

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YAPIM SEKTÖRÜNDE YALIN PROJE TESLİM SİSTEMİNE ENTEGRE
EDİLEBİLECEK ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİ VE YAPI
UZMANLARININ BAKIŞ AÇISI**

Kübra TOPRAK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YAPIM SEKTÖRÜNDE YALIN PROJE TESLİM SİSTEMİNE ENTEGRE
EDİLEBİLECEK ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİ VE YAPI
UZMANLARININ BAKIŞ AÇISI**

Kübra TOPRAK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPIM SEKTÖRÜNDE YALIN PROJE TESLİM SİSTEMİNE ENTEGRE
EDİLEBİLECEK ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİ VE YAPI
UZMANLARININ BAKIŞ AÇISI**

**Kübra TOPRAK
MİMARLIK
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPIM SEKTÖRÜNDE YALIN PROJE TESLİM SİSTEMİNE ENTEGRE
EDİLEBİLECEK ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİ VE YAPI
UZMANLARININ BAKIŞ AÇISI**

Kübra TOPRAK
MİMARLIK
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 26/07/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İkbâl ERBAŞ (Danışman)
Doç. Dr. Hilal Tuğba ÖRMECİOĞLU
Doç. Dr. Ceren KATİPOĞLU ÖZMEN

ÖZET

YAPIM SEKTÖRÜNDE YALIN PROJE TESLİM SİSTEMİNE ENTEĞRE EDİLEBİLECEK ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİ VE YAPI UZMANLARININ BAKIŞ AÇISI

Kübra TOPRAK

Yüksek Lisans Tezi, Mimarlık Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İkbâl ERBAŞ

Temmuz 2023; 101 sayfa

Küreselleşen dünyayla birlikte üretimde israfın artması ve verimliliğin düşmesine paralel olarak endüstriyel verimlilik yönetimi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaca cevap veren bir çözüm aracı olan Yalın Proje Teslim Sistemini benimseyen sektörler, güvenilir iş akışı oluşturarak, her türlü israfı yok ederek ve daha hızlı ürün yönetimi sağlayarak ortaya çıkacak ürünün verimliliğini artırmaya odaklanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sektörlerden biri olan yapım sektörü, Yalın Proje Teslim Sisteminin kendi bünyesine adaptasyonunu sağlamıştır. Benzer olarak artan ve farklılaşan ihtiyaçlarla birlikte sanayi devrimiyle başlayan süreçten günümüze endüstri teknolojileri de birçok sektörde etkisini göstermiştir. Endüstri 4.0 teknolojileri olarak tanımlanan teknolojiler yapım sektöründe de yerini almıştır. Aynı zamanda gelişen teknoloji beraberinde yalın üretim anlayışını da geliştirmiş ve farklı teknolojik uygulamalar yalın üretim sürecinin hedeflerine ulaşmasında önemli bir araç haline gelmiştir. Ancak yapım sektöründe yeni uygulamaya geçilen bu sistem teknoloji ile olan birlikteliğini henüz yeterince geliştirememiştir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de yapım sektöründe son 10 yılda gelişen Yalın Proje Teslim Sistemini oluşturan yalın prensipler ve tekniklerin hedeflerine ulaşmasına katkı sağlamak ve hem tasarım hem de yapım aşamalarında kullanılabilecek Endüstri 4.0 teknolojilerini belirlemektir. Ayrıca, tespit edilen Endüstri 4.0 teknolojilerinin yalın inşaatla entegrasyonuna projenin süre, maliyet ve kalite hedeflerine katkısını değerlendirmek amacıyla sektörün ana aktörleri olan yapı uzmanlarının bakış açılarını ortaya koymaktır. Bu amaçla çalışma kapsamında sektörlerde israfa sebep olan faktörler ve yalın üretim uygulamalarında kullanılan Endüstri 4.0 teknolojileri kapsamlı bir literatür araştırması ile tanımlanmıştır. Ayrıca yapım sektöründeki Yalın Proje Teslim Sistemine entegre edilebilecek Endüstri 4.0 teknolojilerine yapı uzmanlarının bakış açıları anket yöntemi kullanılarak ortaya konulmuştur. Anket verileri SPSS istatistik programında Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA), Korelasyon Analizi, Relative Important Index (RII) kullanılarak analiz edilmiştir.

Çalışma sonuçları, Endüstri 4.0 teknolojilerinin yalın inşaat sürecine adaptasyonunu ortaya koyabilmek için yapım sürecinde israf oluşumunu önemli ölçüde etkileyen faktörlere de ışık tutmaktadır. Bulgular, YPTS sürecinin her aşamasında farklı israf türlerinin bulunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, sözleşme belgeleri, uygun olmayan ürün kullanımı, malzeme kontrolü, kazalar ve israf yönetimi planları gibi konuların ele alınmasının önemini vurgulamaktadır. Bu faktörlere yönelik çözüm

önerileri geliştirerek, yapım sürecinde israfların etkili bir şekilde azaltılması ve bunun sonucunda verimliliğin artırılması da mümkün olacaktır.

Çalışma sonuçları, yapı uzmanlarının yalın inşaat ve Endüstri 4.0 teknolojilerine ilişkin farkındalık seviyelerinin, her iki kavramı da benimseme yönünde olumlu bir eğilime işaret ettiğini ortaya koymuştur. Ancak yalın prensip, teknikler ve Endüstri 4.0 teknolojileriyle ilgili farklı düzeyde aşinalıkları olduğu tespit edilmiştir. Yapı uzmanlarının Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında yalın prensip ve tekniklere göre daha fazla bilgi sahibi olduğu ortaya konulmuştur. Yalın prensip ve tekniklerden "Kaizen" konusunda farkındalık düzeyi en yüksekken "Jidoka" için farkındalık düzeyi en düşük; Endüstri 4.0 teknolojilerinden "Sanal ve Artırılmış Gerçeklik" konusunda farkındalık düzeyi en yüksekken "Auto-ID" için farkındalık düzeyi en düşük olduğu tespit edilmiştir.

