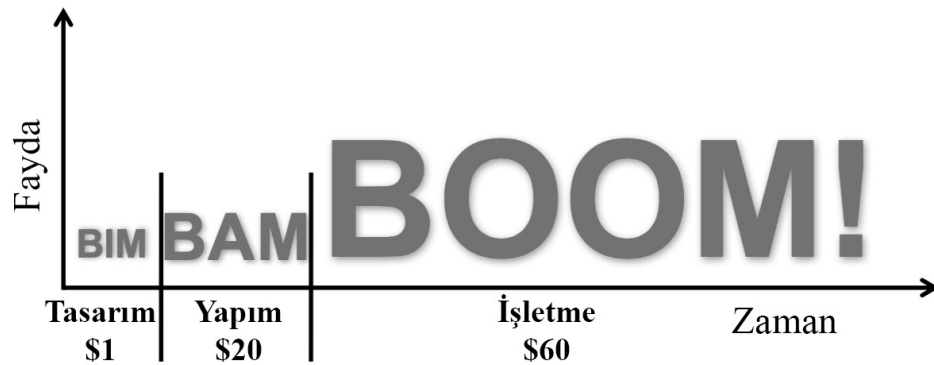
Yapı bileşeni üreticileri günümüzde ürünlerine ait BIM nesne modellerini, baz spesifikasyonlarını üretilip, kendilerine kütüphane oluşturup mimarlarla paylaşmaktadırlar. Örneğin, Mitsubishi marka bir havalandırma cihazı için üreticinin kendi İnternet sitesinden ya da satış danışmanları aracılığıyla seçilen ürünün modeli

alınarak BIM modeline yerleştirilebilir. Bu tip yapı bileşenlerinin markadan bağımsız olarak kütüphaneleştirildiği, www.bimnesnect.com, www.nationalbimlibrary.com, www.bimcomponents.com gibi siteler bulunmaktadır.

BIM modellerinde yapı bileşenleri, sınıflandırma altyapısıyla etiketlenir. Kapı, duvar, taşıyıcı gibi etiketler alan yapı bileşenlerine ait spesifikasyonların oluşturulması için standartlar kullanılır. En çok kullanılan standartlar CSI MasterFormat® and CSI UniFormat™'tır.

Enformasyon grafiksel ve grafiksel olmayan olarak iki tür olarak modelde yer alabilir. Enformasyonun her türü modellenmeyebilir. Proje başında belirlenen LOD'ler üzerinden gerekli detay seviyesinde modelleme yapılacaktır. Ancak yapı bileşenlerine, BIM yazılımı içerisinde yapı bileşeni seçildiğinde spesifikasyon bilgisini içerecek şekilde daha detaylı enformasyon girilebilir.

Bir bileşene eklenebilecek enformasyon çeşitleri, boyutsal enformasyon, bileşenin kimliği, performans bilgileri, uygulama/kurma bilgileri, sürdürülebilirlik enformasyonu (örneğin LEED ya da BREEAM gibi sertifika hedefleri varsa eklenebilir), işletme sürecine yönelik enformasyon ve bileşen spesifikasyonu olabilir. İşletme sürecine yönelik enformasyonun girilmesi ve yönetilmesi konusunda İngiltere'nin BIM modellerinin işletme modelleri olarak kullanılabilmesi için ürettiği COBie standardı bulunmaktadır.



Şekil 3.8 : BIM faydaları. Graphisoft KCC 2016, Patrick McLeamy sunumu, 2016

McGrew Hill firmasından Patrick McLeamy, Graphisoft KCC 2016 konferansında yapmış olduğu sunumda, BIM modellerinin kullanım seviyelerine yönelik esprili bir grafikte “BIM” içeriğindeki enformasyonun kullanımıyla sağlanacak kazançları tariflemiştir (Şekil 3.8). Ortalama 50 yıllık bir proje işletme ömrü için harcanan

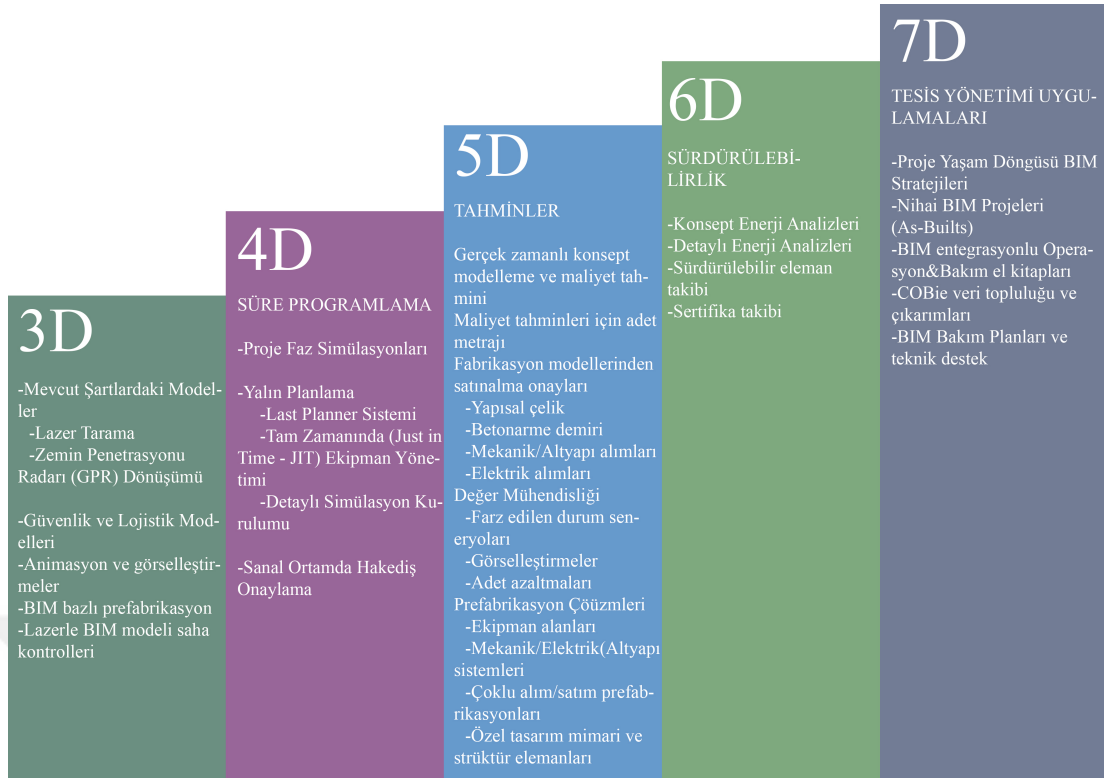
maliyet tasarım, bir araya getirme (assembly) ve işletme aşamaları için oransal olarak belirtilmiştir. Tasarım aşaması için BIM modelleri kullanımı maliyet, zaman tasarrufu için ön plandadır. Yükleniciler ise BIM modelini “montaj” (assembly) modelleri olarak kullanmaktadır, bu da Patrcik McLeamy’nin deyiimiyle BIM’I BAM (Building Assembly Model) yapmaktadır. BAM modeli yükleniciye daha iyi iş planlaması yapma, alt taşeron yönetimi, maliyet kontrolü ve yapım kalitesinde artış sağlamaktadır. İşletme yönetimi aşamasında mal sahibi, BIM modelini operasyon ve optimizasyon modeli olarak kullanacaktır, bu da BOOM (Building Operation Optimization Model) olarak ele alınmıştır. BOOM, mal sahibine enerji tasarrufu, daha iyi yönetim planlaması sağlayacaktır. Operasyon maliyetlerinin tasarım maliyetinin 60 katı olacağı düşünüldüğünde BOOM ile sağlanabilecek maliyet tasarrufu yadsınamaz bir büyüklükte olacaktır (MacLeamy, 2016).

BIM modellerinde yapı bileşenlerine girilecek enformasyonun planlamasının doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Amacı belli olmadan fazladan yapılacak enformasyon girişi, süre kaybına neden olacaktır. Fakat fabrikasyona yönelik yapılacak enformasyon ve detay seviyesi yüksek olmalıdır. Dijital Üretim teknolojileriyle BIM modellerinin işbirliğinde BIM modellerinin detay seviyesi önem taşımaktadır. 2. Seviye BIM modelleri henüz doğrudan üç boyutlu baskı ya da robot destekli imalatlar için yeterli detay seviyesini içermemektedir (Tibaut ve diğ, 2014).

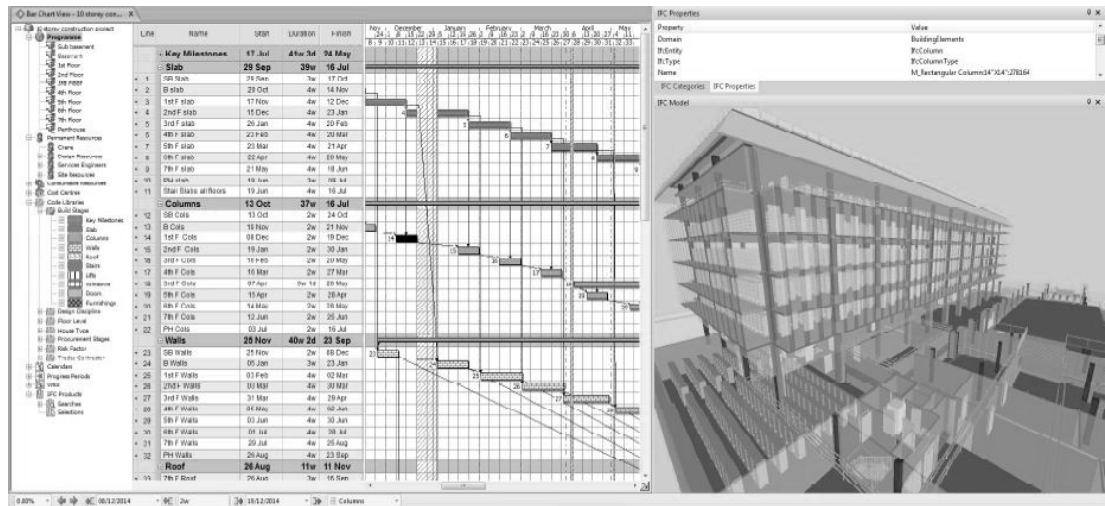
3.1.10 Modele Eklenen Boyutlar

BIM teknolojisi ile yürütülen projeler, zaman, maliyet, sürdürülebilirlik gibi 3B modellere eklenen boyutlar ile farklı amaçlara hizmet edebilir (Şekil 3.9). 3B modeller, BIM teknolojisinde proje paydaşları arasında üç boyutlu koordinasyon sağlar. Üç boyutlu model bilgisiyle sunuma yönelik animasyonlar, görselleştirmeler sağlanabilir. Yapıma yönelik ise lazer teknolojisiyle saha takibi, restorasyon/renovasyon projeleri modele entegre edilebilir.

4B modeller üç boyutlu modellere zaman bilgisinin eklendiği modellerdir. Üç Boyutlu modellere iş programı programları işbirliğiyle eklenecek WBS kodlarıyla iş kalemi süre bilgisinin eklenmesi, böylelikle 4B faz planlama yapabilmek mümkündür. Faz planlamada Navisworks gibi koordinasyon programlarıyla birlikte simülasyonlar üreterek hangi tarihte hangi işin yapılacağını izlenebilir (Şekil 3.10).



Şekil 3.9 : Modellere eklenen boyutlar ve sağladıkları faydalar. (Elsafadi, 2016 <https://www.linkedin.com/pulse/bim-3d-7d-implementation-hani-elsafadi>)



Şekil 3.10 : 4B faz planlama (<http://www.bina-i.com/project-management/4d-bim-project-planning/>).

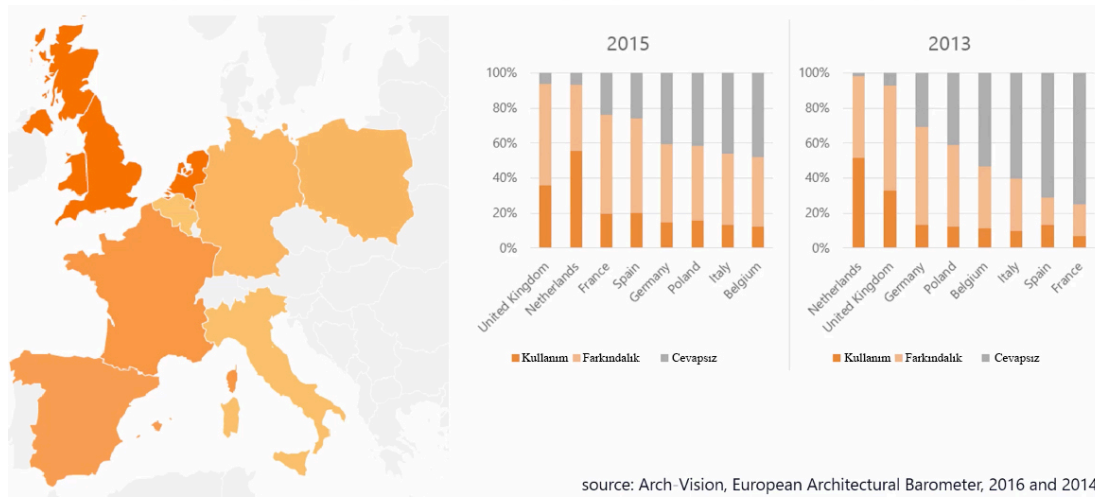
Dört boyutlu modellere eklenebilecek beşinci boyut maliyet enformasyonudur. 5B maliyet tahmin modelleri ile birlikte malzeme metrajları (MOT - Material Takeoff), adet metrajları (QTO – Quantity Takeoff) alınabilmektedir.

Modellere eklenen altıncı boyut, Proje Yaşam Döngüsü Yönetimi'ne yönelik modelden bağımsız olarak yapılan analizlerin, ek enformasyonların modele entegre edilmesidir. Örneğin enerji analizlerinin sonuçları modele entegre edilebilir. 6B boyutlu modeller binanın sürdürülebilirliğiyle ilgili bilgileri içerir.

7B modeller İşletme Yönetimi'nde veri tabanı olarak kullanılacak modellerdir. Yapım modellerinin (as-built) işlenerek modelin güncellenmesi, spesifikasyon ve garanti enformasyonunun güncellenmesiyle oluşturulur. Proje Yaşam Döngüsü Yönetimi için kaynak veriyi oluşturur.

3.2 Çeşitli Ülkelerde BIM Kullanımı

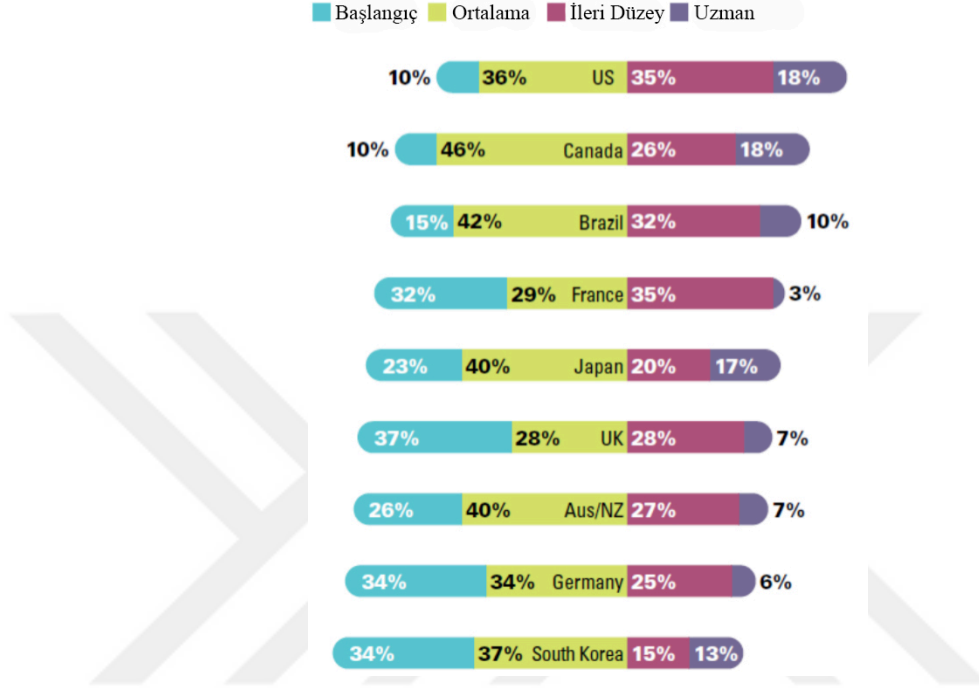
Dünya'da National Building Specification (NBS)'in Dünya çapında kuruluşlarla çalışarak yapmış olduğu BIM kullanım istatistikleri araştırmasında, BIM kullanımının ve farkındalığının giderek arttığı görülmektedir. Yapılan araştırmada Birleşik Krallık, Japonya, Çek Cumhuriyeti, Kanada, Danimarka değerlendirilmiş olup tümünde farkındalık ve kullanım oranlarının önceki yıllara göre arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Arch-Vision raporuna göre Avrupa genelinde BIM farkındalığı ve kullanımının yıldan yıla arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : Avrupa'da BIM adaptasyonu. Kaynak: Arch-Vision, European Architectural Barometer, 2016 ve 2014

Oranlar incelendiğinde Avrupa sınırlarında ön plana çıkan ülkeler Birleşik Krallık ve Hollanda olmaktadır. Bu ülkelerin haricinde Finlandiya BIM konusunda başarılı çalışmaların yürütüldüğü bilinmektedir. Avrupa haricinde değerlendirildiğinde ABD, Singapur, Japonya, Güney Kore gibi ülkelerde de BIM kullanımının arttığı

görülmektedir. Ülkelere göre yüklenici firmaların BIM deneyimi değerlendirildiğinde Amerika Fransa ve Brezilya %30'un üzerinde üst düzey deneyimle ön plana çıkmakta, İngiltere, Avustralya / Yeni Zellanda, Kanada, Almanya ve Güney Kore ise biraz daha düşük üst düzey deneyim oranıyla onları takip etmektedir (Şekil 3.12)



Şekil 3.12 : Yüklenici Deneyimi Oranları. Kaynak: McGraw Hill Construction, 2013

Dünya’da BIM farkındalığının artmasındaki en önemli ortak nokta, bu konuda ileri olan tüm ülkelerde devlet desteği ve devlet yaptırımının olmasıdır. Özellikle Birleşik Krallık ve ABD, BIM üzerine standartlar oluşturup yayınlamaktadır. Birçok ülkede BIM forumları üzerinden bilgi paylaşımı yapılmaktadır. İngiltere 2011 yılında devlet stratejisi olarak konuyu ön plana çıkarmasıyla birlikte hızlı bir şekilde bu konuda ilerlemiştir.

3.3 BIM’in Faydaları

Işıkdag, U. (2015), bir BIM modelinin karakteristik özellikleri literatürde yer alan verilere dayanarak nesne odaklı olması, sağlayıcıdan bağımsız ve paylaşıma açık olması, işbirliğine olanak tanınması, enformasyon açısından zengin, geliştirilebilir, üç boyutlu olması, projenin yaşam döngüsündeki her süreçle yönelik çok çeşitli enformasyonu içermesi, fonksiyonel enformasyon içermesi, tek bir modelin farklı

arayüzlerle farklı temsillerinin sağlanması, saklanabilir, paylaşılabilir ve veri alışverişinin sağlanabilir olması şeklinde tanımlanmıştır. Düzgün planlanmış bir BIM modeli bu karakteristik özellikleri sayesinde bir projenin yaşam döngüsü içerisinde sahip olduğu enformasyon sayesinde farklı amaçlar için kullanılabilir olacaktır. Kullanıldığı ortama göre bir BIM modeli, proje aşamasında farklı paydaşlarla işbirliği sağlamak için, ihale aşamasında gerekli verinin sağlanması için, süre ve maliyet planlama için altlık olarak, saha takibinde üç boyutlu kontrol sağlamak için, işletme sürecinde, simülasyonlar aracılığıyla yapılacak testler gibi birçok farklı konu için kullanılabilir.

Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere, Eastman ve diğerleri, BIM’in hedeflerini, sağladığı kazanımlara göre birkaç başlık altında toplamıştır (Eastman ve diğ, 2011).

Çizelge 3.1 : BIM proje süreçlerine göre sağladığı kazanımlar (Eastman ve diğ, 2011).

Süreçler	Faydaları
İnşaat Öncesi Süreç	İş sahibine konsept, fizibilite, ön tasarım çalışmalarının kolaylaştırması Şematik modelleme çalışmalarıyla yapım öncesinde verilecek işveren kararlarıyla bina performansı ve kalitesini artırmak Entegre proje teslim sistemiyle iyileştirilmiş işbirliği sağlanması
Tasarım Süreci	Daha erken ve daha gerçekçi tasarım modellerinin yapılabilmesi Parametrik kurallar yardımıyla tasarım aşamasında oluşabilecek hataların önüne geçilmesi Daha doğru ve tutarlı dokümantasyon sağlanması Diğer disiplinlerle daha erken koordinasyonun sağlanabilmesi Tasarım kararlarının daha erken verilebilmesi ve onaylanması Tasarım aşamasındayken maliyet tahminlerinin yapılabilmesi Enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik konusunda iyileştirmeler
Yapım Süreci	Tasarım modeli üzerinden fabrikasyon yapılabilmesi Tasarım değişikliklerinin hızlı yapılabilmesi Yapımdan önce tasarım hatalarının ve eksiklerinin belirlenebilmesi Tasarım ve Yapım planlamasının senkronize olabilmesi Yalın İnşaat tekniklerinin daha iyi uygulanabilmesi İhale sürecinin Tasarım ve Yapımla senkronize olabilmesi
Yapım Sonrası Süreç	İşletme bilgileriyle İşletme başlangıcı ve teslimi sürecinin iyileştirilmesi Daha iyi yönetim ve operasyon faaliyetleri İşletme ve yönetim sistemlerinin entegre olabilmesi

Bir projenin, üretkenliği, verimi, değerini, kalitesini ve sürdürülebilirliğini artırmakla ve projenin yaşam maliyetlerini, gecikmeler, teslim süreleri, tekrarları azaltmakla,

performansını artırmak hedeflenir. BIM modeli bu kriterleri etkili iletişim ve işbirliği ile sağlamayı hedefler.





4. BIM VE DİJİTAL ÜRETİM BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİĞİ

Bu bölümde Endüstri 4.0 kapsamında ele alınan teknolojilerin BIM ile birlikte çalışmalarına yönelik araştırma ve değerlendirmeler bulunmaktadır. Öncelikle, çeşitli dijital üretim teknolojilerinin inşaat sektörüne sağlayabileceği faydalar ve uygulamada karşılaşılabilecek zorluklar değerlendirilmiştir. Endüstri 4.0 konseptli teknolojilerden Dünya’da karşılaşılan örnekler incelenmiş ve söz konusu teknolojilerin BIM ile birlikte çalışabilirliği konusu özelinde örnekler ve araştırmalar değerlendirilmiştir.

4.1 Dijital Üretimin İnşaat Sektörüne Sağlayabileceği Faydalar

İnşaat sektöründe Dijital Üretim kavramı, verimliliği artırmaya yönelik inovatif gelişmelerin geleneksel üretim yöntemlerine adaptasyonu, inşaat sektöründe sanayileşmeyi kapsamaktadır. İnşaat sektörünün sanayileştirilmesi konusunda, mimari ve enerji kapsamında yeni yapım teknolojilerinin geliştirilmesi ve kullanımının fayda ve zorluklarının değerlendirilmesi gerekmektedir (Ghalenoe ve diğ., 2013). Bu değerlendirmelere bağlı olarak mekanizmaların geliştirilmesi, lokalizasyonun fizibilitesi, alışılmış yöntemlere kıyasla rekabet edebilirliği, sektör paydaşlarının eğitimi gibi konulara çözümler üretilmesiyle sanayileşme yayılabilir ve yapımda kalite ve verimlilik artırılabilir (Mahdavi ve diğ., 2010). Sanayileşme; modülerlik, dinamizm ve esneklik, enerji etkinlik, sürecin sürekliliği, bilgi toplamak ve yaygınlaştırmak için kapsamlı bir sistemin varlığı, eğitimin varlığı ve sonuç ürünün nakliyesi demektir. Sanayileşmenin başlıca özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Yapımda geleneksel ve manuel yöntemlerden kaçınma,
- Tekrar eden ve çoklu birimler içeren prototipin seri ve toplu üretimi,
- Prefabrike elemanların kontrollü koşullarda üretimi ve montajı,
- Yapım sürecinde enerji ve malzeme kayıplarının azaltılması (Sardoud ve diğ., 2016).