Yalın prensip ve tekniklerden ve Endüstri 4.0 teknolojilerinden tanınırlığı düşük olanların inşaat projelerinde kullanımlarını teşvik etmek için eğitim programlarına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Her iki konuda mevcut bilgi açığının kapatılması ve gelişimin sağlanması, yalın prensip ve tekniklerle Endüstri 4.0 teknolojilerinin başarılı bir şekilde entegrasyonunda yardımcı olacaktır ve sektör için büyük umut vaat etmektedir.

Yapım sektöründe YPTS sürecinde, büyük veri ve veri analitiği, bulut bilişim, dijital ikiz/simülasyon, sanal ve artırılmış gerçeklik, eklemeli üretim ve makine öğrenimi gibi teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılmasıyla inşaat projelerinin süre, maliyet ve kalite hedeflerine daha başarılı bir şekilde ulaşmak mümkün olabilir. Ancak anket sonuçları, yapı uzmanlarının bu konuda tecrübe eksikliğine sahip olduğunu ve bu nedenle elde edilecek faydanın sınırlı olabileceğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın kapsamlı bir literatür araştırması içermesi, bu alanda yapılacak bilimsel araştırmalara katkı sağlamasını beklenmektedir. Ayrıca, sektördeki bilgi eksikliğini ortaya koyduğu için eğitim programlarının geliştirilmesine, sektörel eğitimlerin verilmesine ihtiyaç olduğunu belirtmesi, yapı uzmanları ve diğer paydaşlarda farkındalık yaratmasıyla uygulama alanına da katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Çalışma, kapsamlı bir araştırmanın sonucu olsa da elde edilen bulguların uygulama alanında test edilmemiş olması çalışmanın sınırlılığını oluşturmaktadır. Gelecekte, benimsenen Endüstri 4.0 teknolojilerinin YPTS sürecinde test edilmesinin, YPTS'nin Endüstri 4.0 ile entegrasyonunun gelişimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Endüstri 4.0, Yalın Proje Teslim Sistemi, Yalın Üretim, Yapım Sektörü, Teknoloji

JÜRİ: Doç. Dr. İkbâl ERBAŞ

Doç. Dr. Hilal Tuğba ÖRMECİOĞLU

Doç. Dr. Ceren KATİPOĞLU ÖZMEN

ABSTRACT

INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES THAT CAN BE INTEGRATED INTO THE LEAN PROJECT DELIVERY SYSTEM IN THE CONSTRUCTION SECTOR AND THE PERSPECTIVE OF THE CONSTRUCTION SECTOR EXPERTS

Kübra TOPRAK

MSc Thesis in Architecture

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İkbâl ERBAŞ

July 2023; 101 pages

The increasing waste and declining efficiency in production, parallel to the globalized world, have led to the emergence of the need for industrial productivity management. Sectors that have embraced the Lean Project Delivery System, which is a solution tool that responds to this need, have focused on increasing the efficiency of the resulting products by establishing reliable workflow, eliminating all forms of waste, and enabling faster product management, leading to successful results. The construction sector is one of these industries that has adapted the Lean Project Delivery System within its own framework. Similarly, industrial technologies have shown their impact in many sectors since the process that began with the industrial revolution, accompanying the increasing and diversifying needs. The technologies known as Industry 4.0 have also found their place in the construction sector. Additionally, the evolving technology has further developed the concept of lean production and various technological applications have become important tools in achieving the goals of lean production processes. However, the construction sector has not yet fully developed its integration with technology in this newly implemented system. English abstract should be written here.

The aim of this study is to contribute to the achievement of the goals of the Lean Project Delivery System, which has developed in the construction sector in Turkey in the last 10 years, by identifying the lean principles and techniques that constitute it, and to determine the Industry 4.0 technologies that can be used in both the design and construction phases. Additionally, it aims to uncover the perspectives of construction industry professionals, who are the main actors in the sector, regarding the integration of the identified Industry 4.0 technologies with lean construction and their contribution to the project's time, cost, and quality objectives. To achieve these goals, factors causing waste in sectors and Industry 4.0 technologies used in lean production practices have been defined through an extensive literature review within the scope of the study. Furthermore, the perspectives of construction industry experts on Industry 4.0 technologies that can be integrated into the Lean Project Delivery System were revealed using a survey method. The survey data were analyzed using One-Way Analysis of Variance (ANOVA), Correlation Analysis, and Relative Importance Index (RII) in the SPSS statistical program.

The study results shed light on the factors that significantly influence waste generation in the construction process in order to demonstrate the adaptation of Industry 4.0 technologies to the lean construction process. The findings indicate the presence of different types of waste at each stage of the Lean Project Delivery System (LPDS)

process. These findings highlight the importance of addressing issues such as contract documents, improper product usage, material control, accidents, and waste management plans. By developing solution recommendations for these factors, it is possible to effectively reduce waste in the construction process and consequently increase efficiency.

The results of the study revealed that the awareness levels of construction professionals regarding lean construction and Industry 4.0 technologies indicate a positive trend towards adopting both concepts. However, it has been determined that they have different levels of familiarity with the lean principle, techniques and Industry 4.0 technologies. It has been revealed that construction experts have more knowledge about Industry 4.0 technologies than lean principles and techniques. Among the lean principles and techniques, "Kaizen" has the highest level of awareness, while "Jidoka" has the lowest level of awareness; It has been determined that the awareness level of "Virtual and Augmented Reality" among Industry 4.0 technologies is the highest, while the level of awareness is the lowest for "Auto-ID".

There is a need for training programs to promote the utilization of lean principles, techniques, and less recognized Industry 4.0 technologies in construction projects. Closing the existing knowledge gap and facilitating development in both areas will aid in the successful integration of lean principles and techniques with Industry 4.0 technologies, offering great promise for the industry.

In the construction sector, the effective utilization of technologies such as big data and data analytics, cloud computing, digital twins/simulation, virtual and augmented reality, additive manufacturing, and machine learning can lead to more successful achievement of time, cost, and quality objectives in construction projects. However, survey results indicate that construction experts have a lack of experience in this regard, which may limit the potential benefits that can be obtained.

The comprehensive literature review included in the study is expected to contribute to scientific research in this field. Furthermore, by highlighting the knowledge gap in the industry and emphasizing the need for the development of training programs and the provision of sector-specific education, the study aims to raise awareness among construction experts and other stakeholders and contribute to practical implementation.

Although the study is the result of a comprehensive research effort, the limitation of the study is that the findings have not been tested in the field of application. It is believed that in the future, testing the adopted Industry 4.0 technologies in the Lean Project Delivery System (LPDS) process will contribute to the development of the integration between LPDS and Industry 4.0.

KEYWORDS: Industry 4.0, Lean Project Delivery System, Lean Manufacturing, Construction Industry, Technology

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. İkbâl ERBAŞ

Assoc. Prof. Dr. Hilal Tuğba ÖRMECİOĞLU

Assoc. Prof. Dr. Ceren KATIPOĞLU ÖZMEN

ÖNSÖZ

Lisansüstü dönemimin başından beri benim gelişimime büyük katkıları olan, tez çalışmamın her aşamasında güzel enerjisiyle desteklerini ve tavsiyelerini eksik etmeyen, birlikte çalıştığımız için kendimi çok şanslı hissettiğim dünyalar tatlısı çok değerli hocam Doç. Dr. İkbâl Erbaş'a,

Bu noktaya gelene kadar bana katkıları olan bütün hocalarım, büyüklerim, ailem ve arkadaşlarıma,

En içten teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	vi
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGE DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	4
2.1. Yalın Düşünce, Yalın Üretim ve Yalın Yönetim	4
2.1.1. Yalın düşünceden yalın yönetime.....	4
2.1.2. Yalın üretimin temel prensipleri ve teknikleri.....	7
2.1.3. Yalın üretimin tarihsel gelişiminin temel aşamaları.....	13
2.2. Yalın İnşaat ve Yalın Proje Teslim Sistemi	17
2.2.1. Yalın inşaat yaklaşımı.....	17
2.2.2. Yalın inşaat yönetimi.....	22
2.2.3. Yalın Proje Teslim Sistemi.....	25
2.3. Endüstri 4.0	27
2.3.1. Endüstri devrimlerinin tarihsel süreci ve Endüstri 4.0'ın ortaya çıkışı.....	27
2.3.2. Endüstri 4.0 teknolojileri	30
2.4. Yalın Üretim Sürecinde Kullanılan Endüstri 4.0 Teknolojiler.....	37
2.4.1. Farklı sektörlerde kullanılan teknolojiler.....	37
2.4.2. Yapım sektöründe kullanılan teknolojiler	46
3. MATERYAL VE METOT.....	54
3.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi.....	54
3.2. Araştırmanın Kapsamı.....	54
3.3. Araştırmanın Yöntemi	54
3.3.1. Anket çalışması.....	58
3.3.2. Evren ve örneklem.....	60
3.3.3. Verilerin analizi	60
4. BULGULAR	62

4.1. Katılımcı Profili ve Farkındalık Düzeyleri Analizi	62
4.2. İsrafin Kaynaklandığı Yapım Sürecine İlişkin Görüşlerin Analizi	64
4.3. Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Yalın İnşaatla Entegrasyonunun Süre, Maliyet ve Kalite Açısından Değerlendirilmesinin Analizi	66
5. TARTIŞMA	69
5.1. Katılımcı Profili ve Farkındalık Düzeyleri Üzerinden Değerlendirme	69
5.2. Katılımcıların İsrafin Kaynaklandığı Yapım Sürecine İlişkin Görüşlerinin Değerlendirilmesi	71
5.3. Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Yalın İnşaatla Entegrasyonunun Süre, Maliyet ve Kalite Açısından Değerlendirilmesinin Analizi	74
6. SONUÇLAR	78
7. KAYNAKLAR.....	81
8. EKLER.....	95
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yapım Sektöründe Yalın Proje Teslim Sistemine Entegre Edilebilecek Endüstri 4.0 Teknolojileri ve Yapı Uzmanlarının Bakış Açısı” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