Österreich ve Teuteberg, Endüstri 4.0'ın inşaat endüstrisine yönelik faydalarını PESTEL analizi kapsamında incelemişlerdir (Österreich ve Teuteberg, 2016). Bu çalışmaya göre;

Endüstri 4.0'ın inşaat endüstrisine sağlayacağı ekonomik faydalar:

1. Maliyet tasarrufu: Emek yoğun işlerin otomasyonu ve robotik, otomatik iş akışları gibi teknolojilerin kullanımıyla işçilik maliyetlerinin düşürülmesi (Bruemmer, 2016). RFID etiketleriyle malzeme ve ekipmanı izlemek malzeme maliyetlerini düşürebilir (Sardoud, 2012). Üç boyutlu yazıcıların kullanımı ile birebir amacı ve yerine uygun yapı bileşenlerinin üretimi, yine malzeme maliyetlerini düşürebilir, malzeme sarfiyatını azaltır.
2. Zamanında ve öngörülen bütçe dâhilinde teslim: BIM kullanımı faz planlama, fizibilite analizleri, doğru metraj gibi kavramlarla projelerin zamanında ve bütçesinde bitirilmesine yardımcı olur.
3. Kalitenin artması: BIM ve diğer simülasyon teknolojilerinin kullanımıyla hata olasılığının azaltılarak yapı kalitesi artırılabilir (Allison, 2015). Büyük Veri teknolojisi analitiği, proje yöneticilerine geçmiş verilere dayanan daha etkili ve bilinçli karar vermelerine yardımcı olabilir (McMalcolm, 2015).
4. İşbirliği ve iletişimin artması: BIM, Bulut Bilişim, Sosyal Medya, Mobil Hesaplama gibi teknolojiler proje paydaşları arasında iletişimi artırmaktadır.
5. İşveren-Müşteri ilişkisinin artması: İletişimin bir önceki maddede bahsedilen teknolojilerle artmış olması son kullanıcı dönüşlerinin kolaylaşması ve dolayısıyla kalitenin artmasına yardımcı olacaktır. Satış aşamasında simülasyon gereçlerinin kullanılması ise projelerin daha doğru anlaşılmasını sağlayacaktır (Jönse, 2016). Hatta bu tip teknolojilerinin satışta kullanılması firmaların ve projelerin reklam değerlerini de artırarak rekabet avantajı sağlayabilir.

Endüstri 4.0'ın inşaat endüstrisine sağlayacağı sosyal faydalar:

1. İş güvenliğinin artması: RFID, Nesnelerin İnterneti, Robotik gibi teknolojilerle sahanın dijital olarak gözlemlenmesi, ulaşımı zor ve tehlikeli yerlerde robotların kullanılması, akıllı baretler, akıllı gözlüklerin kullanılması ile iş güvenliği artırılabilir. Sanal Gerçeklik teknolojisiyle işçilere güvenlik

eğitimi verilebilir (Gua ve diğ, 2013). İş kazalarından kaçınmak adına sanal ortamlar aracılığıyla risk haritaları oluşturulabilir (Vahdatikhaki ve Hammad, 2015).

2. Endüstri imajının iyileştirilmesi: İnşaat sektöründe verimliliğin ve dijitalizasyonun düşüklüğü sanayileşmeyle birlikte artırılabilir ve bu da sektörün imajını yükseltebilir (Slowey, 2015).

Endüstri 4.0'ın inşaat endüstrisine sağlayacağı çevresel faydalar:

1. Sürdürülebilirliğin artması: Teknolojinin kullanımı malzeme kayıpları ve atık seviyesinin düşürebilir. BIM'in diğer teknolojilerle birlikte kullanılması, atık yönetimi ve sürdürülebilirliğe yönelik stratejik proje yönetimi (Tang ve diğ, 2013) yapılmasını sağlar.

Endüstri 4.0'ın inşaat endüstrisine sağlayacağı diğer faydalar:

1. Zaman tasarrufu: Eklemeli üretim, prefabrikasyon gibi inovatif üretim teknolojileri geleneksel yöntemlerden daha hızlı yapım sağlar (Baynes ve Steele, 2015).

4.2 Dijital Üretimin İnşaat Sektöründe Uygulanmasında Karşılaşılabilecek Zorluklar

Teknolojinin inşaat sektörüne entegrasyonu konusunda karşılaşılan ve öngörülen zorlukları Österreich ve Teuteberg yaptıkları araştırmada belirlemişlerdir. Söz konusu zorluklar, sonrasında yapılacak araştırmalar için başlıklar oluşturmak amacıyla derlenmiştir (Österreich ve Teuteberg, 2016). Bu zorluklar da, faydalar gibi PESTEL analizi kapsamında değerlendirilmiştir.

Dijital üretimin inşaat sektöründe uygulanmasında karşılaşılabilecek politik zorluklar:

1. Adaptasyonda tereddüt: İlk yatırım maliyetlerinin fazlalığı ve faydaların belirsizliği, firmaları bu sürece adaptasyonda tereddütte bırakmaktadır (Smith, 2014). Bu adaptasyon süreci teşvik programları, devletlerin BIM politikaları, araştırma ve endüstri konusunda kaynak yaratma gibi yöntemlerle desteklenebilir.

Dijital üretimin inşaat sektöründe uygulanmasında karşılaşılabilecek ekonomik zorluklar:

1. Yüksek uygulama maliyetleri: Teknik ekipmanın maliyetli oluşu, eğitim maliyetleri, danışmanlık hizmetleri maliyetleri gibi maliyetler uygulama konusunda bariyerlerdir. Tüm bu ilk yatırım maliyetleri sonrasında alınacak faydaların garantisi olmaması sebebiyle birer bariyer olarak karşımıza çıkmaktadır.
2. Organizasyonel ve imalat tekniği değişimi: Teknolojinin adaptasyonu tüm proje süreçlerini, malzeme üretim süreçlerini, imalat ve montaj tekniklerini kısacası tüm inşaat sektörü üretimini kapsamaktadır. Bu adaptasyonun inşaat firmaları için nasıl başarılı bir şekilde gerçekleşeceği asıl cevaplanması gereken sorudur (Arayıcı ve Coates, 2012).

Dijital üretimin inşaat sektöründe uygulanmasında karşılaşılabilecek sosyal zorluklar:

1. Gelişmiş becerilere olan gereksinim: Organizasyonel ve imalat tekniği değişimi kapsamında teknolojinin adaptasyonu ve kullanımı için belirli bir bilgi seviyesi gereksinimi olacaktır. Çalışanların bu konuda gelişimi firmalar tarafından sağlanabilir. Çalışanlar için ilgi çekici, inovatif ve transparan ortamlar, firmalar tarafından oluşturulmalıdır.
2. Bilgi yönetimi: Yapım projelerinin kendine mahsus olmasından dolayı bilgi yönetimi, firmaların organizasyonel standartlarını oluşturmaları diğer sektörlerden farklı olarak deneyime bağlı olarak gelişmektedir. Bitirilen projelerdeki deneyimlerin dijital verilerle saklanması BIM, bulut bilişim gibi teknolojilerin kullanımıyla daha kapsamlı ve istenilen veriye daha kolay ulaşılabilen bir proje seyri (log) oluşturabilir.
3. Kabullenme: İnşaat sektörünün yeniliklere ve yeni teknolojilere karşı direnci bilinmektedir (Sardoud, 2012). Çalışanların direnç göstermedeki en büyük endişelerinden biri Hegemann'a göre robot ve makinaların yerlerini alması ve iş kayıpları yaşanmasıdır (Hegemann, 2015). Firmaların bu süreci yönetebilmeleri için danışmanlıklar almaları gerekmektedir.

Dijital üretimin inşaat sektöründe uygulanmasında karşılaşılabilecek teknik zorluklar:

1. Standartlar ve referansların olmaması: BIM konusunda uluslararası ve lokal standartlar geliştirilmesine karşın BIM'in diğer teknolojilerle olan işbirliğine yönelik, örneğin yazılım uyumsuzluklarını, yetersizliklerini içeren ve bunlara çözüm sunan bir standart bulunmamaktadır. İnşaat sektöründe kullanılacak diğer teknolojiler için de standartların ve referansların olmaması bu konunun eksiklerinden biridir. Sektördeki firmaların çoğunluğunun küçük-orta büyüklüklü işletmeler olduğu gerçeğini göz önüne alarak, Endüstri 4.0 ve inşaat endüstrisi özelinde bir referans mimarisine gereksinim vardır (Lasi ve diğ, 2014).
2. Yüksek donanımsal gereklilikler: Kullanılacak ekipmanın hava ve çevre koşullarına dayanıklı olması gerekmektedir (Chen ve Kamara, 2011). Saha yönetiminde kullanılacak cihazlar, robotlar, drone'lar yağmur, kum, nem gibi hava koşullarına dayanıklı hale getirilmiş cihazlar olmak durumundadır.
3. Veri güvenliği: Bulut bilişim sistemlerin ve dijital verilerin en büyük endişe duyulan yönleri güvenlik problemleridir. Artan veri hacmi, mobilite, enformasyon paylaşımı firmalar için veri güvenliği gereksinimiyle sonuçlanır. Şirketler, merkezileştirilmiş bulut tabanlı kullanıcı kimliği, erişim yönetimi, aygıt yönetimi ve veri koruma araçları yoluyla verilerini yetkisiz erişime ve her türlü yanlış kullanıma karşı korumalıdır (Microsoft, Construction Firm Uses Cloud-Based Tools to Advance Mobility and Productivity, 2014).
4. Mevcut iletişim ağlarının güçlendirilmesi: Dijitalleşme sürecinde teknolojilerin kullanılması için güçlü bir İnternet altyapısı gerekmektedir. Özellikle şantiyelerde hızlı ve güvenilir İnternet bağlantılarının olması gerekir. Türkiye'de İnternet altyapısına ve bu konudaki yatırımlara bakıldığında mevcut durumun hızlı bir şekilde iyileştirilmesi gerekmektedir.

Dijital üretimin inşaat sektöründe uygulanmasında karşılaşılabilecek yasal zorluklar:

1. Mevzuata uygunluk: İş güvenliği yönetimi ve işgücü yönetimi için RFID teknolojisinin kullanılması, kişisel verilerin otomatik olarak alınmasını ve kaydedilmesini gerektirir. Çoğu durumda, çalışanların takibi ve izlenmesi ile kaydedilen bilgilerin işlenmesi hakkında etik ve yasal endişeler mevcuttur. Örneğin, Alman veri koruma kanunlarına göre, çalışanlarla ilgili kişisel

bilgilerin bulunduğu kurumsal verilerin Avrupa Birliği veya Avrupa Ekonomik Alanı dışındaki şirketlere dış kaynak verilmesi durumunda yüksek kısıtlamalar dikkate alınmalıdır. Bu teknolojilerin uygulanmasından önce, mahremiyet ve veri koruma ile ilgili kısıtlamalar, sürecin en erken aşamalarından itibaren hukuk uzmanlarını dâhil ederek kontrol edilmelidir.

2. Yasal ve sözleşmesel belirsizlikler: Özellikle BIM modelleri konusunda modelin kime ait olacağı, modeldeki hatalar ve problemler için yasal sorumluların kimler olacağı hususunda tartışmalar halen devam etmektedir (Smith, 2014).

4.3 Dijital Üretim Örnekleri

İnşaat sektöründe dijital üretim anlamında ilk çalışmalar Japonlar tarafından 1980'lerin ortalarında yürütülmüştür. Prefabrikasyonun hız konusundaki cazibesi, sahada robot destekli montajlarla desteklenmek istenmiştir. Sektörün belirli bölümlerinde kullanılan teknolojilerin yanında tüm bir binayı dijital olarak inşa etme denemeleri ilk olarak 1990'larda Japonya'da "Building Factories" adı altında denenmiştir. Sonrasında araştırma ve geliştirme yatırımları azaldıkça konu ilerletilememiştir (Tibaut ve diğ, 2014).

1999'da Avrupa'da "Future Home" isimli çalışma, AB, Japonya ve Kanada devlet destekli program olarak çalışılmaya başlamıştır. Çalışmanın amacı Avrupa için ulaşılabilir maliyetli, kaliteli konutlar üretmektir. Tasarımın ilk aşamalarından saha robotlarına kadar tüm süreçleri kapsayan bir çalışmadır. Prefabrik binaların – özellikle konutların- estetik dezavantajı göz önünde bulundurularak bu projede prefabrike modüllerin her konutta, gereksinime göre farklı bir araya getirilerek imalatı ön planda tutulmuştur (Balaguer, 2000). FutureHome "Entegre Yapım Otomasyonu" kullanarak modüler konutların kalitesi, esneklik -farklı iç ve dış mekân çözümlmelerine olanak tanıma- ve sahada robotik montaj olarak daha önceki modüler projelerde dezavantaj olarak bilinen üç temel konuya çözüm üretmiştir. Bu modüllerin otomatik tasarımı için AUTOMOD3 isimli planlama aracı geliştirilmiştir (Diez ve diğ, 2007). Çalışma 2002 yılında tamamlanmıştır (Neelamkavil, 2009).



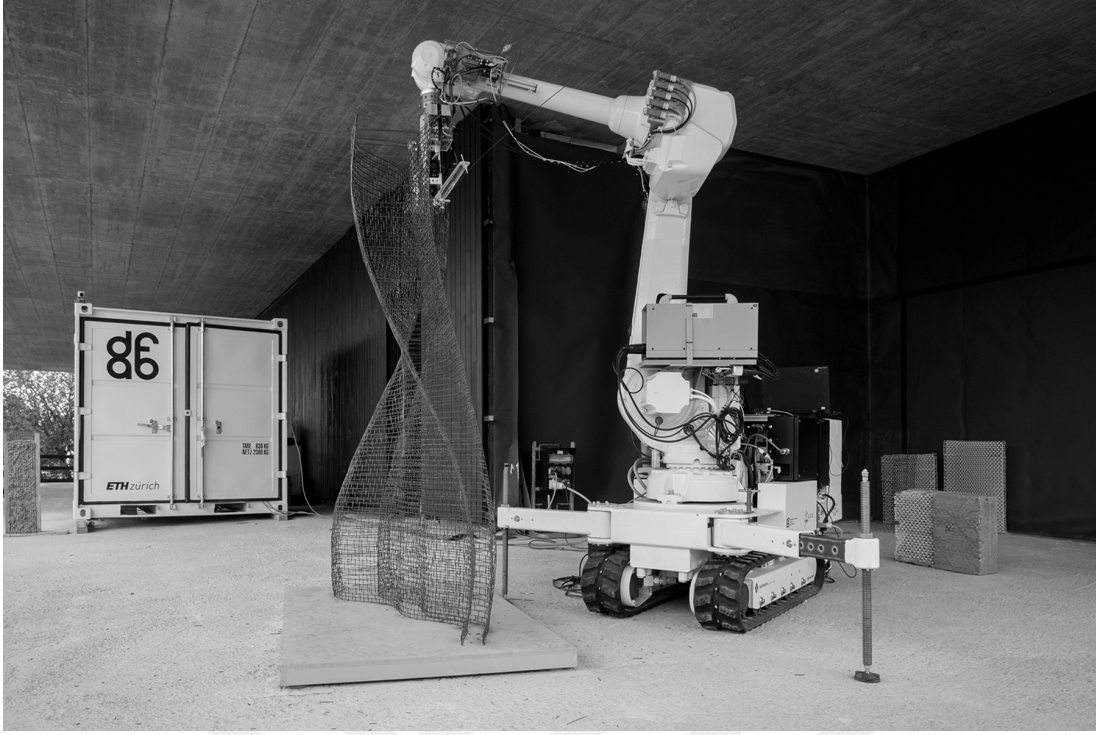
Şekil 4.1 : FutureHome robotik sistemi, (Balaguer, 2003).

Çalışmanın bu bölümünde günümüzde devam eden, çalışmanın daha önceki bölümlerinde belirlenen Endüstri 4.0 kapsamlı teknolojilerin inşaat sektöründeki uygulamaları incelenecektir.

ETH Zürich – “dfab”

ETH Zürich tarafından 2014 yılında kurulan “The National Centre of Competence in Research (NCCR) Digital Fabrication” araştırma kurumu dijital teknolojilerin mimariyle entegrasyonu konusunda çeşitli çalışmalar yürütmektedir. Dijital imalatın potansiyelini tam olarak kullanabilmek için dfab, altı disiplinle -Mimarlık, Yapısal Tasarım, Malzeme Bilimi, Bilgisayar Bilimleri, Kontrol Sistemleri Mühendisliği ve Robotik- yoğun bir işbirliği içerisinde. Eklemeli üretimden robotiğe farklı teknolojilerin inşaat sektörüne entegrasyonu konusunda çeşitli projeler üzerinde çalışmaktadırlar.

Bu projenin amacı, robotik imalatı sahaya getirmektir. Büyük ölçekli ve karmaşık imalatların yüksek doğruluk oranıyla imal edilmesini sağlayacaktır. Bununla birlikte, enformasyon içeriği projeden yapılmışa kadar genişletilebilir. Proje bir diğer dfab projesi olan MeshMould (robot kol yardımıyla örülen çelik hasır kalıp projesi) ile paralel yürütülmekte olup mevcudu geliştirmek ve bir yandan da yeni sürümün algoritmaları ve sistemi üzerine çalışmalar yürütülmektedir (Şekil 4.2).



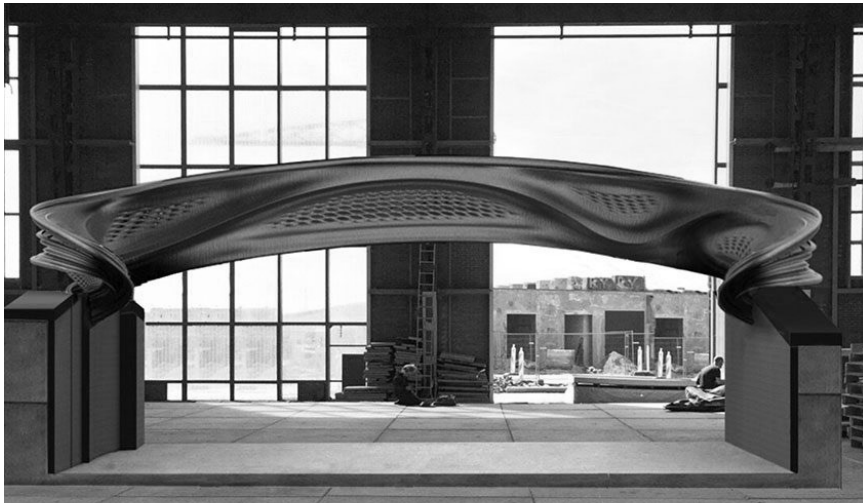
Şekil 4.2 : ETH Zürich MeshMould Robot Kol Örneği.

MX3D – MX3D Bridge

MX3D bir Hollandalı 3B baskı araştırma ve geliştirme “yenilikçi işletmesi” (startup). 2015 yılında Amsterdam’da bir kanal köprüsü için başladıkları proje, destek kullanmadan robot kollarla 3B baskı metal köprü imalatı üzerinedir (Şekil 4.3, Şekil 4.4).

(Linkten videoları izlenebilir

https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=pZNTzkAR1Ho).



Şekil 4.3 : Amsterdam’da 3B Baskı yöntemi ile imal edilen köprü projesi.



Şekil 4.4 : Robot kolla 3B Baskı yöntemi ile yapılan köprü projesi imalat test aşaması.

Projenin 2018 Haziran’ında bitirilmesi hedeflenmektedir. Firma endüstriyel robotlar geliştirip bunları kullanmak üzere yazılımlar üretmektedir. Köprü, geliştirdikleri çok akıllı 3B baskı yöntemlerini göstermek için iyi bir araç haline gelmiştir. Mimari tasarımı Joris Laarman Lab’da yapılan projede Arup statik müellif, ArcelorMillar metalurji danışmanı, Autodesk yazılım sponsoru, Heijmans yapım danışmanı, Lenovo donanım sponsoru, ABB robotik uzmanı, Air Liquide & Oerlikon kaynak uzmanı, Plymovent çalışanlar için temiz hava danışmanı, AMS ve TU Delft üniversitesi araştırma görevini üstlenmiştir.

SOM – Amie 1.0 Pavilion

AMIE 1.0 pavilyonu ABD Enerji Bakanlığı destekli bir proje olup SOM mimarlık ve Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı (ORNL) işbirliği ile gerçekleştirilmiş bir projedir. Proje 3B baskılı bir bina tasarımı ve bu binaya enerji desteği veren yine 3B baskılı araçtan oluşmaktadır. C formu modüllerin bir araya getirilmesinden oluşan binanın çatısı fotovoltaik panellerle kaplıdır (Şekil 4.5). Enerji verimliliği için en doğru form, şeffaflık/doluluk kombinasyonu belirlenen tasarımın doğrudan 3B baskı yöntemiyle basılması ile kendi enerjisini kendisi üretebilen ve bunu uzun süre koruyabilen bir

bina ortaya çıkmıştır. Bu durum geleneksel imalatların aksine gerektiği kadar malzeme kullanımını ve dolayısıyla sıfır atıkla bina yapımı fikrini desteklemektedir.



Şekil 4.5 : Pavilyon projesinin prekast modüllerinin bir araya getirilişi.

Proje, hızla gelişen ve şehirleşen dünyada temiz enerji kullanımının gelecekteki potansiyelini, çift yönlü kablosuz enerji teknolojisi ve yüksek performanslı malzeme kullanımı ile göstererek yoğun zamanlarda elektrik şebekesinden bağımsız olabileceğini kanıtlamaktadır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Elektrik ve su şebekelerinden bağımsız bir alana yerleştirilen pavilyon.

Projenin adı “enerji entegre eklemeli üretim” (The Additive Manufacturing Integrated Energy) kelimelerinin baş harflerinden gelmektedir.

4.4 BIM ve Diğer Teknolojilerin İşbirlikteliği

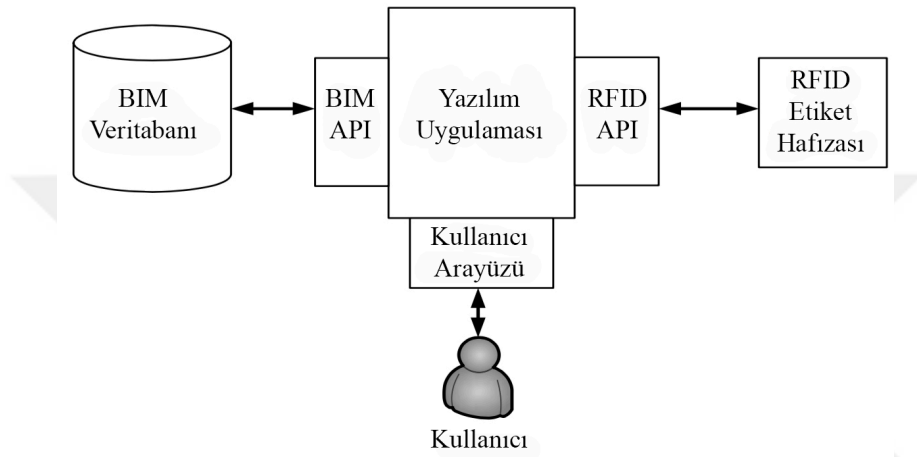
4.4.1 Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) ve BIM İşbirlikteliği

Bir inşaat projesinin yaşam döngüsü içerisinde farklı fazlarda farklı birçok enformasyonun kullanılması, alışverişi ve depolanması gerekir. Söz konusu enformasyon akışı, proje süreçlerinde faaliyetleri etkilemeden devam etmelidir. Proje sürecinin her aşamasında reele dönen her bileşenden gerçek zamanlı olarak enformasyon alabilmek her zaman pek mümkün olamaz. BIM teknolojisi inşaat sektöründeki iletişim verimsizliğine yönelik, Mimarlar, Mühendisler, Danışmanlar, Yükleniciler ve İşverenler (AECCO) için projeye ait enformasyonun tasarlanması, paylaşılması ve yönetilmesi için bir yöntem oluşturmaktadır. İnşaat projesi modeline yüklenen her enformasyon istenildiğinde farklı kullanıcılar tarafından farklı amaçlarla bir bilgisayar aracılığıyla ulaşılabilir olmaktadır. RFID teknolojisi ise inşaat sektörü için otomatik olarak veri toplama ve enformasyon saklama metodolojisi ortaya koymaktadır. RFID sistemi bir nevi otomatik tanımlama teknolojisidir. Bu tanımlamayı radyo dalgaları aracılığıyla yaparak öge hakkında veri toplanması, ögenin tanımlanması ve takip edilmesini sağlar. Bu sayede sahada yerini alan, içeriğinde gömülü ya da monte olarak RFID etiketini bulunduran her bileşen, gerçek zamanlı olarak, bileşene ait enformasyona ulaşım sağlar.

BIM ve RFID teknolojilerinin işbirliğinde önemli nokta BIM modeline enformasyonun çoğunluğu tasarım aşamasında yüklenir. RFID etiketleri ise enformasyon alınmak üzere belirlenmiş yapı bileşenlerinin türüne göre gömülü olacaksa, üretimi sırasında yerleştirilmektedir. Bu sebeple, sürecin ve alınmak istenen enformasyonun proje başlangıcı ve tasarım aşamasında iyi belirlenmesi gerekir. Yapı bileşenlerine yerleştirilecek RFID etiketleri birçok farklı amaç için yerleştirilebilir. Bu amaçlar; enerji performans ölçümü, CO2 salınımı, bileşen spesifikasyonları vb. olabilir.

Motemadi ve Hammad (2009) yapmış oldukları işbirliği önerisinde hedef bileşenler üretim sırasında veya üretimden hemen sonra etiketlenir ve zaman içerisinde belirli aralıklarla taranır. Tarama girişimleri, depolanan verilerin okunması veya verilerin

sistem gereksinimlerine ve taramanın yapıldığı aşamaya göre değiştirilmesi içindir. Taranan veriler, farklı yazılım uygulamalarına aktarılır ve bileşenlerle ilgili etkinlikleri yönetmek üzere işlenir. Şekil 4.7’de konsept iletişim şeması yer almaktadır. Genel yazılım uygulaması, okuyucu API'sini kullanarak RFID etiketleri ile iletişim kurar ve yaşam döngüsü verilerini merkezi bir BIM veritabanına / veritabanından alır. RFID'ye özgü bilgiler, ürün bilgilerinin bir parçası olarak tasarım aşamasında BIM veritabanına eklenir.



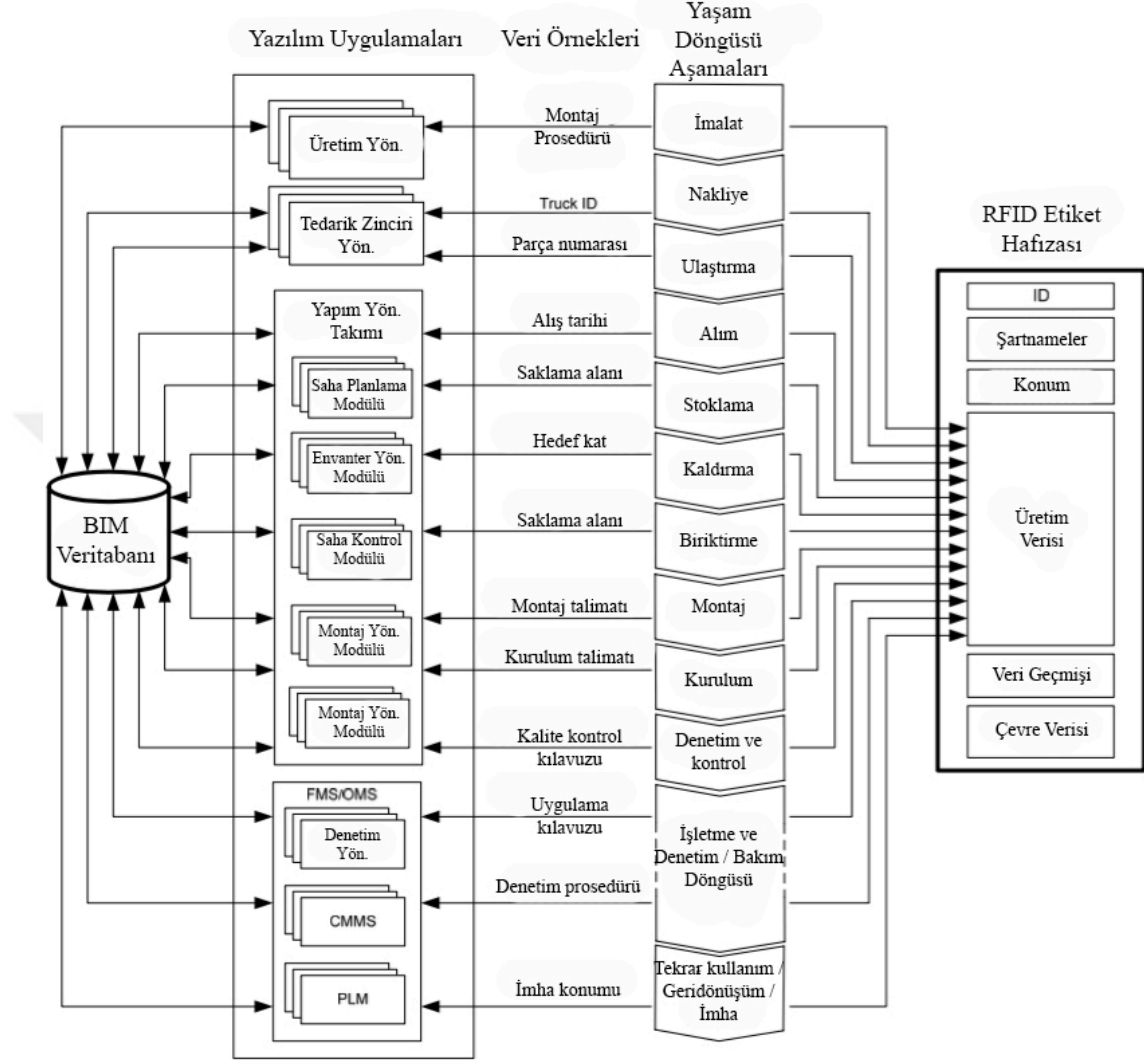
Şekil 4.7 : RFID ve BIM teknolojileri konsept işbirliği şeması.

Etiketler BIM veritabanının alt kümelerini içerir. Projenin yaşam döngüsü boyunca farklı aşamalarda çeşitli enformasyon BIM veritabanına yüklenir ve saklanırken, proje aşamasına göre farklı yazılım uygulamaları gerekli bilgileri veritabanından etiketler üzerindeki bellek alanına kopyalar. Bu şemada etiketlerin “kuruldu, üretildi, onaylandı, onay bekliyor” gibi projenin aşamasına ve gereksinimine göre şekilleneceği öngörülmüş. Her aşamaya göre veri örnekleri listelenmiş ve veriye ve aşamaya göre uygulama yazılımları belirlenmiş, bu işbirliği şemasından oluşacak sonuç ürün de “üretim verisi” adını almıştır (Şekil 4.8) (Motemadi ve Hammad, 2009).

Motemadi ve Hammad (2009) yapmış oldukları araştırmanın sonucunda RFID ve BIM teknolojilerinin işbirliğinde ön plana çıkan zorlukları belirlemişlerdir. Bunlardan inşaat sektörü ve tez ile ilgili maddeler aşağıda listelenmiştir:

- i. Radyo frekanslarının materyallerin manyetik dalgalarından ve özelliklerinden etkilenmesi,
- ii. Etiketler konusunda tamamlanmış ve uluslararası standartların bulunmayışı,

- iii. Altyapı ve etiketlerin yatırım maliyetleri,
- iv. İnşaat sektörüne yönelik, zor iklimlerde yer alan projelerde etiketlerin sağlamlığı ve dayanıklılığı.



Şekil 4.8 : Proje süreçleri bağlamında BIM veritabanı ve veri etiketleri (Motemadi ve Hammad, 2009).

RFID etiketlerinin bir diğer dezavantajı metal malzemeler içeren yapı bileşenlerinde etiketlerin okunmasında karşılaşılan zorluklardır, bu inşaat sektöründe kullanılan metal ya da metal içerikli malzeme yoğunluğu göz önüne alındığında önemli bir engeldir (Mo ve Zhang, 2007).

RFID ve BIM işbirliği konusunda yapılan diğer çalışmalar RFID etiketlerinin BIM modellerine entegre olması, BIM modellerinin de Artırılmış Gerçeklik teknolojisiyle entegre olması yoluyla inşaat ilerlemesini gerçek zamanlı olarak görselleştirmek ve farklı bileşenleri izlemek için kullanılabileceği öne sürülmüştür (Wang ve diğ, 2013).

Diğer araştırmalarda yer alan bilgiye göre RFID teknolojisi daha kesin ve eksiksiz BIM modelleri oluşturmak için kullanılmıştır. Özellikle, gerçek zamanlı konum ve kullanıcıların BIM modellerinde izlenmesi gibi konumlandırma görevleri için kullanılmıştır (Costin ve diğ., 2014, Guo ve diğ., 2014).

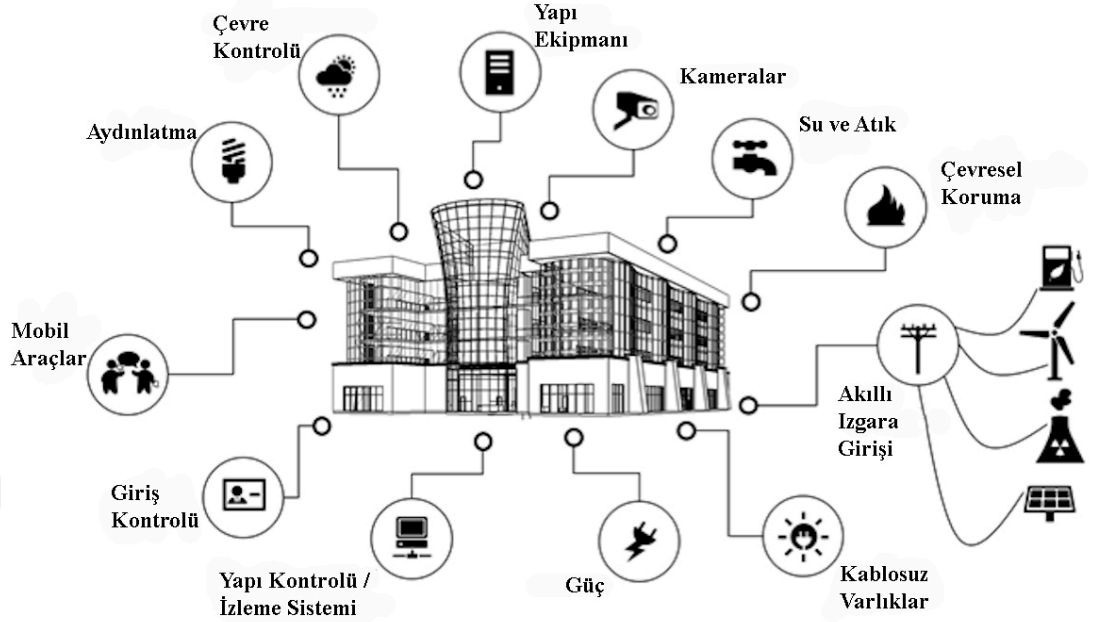
4.4.2 Nesnelerin İnterneti ve BIM İşbirlikteliği

Nesnelerin İnterneti teknolojisi nesnelere bağlı sensörler aracılığıyla bu sensörlerin aldığı verilerin ilgili yerlere ulaştırılması ve değerlendirilmesi konseptini içerir. Bu konsept bir yapı bünyesinde incelendiğinde yapı malzemelerinin bileşenlerinden bir yapının yaşam döngüsü içerisindeki süreçlerine kadar kapsayabilir bir teknolojidir (Şekil 4.9).

BIM modelleri bir yapının proje aşamasından işletmesine kadar yaşam döngüsü içerisindeki enformasyonun doğru şekilde kullanılmasını ve saklanmasını hedefler. Bu iki teknoloji ortak olarak değerlendirildiğinde, ortak noktaları projenin yaşam döngüsünü kapsamasıdır. Tasarım aşamasından itibaren BIM teknolojisi ile yürütülen projelerin daha verimli hale gelebilmesi için Nesnelerin İnterneti verileri kullanılabilir. Örneğin proje alanında yer alacak sensörler –bunlar ışık, gürültü, hava şartları, rüzgâr, toz, kirlilik gibi veriler olabilir-, alana ait projenin tasarımında tasarım kriterlerine dâhil edilebilecek verileri doğru şekilde alarak değerlendirilmesini sağlayabilir. Proje alanından alınabilecek rüzgâr, deprem verileri, projenin tasarımının test edilmesini sağlayacak simülasyonlar ve testlerde kullanılabilir. Günümüzde kullanılan simülasyon verilerinin sensörler aracılığıyla alınan en doğru halini oluşturacaktır. Bu veriler enerji verimliliği testlerinde de doğru bilgiyle fayda sağlayacaktır.

Nesnelerin İnterneti, projenin ilerleyen süreçlerinde yapım kontrolü aşamasında iş güvenliği gibi inşaat sektörünün zayıf noktalarından birinde de fayda sağlayacaktır. BIM modelleri üçüncü boyuttan dördüncü boyuta geçtiğinde yapım süreçlerinin planlanması aşamasında belirlenecek sahada kullanılacak ekipmanın bu teknolojiye faydalanması ve daha verimli kullanılabilmesi sağlanacaktır. Vinçlerde yer alacak sensörler kontrol sürecini otomatize edecektir. Yapı malzemelerinin doğru ve eksiksiz gelmesi ve kullanılması için malzemelerde bulunacak sensörlerden faydalanılabilir. BIM modeli üzerinden dijital olarak BIM'in tüm boyutlarıyla

kontrol edilebilen model, Nesnelerin İnterneti aracılığıyla doğrudan sahadan veri alabilir konuma gelecektir. Böylelikle hatalı imalatlar azaltılabilir.



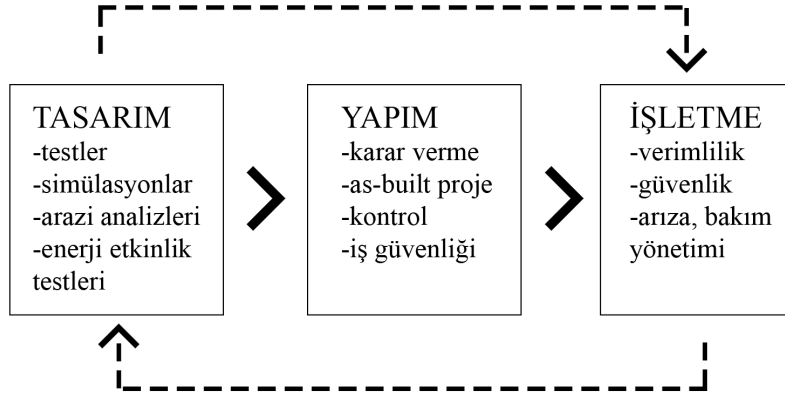
Şekil 4.9 : BIM teknolojisi ile yürütülen bir yapının yaşam döngüsünde Nesnelerin İnterneti teknolojisi kullanımı. Kaynak: <https://fmsystems.com/blog/does-bim-have-a-role-in-the-internet-of-things/>

Yapım aşaması tamamlanan projelerde gerçek hayattaki inşaatları yönlendirmek için kullanılan bilgisayar modelleri, inşa edilmiş binalara yerleştirilen sensörler tarafından güncellenebilir. Sensörler, iklim değişiminden ve zamanın geçmesinden bu malzemelerin etkilenme biçimi hakkında bilgi gönderebilirler. Çatıda enerji verimliliğinde olası değişiklikler, yeryüzünde titreşim olduğunda yapıların nasıl davranılacağı veya bir köprünün trafik akışının ağırlığı altında nasıl büküldüğü hakkında bilgi sağlayabilirler (Burger, 2016). Nesnelerin İnterneti sensörlerinden gelecek veriler BIM modellerine işlenebilir. Bu aşamada işletme süresince alınacak veriler doğrultusunda enerji verimlilik modelleri oluşturulabilir, ısı değişimleri, insan hareketleri gibi veriler kullanılabilir. Yaşayan projelerden alınacak veriler gelecek projeler için kaynak veri oluşturacaktır (Jacqui Levy, IBM, Şubat, 2017). Veri dönüşleri aracılığıyla BIM teknolojisini kullanıldığı projelerde yer alan enformasyon, projenin yaşam döngüsü içerisinde daha doğru ve anlamlı hale gelecektir.

Siemens, Mitsubishi gibi markaların üretmeye başladıkları entegre sensörlü ürünler bu süreci hızlandırmaktadır. Özellikle bina içi teknik ekipmanlarda yaşanabilecek arıza ve problemler, arıza meydana gelmeden önce giderilebilecek, ekipmanın

temizlik ve bakımı zamanında yapılabilecektir. Tüm sistem dijital olarak işletmesi yapılan bina modeli içerisinde ilgili ekipmanın uyarı vermesiyle kontrol edilebilir duruma gelecektir.

Bina cephesinde kullanılan kaplamasının eskime dayanımları da dijital olarak gözlemlenebilecektir. Bu veriler malzeme firmalarının ürün geliştirmesinde önemli bir kaynak olacaktır.



Şekil 4.10 : Nesnelerin İnterneti ve BIM teknolojileri birlikteliği proje yaşam döngüsüne katkısı.

BIM ve Nesnelerin İnterneti işbirlikteliği yapı verimliliği ve performansını artırmaya yönelik projenin tüm süreçlerinde fayda sağlayacağı görülmektedir (Şekil 4.10). Bu şekilde tüm sistemin otomatikleştirilmesi, dijital olarak, gerçek verilerle kontrol edilmesi ve yönetimi sağlanabilir. Bu işbirlikteliğinde karşılıklı alış-veriş söz konusudur (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : IoT ve BIM teknolojisi karşılıklı alışverişi.

BIM projesinde yer alan elemanlar LOD seviyesi ne olursa olsun, IFC gibi ortak bir formata dönüştüğünde çeşitli yazılımlar tarafından geometri ve enformasyon olarak okunacaktır. Bu enformasyon Nesnelerin İnterneti sensörleri ile iletişim halinde olacaktır.

Nesnelerin İnterneti ve BIM işbirlikteliği, Nesnelerin İnterneti kavramının tekil bir nesne ölçeğinden tüm binayı ve hatta şehri birbirine bağlayan yapısını desteklemektedir. Nesnelerin İnterneti ile akıllı hale getirilecek şehirleri, akıllı binalar, yollar, trafik lambaları oluşturacaktır. BIM’le dijital veriyi işletme

döneminde geliştiren ve kullanan binalar işletme yönetiminin dijitalleştirilmesini destekleyecektir. İşletme yönetimi için bu işbirlikteliğinin Bulut Sistem Entegre İşyeri Yönetim Sistemi (Cloud-based Integrated Workplace Management System – IWMS) ile desteklenmesi gerekmektedir (Haines, 2016). Bu noktada karşılaşılabilecek problemler siber-güvenlik sorunlarıdır. Güvenlik Nesnelerin İnterneti teknolojisi için çözölmesi gereken konulardan biridir (Macaulay, 2017).

4.4.3 Modularizasyon ve BIM İşbirlikteliğı

Endüstri 4.0'ın bir başka konsepti olan modularizasyon, genel anlamıyla yapım sahası dışında, çoğunlukla bir fabrikada imal edilen, yapım alanına nakledilen ve vinçler ve çeşitli ekipman yardımıyla montajı yapılan büyük yapı elemanlarının imalatını kapsar. Prefabrikasyon, atık ve maliyeti düşürerek kalite ve iş güvenliğı artırmaktadır. Ayrıca yapının sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır (Hon ve diğ, 2016).

Business Value of BIM SmartMarket Report (2009) raporuna göre, BIM modularizasyon ve prefabrikasyonun kullanımına olanak sağlamaktadır, bu da şantiye verimliliğini ve yatırımın getirisini artırmaktadır. Rapor anketine katılan yüklenicilerin %77'si BIM'in gelecekte daha büyük, daha karmaşık projelerde prefabrikasyon kullanımına olanak tanıyacağını düşünölmektedir (McGrew Hill Construction Smart Market Report, 2011).

BIM ve prefabrikasyonun ayrı ayrı inşaat sektörü verimliliğini artırmaya yönelik katkıları vardır. İşbirlikteliğı olarak bakıldığında BIM prefabrikasyon teknolojisine faydalı yönlerini dâhil edecektir. Bunlar programlama, tasarım ve bilgi saklama ve sunum yetenekleri, organizasyonel, stratejik ve operasyonel avantajları olarak tanımlanabilir (Ezcan ve diğ, 2013).

Ezcan ve diğeri, saha dışı imalatın literatürde yer alan dezavantajlarını ve bu dezavantajlara yönelik BIM'in sunabileceğı avantajları şekil 4.12'de belirtilen tabloda bir araya getirmişlerdir. Bu tabloya göre prefabrikasyonun dezavantajları; Bilişim Teknolojileri'yle entegrasyon gereksinimi, kötü ün, kısıtlı deneyim, tadilat zorlukları, nakliye zorlukları, uzun hazırlık süreçleri, yüksek maliyet, estetik seviyesinin düşüklüğü olarak belirlenmiştir (Ezcan ve diğ, 2012).

BIM Faydaları	Optimize edilmiş listeler	Düşen Maliyetler	Tasarımın İyileştirilmesi	Daha iyi çalışma	Daha iyi işbirliği	Daha iyi lojistik	Düşen tadarım hataları	Tutarlı ve kapsamlı enformasyon	Daha az revizyon
Prefabrikasyon Bariyerleri									
Bilgi teknolojileri ile bütünleşme ihtiyacı					●			●	
Kötü ün	●	●	●						
Sınırlı deneyim				●	●				●
Revizyon Zorlukları			●				●	●	●
Ulaşım problemleri	●		●			●			
Uzun giriş zamanları	●		●		●	●	●	●	
Yüksek maliyetler		●	●		●	●	●		●
Düşük estetik			●					●	

Şekil 4.12 : Saha dışı imalat ve BIM faydaları (Ezcan ve diğ, 2012).

Prefabrikasyonun Bilişim Teknolojileri'yle entegrasyon gereksinimini BIM, paydaşlar arası işbirliğini ve birlikte çalışabilirliği artırması ve doğru ve geniş kapsamlı enformasyon içeriği ile karşılayabilir durumdadır. Prefabrikasyonda kötü ün, 1960-70'li yıllarda savaş sonrası yapılan çalışmalardan kaynaklanmaktadır. BIM'le birlikte sosyal medya, simülasyon gereçleri gibi teknolojilerle de kullanılarak modern ve inovatif bir bakış açısı sağlanabilir. Prefabrikasyonda kısıtlı deneyimin olması, geleneksel yöntemlerin fazla tercih edilmesinden kaynaklanmaktadır. BIM'in çalışma ortamı ve iletişimde daha iyi ortamlar sunması ve değişikliği azaltması bu konudaki çalışmaları destekleyecektir. BIM'in yapım öncesi bir yapım simülasyonu olarak ilerleyen tasarım süreci prefabrikasyonun optimizasyonunu sağlayacaktır. Tadilat gereklilikleri genellikle yapım öncesi öngörülemeyen problemlerden kaynaklıdır. Prefabrike yapı elemanlarının ise tadilatı demek çoğunlukla yapı elemanının yeniden üretimi demektir. BIM modelleri çakışma analizleri ve sanal

prototipleme olması sebebiyle değişiklik gerekliliğini dūřürmektedir. Büyük bileşenlerin nakliye problemlerine yönelik BIM'in gerėekėi dijital veri ve bileşenlerle tasarım olanağı sunması ile tasarım aşamasında ön hazırlığı yapılabilir. 4B, 5B BIM modelleri ile süre ve maliyet tahminleri, faz planlama ile nakliye konusunda özümleer üretmek mümkündür. Uzun hazırlık süreleri için BIM'in entegre ilerleyen süreçleri ile proje süreci paralelinde prefabrikasyon hazırlık süreçleri ilerleyebilir. Yüksek maliyetler konusunda BIM'in iletişim yeteneği ile hata öngörülerini, değişikliğin azalması, tasarım sürecinin optimizasyonu, yapım sürecinin doğru ve gerėekėi planlanabilmesi Prefabrikasyonun yüksek maliyetlerine de optimizasyon sağlayacaktır. Estetik yönün zayıf olması BIM'in algoritmik tasarıma açık olması ve verilerin doğrudan imalata aktarılabilir olması tasarım yönünü kuvvetlendirecektir.



şekil 4.13 : İsviçre'de The Monte Rosa Hut Projesi.

BIM ve prefabrikasyon işbirliğine yönelik bir örnekle olan The Monte Rosa Hut projesi İsviçre'de Alp Dağları'nda ıssız bir konumda yer almaktadır (şekil 4.13). Proje ETH öğrencileri, İsviğreli tasarım ofisi Bearth & Deplazes Architekten ve Monte Rosa Fakóltesi tarafından tasarlanmıştır. Projenin yapım amacı Alp dağlarında dağcılık ve çeşitli sporlar yapan geziciler için konaklama ve dinlenme alanı oluşturmak ve aynı zamanda ETH Züriė öğrencileri için çevreci ve yenilikėi proje tasarımında deneyim sahibi olmalarını sağlamaktır.

Proje tasarım ve yapım yeteneklerini zorlayabilmek adına tamamen irrasyonel olup geleneksel yöntemlerle imalatı yapılamayacak şekilde tasarlanmıştır. Ek olarak proje alanında herhangi bir ulaşım, su, elektrik kaynağı bulunmamaktadır. Bu koşullarla kendi enerjisini üretebilen, su gereksinimini karşılayabilen mühendislik çözümlerine tamamen prefabrike elemanlardan oluşmak üzere tasarlanmış mimari çözümler eşlik etmektedir. 420 farklı duvar ve döşeme parçası sahada bir araya getirilip montajı yapılmıştır. BIM projenin tüm yaşam döngüsünde bir “dijital zincir” oluşturmak üzere kullanılmıştır. Projenin sonucunda kullanılan dijital zincir, yapı elemanları ve maliyette %30 ve yapı ağırlığında %40 tasarruf sağlamıştır (<https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/vectorworks-inc/sustainability-modular-design-and-bim/2/>).