26/07/2023

Öğrencinin Adı Soyadı

Kübra TOPRAK

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

% : Yüzde

Kısaltmalar

3D : 3 Boyut

AG : Artırılmış Gerçeklik

BBÜ : Bilgisayarla Bütünleşik Üretim

DAH : Değer Akışı Haritalama

GPTS : Geleneksel Proje Teslim Sistemi

HDT : Hedef Değer Tasarımı

OYA : Otomatik Yönlendirmeli Araçlar

RFID : Radyo Frekansı Tanımlama

RII : Görelî Önem Katsayısı

RTLS : Gerçek Zamanlı Konum Sistemi

SG : Sanal Gerçeklik

SPS : Son Planlayıcı Sistem

STD : Standart Sapma

STT : Set Tabanlı Tasarım

TFV : Dönüşüm, Akış ve Değer

TÜB : Toplam Üretken Bakım

TÜS : Toyota Üretim Sistemi

TZÜ : Tam Zamanında Üretim

YİT : Yalın İnşaat Topluluğu

YPTS : Yalın Proje Teslim Sistemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İkinci Dünya Savaşı sonrası Japonya'da yalın üretimin başlaması.....	14
Şekil 2.2. Yalın üretimin tarihsel gelişiminin temel aşamaları.....	16
Şekil 2.3. Yıllara göre inşaat sektörü ve endüstriyel verimliliği 2005-2016	18
Şekil 2.4. Yalın inşaatın oluşumundaki sistematik gelişimiyle birlikte Amerika ve diğer ülkelere yayılması	21
Şekil 2.5. Yalın inşaat uygulamalarında ulaşılan sonuçlar	22
Şekil 2.6. Yalın inşaatın proje yönetimi.....	24
Şekil 2.7. YPTS sürecinin aşamaları.....	26
Şekil 2.8. Yalın üretim ile Endüstri 4.0'ın ortaklıkları.....	38
Şekil 2.9. Endüstri 4.0 teknolojileri, sistemleri ve süreçle ilgili özellikler.....	39
Şekil 2.10. Yalın İnşaat 4.0 Evi	48
Şekil 2.11. Üretim ve yapım sektörlerinin arasındaki endüstri devrimlerinin ve teknolojik ilerlemenin karşılaştırılması.....	50
Şekil 2.12. Endüstri 4.0'ın Yalın İnşaat 4.0'a yönelik yalın ile entegrasyonu.....	51
Şekil 2.13. Endüstri 4.0'ın yalın düşünce konsepti ile İnşaat 4.0'ın arasındaki karşılıklı ilişki	51
Şekil 3.1. Araştırmanın iş akış şeması	58
Şekil 4.1. Yalın prensip ve teknikler hakkında bilgi düzeyi.....	63
Şekil 4.2. Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında bilgi düzeyi	64

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Geleneksel örgüt yönetimi ile yalın yönetimin karşılaştırılması	6
Çizelge 2.2. Yalın düşüncenin beş temel prensibi	7
Çizelge 2.3. Sekiz israf türü	9
Çizelge 2.4. Yalın inşaatın farklı araştırmacılara göre tanımlamaları	19
Çizelge 2.5. Yalın yönetim ilkeleri	23
Çizelge 2.6. Endüstri devrimlerinin temel tarihsel süreci	29
Çizelge 3.1. Endüstri 4.0 teknolojileri ile yalın araç ve tekniklerinin kesişimleri	56
Çizelge 3.2. Yapım sürecinde karşılaşılan olası israf türleri	59
Çizelge 4.1. Katılımcı profili frekans dağılımı ve yüzdelikleri	62
Çizelge 4.2. Katılımcı profilinin farkındalık düzeyi	63
Çizelge 4.3. Tasarım aşamasında oluşan israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları	64
Çizelge 4.4. Tedarik aşamasında oluşan israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları	65
Çizelge 4.5. Malzeme taşıma ve kullanım aşamasında oluşan israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları	65
Çizelge 4.6. Operasyon/uygulama aşamasında oluşan israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları	65
Çizelge 4.7. Diğer bölümünde israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları	66
Çizelge 4.8. Tespit edilen teknolojilerin yalın inşaat sürecindeki etkisinin süre, maliyet ve kalite korelasyonu	66
Çizelge 4.9. Yapı uzmanlarının mesleklerinin ilgili ölçeğe ilişkin algılarının süre, maliyet ve kalite açısından değerlendirilmesine ilişkin ortalamalar, standart sapmalar ve ANOVA sonuçları	67
Çizelge 4.10. Yapı uzmanlarının tecrübe yıllarının ilgili ölçeğe ilişkin algılarının süre, maliyet ve kalite açısından değerlendirilmesine ilişkin ortalamalar, standart sapmalar ve ANOVA sonuçları	68

1. GİRİŞ

Dünya ekonomisinin yaşadığı ekonomik krizler, imalat sektöründe üretkenliğin yavaşlamasına yol açmış ve bu durum enflasyonun ve işsizliğin artmasına sebep olmuştur. Bu ekonomik kriz, uluslararası pazarlardaki rekabeti önemli ölçüde artırmıştır (Duman 2011). Aynı zamanda pazardaki müşteriler yüksek kalitede, en kısa zamanda ve düşük maliyetle ürünleri talep etmekte ve bu talepleri karşılayan firmalar piyasayı yönlendirebilmektedir. Rekabetçi baskılarla karşı karşıya olan ülkeler, günümüzde geleneksel üretim sistemlerinin firmaların stratejik hedeflerini gerçekleştirmek için yeterli olmadığını fark etmiş ve yeni arayışlar içine girmiştir.