BIM ve prefabrikasyon teknolojilerinin entegre bir şekilde iş birliği içerisinde olması zorlu hava ve çevre koşullarında yapım sürecini minimuma indirebilmektedir. Yapım süreci yalnızca montaj işleminden oluşabilmektedir. Bu iki teknolojiye imalat ve montaja yönelik 3B yazıcı, robotik, gömülü sensörler, RFID etiketleri eşlik edebilir.

4.4.4 Robotik ve BIM

BIM teknolojisinde yapılan araştırmalar ve çalışmalar incelendiğinde, BIM’in robotik ve otomasyon konusuyla çok fazla birlikte değerlendirilmediği görülmektedir. Şimdiye kadar yapılan BIM uygulamaları fabrikasyon ve yapıma/imalata değil, çoğunlukla proje planlama üzerine yönelmiştir (McGrew Hill Construction, Technical Report, 2014). BIM’in fabrikasyona veya üretim için kullanılmasına yönelik Japonya ve Çin’de birkaç tane örnek bulunmaktadır (Yamazaki ve diğ, 2014).

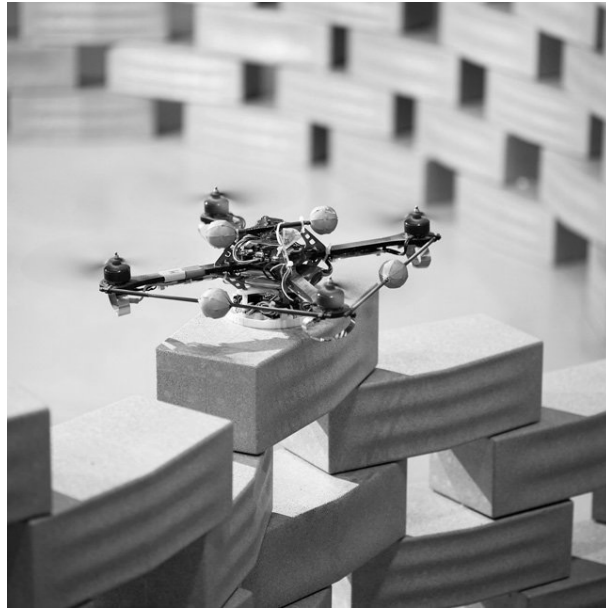
BIM teknolojisi ile yürütülen projeler doğası gereği, projenin yaşam döngüsü içerisinde yapım aşamasında da paydaşlar arası iletişimi yüksek seviyede tutmaktadır. Bununla birlikte BIM, sadece mimari üretimde önemli zaman ve maliyet tasarrufları sağlamakla kalmaz, aynı zamanda dijital tasarım verilerini doğrudan imalat sürecine bağlama yetenekleriyle, çok karmaşık yapı bileşenlerini tam ölçekte verimli bir şekilde yapılandırmayı da sağlamaktadır (Helm ve diğ, 2014).

Schlette ve Rossman yapmış oldukları çalışmanın bir aşamasında, inşaat sektöründe robotik çalışmalarının desteklenmesine yönelik sanal test ortamları oluşturmayı

önermişlerdir. Bu test ortamları, robotların test edilebilmesine yönelik gerçekçi veri ile simülasyonlar oluşturulmasına dayalıdır. Ortamların oluşturulmasında kaynak veri, BIM ve CityGML teknolojilerinden doğru, gerçekçi ve mekânsal-zamansal niteliklere sahip verileri alacaktır (Schlette ve Rossman, 2017). BIM teknolojisi bina ölçeğinde doğru enformasyonu getirirken CityGML arazi boyutunu simülasyona taşımaktadır. Bu projenin küçük ölçekli bir örneği Kajima firmasının saha planlamasında BIM teknolojisi ile yürütülen projelerin kullanılmasıyla örneklenebilir.

İnşaat sahasında robotik kullanımı, mobil robotlar, robot kollar, otomatize vinçler, dronelar, 3B baskı için kullanılabilecek büyük ölçekli robotlar olarak çeşitlendirilebilir.

Dronelar, birkaç inşaat firması tarafından, ilerleme raporları, şantiye gözetimi, teslimlerin gözetimi için etüt etme ve imaj toplama için ya da otomatize edilmiş buldozerler tarafından sahanın taranması, taranan verinin bilgisayarda modelde kontrolü ve yeni görevinin belirlenmesinin geliştirilmesinde kullanılmakta ve geliştirilmektedir (J. Wakefield, 2016). Gramazio Kohler Araştırma Merkezi'nin de "dört pervaneli robot helikopter" (Quadcopter) üzerinde çalışmaları bulunmaktadır (Şekil 4.14). Bu drone'lar tuğla taşımak ve koordinatlı yerine yerleştirmek üzere tasarlanmıştır.



Şekil 4.14 : Gramazio Kohler Araştırma Merkezi, Quadrokopter.

ETH Zürich 2013 yılında okul bünyesinde Institut of Technology in Architecture binasının çatısı için yine kendi ekipleri tarafından bir proje geliştirmişlerdir. BIM ile tasarlanan projede çatı bölümü ahşap, serbest form bir tasarıma sahiptir. Çatının imalatı için İsvi reli ahşap firması ERNE Holzbau ile anlaşmışlar ve bu süreci bir Ar&Ge olarak değerlendirmişlerdir. Çatının büyüklüğü sebebiyle açıklığın geçilmesi konusunda ahşap kirişlerde özel bir yöntem tasarlanmıştır. Toplamda 48,624 adet ahşap parça 7 akslı bir robot aracılığıyla bir araya getirilmiş ve kirişler prefabrike olarak üretilmiştir (şekil 4.15).

Kirişleri bir araya getiren kızaklı robot, doğrudan 3B model üzerinden okuyup kontrol ederek küçük parçaları bir araya getirmektedir. Mimari proje Rhino üzerinden hazırlanıp mühendislere aktarılmaktadır, mühendisler kirişler için çivi yerleri içeren detaylı modeli hazırlamaktadır, ERNE modeli Solibri Model Checker ile kontrol edilmektedir ve model BTL arayüzü ile doğrudan robota aktarılmaktadır.

Mimarlık mühendislik programlarının robotik   z leme arayüzlerine aktarılabilmesi için çeşitli firmalar yazılımlar üretmektedir. Örneğin  elik mühendislik   z lemelerinde kullanılan Tekla Structures, Trimble Robotic Total Solutions ile işbirliği için çalışmalar yürütmüş ve LM80 arayüzünü geliştirmişlerdir. Bunun gibi   z lemeleri dijital üretim teknolojilerini benimseyen bir a  inşaat firması kendi içerisinde geliştirmektedir. Örneğin Skanska inşaat firmasının kendine ait Robotic Total Solutions yazılımı bulunmaktadır.

İsveç merkezli büyük bir firma olan Skanska, 90'lı yılların başından beri robotik ve diğer teknolojiler konusunda aktif olarak çalışmalar yürütmekte ve kullanmaktadır. Skanska Norveç, BIM teknolojisi ile yürütülen projelerle paralel çalışabilen sondaj robotları kullanılmaktadır. Skanska İsveç 90'larda geliştirdiği beton kazık robotlarını BIM çözümleriyle destekleyerek kullanmaktadır.

Mobil robotların BIM işbirlikteliğinin desteklenmesi  rneği olarak Leica firmasına ait iCON robotunu gösterebiliriz. iCON robotu BIM teknolojisi ile yürütülen projelerden veri alabilen ve projelere veri aktarabilen bir takometre (total station) robotudur. Robot tarama verileri, as-built kontrolü, yer belirleme, seviye belirleme gibi birçok farklı amaç için kullanılabilir. Aşağıdaki linkte detaylı bir video anlatımı mevcuttur.

<https://www.youtube.com/watch?v=-IZmva2QCqA>



Şekil 4.15 : 7 akslı robot yardımıyla üretilen kirişler.

Robotik örneklerden de görüldüğü üzere, yapım sürecinde birçok farklı aşamada farklı katkılar sağlayabilmektedir. BIM ile işbirliği bu noktada dijital tasarımın dijital üretilmesi olarak ele alınabilir. Bu işbirliği üzerinde özellikle veri akışı konusunda çalışmaların yoğunlaşması gerektiği görülmektedir.

4.4.5 Simülasyonlar ve BIM

BIM teknolojisi ile yürütülen projeler, enformasyon içeriği yüksek, koordineli dijital modellerdir. Bu dijital modeller bir yapının geometrik, fiziksel ve fiziksel olmayan karakteristik özelliklerine ait enformasyonu içerir. Zengin içerikli modeller simülasyon gereçleri, AR, VR, MR gibi teknolojiler için uygun altlık veri oluşturur. AR teknolojisi, bu dijital veriyi gerçek dünya verileriyle birleştirerek sunar.

BIM verisini altlık olarak alan AR teknolojisi ile proje yaşam döngüsü içerisinde pek çok alanda verimlilik sağlanabilir. Eğitimden saha yönetimine kadar sektör içinde ve proje yaşam döngüsünde fayda sağlayacağına yönelik araştırmalar ve öneriler mevcuttur. Bu önerilerden bazıları;

- AR ve BIM işbirlikteliği hata/kusur (defect) yönetimi için kullanılabilir (Park ve diğ, 2013).
- Saha ile gerçek zamanlı iletişim kurulabilir (Wang ve diğ, 2013).
- Tasarım ve mühendislik eğitimlerinde kullanılabilir (Fonseca ve diğ, 2013).
- Yapı tasarımı (Imaizumi, 2017).
- Yapım planlaması (Lin ve diğ, 2015).
- İş güvenliği iyileştirmeleri (Bhoir ve Esmaceli, 2015).

AR teknolojisi ile BIM modeli sanal olarak arazi konumu üzerinde incelenebilir, deneyimlenebilir. Bu özelliği tasarıma katkı sağlamaktadır. Projenin ilerleyen aşamalarında saha kontrolünde, hatalı imalat yapıp yapılmadığı, projenin ölçekli olarak bakılan imalatla olması gerektiği gibi görülmesi ile hem daha iyi anlaşılabilir hem de anlatılabilir olmaktadır. Örneğin tesisat kesişimleri hata yapılmadan önce öngörülebilir ve engellenebilir.

İşletme yönetiminde kullanımı farklı yönlerden fayda sağlayabilir. Örneğin sonradan yapılacak bir tadilat ya da yeni imalat durumunda, tadilatın yapılacağı bölgede hangi tesisatın geçtiği ve nerelerde olduğu gözlemlenebilir ve buna uygun olarak tesisata hasar vermeden tadilatı gerçekleştirmek mümkün olacaktır. Bu teknoloji sık sık konsept değişikliği yapılan otel, mağaza projeleri için önemli bir fayda sağlayacaktır. Fakat teknolojinin kullanılabilmesi için BIM modelinin sahada proje kapanışında yapıldığı-gibi-imalatların doğru bir şekilde projeye işlenmiş olması gerekir.

AR teknolojisi BIM modelinin doğruluğuna güvenir. Projenin herhangi bir aşamasında kullanılması ve faydalı olabilmesi için her zaman doğru enformasyonu içeren BIM modelinin olması gerekir. Gerçek ve doğru veri önemli bir kaynaktır.

AR gibi sanal gerçeklik teknolojilerinin kullanılması, tablet ve bilgisayar dışında İnternet bağlantısı olan giyilebilir teknolojiler olarak nitelendirilen akıllı gözlüklerle kullanılabilir. İnşaat sektörüne yönelik bu teknolojiyi geliştiren “akıllı baret” örneği olarak Daqri firmasına ait “Smart HelmetTM” ürünü bulunmaktadır (Şekil 4.16). Google Glass ürününden duymaya alışık olduğumuz akıllı gözlük kavramını baretle birleştiren bu teknoloji, sahada bakıldığı alanda BIM projesinden okuduğu teknik ya da tasarım verilerini sanal olarak görebilmeyi sağlamaktadır. Bu görsel üzerinden neyin görülmek istendiği ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.16 : Daqri firmasına ait “Smart Helmet™” ürünü.

Akıllı gözlükler ya da tabletler ile kullanılan AR teknolojisi, projede kullanılan yapı bileşenleri üzerinde RFID etiketleri gibi Nesnelerin İnterneti teknolojisine hizmet edecek sensörler, vericiler bulunması durumunda çok daha fazla fayda sağlanabilmektedir. İmalat sırasında ortamın ısı, nem, basınç gibi değerlerine bağlı olarak uygun imalat ortamının sağlanması ile örneklenebilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde AR ve BIM teknolojisi işbirlikteliği, operasyon giderleri, saha ziyaretlerinin sıklığı, hata ve kusurların yapılmasını azaltırken, saha mobilizasyonu iyileştirmeleri, işletme ve onarımda verimlilik, kurumsal verilerin bilgilerin tutulması, iş güvenliği ve risk algısının artırılması, işbirliği ve iletişimin artması, gerekli ve önemli bilgiye yerinde ulaşma olanağı sağlamaktadır.



5. DİJİTAL ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE BIM BİRLİKTELİĞİ DEĞERLENDİRMESİNE İLİŞKİN KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde, BIM teknolojisinin dijital üretimdeki yeri ve teknoloji birlikteliğinin etki ve sonuçları yer almaktadır. Dijital üretimde BIM teknolojisinin rolü belirlenmiş ve bu rol doğrultusunda dijital üretim teknolojileriyle BIM'in birlikte çalışabilirliğinin değerlendirilebilmesi için kavramsal bir çerçeve oluşturulmuştur. Oluşturulan kavramsal çerçeve kapsamında, BIM teknolojisi ile yürütülen inşaat projesi süreçlerinde yararlanılabilecek dijital üretim teknolojileri önerileri yapılmıştır. BIM ve dijital üretim birlikteliğinin süreçlere ve paydaşlara olan etkileri değerlendirilmiştir. Proje teslim sistemlerinde sürece ve paydaşlara uygun olacak proje teslim sistemi önerisi yapılmıştır. 2. Bölüm'de belirlenen BIM teknolojisi özellikleri üzerinden teknoloji birliktelikleri değerlendirilmiş ve bu özelliklerin fayda ve zorlukları belirlenmiştir. Son olarak süreç bazında yapılan öneriler, proje yönetimi açısından kısaca değerlendirilmiştir.

5.1 BIM'in Dijital Üretimdeki Rolü

BIM teknolojisi ile yürütülen inşaat projelerinde olgunluk seviyelerinde 2. seviyeden sonra geçilecek 3. seviye, BIM'i merkeze alan entegre ağ sistemlerini hedeflemektedir. BIM teknolojisi ile yürütülen 3. seviyedeki projeler, tamamen entegre olduğundan "iBIM" bir başka deyişle, "Integrated BIM" olarak adlandırılmaktadır. BIM teknolojisi ile yürütülen inşaat projelerinin öngörülen son seviyesi olan bu seviyede BIM'in tüm boyutlarıyla, işbirliğine olanak tanıyan bir model sunucusunda (model server), IFC standartlarıyla uyumlu bir web servisinden etkin bir şekilde kullanılacağı ve açık üretim süreci ve veri entegrasyonu ile kullanılacağı öngörülmektedir. 3. seviye inşaat sektöründe tam anlamıyla birlikte çalışan dijital üretim sistemleri için gerekli seviyedir (Tibaut ve diğ, 2016). BIM'in diğer dijital üretim teknolojileriyle entegrasyonu, verimli ve doğru bir şekilde

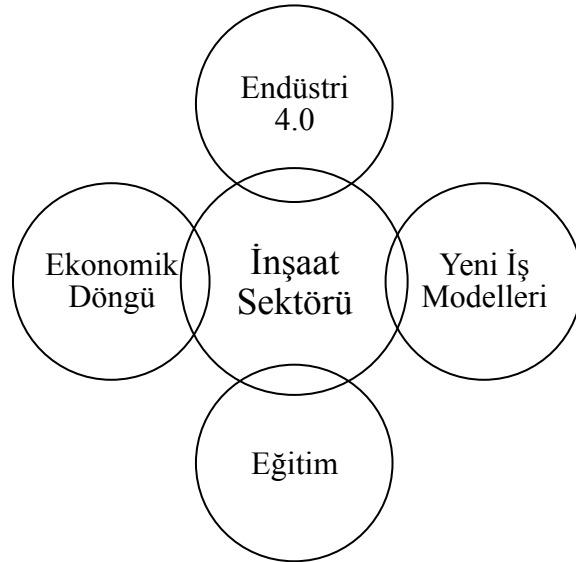
işbirlikteliği sağlaması, BIM 3. olgunluk seviyesine geçiş çalışmaları arasında değerlendirilmesi gereken bir konudur.

İnşaat sektörünün karakteristiğini ve özelliğini belirleyen problem ve zorluklar şunlardır (Mirzaee ve Motamede, 2013):

- Tasarım ve yapım ekipleri arasında karşılıklı etkileşimin olmaması
- Sektörde kısa vadeli düşünme süreleri
- Yapımda tamamlanmamış tasarım enformasyonu
- Yapım sürecinde zayıf yönetim

İnşaat sektörünün karakteristik zorluklarına yönelik tüm sektör paydaşlarını kapsayan iki adet yaklaşım sunulmuştur (BorjeGhaleh ve Sardoud, 2016). Bunlardan biri modularizasyon ve prefabrikasyon diğeri ise BIM'dir.

BIM, yalnızca büyük ölçekli yapım projeleri için değil, küçük ölçekli yapı bileşenleri için de değerlendirilmelidir. Örneğin modüler bir merdiven projesi BIM olarak çalışılmış ve İngiltere'de bir otobüs durağına monte edilmiştir (Buildoffsite, 2011). Modularizasyonu ön plana çıkaran bu sistem, BIM ve diğer teknoloji işbirlikteliğini desteklemektedir. Doğru işbirlikteliği yapım süreçlerinde hız ve kaliteyi artıracaktır.



Şekil 5.1 : İnşaat sektörü dijital üretim teknolojilerine adaptasyonunda dört adet bileşen önerisi.

İnşaat sektöründe verimliliğin artırılabilmesi için, gelişen dünyada endüstrileşmeden ve gelişen teknolojilerden pay alması gerekmektedir. Bu amaçla inşaat sektörünü merkeze alan dört temel bileşenli bir öneri yapılmıştır (Şekil 5.1). İnşaat sektörünün tüm bu bileşenlerden sürekli olarak karşılıklı alışverişi koruyarak pay alması gerekmektedir. Eğitim bu bileşenlerden en önemlisidir. Tüm süreci kapsayan eğitim, mimarlık, mühendislik eğitimlerinden saha eğitimlerini, işveren eğitimlerini kapsamaktadır. Teknolojilerin en önemli özelliği olan sürekli gelişimin korunması için eğitim inşaat şirketlerinde Ar&Ge departmanlarıyla sürekli devam etmelidir.

BIM'in inşaat sektörünün endüstrileşmesi ve teknolojilerle entegrasyonu konusundaki rolleri, Sardoud ve diğerlerinin araştırmasından yola çıkılarak yorumlanmış ve aşağıda açıklanmıştır (Sardoud ve diğ, 2016);

1. Daha düşük hata payıyla yapılabilen en yakın projenin dijital olarak saklanması.
2. Büyük ve karmaşık projelerde projenin ilk aşamalarından itibaren daha doğru maliyet tahminlerinin alınabilmesi. Aynı zamanda proje paydaşlarıyla koordinasyonun sağlanmasıyla daha az zaman ve daha düşük maliyetle projenin gerçekleştirilebilmesi.
3. Çeşitli programlar aracılığıyla yapılabilen faz planlama, daha detaylı hazırlanabilecek iş programları, iş gücü ve malzeme tahminlerinin daha doğru yapılabilmesi.
4. Tabletler, bilgisayarlar, telefonlar gibi kişisel dijital cihazlar aracılığıyla dijital olarak model üzerinden saha kontrollerinin yapılabilmesi
5. Faz planlama hem yapım sırasında doğru kararların verilmesini sağlarken projenin ilerleyen zamanda yenilenmesi ya da tadilat gerektirmesi durumunda da önemli bir kaynak haline gelmesi.
6. Oluşabilecek problemlerin, hataların mümkün olduğunca yapım öncesinde çözülmesi sebebiyle daha net ve hızlı yapım süreci elde edilmesi.
7. Endüstrileşmiş bir inşaat sürecinde çeşitli parçalar ve paneller prefabrike olarak üretilir, sonrasında sahada birleştirilir. BIM modeli sayesinde prefabrike parçaların sanal olarak test edilmesi ve sahada yaşanabilecek çeşitli hataların, problemlerin önüne geçilmesi.

8. Sahada yapım sırasında yaşanabilecek bir hatalı imalatın sebep olduğu iş tekrarlarının mümkün olduğunca önüne geçilebilir.
9. Paylaşımlı model sayesinde bir proje paydaşı tarafından yapılan değişikliğin modelin güncellenmesiyle diğer paydaşlara aktarılabilmesi, revizyonların daha kısa zaman aralığında çözülebilmesi.
10. Modelle senkron çalışan metraj listeleriyle malzeme fiyat bilgileri girildiğinde güncellenebilir maliyet tahminlerinin alınabilmesi.
11. Model üzerinden çeşitli simülasyonlarla çeşitli testlerin yapılabilmesi. Rüzgar dayanım testi, sismik testler, güneş ışığı analizleri vs.
12. Diğer yazılımlarla veri alışverişi sağlanması. IFC gibi ortak bir dil belirlenmesi.
13. Parametrik tasarıma olanak tanınması ve bu tasarımı yapım enformasyonu olarak mühendisliklere ve sahaya aktarabilmesi.

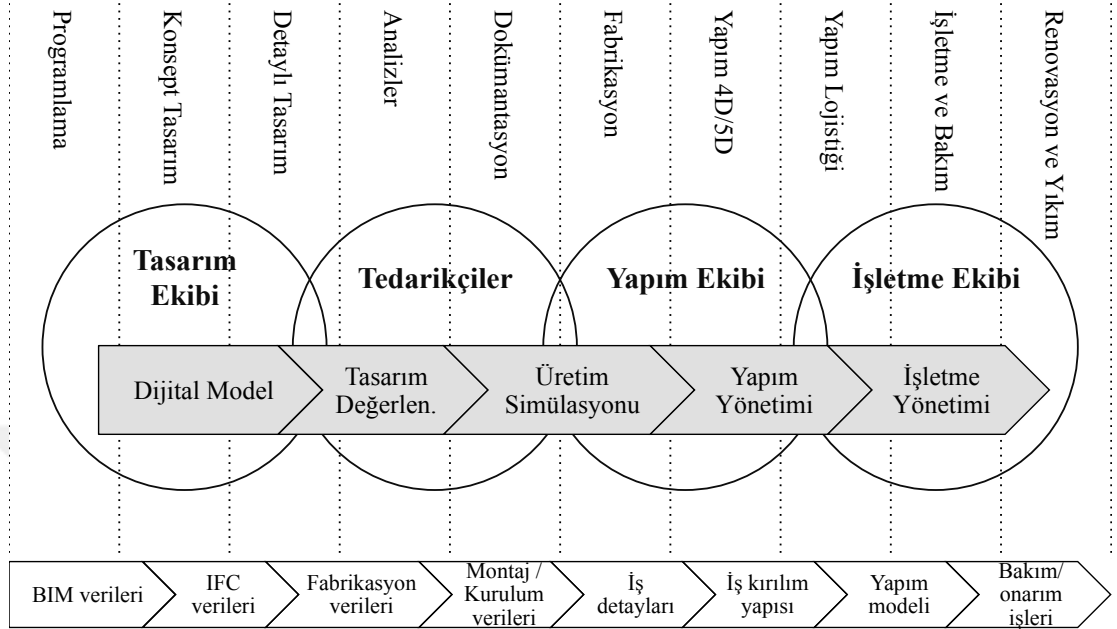
5.2 Birlikte Çalışabilirliğin Değerlendirilmesine Yönelik Kavramsal Çerçeve

Tez çalışmasında, BIM ve diğer teknolojiler arasında önerilen işbirlikteliği, belirli bir kavramsal çerçeve içerisinde değerlendirilmiştir. BIM ve diğer teknolojiler arasında önerilen işbirlikteliği, BIM ile yürütülen proje süreçlerinde tüm proje paydaşları, iş kalemleri, mevcut işbirliktelikleri, kullanılan ve paylaşılan veri tipleri, mevcut standartlar kapsamında bir bütün halinde değerlendirilmiştir (Şekil 5.2).