Yeniden yapılandırılma sürecinde modern dünyada, endüstriyel üretimde üç temel aşama veya model değişikliği yaşanmıştır (Womack vd. 1990). Bu aşamalar zanaat üretimi, seri üretim ve yalın üretim olarak sonuçlanmaktadır. Bu endüstriyel üretim aşamaları sadece imalat sektörünü değil birçok sektörü etkilemiştir. Lokomotif sektör olarak anılan inşaat sektörü de bu üretim aşamalarından etkilenmiştir. Nesan ve Holt (1999) inşaat sektöründe zanaat temelli yaklaşımla tasarım ve inşaatın entegrasyonunun inşa edilebilirlik sorunlarını ortadan kaldırdığını; iş süreçlerinin merkezi olmayan bir yapıya sahip olmasının zanaatkarların inşaat süreci üzerinde tam olarak yetkiye ve kontrole sahip olmasına yol açtığını savunmuştur (Nesan ve Holt 1999). Ancak zanaat üretimi yüksek kaliteli ürünler üretse de düşük iş verimliliğine sahip olması ve maliyetli olmasından dolayı üretim kapasitesini artıran ve birim maliyeti düşüren seri üretimle rekabet edememiştir. İlk olarak otomotiv sektöründe Henry Ford tarafından uygulanan seri üretim, üretim kapasitesi arttıkça orta kalitede ürünler üretse de düşük maliyetli olmasıyla zanaat üretimine karşı avantaj sağlamıştır. Ancak seri üretimin dezavantajı, iş tatmininin genellikle düşük olması ve üretimi çeşitlendirmek için modelleri değiştirme maliyetinin yüksek olması (Womack vd. 1990) ve standartlaşmış parçalardan çeşitli ürünlerin üretilmemesidir. Bu dezavantajlar yalın üretimin seri üretime alternatif bir üretim sistemi haline gelmesine sebep olmuştur.

Üretim süreçlerinde verimliliği ve performansı arttıran yalın üretim, Japon otomotiv firması olan Toyota'da uygulanmaya başlandı. Yalın üretim, her türlü israfı yok ederek güvenilir iş akışı oluşturup, minimum sürede, mümkün olan en az maliyet ve en yüksek kaliteyle ürünler ortaya çıkarmaktır. Yapım sektöründe de uygulama alanı bulan yalın ilkelerin, üretimdeki başarısı ve kullanımından kaynaklanan faydaları, sektörde yalın ilkeleri benimsemenin ana motivasyonlarından biri olarak karşımıza çıkar (Toker 2022). Yalın üretim felsefesinin inşaat sektöründe, üretim planlama sürecinden yürütme ve hazır hale getirme sürecine kadar adaptasyonu geleneksel proje teslim sistemleri uygulamalarına göre zamandan kazanç, malzeme israfında düşüş, performans ve kalitede artış olduğu görülmüştür. Yalın yönetim yaklaşımını benimseyen inşaat firmaları, iş birliği ve planlama ile mümkün olan en az kaynak kullanımını başarmış ve inşaat uygulamalarında verimlilik artırılmıştır (Tokdemir 2017).

"Yalın İnşaat" olarak adlandırılan yalın düşüncenin yapım sektörüne uygulanması, 1990'lı yıllarda bir grup araştırmacı tarafından başlatılmış ve günümüzde de hala devam etmektedir (Tokat 2015). Bu amaçla, "Uluslararası Yalın İnşaat Grubu" (International Group for Lean Construction - IGLC) adıyla bilinen bir topluluk kurulmuştur. Bu topluluk 1993 yılından beri aktif bir şekilde faaliyet göstermektedir. Yalın inşaatın kalbinde, iş kırılım yapısını kullanarak girdilerin çıktılara dönüştürülmesine odaklanan geleneksel dönüşüm görüşünün ötesine geçen "Dönüşüm,

Akış ve Değer (TFV)" teorisi vardır. TFV ayrıca sürekli akış, çekme ve sürekli iyileştirmeyi temsil eden akış görüşünü ve müşterinin sesini, amaçların tatminini ve katma değerli faaliyetleri temsil eden değer görüşünü de onaylar. Yalın tasarım ve inşaat ilişkisiyle ilgili olarak literatürde farklı çalışmalar mevcuttur (Evcimen 2021). Ayrıca, yalın düşünce ve geliştirilmiş iş güvenliği arasındaki ilişkiyi ele alan Glenn Ballard (2000) tarafından geliştirilen "Son Planlama Sistemi" (Last Planner System) incelenmiş ve yalın iş güvenliği konularında da çalışmalar yapılmıştır (Ballard ve Howell 2003).

Yalın üretimin teslim sistemini oluşturan Yalın Proje Teslim Sistemi (YPTS), kullanıcı taleplerini merkeze alarak mümkün olan en az maliyet ve sürede proje teslimatını gerçekleştirmektedir. Bu durumu sağlarken yapım sürecinde değeri olmayan her aktiviteyi tespit ederek, ortadan kaldırmaktadır. Geleneksel Proje Teslim Sistemlerinde (GPTS) ise, tüm iş kalemleri gerçekleştikten sonra sapmaya neden olan faaliyet tespitleri yapılmaya çalışılır (Kömürcü 2007). Dolayısıyla sapmalar önlenemediği gibi sapmaya neden olan kaynaklar da bulunamaz. Öte yandan, YPTS, yalın düşünce temelli çalışarak, süreçlerde katma değeri olmayan kayıpları önceden analiz eder ve bu kayıpları önlemeye yönelik sistematik uygulamalara gider. YPTS, gerektiğinde sistemi her adımda ve aşamada öğrenmek ve ayarlamak için bir "Öğrenme Döngüsü" içerir. Son Planlayıcı Sistemi (SPS), Hedef Değer Tasarımı (HDT) ve Set Tabanlı Tasarım (STT) YPTS parçası olan yöntemlerdir (Horikiri vd. 2013). Örneğin SPS üretim kontrolü olarak kullanılır. HDT, projenin son müşterinin memnuniyet ve kısıtlama koşulları içinde teslim edilmesini sağlar. STT, proje ekibinin gereksiz olumsuz yinelemelerden kaçınmasına yardımcı olur. YPTS'yi başarılı bir şekilde uygulamak için iş birliği, erken katılım, uyumlu teşvikler ve proje paydaşlarının entegrasyonu gereklidir. Ancak küreselleşen dünyamızda sadece bu yöntemleri kullanarak YPTS'yi hedeflenen başarıya ulaştırmak mümkün değildir.

Öte yandan, akıllı ve dijital teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanılması, son on yılda imalat sektörü başta olmak üzere farklı endüstri ve iş alanlarında bir dönüşüme neden olmuştur (Karal 2019). Bazıları, bu dönüşümün Endüstri 4.0'ı veya değer zinciri katılımcıları arasında bağlanabilirlik, esneklik, verimli süreçler ve gerçek zamanlı entegrasyona izin veren bir dizi yeni teknoloji ve kavramı kapsayan Dördüncü Sanayi Devrimi'ni temsil ettiğini iddia etmektedir (Yıldırım 2019).

Endüstri 4.0 aynı zamanda akıllı ve dijital teknolojileri bünyesine entegre etmeye çalışan yapım sektörünü de etkilemektedir. Yapım sektörü, "İnşaat 4.0" olarak adlandırılan süreçten yararlanmak için çaba gösterse de imalat endüstrisinin gerisinde kalmaktadır. Bazı çalışmalarda İnşaat 4.0 konseptinin, yapım sektöründe dijital dönüşümle birlikte tasarımdan teslimat kadar olan süreçte verimli sonuçlar elde edileceği ifade edilmektedir (Sawhney vd. 2020). Ancak Endüstri 4.0 teknolojilerinin de tek başına kullanılması yeterli olmamaktadır. Çünkü Endüstri 4.0 teknolojileri yapım sektörünün teknik alt yapısını oluştururken yönetim anlayışında eksik kalmaktadır. Bu hususta yönetim anlayışını geliştirmek için yeni yöntemler uygulanmıştır. Yalın düşünce de bu anlayışlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yalın düşünce temelli proje teslim sistemi olan YPTS'nin yapım sektöründe uygulanması, GPTS'ye kıyasla çok daha verimli sonuçlar çıktığı ortaya konulmuştur. Bununla birlikte günümüzde yeni bir yöntem olarak teknolojinin YPTS sürecine entegrasyonu bir gereklilik haline gelmiştir. Çünkü YPTS de Endüstri 4.0 teknolojileri de tek başına yetersiz kalmaktadır. YPTS ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin sinerjisinden doğan yaklaşım, yalın düşüncenin hedefi olan mükemmelliğe, günümüz koşullarında ulaşılabileceği öngörülmektedir. Fakat literatürde

YPTS'nin teknolojiyle entegrasyonuna odaklanan ve sektördeki karşılığını inceleyen yeterince çalışma bulunmamaktadır.

Bu nedenle bu çalışmanın amacı Türkiye'deki YPTS uygulamalarının hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayacak teknolojilerin belirlenmesi, bu teknolojilere sektörün ana aktörleri olarak yapı uzmanlarının bakış açılarının ortaya konulmasıdır. Bu nedenle çalışma YPTS sistemine adapte olmaya çalışan yapım sektöründe YPTS'ye entegre edilebilecek teknolojileri kapsamaktadır. Bu kapsamda çalışmada farklı sektörlerdeki yalın üretim uygulamalarında kullanılan teknolojiler incelenerek bu teknolojilerin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuş, yapım sektöründeki YPTS'ye entegre edilebilecek teknolojilere sektörün ana aktörleri olarak yapı uzmanlarının bakış açıları anket yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir.



2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Yalın Düşünce, Yalın Üretim ve Yalın Yönetim

Emek yoğun sistemden günümüze gelen süreçte birçok üretim ve yönetim sistemi kullanılmıştır. Daha az zamanda daha az maliyetli ve daha kaliteli üretim yapmayı hedefleyen yalın düşünce temelli "Yalın Üretim", endüstriyel verimliliğin artması yönünde katkılar sağlamaktadır. Çalışmanın bu bölümünde yalın düşünceden yalın yönetime evrilen yönetim sistemi, yalın üretimin tarihsel sürecinin temel aşamaları ve yalın prensipler ve teknikler incelenmiştir.

2.1.1. Yalın düşünceden yalın yönetime

20. yüzyılın ortalarında Japonya'da Toyota üretim fabrikasında "Toyota Üretim Sistemi (TÜS)" olarak adlandırılan yönetim sistemi, yalın düşüncenin kökenini oluşturmuş ve bu doğrultuda yalın düşünce sistemi gelişmeye başlamıştır. Felsefesiyle ve tekniğiyle endüstrilerde çığır açılmasına sebep olan yalın yönetim sistemi dünyada 1980'lerde fark edilebilmiştir. 1986 yılında, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde, Uluslararası Motor Araç Programı'nın bulgularına dayanarak, TÜS'de gözlemlenen düzeni anlamak için ilk çalışma hazırlığına başlanmıştır. Bu çalışmada, sistematik bir yaklaşımın tanımlanması hedeflenmiştir. Uzun süren araştırmalar sonucunda, John Krafcik (1988) tarafından TÜS'ün performans nitelikleri, geleneksel kitle üretimiyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Çankır 2010). Bu çalışmalar sonucunda "her şeyin daha azına ihtiyaç duyarak belirli bir miktarda değer yaratmak; bu durumda buna yalın denilmesi gerektiği" sonucuna varılmış ve "yalın" terimi kullanılmaya başlanmıştır (Çankır 2010). Yıllar geçtikçe ortaya atılan düşünce araştırmacılar tarafından incelenmiş, geliştirilmiş ve çeşitlendirilmiştir. Bu düşünce birçok sektöre yayılmış ve sektörler yalın düşünceyi bünyelerine uyarlayarak kendi yöntemlerini belirlemişlerdir.