BIM ve diğer teknolojiler arasında önerilen işbirlikteliği, ilk olarak tasarımdan yıkım ya da renovasyona kadar olan proje süreci, BIM yaşam döngüsü dâhilinde dijital üretim ve inşaat sektöründe endüstrileşme süreci açısından değerlendirilmiştir. Süreçte hangi teknolojilerin, hangi aşamada sürece dâhil olabileceği ya da faydalı olabileceği değerlendirilmiştir.

BIM ve diğer teknolojiler arasında önerilen işbirlikteliği ikinci olarak, proje katılımcıları ve paydaşlar kapsamında değerlendirilmiştir. Bu kapsamda proje süreçleri içerisinde hangi katılımcıların sürece ne aşamada katıldığı, yeni teknolojilerle adaptasyon sürecinde yeni katılımcıların hangi aşamada sürece ekleneceği, mevcut katılımcıların süreç aşamalarındaki yer değişikliğini görebilmek adına değerlendirilmiştir. Mimarlık mühendislik hizmetleri sunan tasarım ekipleri,

tedarikçiler, yapım ekipleri ve işletme ve bakım ekiplerinin işbirliğine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Proje süreçleri içerisinde bu ekiplerin görevleri, hizmet kapsamları yeni kesişimler oluşturmaktadır.



Şekil 5.2 : Kavramsal çerçeveyi oluşturan kapsamlar.

BIM ve diğer teknolojiler arasında önerilen işbirlikteliği üçüncü olarak, iş kalemleri ve paydaşların birlikte çalışabilirliği kapsamında değerlendirilmiştir. Mevcut iş kalemlerine dijital üretim entegrasyonu ile birlikte eklenecek yeni boyutlar değerlendirilmiştir. Proje süreçleri içerisinde dijital deneme modellerinin (mock-up) oluşturulması, dijital ortamda tasarım değerlendirme süreçleri, üretimin simülasyonu, proje yönetimi ve işletme yönetimi alt süreçlerini içermektedir. Bu alt süreçler birbirini takip ederken, farklı proje katılımcıları ve farklı iş kalemleri kesişimleri oluşturmaktadır.

BIM ve diğer teknolojiler arasında önerilen işbirlikteliği dördüncü olarak, kullanılan ve paylaşılan veri tipi kapsamında değerlendirilmiştir. Proje paydaşlarından her ekibin ve alt ekiplerin kendi bünyelerinde kullandıkları veri tipi, paydaşlar arasında iletişimi sağlayan IFC formatı, veri büyüklüğü, içeriği yeni teknolojilerle olan uyumlulukları kapsamında değerlendirilmiştir.

BIM ve diğer teknolojiler arasında önerilen işbirlikteliği beşinci ve son olarak, standartlar kapsamında değerlendirilmiştir. Mevcut standartlar, yenilenen BIM standartları, üretim ve imalat sektörü standartları değerlendirilmiştir. BIM olgunluk

seviyelerinde 3. ve son seviyeye geçişte öngörülen standartlar kapsamında olması gerekenler değerlendirilmiştir.

Kavramsal çerçeve oluşturulurken proje yaşam döngüsü süreçlerinin proje paydaşları ile ilişkisi göz önünde bulundurulmuştur. Süreçler kapsamında paydaşların birbiri ile ilişkisi, birbirleri arasında veri alışverişi, ana ve alt iş kalemleri üzerinden inceleme yapılmıştır. Tüm bu kapsamlar araştırmada bir kavramsal çerçeve oluşturmaktadır. BIM özellikleri ve dijital üretim teknolojileri, Şekil 5.2’de tariflenen çerçeve kapsamı içerisinde incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

5.3 BIM Süreçlerinde Birlikte Çalışılabilecek Teknolojiler

Oluşturulan kavramsal çerçeve dâhilinde değerlendirilen BIM teknolojisi ile yürütülen proje süreçleri ve Endüstri 4.0 teknolojileri birlikteliği, inşaat sektöründe dijital üretim adaptasyonuna yönelik olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 5.1’de BIM ile gerçekleştirilecek bir inşaat projesi yaşam döngüsü süreçlerinde birlikte çalışabilecek teknoloji önerileri yapılmıştır.

Çizelge 5.1 : BIM ve diğer teknolojilerin inşaat projeleri yaşam döngüsünde birlikte kullanım önerileri.

Süreçler	Akıllı Üretim Teknolojileri	Simülasyon ve Modelleme Teknolojileri	Dijitalleşme ve Sanallaşma Teknolojileri
Programlama	Nesnelerin İnterneti, Otomasyon, Robotik		Büyük Veri, Sosyal Medya, İnsan Bilgisayar Etkileşimi
Konsept Tasarım	Nesnelerin İnterneti, 3B Baskı	Simülasyonlar, AR, VR, MR	Mobil Hesaplama, İnsan Bilgisayar Etkileşimi
Detaylı Tasarım	RFID	Simülasyonlar, AR, VR, MR	Bulut Bilişim, Mobil Hesaplama
Analizler	Nesnelerin İnterneti, Otomasyon, 3B Baskı	Simülasyonlar, AR, VR, MR	Büyük Veri

Dokümantasyon	RFID		Bulut Bilişim, Mobil Hesaplama, Dijitalizasyon
Fabrikasyon	RFID, Otomasyon, Robotik, 3B Baskı, Prefabrikasyon		Bulut Bilişim
Yapım 4D/5D	RFID, Otomasyon, Prefabrikasyon, 3B Baskı, Robotik	AR, VR, MR	Bulut Bilişim, Büyük Veri, Mobil Hesaplama
Yapım Lojistiği	RFID, Nesnelerin İnterneti, Otomasyon, Robotik		Bulut Bilişim, Mobil Hesaplama
İşletme ve Bakım	RFID, Nesnelerin İnterneti	Simülasyonlar	Bulut Bilişim, Büyük Veri, Mobil Hesaplama, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi
Renovasyon / Yıkım	RFID, Nesnelerin İnterneti, Otomasyon	Simülasyonlar, AR, VR, MR	Bulut Bilişim, Büyük Veri, Mobil Hesaplama, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi, İnsan Bilgisayar Etkileşimi

Tüm bu teknolojilerin kullanımında BIM ortak bir noktada tutulmuştur. Kaynak proje verisini oluşturmaktadır. Bu sebeple, sürecin ilerlemesinde BIM modelinin sürekli güncel tutulması çok önemli bir noktadır. Özellikle model İşletme ve Bakım sürecine aktarılırken yapılanla birebir uyumlu BIM modeli olmak zorunudur. Böylelikle döngü verimli bir şekilde devam edecektir.

5.3.1 Programlama

BIM teknolojisi kullanılacak proje süreçlerinden programlama aşaması proje hazırlık aşaması olarak değerlendirilmektedir. Bu süreçte Nesnelerin İnterneti teknolojisi, akıllı şehirler konseptinde proje yapılacak uygun lokasyonun belirlenmesinde, sensör verilerine bağlı proje alanının yaya, araç trafik yoğunluğu, tarihi bilgileri gibi Büyük Veri teknolojisinin de desteklediği verilerle doğru proje fonksiyonu, doğru proje büyüklüğü gibi bilgilerin alınmasında yardımcı olacaktır. Bununla birlikte Sosyal Medya kullanımı hem satış planlaması, hem de yoğunluk ve gereksinimin doğru belirlenmesinde faydalı olacaktır. İşveren bünyesinde daha önce yapılan projelerden alınacak otomatik zaman maliyet verileriyle yeni yapılacak projenin fizibilite otomasyonunun sağlanmasında otomasyon teknolojisi kullanılabilir. Proje alanında fonksiyon gereksinimini karşılamaya yönelik İnsan-Bilgisayar Etkileşimi teknolojilerinden faydalanılabilir. Ek olarak, Drone ve arazi algılama sistemleri ile kullanılabilecek Robotik teknolojisi, doğru arazi verilerinin alınmasında yardımcı olacaktır.

5.3.2 Konsept Tasarım

Konsept Tasarım aşamasında kullanılabilecek teknolojiler projelendirme sürecini efektif hale getirmeye yöneliktir. Nesnelerin İnterneti teknolojisi ile proje alanından trafik, CO2 yoğunluğu, yeşil alan gereksinimi, sosyal donatı yakınlığı gibi bilgiler hızlı ve doğru bir şekilde alınabilir. Projede belirlenen fonksiyonların gereksinim önceliğine, kullanıcı tercihlerine uygun tasarım alternatifleri geliştirilmesinde İnsan Bilgisayar Etkileşimi, Otomasyon gibi teknolojiler kullanılabilir. Örneğin Autodesk University'16 etkinliğinde Jeff Kowalski ofislerinin renovasyonunda, ofis çalışanlarının kullanım alışkanlıklarının belirlenmesine yönelik bir anket düzenleyerek anket sonuçlarının yazılım içerisine girilmesiyle yüzlerce farklı yerleşim alternatifi geliştirdiklerini anlatmıştır (AU 2016, Las Vegas). Bu alternatifler arasından gün ışığını öncelikli hale getirerek seçenekleri 10'a indirerek aralarından seçim yapmışlardır. Bu bir insanın üretebileceği alternatif sayısından çok daha fazladır. Tasarım alternatiflerinin somut olarak değerlendirilebilmesi için Üç Boyutlu Yazıcı teknolojisi kullanılabilir. Simülasyonlar hem projeyi anlatımlı hale getirmek hem de alternatifleri deneyimlemek için AR /VR / MR gibi teknolojilerle birlikte kullanılabilir. Mobil Bilgi İşlem, arazi verilerinin mobil olarak

gözlemlenmesinde, deneyimlenmesinde kullanılabilir. Konsept alternatiflerinin gerçekçi arazi üzerinde deneyimlenerek geliştirilmesine yardımcı olmaktadır.

5.3.3 Detaylı Tasarım

Detaylı Tasarım aşaması tasarımın sonuçlandığı, dokümantasyon hazırlığının yapıldığı aşamadır. Bu aşamada yapımda kullanılacak teknolojilerin belirlenmesi tasarıma yön verecektir. Örneğin projedeki modülerliğe göre Prefabrikasyonun kullanım seviyeleri belirlenebilir. Buna paralel olarak Siber Fiziksel Sistemler belirlenebilir. Bu aşamada projeyi geliştirmeye yönelik Simülasyonlar, AR/VR/MR teknolojileri kullanılabilir.

5.3.4 Analiz

Analizlere yönelik doğru ve gerçekçi veriyle modelin analiz edilmesi için Nesnelerin İnterneti, Büyük Veri teknolojileri kaynak oluşturacaktır. İklim, trafik, gün ışığı, nem, hava kirliliği gibi gerçek çevre verilerine projenin uyumluluğu kontrol edilebilir. Bu veriler Simülasyonlar aracılığı ile proje enerji verimliliği, risk senaryoları, erişilebilirlik gibi konularda tasarım kontrollerinin yapılmasına yardımcı olur. Yine Simülasyonların Sanal gerçeklik teknolojileriyle kullanılmasıyla yangın kaçış planları, yoğun zamanlarda bina giriş-çıkış yeterliliği gibi kontrollerin yapılmasını sağlar. Otomasyon teknolojisi, Robotik, Prefabrikasyon gibi teknolojilerin kullanılmasına yönelik uygunluk denemeleri simülasyonları yapılmasını sağlayacaktır.

5.3.5 Dokümantasyon

Dokümantasyon aşamasında dokümanın dijitalizasyonu önemlidir. 2B, 3B ve maliyet, zaman içerikli 4B, 5B modellerin dijital olarak dokümante edilmesi mümkündür. Bu dokümantasyon Bulut Bilişim üzerinden proje paydaşlarına açık kaynak olarak sunulacaktır. Yine Bulut Bilişim teknolojisiyle mobil cihazlar ile lokasyondan bağımsız projeye ve proje enformasyonuna ulaşmak mümkün olacaktır. Bu noktada kullanılacak RFID etiketleri ve sensörler için de adresleme yapılabilir.

5.3.6 Fabrikasyon

Fabrikasyon süreci, projede belirlenen yapı bileşenlerinin Prefabrikasyon, 3B Yazıcı, Robotik gibi uygun teknolojilerle üretilmesini sağlar. Bulut Bilişim projeye ulaşımı kolaylaştırır. Siber Fiziksel Sistemler montaja yönelik kolaylık sağlayacaktır. Sensörler, üretilen bileşenin yaşam döngüsünde geri bildirimlerin alınmasını böylelikle sürekli gelişimi destekleyecektir.

5.3.7 Yapım

Yapım süreçlerinde BIM modeli ile entegre çalışacak teknolojiler, maliyet ve süre modellerinin Büyük Veri teknolojisiyle doğru verilerle oluşturulmasına yardımcı olacak, Prefabrikasyon, Robotik, Otomasyon, 3B Yazıcı gibi teknolojiler maliyet ve süre tasarrufu sağlayacaktır. Bulut Bilişim paydaşlar arası iletişimi destekler ve Mobil Hesaplama ile birlikte imalat kontrolünün güncel model üzerinden yapılmasını sağlar. Siber Fiziksel Sistemler, Otomasyon, Mobil Hesaplama gibi teknolojiler saha ekipmanının efektif kullanılmasını sağlayacaktır.

5.3.8 İşletme ve Bakım

İşletme ve Bakım sürecinde, proje bünyesinde entegre bir şekilde gelmiş olan BIM modeli ve Siber Fiziksel Sistemler, projenin enerji verimlilik yönetimine, bakım süreçlerine, güvenlik sistemlerine yardımcı olacaktır. RFID etiketleri ve sensörler, Bulut Bilişim üzerinden BIM modeliyle sürekli iletişim halinde olarak Mobil Hesaplama sistemleriyle İşletme ve Bakım süreçlerinin dijitalleşmesini sağlayacaktır. Günümüzde kullanılan Akıllı binalar kavramının kapsamını genişleterek Nesnelerin İnterneti, Büyük Veri gibi teknolojilerle Akıllı Şehirler'in oluşmasını sağlayacaktır.

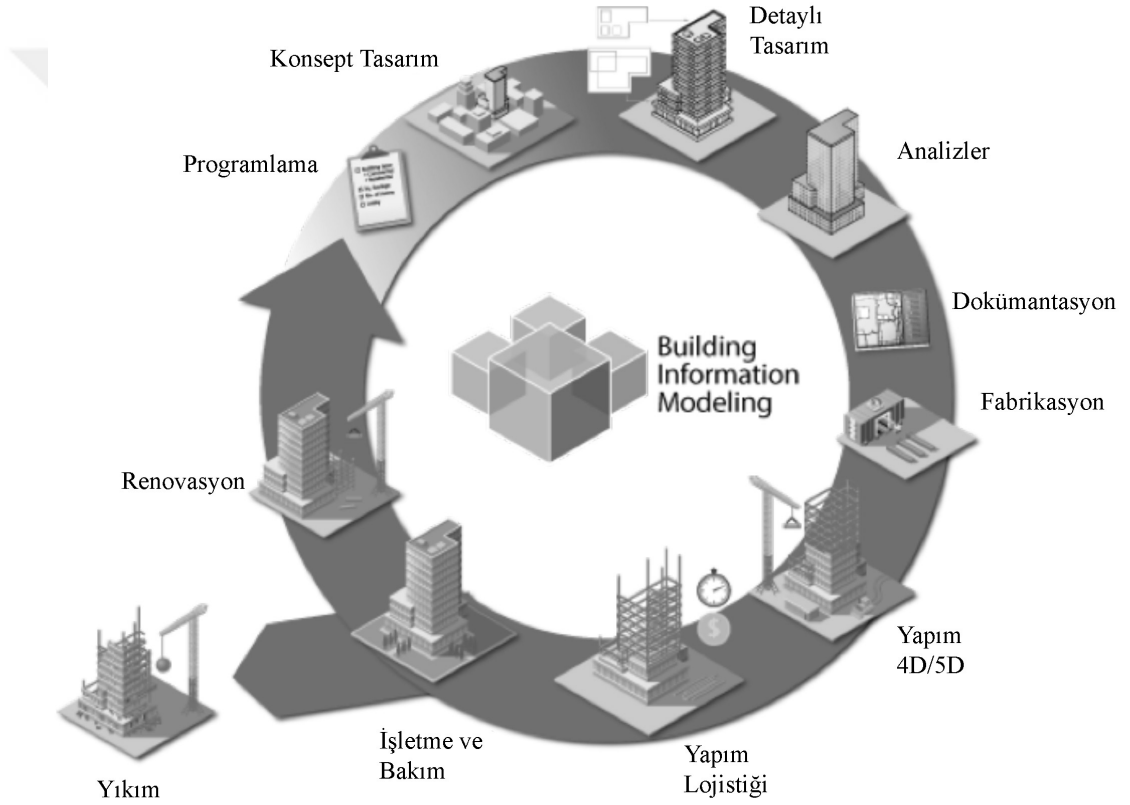
5.3.9 Renovasyon veya Yıkım

Renovasyon ve Yıkım sürecine entegre teknolojilerle gelmiş BIM projesi yine siber Fiziksel Sistemler yardımıyla atık yönetiminin çevreci bir şekilde yapılabilmesini sağlar. Örneğin Nesnelerin İnterneti teknolojisiyle trafik yoğunluğunun ya da insan yoğunluğunun en az olduğu zaman dilimi belirlenir ve bu zaman diliminde yıkım sürecinin gürültülü süreçleri gerçekleştirilir. Proje renovasyon süreci geçirecekse, proje planlama aşamasında bahsedilen teknolojilerle fonksiyon değişimi, eklentiler

belirlenebilir. Otomasyon teknolojisi renove edilecek binanın lazer tarama ile BIM modeline aktarılmasını sağlar. Böylelikle BIM projesi renovasyonu sırasında proje başlangıç enformasyonuna ulaşabilir, renovasyon süreci enformasyon kaybı olmadan hızlı ve projeye uygun bir şekilde gerçekleştirilir. Yıkım süreci ise başka projelere öğrenilmişlik sağlar.

5.4 BIM Süreçleri Bağlamında Değerlendirme

BIM projesi süreçleri, inşaat projeleri yönetimi için PMI PMBoK tarafından belirlenen fazlardan farklı bir döngüyü öne sürmektedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 : BIM ile yürütülen inşaat projesi yaşam döngüsü.

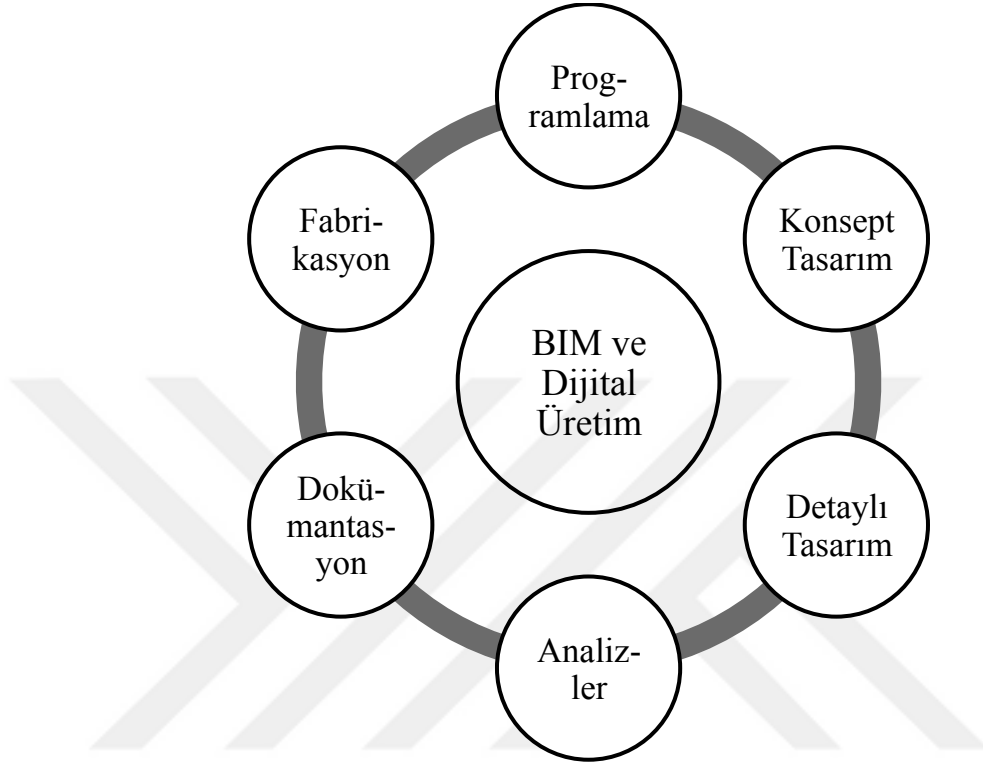
Dijital üretim teknolojileri, BIM projesinde devreye girdiğinde döngü halinde ifade edilen BIM süreçlerinin, başlangıç bitiş ilişkisinden ziyade, bütünleşik bir hale geleceği söylenebilir. Yapım aşamasında ya da yapım öncesi aşamalarda kullanılacak teknolojilere bağlı olarak proje süreç akışı kendi içinde değişebilir, belirli süreçler uzarken diğerleri kısalabilir. Örneğin yapımda robotik ve prefabrikasyon kullanılacak projelerde tasarım süreci uzayacak yapım süreci ise montaj ağırlıklı

gerçekleşeceğinden kısılacaktır. Dijital üretim teknolojileri genel olarak değerlendirildiğinde yapım sürecinde oluşabilecek hatalı imalatlar ve iş kazalarını önlemeye yönelik olup, yapım sürecini süre ve maliyet olarak azaltma hedefi olduğu söylenebilir. BIM süreçleriyle beraber ilerleyen dijital üretim süreçleri, yapım öncesinde mühendislik ve mimari projeler arasında oluşabilecek çakışmaların ve yapım ve yapım sonrası süreçlerde oluşabilecek risk faktörlerinin belirlenmesine yönelik bir yapım simülasyonu oluşturmaktadır. Bu sayede yapım sırasında hatalardan kaynaklı süre kayıpları, yapım sırasında risklerden kaynaklı olabilecek iş kazalarının önüne geçilebilir. Yapım sürecinin optimizasyonu, yapım öncesi süreçlerin verimli değerlendirilmesiyle orantılıdır. BIM teknolojisi ile yürütülen projelerin dijital üretim teknolojileri kullanılmadığı seviyelerinde de yapım ve operasyon maliyetlerini ve sürelerini aşağıya çekme yetkinliği önemli özelliklerinden biridir. Bununla birlikte tasarım sürecinin uzaması ve tasarım sürecini geleneksel yöntemlere göre daha verimli kullanılması beklenir.

Prefabrikasyonun tüm teknolojilerle bütünleşik kullanılması hali, yapım sürecinin neredeyse tamamen montaj işlemlerinden oluşmasıyla sonuçlanacaktır. Bu durum insan gücünün çalışması için tehlikeli olabileceği koşullarda, ulaşımın zor olduğu lokasyonlarda yapılacak tünel, su altı yapıları gibi projeler için bir çözüm oluşturacaktır. Yapı sürecinde iş güvenliği açısından riski, imalat zorlukları ve sürelerini azaltabilir.

Dijital üretim ve BIM işbirliğinde tasarım süreci, tüm proje paydaşlarıyla beraber ilerletilmelidir. En önemli süreç tasarım sürecidir. Bu süreç BIM projesi yaşam döngüsü süreçleri üzerinden ele alındığında programlamadan fabrikasyona kadar olan süreç kendi içerisinde bir döngü oluşturması önerisi yapılabilir (Şekil 5.4). İnşaat projelerinin tek sefere ve kendisine özgü olması sebebi ile projeden projeye aktarılan çoğunlukla yönetime ilişkin enformasyondur. Dolayısıyla dijital üretim teknolojileri kullanacak BIM teknolojisi ile yürütülen projeler Mock-up'lar, çeşitli simülasyonlar aracılığıyla test edilmelidir. Örneğin, çalışmanın dördüncü bölümünde örnekler kapsamında incelenen köprü projesi, yapım aşamasına geçmeden önce çok defa denenerek, tam anlamıyla bir Ar&Ge süreci geçirmiştir. Dijital üretim teknolojileri kullanılacak inşaat projeleri yapılacak küçük ölçeklerde imalat numuneleri, gerçek ölçekli kısmi numuneler imatları ile hem yapılabilirliği hem de tasarımı sınayacaktır. Tasarım döngüsünü gerektiği kadar tekrarlar gerçekleştirir

proje sonrasında dokümantasyon, fabrikasyon ve yapım süreçleriyle döngüye devam edecektir. Kullanılacak dijital üretim teknolojilerin yetkinliği projeye, proje teknolojilere katkı sağlayabilir. Böylelikle bir Ar&Ge döngüsü oluşacaktır. Bu süreç tüm paydaşların kendi uzmanlıkları çerçevesinde gerçekleşecektir.



Şekil 5.4 : Tasarım süreci kendi içerisindeki süreç döngüsü.