Yalın düşünce sisteminin temellerini "değer" ve "israf" kavramları oluşturmaktadır. Yalınlık, zaman da dahil olmak üzere tüm israfı ortadan kaldırmak ve seviye çizelgesi sağlamak için değer akışı geliştirmek anlamına gelmektedir (Naylor vd. 1999). Temelinde yalın, yönetime yönelik felsefi yaklaşımı temsil eder, her türlü israfın ve kayıpların tanımlanması ve ortadan kaldırılmasına ve sürekli iyileştirmeye odaklanır (Çilhoroz ve Arslan 2018). Yalın düşünce, müşterinin belirlediği değeri sağlamak için çevrim süresini (bir iş sürecini tamamlamak için geçen süreyi) en aza indirme, süreçleri standardize etme, israfı ortadan kaldırma ve kaliteli ürün sunma gibi hedeflere odaklanmaktadır (Maraşlı vd. 2016).

Yalın bir sistemin başlangıç noktası, israfın tanımını yapabilmek için müşterinin neye değer verdiğini bilmekle başlar. Burada israf kavramı, değer katan ve katmayan faaliyetler sırasında oluşan amaçsız kaynak tüketimi olarak nitelendirilir (Aydın 2015). Farklı bir ifadeyle, israf herhangi bir faaliyeti tanımlar ki bu faaliyet hem para hem de zaman açısından maliyetli olmasına rağmen müşteriye değer katmaz. İsraf, müşteri için yanlış ürün veya hizmet üretmenin yanı sıra, zamanından önce doğru ürün veya hizmet üretmek olarak da ortaya çıkabilir (Çanakçıoğlu 2019).

Yalın düşüncenin temel hedefi, kaynakların üretimine ve ürüne etki eden faaliyetlere odaklanarak değer oluşturma ve israflardan kurtulma yoluyla zenginliği elde etmektir. Yalın düşünce uygulamalarıyla israf kalemleri sürekli olarak azaltılırken, kaynaklar daha fazla değer yaratmaya yönlendirildiğinde, sadece firmaların kârlılığı ve

rekabet gücü artmakla kalmaz, aynı zamanda müşteriler de kendilerine daha uygun, daha kaliteli ve daha ekonomik ürün ve hizmetlere erişebilirler. Bu zincir tüm sektörler ve faaliyet alanları için geçerli olduğunda, toplumsal ekonominin gelişimine katkı sağlanır.

Bu düşünce, hammaddeyi başlatarak değer yaratma sürecinde süreklilik sağlayarak müşteriye ulaştırmayı hedeflemektedir. Bu yaklaşımın uygulanmasıyla birlikte, israfların ortadan kaldırılması ve tüm faaliyetlerin müşteri için mükemmel değer oluşturma amacına yönelik olarak değer zincirinin bütününe odaklanması önem arz etmektedir. Hatalar, aşırı üretim, stoklar, beklemler, taşımalar, hareketler gibi değer zincirindeki her türlü israfın ortadan kaldırılmasıyla maliyetlerin düşürülmesi, müşteri memnuniyetinin artırılması, pazara uygun esneklik elde edilmesi ve nakit akışının hızlandırılması hedeflenmektedir (Savcı ve Haftacı 2017).

Yalın düşünce, yalın üretim sisteminin temelini oluşturur. Yalın üretim, sürekli olarak üretimi ve aşamaları iyileşen bir organizasyon içindeki insanlarda bir kültür oluşturan, bütün bir sistem yaklaşımıdır. Görüldüğü üzere, yalın üretim, müşteri beklentileri, üretim teknolojileri ve küreselleşme sonucunda geleneksel yaklaşımların yetersizliklerinin kaldırılmasını hedefleyen bir üretim ve yönetim sistemi olmanın yanında bir düşünce ve felsefenin ürünüdür (Marchwinski vd. 2012).

Yalın üretim, müşteriye hiçbir değer sunmayan ve sadece firma maliyetlerini artıran israfın sürekli olarak iyileştirilerek ortadan kaldırılmasını hedeflemektedir. Başka bir deyişle, gereksiz unsurların bulunmadığı veya gereksiz unsurların en aza indirildiği bir üretim sistemi olarak tanımlanmaktadır (Akyıldız 2018). Yalın üretim sistemi, bu yaklaşımla birlikte işletmelerdeki $Fiyat = Maliyet + Kar$ anlayışını kökten değiştirerek $Kar = Fiyat - Maliyet$ anlayışıyla yeniden şekillendirmiştir.

Yalın üretim hem stratejik hem de operasyonel düzeylerde olmak üzere iki farklı şekilde mevcuttur. Stratejik düzeyde, kavram müşteri değerini anlamaya ve değer akışını tanımlamaya yardımcı olur; operasyonel düzeyde ise, israfın ortadan kaldırılmasına yol açan ve sürekli iyileştirmeyi teşvik eden bir uygulama ve araçlar bütünüdür. Shah ve Ward'a (2007) göre de benzer bir şekilde yalın üretim genellikle ya felsefi ya da pratik olarak görülmektedir. İlk bakış açısı yol gösterici ilkeler ve kapsayıcı hedeflerle ilgilidir; ikinci bakış açısı, doğrudan gözlemlenebilen bir dizi yönetim uygulaması, aracı veya tekniği ile ilgilidir (Shah ve Ward 2003).

Yalın üretim ile ilişkili olan yalın yönetim, yetki devrinin arttığı, herkesin işin sorumluluğunu üstlendiği ve hiyerarşinin olmadığı bir yönetim şekli olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yaklaşımda, anlamlar ve yöntemlerin bir araya gelmesiyle işletme için yalın bir durum oluşturmayı ve aynı zamanda firmanın rekabet koşullarına uygun hale gelmeyi amaçlanmaktadır. Özetle, yalın yönetim anlayışının amacı, yalın üretim, hizmet ve ürün yaratma sürecinde gereksiz masraflardan kaçınmayı ve bu şekilde firma karlılığını artırmayı hedefleyen teknikleri, kavramları ve sistemleri bütünsel olarak içermektedir.