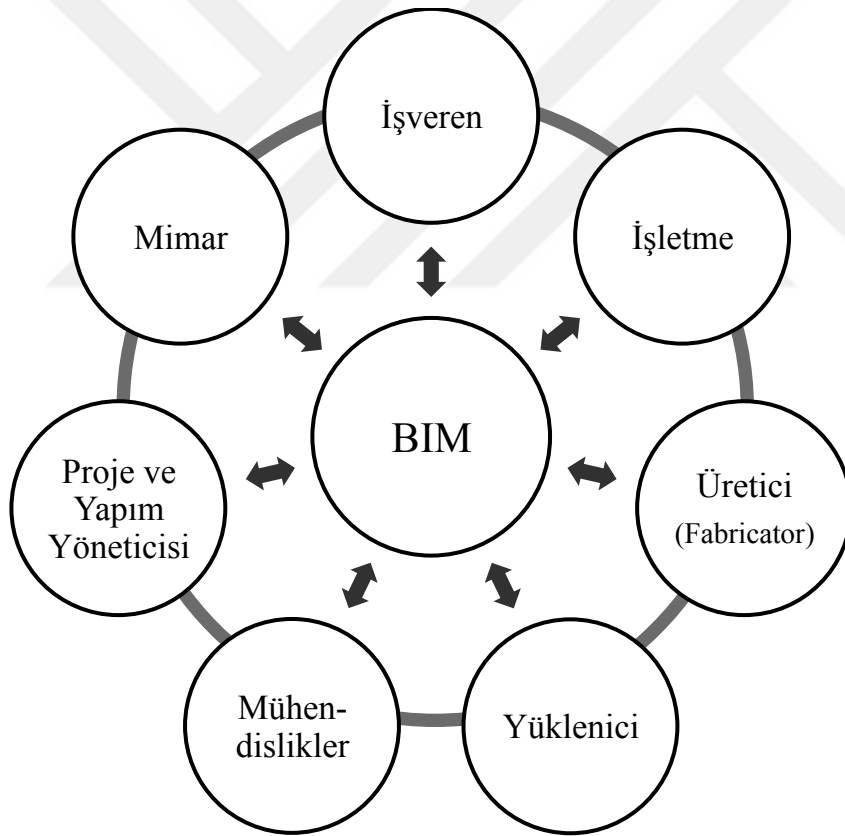
Doğru planlanan yapım süreci, yerinde kullanılacak teknolojilerle montaj ve imalat kolaylığı sağlayacaktır. Hem seri üretime hem özel üretime yönelik robot kol kullanımı ile adam/saat verimliliği sağlanabilir. Örneğin sıva imalatı, seramik döşeme imalatı için ETH Zürih'in robot kol çalışmaları bulunmaktadır. Bu robot kollar bir işinin yapabileceği m2'lerin çok üzerine çıkabilmektedir. Özel üretime yönelik olarak da çalışmanın dördüncü bölümünde örneklerde verilen MeshMould projesi, rasyonel olmayan, ya da başka bir deyişle insan gücüyle imalatı zor olan geometrilerin imalatı için çelik hasır örgüsü yapmaktadır. Dijital teknolojilerle ilerlemiş yapım süreci, yine farklı teknolojiler yardımıyla işletme ve bakım süreçlerine doğru kaynak verinin aktarılmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, inşaat projelerinde yapım süreçlerinin geleneksel yapım yöntemlerine kıyasla daha kaliteli, aynı zamanda daha kısa sürelerde ve güvenli bir şekilde gerçekleşebileceğini söyleyebiliriz. Kısalan yapım süreçleri, etkin kullanılan tasarım

süreçleri ile sağlanacaktır. Tasarım süreçleri tüm paydaşların işbirliği sonucunda başarıya ulaşabilir. Çünkü kullanılacak teknolojinin projeye, projenin de kullanılacak teknolojiye uygun olması gerekmektedir.

5.5 Proje Paydaşları Bağlamında Değerlendirme

BIM modelinin, tüm paydaşların ortak ve bütünleşik çalışmasıyla, bir ya da birden fazla yapının dijital olarak inşa edilmesiyle birlikte imalat, fabrikasyon ve tedarik süreçleri ile ilgili enformasyonu içermesi hedeflenir. Model, proje süreçlerinde tüm proje paydaşları tarafından enformasyon kaynağı olarak kullanılacaktır. Literatürde, BIM teknolojisi kullanılan inşaat projesi paydaşları genellikle anahtar gruplar çerçevesinde verilir (Şekil 5.5). Anahtar proje paydaşları geleneksel yöntemlerle imal edilecek bir proje için yeterli paydaşlardır.



Şekil 5.5 : BIM ile yürütülen inşaat projesinde anahtar paydaşlar ile ilişkisi.

Projeden beklenen, fonksiyonunu karşılaması yanında; etkili tasarım, sürdürülebilirlik hedefleri, dijital işletme ve bakım süreçleri, şehir imgesi olması, başka projeler için örnek niteliğinde olması gibi hedefler olabilir. Bu ilk hedeflerin

nasıl yapılacağı, nasıl tasarlanacağı ile ilgili konular dijital üretim ve BIM birlikte çalışabilirliğinin yetkinlikleridir. Günümüzde yapılan birçok ikonik yapı, geleneksel yöntemlerle imal edilmektedir ve bu uzun yapım süreleri ve maliyetlerle sonuçlanmaktadır. İnşaat sektörünün verimsizliği bu noktada ön plana çıkmaktadır. Bu sebeple teknolojinin süre ve maliyetleri düşürmek ve verimliliği artırmak üzere kullanılması, günümüz teknoloji seviyesi göz önüne alındığında, zorunludur.

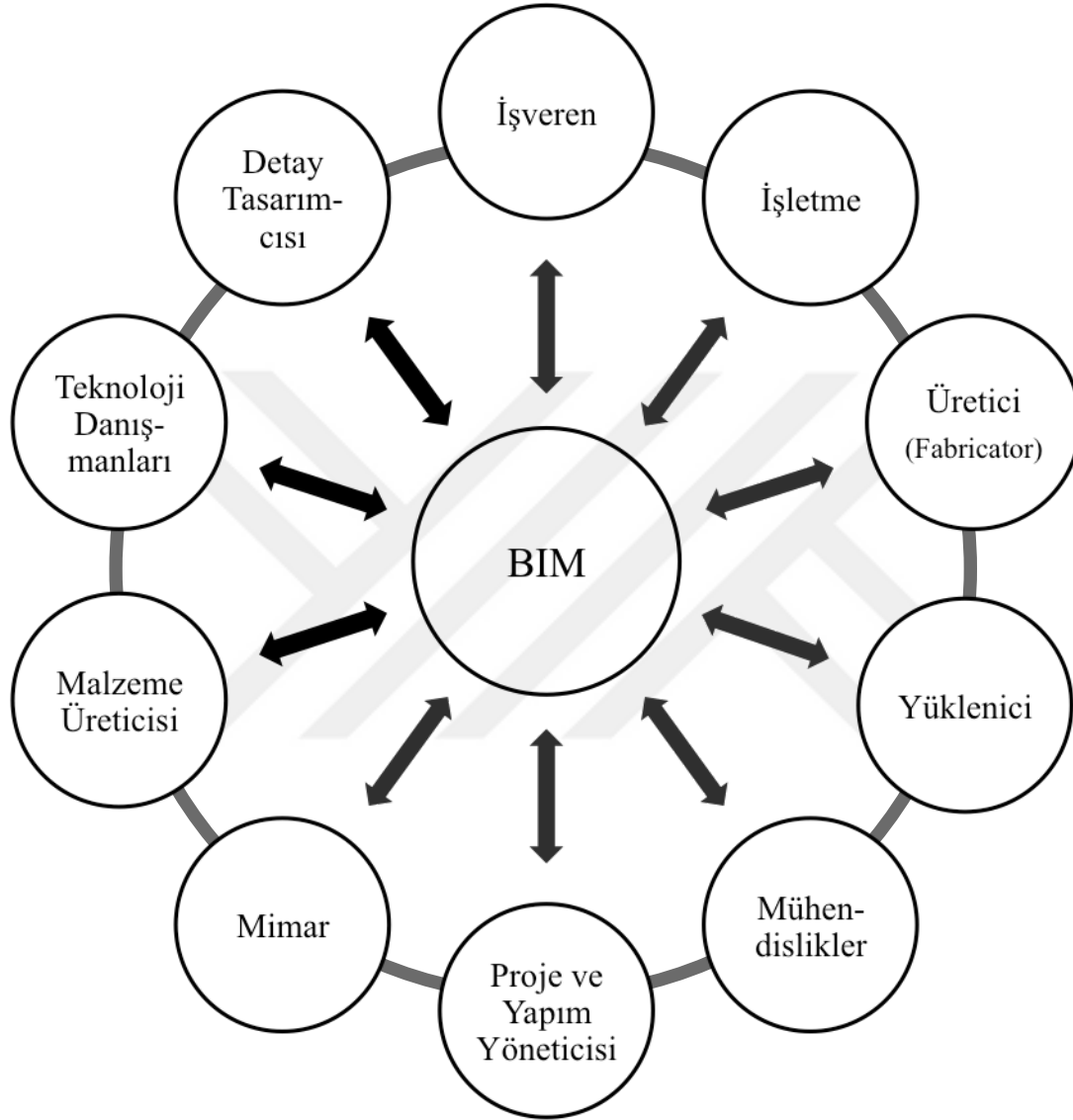
Dijital üretimin BIM teknolojisi ile beraber kullanılacağı inşaat projelerinde, proje hedefleri programlama ve konsept proje aşamasında belirlenmeli ve hangi teknolojinin hangi hedeflere yönelik hangi süreç ve alanda kullanılacağı belirlenmelidir. Bu kararların verilebilmesi için, tüm proje paydaşlarının proje başlangıç aşamasından itibaren birlikte çalışabilir olmaları gerekmektedir. Böylelikle hedefler doğru bir şekilde belirlenebilir. Anahtar paydaşlar, dijital üretim ve BIM teknolojisi kullanılacak inşaat projelerinde yine yer almaktadır. Fakat dijital üretim sürecinde bu paydaşlar içerisinde ön plana çıkacak olanlar ve yeni eklenecek paydaşlar olacaktır. Mevcut paydaşlara yeni eklenecek sorumluluklar olacaktır. Tasarım ve yapım sürecini optimize etmek üzere kullanılacak teknolojinin formatına göre proje paydaşları ve bunula birlikte mevcut paydaşların sorumlulukları farklılık gösterebilir.

Örneğin 3B yazıcıların kullanımında malzeme en önemli kaynaktır. Bu teknolojinin kullanımında mimar, malzeme üreticisi ve üretici (fabricator) en önemli paydaşlar olacaktır. Kullanılacak malzemenin cinsine, bitmiş yapı bileşenindeki etkisine göre tasarım değişebilir, ya da tasarıma göre malzeme ve yöntem şekillenebilir. Bu durumda malzeme üreticisi de anahtar paydaşlar arasına girecek ve tüm paydaşlarla proje başlangıcından itibaren bütünleşik (entegre) çalışacaktır.

Prefabrikasyon teknolojisi kullanımı, üreticiyi ön plana çıkaracaktır. Üretici ile birlikte mimar, teknoloji danışmanları, malzeme üreticisi, detay tasarımcısı (Detailer) gibi paydaşlar kritik konuma gelecektir. Prefabrikasyona uygun proje için modularizasyon tasarımının yapılması gerekir. Prefabrikasyon teknolojisi genellikle hem üretiminde hem de montajında robotik teknolojisini kullanır. Sahada doğru montajın takibi ve kontrolü için RFID etiketleri kullanılabilir. Teknolojilerin birlikte çalışabilirliği teknoloji danışmanları ve mühendisliklerin kapsamını genişletecektir.

Dijital üretim teknolojileri ve BIM birlikte çalışılabilirliği proje paydaşları açısından değerlendirildiğinde anahtar paydaş konumuna gelen paydaşlar ve veri akışı Şekil

5.6’da ifade edilmiştir. Bu süreç, mimar, mühendislikler, yüklenici ekibinin, üretici, malzeme üreticisi, teknoloji danışmanları gibi diğer paydaşlarla geleneksel yöntemlere ve BIM teknolojisi kullanılan fakat, geleneksel yöntemle inşa edilen projelere kıyasla daha bütünleşik çalışmalarını gerektirmektedir.



Şekil 5.6 : BIM ve dijital üretim teknolojileri birlikteliğinde inşaat projesi anahtar paydaşlar önerisi.

Tüm dijital üretim ve BIM kullanılacak inşaat projeleri süreçleri kapsamında paydaşların ortak kaynağı BIM projesidir. Bu sebeple, tüm paydaşlar arasında verilerin doğru bir şekilde aktarılması, enformasyon alışverişinin sağlanması, Veri yönetimini gerektirir. Tüm paydaşlar arasında en kritik görev, Veri yönetimi yapacak BIM yöneticisi ve proje yöneticisine aittir. Veri akışının düzgün sağlanamadığı

durumda BIM ve dijital üretim teknolojilerinin fayda sağlayacak özelliklerini verimli bir şekilde kullanmak mümkün olmayacaktır.

Dijital üretim ve BIM teknolojilerinin kullanıldığı projelerde paydaşların işbirlikteliği, proje tesliminde sonra da proje yaşam döngüsü süresince devam edecektir. Otomatik alınan arıza, bakım, çevre koşullarından etkilenme, eskime, enerji tüketimi gibi enformasyon çeşitleri ilgili paydaşlara aktarılacaktır. Bu bilgiler her paydaşın kendi uzmanlık alanı çerçevesinde Ar&Ge'lerine katkı sağlayacaktır. Dijital olarak Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi yapmayı sağlayacaktır. Böylelikle her paydaş bir sonraki projesinde kendi uzmanlığını geliştirerek etkinlik gösterecektir.

5.6 Proje Teslim Sistemleri Bağlamında Değerlendirme

BIM ve dijital üretim, inşaat projelerinde tasarım ve yapıma yönelik olup, projenin yapım sonrası yaşam süreçlerini de optimize etmeyi hedefleyen teknolojilerdir. Proje programlama aşamasında belirlenecek proje hedefleri, tasarım ve Ar&Ge döngülerini tamamlayarak uygulanacaktır. Proje hedeflerinin yapılabilirlik ve yapılacağın gerekli olup olmadığı doğru belirlenmelidir. Bu sebeple, proje süreci başlangıç aşamasından itibaren hedefleri doğru değerlendirebilecek uzmanlık seviyelerinde proje paydaşları ile bütünleşik süreçlerle ilerlemelidir. BIM teknolojisi ile yürütülen projelerin bütünleşik doğası gereği, literatürde BIM teknolojisi kullanılacak inşaat projelerinde önerilen, IPD (Integrated Project Delivery) adı verilen bütünleşik proje teslim sistemidir. Çalışmada, geleneksel teslim sistemlerine kıyasla, BIM ve dijital üretim teknolojileri kullanılacak inşaat projelerine yönelik IPD sistemi değerlendirilecektir.

AIA'nın yapmış olduğu IPD tanımı şu şekildedir:

“IPD, proje sonuçlarını optimize etmek, işverenin değerini artırmak, atıkları/israfi azaltmak ve, tasarım, üretim ve yapım süreçlerinin verimliliğini artırmak amacı ile, insanları, sistemleri, iş yapılarını ve uygulamaları, tüm katılımcıların yetenek ve anlayışlarını işbirliği içinde kullanan bir sürece entegre eden bir proje teslim yaklaşımıdır.”

IPD ilkeleri çeşitli sözleşme düzenlemeleriyle uygulanabilir ve ekipler kapsamına, İşveren, Mimar, Yüklenici temel üçlünün ötesinde birçok üye katabilir. IPD projenin başlangıcından teslimine kadar paydaşlar arasında etkin işbirliği sağlar. IPD, proje üretim süreçlerini, proje yöneticileri, tasarımcı, mühendisler, sistemler ve

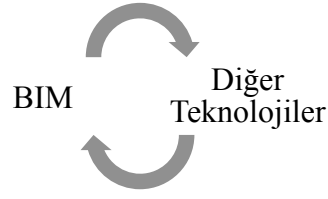
uygulama alışkanlıklarını işbirliği ve verimli iletişim halinde üretim süreçlerine dönüştürür. Paydaşlar kopuk ya da başlangıç bitiş ilişkili süreçler halinde değil, uyumlu bir takım olarak çalışır. Paydaşlar bu sayede projeyi etkin bir şekilde izleyebilir, değerlendirip gözden geçirebilir, gerektiği durumlarda kararlar alabilir, çakışma ve tutarsızlıkları çözebilir. Bütünleşik süreçte BIM teknolojisi, iletişim ve birlikte çalışabilirliğe uygunluğu sebebiyle önemli ve uygun bir kaynaktır. IPD'nin proje yönetimi için bütünleşik bir yaklaşım olduğu ve BIM'in bu işlemi kolaylaştıran teknolojik bir arayüz olduğu belirtilmektedir (Rokooei, 2015).

İnşaat projelerinde tasarımın ilerleyen aşamalarında veya tasarım sonrasında verilen kararlara bağlı yapılan değişikliklerin maliyetleri tasarım sırasında yapılacak revizyonlara kıyasla çok daha fazladır. IPD ve BIM süreçlerinde en yoğun efor tasarım aşamasında harcanır. Böylelikle tasarım sürecinden sonra projenin yaşam döngüsü sırasında oluşabilecek ek maliyetler, hatalardan kaynaklı iş tekrarları, gecikmeler ve boşa giden çalışmaların önüne geçilmiş olur.

Dijital üretim teknolojilerinin inşaat projelerinde verimli bir şekilde kullanımı için doğru planlama süreci gerekir. Tasarım süreci kullanılacak teknolojilerin belirlenmesi ve teknolojilerden doğru faydanın sağlanması için en önemli süreçtir. BIM teknolojisi bu noktada dijital üretime yönelik doğru kararların verilebilmesi, analizlerin yapılabilmesi bir kaynaktır. IPD sistemleri ile birlikte proje paydaşlarının projenin ilk aşamalarından itibaren işbirliği içinde olması, BIM ve dijital üretim birlikteliğini desteklemektedir. Proje hedeflerinin doğru belirlenmesi ve uygulanması için bütünleşik çalışılan teslim sistemleri gereklidir.

5.7 BIM'in Özellikleri Bağlamında Değerlendirme

BIM projesi tüm teknolojilerin inşaat sektöründe proje yaşam döngüsü süreçlerinde kullanılabilmesi için anahtar teknoloji konumundadır. Proje yaşam döngüsünün devamlılığı için dijital proje enformasyonunun kaynağını oluşturur. Bu sebeple BIM teknolojisinin diğer tüm teknolojilerle iletişim içerisinde bulunması çok önemlidir (Şekil 5.7). İletişimle birlikte kesintisiz karşılıklı alışveriş devam edecektir. Bu ilişki kazan-kazan ilişkisi olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5.7 : BIM ve dijital üretim teknolojileri iletişimi.

Yapı enformasyon modeli, zaman ve maliyet tahminleri, malzeme envanteri, geometri, mekânsal ilişkiler gibi çok katmanlı enformasyonu tek bir kaynakta toplar. Tüm proje paydaşlarının bu kaynak etrafında etkin iletişimi sağlar. Endüstri 4.0 konseptine göre, inşaat sektörü tüm değer ağlarına dijital değer zinciri yatay entegrasyonu önerisinde BIM, Endüstri 4.0 ana fikrini destekleyen merkezi teknolojilerden biri olarak düşünülmüştür (Österreich ve Teuteberg, 2016).

BIM teknolojisi ile yürütülen projeler özelliklerinden yola çıkarak, belirlenen kavramsal çerçeve içerisinde, teknolojilerin entegrasyonu değerlendirilmiştir. Değerlendirmede ön plana çıkan özellikler detaylı açıklanmıştır.

BIM teknolojisi nesne tabanlı modellemeye dayanmaktadır ve model içeriği sınıflandırma ve enformasyon içeren nesnelerden oluşur. Yapı bileşenlerini oluşturan nesneler zaman, maliyet, koordinasyon bilgisi içerir. BIM modellerinin işbirliği yapacağı dijitalleşme ve sanallaşma teknolojileriyle karar verme süreçlerinde gerçekçi çevre verilerinin kullanılması ve simüle edilmesi yoluyla deneyimlenmesini sağlar. Dijital üretim teknolojileriyle işbirliği BIM projesinin sanal prototip oluşturmalarını sağlar. Sanal prototipler dijital üretimde, simülasyonlar ve otomasyon sistemleriyle test edilerek geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

Veri Akışı

Mevcut BIM projesi veri akışı, proje paydaşları üzerinden değerlendirildiğinde proje bazında değişmekle beraber ön plana çıkan proje paydaşları; Mimar, Mühendislikler, İşveren, Yüklenici, İşetme Yöneticisidir. Bu paydaşlara BIM projesinin diğer teknolojilerle işbirliğine yönelik eklenecek veya mevcut paydaşlardan ön plana çıkanlar olacaktır. Projenin başlangıç aşamalarında kullanılacak teknolojilerin belirlenmesi veri akışının da doğru kurgulanmasını sağlar. Örnek üzerinden gidecek olursak, bir otel projesi modularizasyona yatkınlığı sebebiyle ıslak hacimleri hatta

odaları çok sayıda tekrardan oluşur. Bu birimlerin prefabrikasyonla alt birimlerinin yapılması imalat sürecini hızlandıracaktır. Konsept tasarım aşamasında prefabrikasyon kullanımı üzerine belirlenen Yüklenici ile iletişim halinde olan Mimar ve Mühendisler, yapım yöntemine uygun olarak tasarımı yürütecektir. BIM projesi Uygulama Planı'na da uygun şekilde veri akış şemaları işlenecek ve buna uygun ilerlenecektir. Veri Yönetimi en önemli konulardan biri haline gelmektedir.

Veri akışı teknoloji entegrasyonu ile değerlendirildiğinde Malzeme Üreticileri, Teknoloji Danışmanları ön plana çıkmaktadır. 3B Baskı, robot kol imalatları malzeme ile birebir ilişkilidir. Proje yöneticisinin bu paydaşlarla uygun teknolojileri belirlemesi projeye yön verecektir.

BIM teknolojisini kullanıldığı projelerde paydaş arası ortak dil IFC XML formatı olarak geçmektedir. Fakat bu ortak dil, dijital üretim teknolojileri işbirliği konusunda geliştirmeler gerektirmektedir. Ham geometrik bilgiler, 3B Yazıcı gibi makinalar ile manuel müdahale olmadan, kesintisiz üretim yapabilmek için yetersizdir. Otomatik üretim makinalarının beslenmesi için CAM (Computer Aided Manufacturing) gibi bir veri girişi olması gerekir (Tibaut ve diğ, 2016).

Detay Seviyeleri

BIM teknolojisi ile yürütülen projelerde, BIM Uygulama Planı hazırlığında kullanılacak detay seviyeleri belirlenir. Dijital üretim teknolojileri yüksek detay seviyeleri gerektirir. Bu sebeple detay seviyelerinin proje aşamalarında kullanılacak teknolojilere göre belirlenmesi gerekir.

Örneğin Simülasyonlar, Siber Fiziksel Sistemler, Nesnelerin İnterneti gibi model bileşenlerinin enformasyonunu kaynak olarak kullanan teknolojiler için detay seviyeleri düşük tutulabilir. BIM modelini geometrik ve geometrik olmayan verisiyle birlikte doğrudan imalata kaynak olarak alacak teknolojiler -3B Baskı, prefabrikasyon, yerinde robotik imalatlar vb.- için detay seviyesinin fabrikasyon verisi niteliğinde, en yüksek detay seviyelerinde olması gerekir.

Projelerde detay seviyeleri arttıkça model dosya büyüklüğü de artmakta ve dosya kullanımı ve aktarımını zorlaştırmaktadır. Bu sebeple kullanılacak teknolojiler tasarım aşamasında belirlenip tasarımda veri kullanımının uygun organize edilmesi gerekir. Proje genelinde dijital üretim teknolojileri kullanılmıyacaksa, projenin dijital olarak imal edilecek bölümleri ayrışık olarak fabrikasyona yönelik

detaylandırılabilir. Burada dikkat çeken önemli noktalardan biri; BIM teknolojisini kullanıldığı projelerde detay seviyelerinin dijital imalat teknolojileri için yeterli olup olmadığıdır. Diğer ise gerekli detay çalışmalarının yapılması hangi paydaşın kapsamında olacaktır.

Algoritmik Tasarım

Parametrik tasarım yazılımından kodlama tabanlı yazılımları kullanarak BIM yazılımlarına aktarılması, BIM tabanlı yazılımların tasarım yetkinliğinin gelişmesini sağlamıştır. Bu sayede amorf formlar BIM modeli içerisine yapı bileşen enformasyonu ile aktarılmış olup paylaşılabilir duruma gelir (Şekil 5.8). Parametrik tasarım, amorf tasarımlara katkısının bir başka deyişle, sıra, algoritmaya dayalı modularizasyonun yapılabilmesi için de kullanılabilir. Bu prefabrikasyona altlık oluşturabilecek sistemlerin kurulmasını sağlar.



Şekil 5.8 : Parametrik tasarımın üretime yönelik süreci.

Teknoloji işbirlikliklerinde faydalı olacak algoritmik tasarım yetkinliği, detay seviyeleri ve veri akışı konularında karşılaşılan problemler aşıldığı durumda kesintisiz bir akış oluşturacaktır. Temel olarak bakıldığında BIM, serbest formlu tasarımların doğru geometri ile uygulanabilmesini sağlamak üzere bu yetkinliğe sahiptir. Bunun için veri akışının doğru kurgulanması gerekir.

Örneğin ETH Zürich dFab laboratuvarının geliştirdiği MeshMould teknolojisi, robot kol ile çelik hasır örülmesini ve böylelikle serbest formlu beton imalatının yapılabilmesini sağlamak üzere geliştirilmektedir.

5.8 BIM Özelliklerinin Teknoloji Birlikteliğinde Faydaları ve Zorlukları

BIM teknolojisi ile yürütülen projeler özellikleri üzerinden, belirlenen kavramsal çerçeve dâhilinde Endüstri 4.0 konseptinde inşaat sektörüne uygulanabilecek teknolojilerle işbirlikteliği avantaj ve dezavantajları bağlamında değerlendirilmiş ve listelenmiştir.

BIM teknolojisi ile yürütülen projelerin inşaat sektörünün dijital üretime geçişinde yararlı özellikleri;

1. Veri akışı kapsamında, IFC ile mühendislik ve mimarlık dosyaları arasında ortak dil oluşturma,
2. Ortak dil olan IFC formatının geometrik ve geometrik olmayan yapı enformasyonunu içermesi ve aktarabilmesi,
3. Proje yaşam döngüsü tüm süreçlerinde BIM modelinin kaynak olarak kullanılabilme potansiyeli,
4. Detay seviyeleri bağlamında, modellerin geometrik olmayan enformasyonu da içermesi sebebiyle düşük LOD seviyelerinde de Nesnelerin İnterneti, RFID, İnsan-Bilgisayar Etkileşimi, Simülasyonlar gibi çeşitli teknolojilerde yeterli bir kaynak olması,
5. Nesne tabanlı modelleme mantığı olması sebebiyle, bileşenin imalat tarihi, ısı değerleri, enerji değerleri gibi geometrik olmayan enformasyonu da içeren yapı bileşenlerinin geometrik detay gerektirmeyen teknolojilerle işbirliği potansiyeli (RFID, Nesnelerin İnterneti gibi),
6. Algoritmik tasarım yetkinliği bağlamında, parametrik tasarım programlarıyla işbirliği yapabilmesi,
7. Tasarımda sağladığı esnekliğin robotik, 3B baskı gibi teknolojilerle yapım kolaylığı sağlama potansiyeli,
8. Prefabrikasyona yönelik modularizasyonun Grasshopper, Dynamo gibi kod tabanlı programlarla yapılabilmesi ve yönetilmesi,
9. Dokümantasyonun dijitalizasyonu,
10. As-built dokümantasyonunda Lazer Tarama gibi teknolojilerle en doğru verinin dokümente edilmesi,
11. Bulut Bilişim, Mobil Hesaplama teknolojilerine kaynak verebilmesi,
12. Hata öngörülmesi ve çakışma analizleri yetkinliği bağlamında, AR, VR, MR teknolojileriyle çakışma analizleri yapılabilmesi,
13. Giyilebilir teknolojilerle çakışma analizleri ve kontrollerin yapılabilmesi,
14. Çakışma analizi yapılmış hata payı az projelerde örneğin tesisat duvarlarının prefabrikasyonu sağlanabilir,

15. Karar vermeye etkisi kapsamında, dijital veri kaynak olarak kullanıldığında daha doğru maliyet, zaman tahminlerinin yapılabilmesi,
16. Lazer tarayıcılar, siber fiziksel sistemler ile saha kontrolünün dijital olarak yapılabilmesi, saha kontrolü otomasyonu sağlaması,
17. Faz planlama ve kontrolünün otomasyonu,
18. Sanal prototipleme olması sebebiyle, yapım öncesi hataların önüne geçme,
19. Yapım süreci optimizasyonu yapabilme,
20. Saha dışı imalatların montajı için simülasyonlar aracılığıyla kontroller yapılabilmesi,
21. İçerdiği enformasyonun derinliği kapsamında, grafiksel ve grafiksel olmayan enformasyonun siber fiziksel sistemler, ürün yaşam yönetimi gibi teknolojilerle yapım sonrası geri dönüşlerin (feedback) alınabilmesi ve yapıma yönelik optimizasyonun sağlanabilmesi,
22. Modele eklenen boyutlar bağlamında, 7D işletme yönetimi modellerinde Nesnelerin İnterneti, RFID gibi teknolojilerin kullanılabilmesi,
23. 6D sürdürülebilir yapı modellerinde Nesnelerin İnterneti teknolojilerinden alınacak doğru çevre verileriyle doğruluk payı yüksek analizlerin yapılabilmesi.

Literatür araştırmasından yola çıkılarak belirlenen avantajların yanında BIM özelliklerinin henüz yeterli seviyeye gelmemesinden kaynaklı eksik ve engelleri bulunmaktadır.

BIM teknolojisi ile yürütülen projelerin inşaat sektörünün dijital üretime geçişinde dezavantajlı olarak değerlendirilen özellikleri;

1. Veri akışı kapsamında, fabrikasyona yönelik veri akışlarında IFC'nin yetersiz kalması, doğrudan makineye aktarılacak fabrikasyon verisi için ham kalması,
2. Eğimli yüzeylerde doğru geometrinin aktarımında IFC'nin yetersiz kalması,
3. Detay seviyeleri kapsamında, doğrudan imalata yönelik veri aktarımında LOD 500'lere çıkılması gerekir. Bu durumun modelin dosya büyüklüğünü artırarak çalışma koşullarını zorlaştırması,

4. Algoritmik tasarım konusunda, eğimli yüzeylerde parametrik tasarım programlarından aldığı geometrik veriyi doğru alamaması, dolayısıyla dışarıya da doğru aktaramaması,
5. Aktarılamayan doğru geometrinin imalatda da kırıklı yüzeylere, hatalara yol açma ihtimali,
6. Gerekli taşıyıcılık testlerinden geçirilmemiş parametrik tasarımın imalata aktarılması,
7. Dokümantasyon konusunda, dijital dokümanın güvenliği, siber güvenlik problemleri önemli bir konudur.
8. Çakışma analizleri ve hata öngörülerini bağlamında, çakışma analizlerine üretici verilerinin dosya formatları sebebiyle dâhil edilememesi,
9. Karar vermeye etkisi kapsamında, mevcut proje yönetim yazılımlarında üstverinin (metadata) kullanılamaması, web tabanlı teknolojilerle iletişim kuramaması,
10. Yapım kontrollerinin dijital olarak yapılabilirdiği proje yönetim yazılımlarının eksikliği,
11. Enformasyonun derinliği konusunda, gereksiz enformasyon girişi için yapılan süre kayıpları.

5.9 BIM ve Dijital Üretim Teknolojileri Birlikteliği Sonucunda Proje Ve Yapım Yöneticilerine Görev Önerileri

Gelişen ve değişen yapı üretim süreçlerinde proje ve yapım yönetimi kapsamı, bilgi alanları, süreçleri de gelişme göstermek durumundadır. Tüm dijitalleşme sürecinin kilit noktasında bulunmaktadır. Teknolojilerin tercih edilmesinden araştırma ve geliştirme birimlerinin desteklenmesine kadar süreci yönetecek önemli bir konumda bulunmaktadırlar. BIM proje süreçleri ve teknoloji işbirliktelikleri sonucunda proje yöneticilerine eklenecek görev önerileri, daha sonra yapılacak araştırmalara altlık olması amacı ile belirlenmiştir.

İnşaat projeleri yönetimi, tüm inşaat süreçlerini anlamayı gerektirir. Değişen ve gelişen tasarım, yapım, işletme süreçleri, proje ve yapım süreçlerinde de paralel yaşanmalıdır. Teknolojideki değişim, organizasyonel (örgütsel) düzenleme veya

prosedürler, yeni gelişmeler, yeni yöntemlerle birlikte inşaat projeleri yönetimi farklılık göstermektedir (Hendricksen, 2000). PMBOK’da verilen Proje Yönetimi Bilgi Tabanı kapsamında proje yöneticisinin görevleri; proje yönetimi planlaması, maliyet yönetimi, süre yönetimi, kalite yönetimi, sözleşme yönetimi ve uygulaması, güvenlik ve risk yönetimidir. Bunlarla birlikte proje yöneticisi, tüm paydaşların iletişiminden de sorumludur (Rokooei, 2015). Bu görev kapsamlarından yola çıkarak dijital üretim teknolojilerinin proje yönetim süreçlerine etkileri değerlendirilmiştir.

İnşaat sektöründe Endüstri 4.0 etkileri sonucunda proje ve yapım yöneticilerine yapılan görev önerileri, yine BIM teknolojisi ile yürütülen projeler yaşam döngüsü üzerinden değerlendirilmiştir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 : Teknoloji işbirlikteliğine yönelik proje yöneticisine ait görev önerileri.

Programlama	Projeye uygun kullanılabilecek teknolojilerin önerilmesi Fizibilitenin teknoloji yatırım ve kullanım maliyetlerini içerecek şekilde hazırlanmalı Veri yönetimi için hazırlık yapılmalı Araştırma ve Geliştirme kurulmalı, varsa yeni projeye uygun kaynaklar belirlenmeli Teknoloji işbirlikteliklerine uygun sözleşme hazırlığı yapılmalı
Konsept Tasarım	Projeye uygun kullanılabilecek teknolojilerin belirlenmesi Veri yönetimi haritaları oluşturulmalı Prefabrikasyon kullanılacaksa modularizasyon için çalışmalar yapılmalı Üretici ile iletişim kurulmalı 3B yazıcı teknolojileri kullanılacaksa buna uygun çalışmaların organize edilmesi ve yönlendirilmesi Ar&Ge'ye geri besleme yapılmalı
Detaylı Tasarım	Modularizasyonun belirlenmesi Fabrikasyona yönelik verilerin organize edilmesi Üretici ile iletişim kurulmalı Veri yönetimi yapılmalı Faz Planlama İmalat planlama Sanal prototip oluşturulmasının organizasyonu sağlanmalı 3B yazıcı teknolojileri kullanılacaksa buna uygun çalışmaların organize edilmesi ve yönlendirilmesi Ar&Ge'ye geri besleme yapılmalı
Analizler	Simüle testlerin organizasyonu, geri beslemelerin organizasyonu Çakışma analizleri Veri yönetimi analizleri Kullanılacak üretim teknolojisine uygun Mock-up'ların organizasyonu Ar&Ge'ye geri besleme yapılmalı
Dokümantasyon	Veri yönetimi yapılmalı

	Bulut Bilgi İşlem kullanılacaksa bunun organizasyonu Dokümantasyonun dijitalizasyonu Siber Fiziksel Sistemler kullanılacaksa hangi yapı bileşenlerinde kullanılacağıının organizasyonu
Fabrikasyon	Veri yönetimi yapılmalı Siber Fiziksel Sistemler kullanılacaksa etiketli yapı bileşeni kontrolü
Yapım 4D/5D	Faz planlama kontrolünün otomasyonu İmalat Planı kontrolü otomasyonu Maliyet kontrolü otomasyonu Prefabrike imalat kontrolü Siber Fiziksel sistemlerle atık yönetimi İmalat için uygun ortam verilerinin sensörler aracılığıyla kontrolü As-built yönetimi Ar&Ge'ye geri besleme yapılmalı
Yapım Lojistiği	Yerinde imalat yapacak 3B yazıcı organizasyonu Prefabrike imalat montaj kontrolü Yerinde imalat yapacak robot organizasyonu Akıllı vinçlerin organizasyonu Ar&Ge'ye geri besleme yapılmalı
İşletme ve Bakım	İşletme yönetimi yapacak organizasyona doğru verinin aktarılması

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan araştırmalarla ortaya konmuş olan inşaat sektöründe giderek düşen verimlilik oranı, inovatif yeniliklerle artırılabilir. İnşaat sektörü kendine has özellikleri ve davranışı olan bir sektör olduğundan, inovatif gelişmelerin adaptasyonu uzun sürmektedir. Buna bağlı olarak, dijitalize ve otomotize olmuş üretim süreçlerini öneren Endüstri 4.0 kavramı inşaat sektöründe yeterince dikkat çekmemiştir. Bunda inşaat projelerinin yerine özgü ve tekrarı olmayan projeler olması, ayrışık ve pek çok bilgi alanından paydaşı olması önemli bir etkidir. İnşaat sektörünün karakteristik zorluklarına yönelik tüm sektör paydaşlarını kapsayan iki adet yaklaşım sunulmuştur. Bunlardan biri, modularizasyon ve prefabrikasyon, diğeri ise BIM'dir.

Bir projenin performansını artırmak için, üretkenliğini, verimini, değerini, kalitesini ve sürdürülebilirliğini artırmak bununla birlikte, projenin yaşam maliyetlerini, gecikmelerden kaynaklı süre ve emek kayıplarını, teslim sürelerini, iş tekrarlarını azaltmak hedeflenir. BIM modeli bu kriterleri etkili iletişim ve işbirliği ile sağlamayı amaçlar. BIM teknolojisini kullanıldığı projelerde olgunluk seviyelerinde 2. seviyeden sonra geçilecek 3. seviye, BIM'i merkeze alan entegre ağ sistemlerini hedefler. 3. seviyedeki BIM teknolojisi ile yürütülen projeler, tamamen entegre olduğundan "iBIM" bir başka deyişle, Integrated BIM olarak adlandırılır. BIM teknolojisi ile yürütülen projelerin öngörülen son seviyesi olan bu seviyede, BIM, tüm boyutlarıyla işbirliğine olanak tanıyan bir model sunucusunda (model server), IFC standartlarıyla uyumlu bir web servisinden etkin kullanılan, açık üretim süreci ve veri entegrasyonu ile kullanılır. BIM'in diğer dijital üretim teknolojileriyle entegrasyonu, verimli ve doğru bir şekilde işbirlikteliği sağlaması, BIM 3. olgunluk seviyesine geçiş çalışmaları arasında değerlendirilmesi gereken bir konudur.

Yapılan araştırmada, öncelikle BIM süreçleri değerlendirilerek, 3. seviye olan bütünleşik BIM süreçlerine geçişte eksik ya da yetersiz kalan yönlerini belirleyerek bu maddelerin dijital üretim birlikteliğinde ne gibi sonuçlar doğuracağı incelenmiştir. Çalışmanın amacı, inşaat sektöründe verimliliği artırmaya yönelik, BIM sistemleri ve

dijital üretim teknolojilerinin birlikte çalışabilirliğinin altını çizmektir. Bu amaçlar şöyle sıralanabilir;

- Endüstri 4.0 konseptinin inşaat sektöründeki etkilerinin incelemek.
- BIM ve dijital üretim kavramlarının arasındaki ilişkinin sorgulamak.
- İnşaat projesi süreçlerinde BIM teknolojisi paralelinde kullanılabilecek teknolojilerin belirlemek.
- Birlikte çalışabilirliğe yönelik fayda ve eksikleri belirlemek.
- BIM teknolojisinde dijital üretim birlikteliğine yönelik geliştirilmesi gereken konuların belirlemek.

Belirlenen amaçlara yönelik, inşaat sektöründe dijital üretim kapsamında BIM teknolojisinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için bir kavramsal çerçeve oluşturulmuştur. Bu çerçeve kapsamında genelde işbirlikteliği örnekleri, özelde ise BIM teknolojisi ile yürütülen projeler özellikleri değerlendirilmiştir.

Kavramsal çerçevenin oluşturulabilmesi için öncelikle literatür araştırması yapılmıştır. Belirlenen kavramsal çerçeve dâhilinde değerlendirilen BIM süreçleri ve Endüstri 4.0 teknolojileri, inşaat sektörüne dijital üretim adaptasyonuna yönelik değerlendirilmiştir. Kavramsal çerçeveyi, bir inşaat projesinin süreçleri, katılımcıları, iş kalemleri ve mevcut işbirliktelikleri, veri paylaşımı ve kullanılan veri tipleri, standart ve yönetmelikler oluşturmaktadır.

İnşaat sektörünün karakteristikleri bağlamında, sektörün değer zincirini geliştirmek üzere Endüstri 4.0 konseptinin inşaat sektörüne yönelik anahtar özellikleri üç ayrı boyutta incelenmiş ve olası çözümler aşağıda sıralanmıştır:

- i. Değer zinciri ve değer zincirinde yer alan proje paydaşlarının (işveren, yüklenici, mimar, alt yüklenici, tedarikçiler) artan sayısına bağlı değer ağı arasında yatay entegrasyon,
- ii. Tüm gruptaki teknolojilerin kullanımı yoluyla mühendislik ve değer zincirinin uçtan uca dijital entegrasyonu,
- iii. Dijitalleştirme ve sanallaştırma teknolojileri ya da otomasyon teknolojileri kullanılarak, IT (Enformasyon Teknolojileri) sistemi, üretim süreçleri ve veri

akışlarının şirket içinde bütünleştirilmesi sonucunda dikey bütünleşmenin sağlanması ve ağıba bağlı üretim sistemlerinin kullanılması.

Endüstri 4.0 konseptinde gelişen teknolojiler, inşaat sektörünün karakteristik özellikleri olan inşaat projelerinin karmaşıklığı ve belirsizliğini azaltacak, proje paydaşları arasında iletişimi ve işbirliğini artırabilecek ve tüm bunlarla birlikte projelerin kalite ve verimliliğini artırabilecek vaatlere sahip görünmektedir.

Literatür araştırmasının devamında, yine Endüstri 4.0 teknolojilerinden biri olarak sayılan ve giderek artan bilinirliği ve kullanımıyla BIM teknolojisi özellikleri incelenmiştir. Literatürde yer alan BIM tanımlarından yola çıkılarak BIM teknolojisi kullanan inşaat projelerinin özellikleri belirlenmiştir. BIM teknolojisinin tek bir tanımı bulunmamaktadır. Bunun sebebi çok yönlü olmasıyla birlikte kullanıcı ve hedeflere göre şekillenebilmesi ve sonuç vermesidir.

Çalışmada BIM özellikleri dijital üretime yönelik birlikte çalışabilirliği etkileyebilecek özellikleri faydaları ve eksiklikleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. BIM projesi tüm teknolojilerin inşaat sektöründe proje yaşam döngüsü süreçlerinde kullanılabilmesi için anahtar teknoloji konumundadır. Proje yaşam döngüsünün devamlılığı için dijital proje enformasyonunun kaynağını oluşturur. Bu sebeple BIM teknolojisinin diğer tüm teknolojilerle iletişim içerisinde bulunması çok önemlidir.

BIM teknolojisinin araştırma kapsamında ele alınan özellikleri, kavramsal çerçeveyi oluşturmaya yönelik olup; veri akışı, detay seviyelerinin proje bazında belirlenmesi, nesne tabanlı modelleme oluşu, algoritmik tasarım yetkinliği, dokümantasyon dijitalleştirilmesi, hata öngörüler ve çakışma analizleri yetenekleri, karar vermeye etkisi, sanal prototipleme oluşu, içerdiği enformasyonun derinliği ve eklenen boyutları olarak belirlenmiştir.

Belirlenen BIM teknolojisi özellikleri ve Endüstri 4.0 konseptinde inşaat sektöründe kullanılabilecek teknolojilerin faydaları ve zorlukları çalışma çatkısını desteklemek üzere değerlendirilmiştir. Dijital üretimin inşaat sektörüne sağlayacağı faydaları ve zorlukları inşaat sektöründe sanayileşme konseptinde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda ön plana çıkan faydaları; maliyet ve süre tasarrufu, kalitenin, işbirliği ve iletişimin artması, işveren-müşteri ilişkisine katkı sağlaması, iş güvenliğinin artması, endüstri imajını iyileştirmesi, sürdürülebilirliğin artmasıdır. Literatürde geçen zorlukları ise; adaptasyonda tereddüt, yüksek uygulama maliyetleri, örgütsel ve

imalat tekniği değişiklikleri, gelişmiş becerilere olan gereksinim, bilgi yönetimi, kabullenme, standart ve referansların olmaması, yüksek donanımsal gereklilikler, veri güvenliği, mevcut iletişim ağıının güçlendirilmesi gerekliliği, mevzuata uygunluk, yasal ve sözleşmesel belirsizliklerdir.

Çalışmayı destekleyici olarak Dünya’da yer alan çeşitli dijital üretim örnekleri kısaca incelenmiştir. Sonrasında literatürde yer alan kaynaklar doğrultusunda BIM teknolojisinin Endüstri 4.0 konseptli teknolojilerle birlikte çalışabilirliğine yönelik araştırmalar ve çalışmalar değerlendirilmiştir.

Çalışmanın devamında öncelikle BIM teknolojisinin dijital üretimdeki mevcut durumu ve rolü incelenmiştir. İnşaat sektöründe verimliliği artırmaya yönelik dijital üretimin kullanılmasında BIM teknolojisinin belirli özellikleri süreci kolaylaştıracakı öngörülmektedir. Bunlar teknolojinin; kontrollerle daha az hata payı, faz planlama ile yapıma yönelik maliyet, süre, iş gücü tahminleri yapılabilmesi ve bu tahminlerin güncellenebilmesi, dijital kaynak veri oluşturma, revizyonların hızlı yapılabilmesi, diğer paydaş yazılımlarıyla ortak dil kullanması, iletişimi artırması ve parametrik tasarıma olanak tanıma özellikleridir. BIM özelliklerinin dijital üretim teknolojileriyle birlikte çalışabilirliğinin incelenmesi için oluşturulan kavramsal çerçeve üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. BIM ile yürütölen inşaat projesi süreçleri içerisinde tüm proje paydaşları, iş kalemli, mevcut işbirliktelikleri, kullanılan ve paylaşılan veri tipleri, mevcut standartlar kavramları üzerinden çerçeve oluşturulmuştur.

BIM süreçlerinde birlikte çalışabilecek teknolojiler için öneriler yapılmıştır. Programlama aşamasında dijital üretim teknolojilerinden Nesnelerin İnterneti (Nesnelerin İnternet’i), robotik teknolojileri arazi verilerinin ve ihtiyaçlarının doğru anlaşılabilmesi için kullanılabilir. Dijitalleşme ve sanallaşma teknolojilerinden sosyal medya ve otomasyon hem satış ve pazarlama hem de fizibilite hazırlıklarında BIM teknolojisi ile birlikte kullanılabilir. Konsept tasarımda yine BIM teknolojileriyle birlikte maket çalışmaları için 3B yazıcılar kullanılabilir. Simölasyonlar, AR/VR/MR teknolojileri ile desteklenebilir. Mobil Hesaplama arazi algılama, deneyimleme için destekleyici olarak kullanılabilir. Genel olarak bakıldığında bu aşamada BIM teknolojisi dijital kaynak veriyi kontrollü bir şekilde oluşturmayı sağlarken dijital üretim teknolojileri tasarımı geliştirmeye yönelik destekleyici olmaktadır.

Detaylı tasarım aşaması, yapım ve yapım sonrası süreçlerde kullanılacak teknolojilerin belirlenmesi tasarıma yön verecektir. Detaylı tasarım aşaması teknoloji kararlarına göre teknolojilerden destek alacak, örneğin prefabrikasyon teknolojisine uygun siber fiziksel sistemler, modularizasyon gibi teknolojiler projeye eklenecektir. Analiz aşamasında simülasyonlar, AR/VR/MR teknolojileri projenin enerji verimliliği, risk senaryoları, erişilebilirlik gibi konularda tasarım kontrollerinin yapılmasına yardımcı olacaktır. Genel olarak bu aşama Nesnelerin İnterneti, büyük veri gibi teknolojilerle kullanılacak otomasyon, robotik, 3B baskı, prefabrikasyon gibi dijital üretim teknolojilerine uygunluk denemeleri yapılmasını sağlayacaktır. Dokümantasyon aşaması, dijital üretime kaynak oluşturacak dijital dokümantasyon yapılacak aşamadır. Bu aşamada BIM başlı başına yeterli görünse de büyük veri, Nesnelerin İnterneti gibi teknolojilerden kaynak alabilir, siber fiziksel sistemler için adresleme yapılabilir. Böylelikle fabrikasyon sürecinde üretilecek yapı bileşenlerinin yapım aşamasında kontrolü ve takibi kolaylaşacaktır. Yapım aşamasında BIM teknolojisinin faz planlama özelliği ile birlikte kullanılacak teknolojilere yönelik yapı bileşenleri için montaj planlama yapılabilir. Yapım sürecinin başlangıcında süre, maliyet modelleri güncellemeleri büyük veri, Nesnelerin İnterneti teknolojileri kullanılarak yapılabilir.

Prefabrikasyon, robotik, 3B baskı teknolojileri fabrikasyon sürecinde veya yapım sürecinde ayrı ayrı veya iki aşamada da kullanılabilir. Yapım aşamasında yerinde kullanılacak robotik, 3B baskı gibi dijital üretim teknolojileri kontrolü ve yönetimi BIM modelini kaynak kullanan siber fiziksel sistemler, otomasyon, Mobil Hesaplama, bulut bilişim teknolojileri kullanılabilir.

İşletme ve Bakım sürecinde, proje bünyesinde entegre bir şekilde gelmiş olan BIM modeli ve Siber Fiziksel Sistemler, projenin enerji verimlilik yönetimine, bakım süreçlerine, güvenlik sistemlerine yardımcı olacaktır. İşletme ve Bakım süreçleri dijitalleşen yapılar, Nesnelerin İnterneti ve büyük veri teknolojileri ile Akıllı Şehirler konseptinin oluşmasını sağlayacaktır. Renovasyon veya Yıkım sürecinde dijital veri, siber fiziksel sistemler ile atık yönetimine katkı sağlayacaktır. Nesnelerin İnterneti ve bulut bilişim teknolojileriyle tutulan kayıt verileri Renovasyon için projenin fonksiyon değişimi, eklentiler konusunda enformasyon sağlayabilir.

Dijital üretim teknolojilerinin BIM süreçleri konusunda değerlendirildiğinde, yapım sürecini optimize ederken tasarım sürecinin etkili kullanımını desteklediği

söylenabilir. Dijital üretim teknolojileri, BIM projesinde devreye girdiğinde döngü halinde ifade edilen BIM süreçlerinin, başlangıç bitiş ilişkisinden ziyade bütünleşik bir hale gelecektir. Dijital üretim ve BIM işbirliğinde tasarım süreci, tüm proje paydaşlarıyla beraber ilerletilmelidir. En önemli süreç tasarım sürecidir. Çalışmada BIM süreçlerinde Programlama'dan Fabrikasyon'a kadar olan sürecin kendi içerisinde bir döngü oluşturması önerisi geliştirilmiştir. İnşaat projelerinin tek sefere ve kendine özgü olmaları sebebiyle her projede tasarım döngüsünün, proje için yeterli olgunluk seviyesine ulaşana kadar bir Ar&Ge süreci olarak değerlendirilmesi, yapım süreci optimizasyonu ve süre ve maliyet tasarrufu için önemlidir. Dijital üretim teknolojileri kullanılacak inşaat projeleri yapılacak küçük ölçeklerde imalat numuneleri, gerçek ölçekli kısmi numuneler imalatları ile hem yapılabilirliği hem de tasarımı sınayacaktır. Tasarım döngüsünü gerektiği kadar tekrarlar gerçekleştirilen proje sonrasında dokümantasyon, fabrikasyon ve yapım süreçleriyle döngüye devam edecektir. Kullanılacak dijital üretim teknolojilerin yetkinliği projeye, proje teknolojilere katkı sağlayabilir. Böylelikle bir Ar&Ge döngüsü oluşacaktır. Bu süreç tüm paydaşların kendi uzmanlıkları çerçevesinde gerçekleşecektir.

Dijital üretimin BIM teknolojisi ile beraber kullanılacağı inşaat projelerinde, proje hedefleri programlama ve konsept proje aşamasında belirlenmeli ve hangi teknolojinin hangi hedeflere yönelik hangi süreç ve alanda kullanılacağı belirlenmelidir. Bu kararların verilebilmesi için, tüm proje paydaşlarının proje başlangıç aşamasından itibaren birlikte çalışabilir olmaları gerekmektedir. Dijital üretim teknolojileri ve BIM birlikte çalışabilirliği proje paydaşları açısından değerlendirildiğinde bu süreç, Mimar, Mühendislikler, Yüklenici ekibinin, Üretici, Malzeme Üreticisi, Teknoloji Danışmanları gibi diğer paydaşlarla geleneksel yöntemlere ve BIM teknolojisi kullanılan fakat geleneksel yöntemle inşa edilen projelere kıyasla daha bütünleşik çalışmalarını gerektirmektedir. Tüm dijital üretim ve BIM kullanılacak inşaat projeleri süreçleri kapsamında paydaşların ortak kaynağı BIM projesidir. Bu sebeple tüm paydaşlar arasında verilerin doğru bir şekilde aktarılması, enformasyon alışverişinin sağlanması, Veri Yönetimini gerektirir. Tüm paydaşlar arasında en kritik görev, Veri Yönetimi yapacak BIM Yöneticisi ve Proje Yöneticisine aittir. Veri akışının düzgün sağlanmadığı durumda BIM ve dijital üretim teknolojilerinin fayda sağlayacak özelliklerini verimli bir şekilde kullanmak mümkün olmayacaktır.

Dijital üretim teknolojilerinin inşaat projelerinde verimli bir şekilde kullanımı için doğru planlama süreci gerekir. IPD sistemleri ile birlikte proje paydaşlarının projenin ilk aşamalarından itibaren işbirliği içinde olması, BIM ve dijital üretim birlikteliğini desteklemektedir. Proje hedeflerinin doğru belirlenmesi ve uygulanması için bütünlük sağlanan teslim sistemleri gereklidir.

BIM teknolojisi ile yürütülen inşaat projesi, proje yaşam döngüsünün devamlılığı için dijital proje enformasyonunun kaynağını oluşturur. Bu sebeple BIM teknolojisinin diğer tüm teknolojilerle iletişim içerisinde bulunması çok önemlidir. İletişimle birlikte kesintisiz karşılıklı alışveriş devam edecektir. Bu ilişkinin doğru sağlanabilmesine yönelik BIM teknolojisi özellikleri dijital üretim kapsamında değerlendirilip faydalı olan ve zorluk oluşturabilecek özellikleri belirlenmiştir. BIM teknolojisinin paydaşlar arasında veri akışı sağlayabilmek adına ortak bir dil olarak IFC dosya formatı kullanması ve bu formatın geometrik ve geometrik olmayan enformasyonu içermesi ve aktarmasıyla faydalı bir özelliğidir. Ancak fabrikasyona yönelik verinin aktarılmasında yetersiz kaldığı noktalar görülmüştür. BIM teknolojisinin içerdiği enformasyon, dokümanı dijitalleştirme, algoritmik tasarım yetkinliği, hata kontrolü ve çakışma analizi özelliklerini giyilebilir teknolojilerle kullanabilme potansiyeli, faz planlama ve kontrolün otomasyonu gibi faydalı özellikleri bulunmaktadır. Bununla birlikte özellikle eğimli geometrik verilerin aktarımında yetersizlik, detay yetersizliği, siber güvenlik problemleri, proje yönetim araçlarının web tabanlı teknolojilerle iletişim kuramaması, gereksiz enformasyon girişinden kaynaklı süre kayıpları gibi negatif ve geliştirmesi gereken yönleri belirlenmiştir.

İnşaat sektöründe verimliliği artırmaya yönelik teknoloji birlikteliklerinin proje yönetim sistemlerine de etkisi olacaktır. PMBOK'da verilen Proje Yönetimi Bilgi Tabanı kapsamında proje yöneticisinin görevleri; proje yönetimi planlaması, maliyet yönetimi, süre yönetimi, kalite yönetimi, sözleşme yönetimi ve uygulaması, güvenlik ve risk yönetimidir. Bu görevler dışında proje yöneticisi paydaşlar arasındaki iletişimden de sorumludur. Bu görev kapsamlarından yola çıkarak dijital üretim teknolojilerinin proje yönetim süreçlerine etkileri değerlendirilmiş ve çeşitli görev önerileri geliştirilmiştir.

Tüm değerlendirme süreçlerinin sonucunda, inşaat sektöründe verimliliğin artırılması gerekliliği, BIM teknolojisi ve dijital üretim teknolojileri kullanımıyla artırılabilir

görülmektedir. Proje yaşam döngüsünde de süre ve maliyet miktarının paralel gittiği süreçler sırasıyla tasarım, yapım ve işletmedir. Yapım sürecinde sağlanacak optimizasyon, tasarım sürecinin etkili kullanımıyla mümkün olacaktır. Endüstri 4.0 konseptli teknolojilerin kullanımı tasarım sürecini etkili kullanımını ve yapım süreci optimizasyonunu desteklemektedir.

Yapılan çalışmanın sonucunda dikkat çeken nokta, teknoloji birlikteliğinin kullanım amaçlarının şu şekilde yönlenmesidir:

- İnşaat sektörünün endüstrileşmesi ve seri üretime olanak tanımak.
- Ulaşım, hava ve ortam şartları zorlu proje alanlarında imalat yapabilmek.
- Özel tasarım projelerde imalat yapabilmek.

Dijital üretim teknolojilerinin kullanılabileceği bu alanlar için ortak nokta imalat süresinin kısalabilmesi ve iş güvenliğinin artması diyebiliriz. Projenin yaşam döngüsü süresince anahtar kaynak veriyi oluşturan BIM teknolojisi, inşaat projelerinde dijital üretim teknolojileriyle desteklenmesiyle süre maliyet optimizasyonu ve kalitenin artması, iş güvenliğinin artması gibi faydalarla birlikte sektör verimliliğini artıracaktır.

Araştırmada dikkat çeken bir diğer konu, teknolojilere yönelik araştırmaların yapıldığı kurumlar, yapılan örnek projeler incelendiğinde, ülkelerin inşaat sektöründe dijital üretim konusunu hedef halinde ele almaları ve desteklemeleridir. Hedefler BIM teknolojisine geçiş, BIM'in seviyelerinde ilerleyebilme ve böylelikle dijital üretim teknolojileriyle adaptasyon olarak belirlenmekte ve bu yönde standartların geliştirilmesi, Ar&Ge'nin desteklenmesinde çalışmalar yapılmaktadır. Böylelikle bu ülkelerde inşaat sektörünün adaptasyonu daha hızlı olabilmektedir.

Dünya çapında mevcut örnekler incelendiğinde, yapılan örneklerin tekil, prototip niteliğinde uygulamalar olması, ETH Zürih gibi açık kaynak araştırma yapacak kurumların azlığı adaptasyon sürecini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple firma bazında adaptasyon ele alındığında, karşılaşılabilecek bariyerlere karşı sürecin iyi yönetilmesi gerekmektedir. Sektör ve firma bazında değerlendirildiğinde teknoloji birlikteliği ve adaptasyonun önemli iki adet kapsamı bulunmaktadır. Bunlardan biri eğitim diğeri ise Ar&Ge'dir. Eğitim yardımıyla birlikte sektör paydaşlarının farkındalığı artırılabilir, bilgi sahibi, donanımlı yeni elemanlar yetişecektir. Kabuk değişiminin başlangıcı eğitim diyebiliriz. Eğitimin devamı gibi olarak

değerlendirilebilecek Ar&Ge süreci açık kaynak olarak tüm firmalar bünyesinde geliştirilmelidir. Böylelikle firmalar birbirlerinden de bilgi öğrenebilecek ve adaptasyon süreci hızlanacaktır.





KAYNAKLAR

- Abbasnejad, B., & Moud, H. I.** (2013). BIM and Basic Challenges Associated with its Definitions , Interpretations and Expectations. *International Journal of Engineering Research and Application*, 3(2), 287–294.
- Abramowicz, W.** (2015). Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results. *Lecture Notes in Business Information Processing*, 208, 16–27. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19027-3>
- Agustí-Juan, I., & Habert, G.** (2016). Environmental design guidelines for digital fabrication. *Journal of Cleaner Production*, (November). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.190>
- Alavi, A. H., & Gandomi, A. H.** (2017). Big data in civil engineering. *Automation in Construction*, 79, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.12.008>
- Arayici, Y., Coates, P.** (2012). A system engineering perspective to knowledge transfer: a case study approach of BIM adoption, in: T. Xinxing (Ed.), *Virtual Reality – Human Computer Interaction*, ed., InTech.
- Azhar, S.** (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry, 11(Bazjanac 2006), 241–252.
- Azhar, S., & Brown, J.** (2008). BIM-based Sustainability Analysis : An Evaluation of Building Performance Analysis Software.
- Azimi, R., Lee, S., Abourizk, S. M., & Alvanchi, A.** (2011). A framework for an automated and integrated project monitoring and control system for steel fabrication projects. *Automation in Construction*, 20(1), 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.07.001>
- Barnes, P. Davies, N.** (2014). *BIM in Principle and in Practice*. London:ICE Publishing
- Bew, M., Underwood, J.** (2010). Delivering BIM to the UK market. In: Underwoord, J., Isikdag, U. (eds.) *Handbook of Research on Building Information Modelling and Construction Informatics: Concepts and Technologies*. IGI Global, Hershey
- Bock, T.** (2015). The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in Construction*, 59, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.022>

- BorjeGhaleh, R. M., & Sardroud, J. M.** (2016). Approaching Industrialization of Buildings and Integrated Construction Using Building Information Modeling. *Procedia Engineering*, 164, 534–541.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.655>
- Byrne, G., Ahearne, E., Cotterell, M., Mullany, B., O'Donnell, G. E., & Sammler, F.** (2016). High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing - A Roadmap. *Procedia CIRP*, 46, 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.038>
- Chiang, Y. H., Hon-Wan Chan, E., & Ka-Leung Lok, L.** (2006). Prefabrication and barriers to entry-a case study of public housing and institutional buildings in Hong Kong. *Habitat International*, 30(3), 482–499.
<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2004.12.004>
- Chu, B., Jung, K., Lim, M. T., & Hong, D.** (2013). Robot-based construction automation: An application to steel beam assembly (Part I). *Automation in Construction*, 32, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.016>
- Construction Industry Council** (2013). The Digital Plan of Work & Assemblies., (March), 1–55. <https://doi.org/Draft Only> Accessed Online www.bimtaskgroup.org [Accessed 5March 2013].
- Construction Industry Council** (2013). BUILDING INFORMATION CIC / BIM Protocol. *Cic*, 1–15.
- Correa, F. R.** (2016). Robot-Oriented Design for Production in the context of Building Information Modeling, (Isarc).
- Datta, S., Sharman, M., & Chang, T.-W.** (2016). Computation and fabrication of scaled prototypes. *Automation in Construction*, 72, 26–32.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.030>
- Dave, B., Kubler, S., Främling, K., & Koskela, L.** (2016). Opportunities for enhanced lean construction management using Internet of Things standards. *Automation in Construction*, 61, 86–97.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.10.009>
- Dubois, A., Gadde, L.-E.** (2002). The construction industry as a loosely coupled system: implications for productivity and innovation, *Constr. Manag. Econ.* 20 (October (7)) 621–631.
- Dunn, N.** (2012). Digital Fabrication in Architecture, pp. 26–39. Lawrence King Publish- ers, London
- Eadie, R., Browne, M., Odeyinka, H., McKeown, C., & McNiff, S.** (2013). BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. *Automation in Construction*, 36, 145–151.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.001>

- Eastman, C.** (1999). *Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction*. CRC Press, USA
- Eastman, C., Bond, A.H., Chase, S.C.** (1991). Application and evaluation of an engineering data model. *Res. Eng. Des.* 2(4), 185–208
- EU R&D Scoreboard** (2016). *The 2016 EU Industrial R&D Investment Scoreboard*, European Commission, JRC/DG RTD.
- Everett, B. J. G., & Slocum, A. H.** (1994). Project Construction differs from most other industries because of its “ project ,” 120(2), 443–452.
- Ezcan, V., Isikdag, U., & Goulding, J. S.** (2013). BIM and Off-Site Manufacturing : Recent Research and Opportunities. *Paper Presented at the 19th CIB World Building Congress Brisbane, Australia*.
- Fukuda, T., Tokuhara, T., & Yabuki, N.** (2016). A dynamic physical model based on a 3D digital model for architectural rapid prototyping. *Automation in Construction*, 72, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.07.002>
- Ganzha, M., Paprzycki, M., Pawlowski, W., Szmeja, P., & Wasielewska, K.** (2016). Semantic interoperability in the Internet of Things: An overview from the INTER-IoT perspective. *Journal of Network and Computer Applications*, 81, 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.08.007>
- Gramazio, F., Kohler, M., Langenberg, S.** (2014). *Fabricate: Negotiating Design & Making*. gta Verlag, Zurich.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M.** (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Hack, N., Lauer, W.V.** (2014). Mesh-mould: robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork. *Archit. Des.* 84, 44e53.
- Helm, V., Ercan, S., Gramazio, F., & Kohler, M.** (2012). Mobile robotic fabrication on construction sites: DimRob. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4335–4341. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385617>
- Helm, V., Willmann, J., Gramazio, F., & Kohler, M.** (2014). Gearing Up and Accelerating Cross-fertilization between Academic and Industrial Robotics Research in Europe:, 94, 63–83. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03838-4>
- IEEE** (1990). *IEEE Standart Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standart Computer Glossaries* (Çevrimiçi sözlük). Son giriş Kasım 13, 2017, kaynak <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=2267>

- IET** (2012). The Institution of Engineering and Technology, Digital Engineering and Project Controls in the Construction Industry [Online]. Son giriş Kasım 13, 2017, kaynak <http://www.theiet.org/sectors/built-environment/files/Laing-digital-casestudy.cfm>.
- Isikdag, U.** (2015). *Enhanced Building Information Models: Using IoT Services and Integration Patterns*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21825-0>
- Isikdag, U., & Underwood, J.** (2010). A Synopsis of the Handbook of Research on Building Information Modelling. *W078-Special Track 18th CIB World Building Congress May 2010 Salford, United Kingdom*, (March 2016), 84.
- Khalfan, M.** (2015). Building Information Model and Supply Chain Integration: A Review. *Journal of Economics, Business and Management*, 3(9).
- Khanzode, A., Fischer, M., & Reed, D.** (2007). Challenges and benefits of implementing virtual design and construction technologies for coordination of mechanical, electrical, and plumbing systems on large healthcare project. *Image Rochester NY*, 5(Vdc), 205–212. Retrieved from <http://itc.scix.net/data/works/att/w78-2007-032-107-Khanzode.pdf>
- Kraatz, J.A. , Hampson, K.D., Sanchez, A.X.** (2014). The global construction industry and R&D, *R&D Investment and Impact in the Global Construction Industry*, 1st ed., Routledge, 2014, pp. 4–23.
- Labonnote, N., Ronnquist, A., Manum, B., & Rother, P.** (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>
- Lim, J., & Lim, J.** (t.y.). Software Environments for Designing with Robotic Fabrication, 1–20.
- Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G., Thorpe, T.** (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation Constr.* 21, 262e268.
- Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S.** (2015). Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *CAD Computer Aided Design*, 60, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.011>
- Macaulay, T., & Macaulay, T.** (2017). Chapter 11 – Interoperability, Flexibility, and Industrial Design Requirements in the IoT. *RIoT Control*, 197–219. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419971-2.00011-X>
- MacLeamy Patrick** (2016). *Productivity Manufacturing vs Construction* [PowerPoint sunumu]. Graphisoft Archicad Key Client Conference 2016, Budapeşte

- Maining, M., & Vargas, R.** (2013). Digital Fabrication Processes of Mass Customized Building Facades in Global Practice. *Sigradi*.
- Microsoft** (2014). Construction Firm Uses Cloud-Based Tools to Advance Mobility and Productivity [Çevrimiçi]. Son giriş Kasım 13, 2017, kaynak <https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0ahUKEwiqo9H-1bHKAhXk63IKHR2vDf8QFghuMAk&url=https%3A%2F%2Fcustomers.microsoft.com%2FPages%2FDownload.aspx%3Fid%3D10787&usg=AFQjCNFN7jbY9jj-clqUP7KViRgYbZ5WWA>
- Migilinskas, D., Popov, V., Juocevicius, V., & Ustinovichius, L.** (2013). The benefits, obstacles and problems of practical bim implementation. In *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.097>
- Mihindu, S., & Arayici, Y.** (2008). Digital construction through BIM systems will drive the Re-engineering of construction business practices. *Proceedings - International Conference Visualisation, VIS 2008, Visualisation in Built and Rural Environments*, 29–34. <https://doi.org/10.1109/VIS.2008.22>
- Mo, L., Zhang, H.** (2007). RFID antenna near the surface of metal, in: *Proceedings of IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications*.
- Motamedi, A., & Hammad, A.** (2009). RFID-assisted lifecycle management of building components using BIM data. *2009 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2009*, (Isarc), 109–116.
- Nisbet, N., & Dinesen, B.** (2010). International Alliance for Interoperability; Constructing the business case, Building information modelling. *British Standards Institution*, 20. <https://doi.org/ISBN 978 0 580 70935 7>
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F.** (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.00>
- Paulson, B. C.** (1985). Automation and Robotics for Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 111(3), 190–207. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1985\)111:3\(190\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1985)111:3(190))
- Prasath Kumar, V. R., Balasubramanian, M., & Jagadish Raj, S.** (2016). Robotics in construction industry. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(23), 1–12. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i23/95974>
- Rayna, T., & Striukova, L.** (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>

- Reichert, S., Schwinn, T., La Magna, R., Waimer, F., Knippers, J., & Menges, A.** (2014). Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles. *CAD Computer Aided Design*, 52, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.005>
- Robeller, C., Nabaei, S. S., & Weinand, Y.** (2014). Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014. Robotic Fabrication in Architecture, *Art and Design* 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04663-1>
- Sardroud, J. M., Mohajeri, R., Ghaleh, B., & Kameli, M.** (2016). An Investigation on Building Information Modeling Role in Industrialization of Buildings, 650–655.
- Smith, P.** (2014). BIM implementation - Global strategies. *Procedia Engineering*, 85, 482–492. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.575>
- Succar, B., & Kassem, M.** (2015). Macro-BIM adoption: Conceptual structures. *Automation in Construction*, 57, 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.018>
- Suermann, P. C., & Issa, R. R. a.** (2009). Evaluating industry perceptions of Building Information Modelling (BIM) impacts on construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 14(2009), 574–594. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.212.786&rep=rep1&type=pdf>
- Teicholz P.** (2004). “Labor Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies.” AECbytes 4, 2004
- Tibaut, A., Babič, N. Č., & Perc, M. N.** (2016). Integrated Design in Case of Digital Fabricated Buildings. *Energy Procedia*, 96(October), 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.125>
- Tibaut, A., Rebolj, D., & Nekrep Perc, M.** (2014). Interoperability requirements for automated manufacturing systems in construction. *Journal of Intelligent Manufacturing*, (January), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0862-7>
- The British Standards Institution.** (2015). B/555 Roadmap (FEBRUARY 2015 Update), (February), 1–7. Retrieved from <http://shop.bsigroup.com/upload/271929/B-555-Roadmap-FEBRUARY-2015.pdf>
- Underwood, J., Khosrowshahi, F., Pittard, S., & Greenwood, D.** (2013). Embedding Building Information Modelling (BIM) within the taught curriculum. *Higher Education Academy (HEA)*, (June).
- Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., Järviluoma, M., & Gambao, E.** (2013). Extending automation of building construction - Survey on potential sensor

technologies and robotic applications. *Automation in Construction*, 36, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.002>

Valero, E., & Adán, A. (2016). Integration of RFID with other technologies in construction. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 94, 614–620. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.08.037>

Velocloud (2015). Devcon Provides Reliable Access to Cloud Apps and Improves Remote Collaboration [Online]. Son giriş Kasım 13, 2017, kaynak <http://www.velocloud.com/customers/case-study-devcon>.

Wang, L. J., Zheng, R. Y., & Jian, X. S. (2013). The application of BIM in the completion phase. *Proceedings - 2013 4th International Conference on Digital Manufacturing and Automation*, ICDMA 2013, 1392–1395. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2013.332>

Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>

Yılmaz, G., Akçamete, A., & Demirörs, O. (t.y.). İnşaat Sektöründe kullanılan Bilgi ve İletişim Teknolojileri, 562–573.

Yu, W. Der, Wu, C. M., Cheng, S. T., & Chen, T. S. (2013). Enhanced function modeling for early assessment of conceptual innovative construction technologies. *Automation in Construction*, 36, 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.04.006>

Zanella, a, Bui, N., Castellani, a, Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>

Zhang, J., Long, Y., Lv, S., & Xiang, Y. (2016). BIM-enabled Modular and Industrialized Construction in China. *Procedia Engineering*, 145, 1456–1461. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.183>

Zhong, R. Y., Newman, S. T., Huang, G. Q., & Lan, S. (2016). Big Data for supply chain management in the service and manufacturing sectors: Challenges, opportunities, and future perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 572–591. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.07.013>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ebru İrem ÇETİNKAYA
Doğum Tarihi ve Yeri : 08.03.1989, Bolu
E-posta : eiremcetinkaya@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü
- **Yükseklisans** : 2014 (Başlangıç), İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Anabilim Dalı, Proje ve Yapım Yönetimi Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2012-2016 Adnan Kazmaoğlu Mimarlık Araştırma Merkezi, Mimar
- 2016-halen Adnan Kazmaoğlu Mimarlık Araştırma Merkezi, Proje Sorumlusu