Yalın yönetim, şirketin hatalarını azaltarak, kaliteyi ve üretkenliği artırarak ve çalışanların memnuniyetini ve katılımını geliştirerek şirketin performansının iyileştirilmesine olanak tanıyan karar alma ve yönetim süreçlerine ilişkin bir yansıma anlamına gelir. Yalın üretimde olmayan bir insan boyutu içerir. Yalın yönetim felsefesi, katma değeri olmayan faaliyetlerin zaman açısından minimum seviyeye indirilmesini hedefleyerek, bütün bir sistem üzerinde detaylı bir inceleme yapar. Bu felsefe, gereksiz süreçlerin analiz edilerek iyileştirilmesi, verimlilik artışı sağlanması ve kaynakların etkin

bir şekilde kullanılması üzerine odaklanır (Şimşek vd. 2016). Özellikle rekabet koşullarında etkin bir yönetim felsefesi benimsemek, işletmenin süreçlerinde değer oluşturmaya faaliyetlerin ortadan kaldırılması ve sürekli iyileştirmelerin yapılması temel amaçları arasında yer alır. Bu kapsamda, yalın yönetim uygulamaları üretim işlemlerinde belirgin etkiler yaratır. Üretim ve teslim süreçlerinin kısaltılması, stok miktarının azaltılması, takip ve kontrol mekanizmalarının iyileştirilmesi ve maliyetlerin hızlı bir şekilde düşürülmesi, yalın yönetimin olumlu etkileri olarak gözlemlenir (Çakırlı vd. 2009)

Yalın yönetimin temel noktası, organizasyonun sürekli ilerlemesini ve departmanlarının hiçbirinde gerileme olmamasını sağlamaktır. Tüm organizasyonun sürekli olarak gözden geçirilmesini ve kalıpları saptamak ve önemli veri noktalarını belirlemek için iyi bir beceri gerektirir. Yalın yönetim hakkında önemli bir nokta da tipik olarak zaman içinde daha iyi birikebilecek daha küçük değişiklikler yapmaya odaklanmasıdır. Bazı yönetim ilkeleri, her yinelemede şirketin durumunu önemli ölçüde değiştiren geniş kapsamlı değişiklikler yapmaya çalışır. Ancak yalın yönetim çok daha farklı bir yol izlemektedir.

Yalın yönetimi geleneksel örgüt yönetimine göre farklılıklarının anlaşılmasıyla yalın yönetimin çok daha verimli olduğu anlaşılabilecektir. Çizelge 2.1'de geleneksel örgüt yönetimi ile yalın yönetim anlayışlarının karşılaştırılması özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Geleneksel örgüt yönetimi ile yalın yönetimin karşılaştırılması (Liker 2004)

Geleneksel Örgüt Yönetimi	Yalın Yönetim
Yönetici rolü, stratejik planlamayı yapar ve belirler.	Yönetici ve takım üyeleri birlikte iş planlaması yapar ve görevleri belirler.
İşler sınırlı bir kapsam içerisinde tanımlanmıştır.	Görsel yönetim yaklaşımıyla, tüm ayrıntılar standart iş tanımları içerisinde yer alır.
Bilginin büyük kısmı yöneticilerin elindedir.	Bilginin büyük kısmı her düzeyde serbestçe paylaşılmaktadır.
Yönetici olmayanların eğitimi teknik beceriler üzerine yoğunlaşmıştır.	Sürekli öğrenme anlayışıyla, herkes için yönetime ve teknik konulara yönelik her türlü eğitim söz konusudur.
Risk alma teşvik edilmez, hatta cezalandırılır.	Ölçülmüş risk alma teşvik edilir ve desteklenir.
Bireysel çalışma tarzı vardır ödüller bireysel başarıya dayanır.	Karşılıklı dayanışma ve yardımlaşma tarzı ile birlikte çalışma vardır. Ödüller takımın başarısına dayanır.
Yöneticiler en iyi yöntemleri belirler.	Yöntemleri ve süreçleri iyileştirmek için herkes sürekli çalışır.
Yönetim tarafından koyulan ve uyulması istenilen disiplin kuralları vardır.	Yönetim, destekleyici bir ortam sağlayarak iş görenlerin kabul ettiği ve otomatik kontrol esasına dayanan bir disiplin anlayışını teşvik eder.
Tek fonksiyona dayalı uzmanlaşma vardır.	Esneklik ilkesi ışığında çalışılabilmesi için çok fonksiyonlu uzmanlaşma vardır.

Modern bir organizasyonu doğru bir şekilde yalın yöntemlerle yönetmenin kritik bir noktası yaklaşımı doğru bir şekilde anlayabilmektir. Yalnızca teoride kalmayıp aynı zamanda pratiğe dökülürse sektörlerde yalın yönetimle birlikte verimli bir yönetim sistemi oluşabilir.

2.1.2. Yalın üretimin temel prensipleri ve teknikleri

Rekabetçi iş ortamlarında etkin bir yönetim felsefesi oluşturulabilmesi için yalın düşünce, beş temel ilke üzerine kurulmuştur. Yalın düşüncenin yol göstericileri olarak değer, değer akışı, akış prensibi, çekme prensibi ve mükemmellik prensibi temel basamaklarını oluşturur (Womack ve Jones 1996). Yalın düşüncüyü benimsemeyi hedefleyen işletmelerde, öncelikle bir ürünün değeri belirlenmeli ve değer tanımı yapılmalıdır. Ardından, değer akış yolları belirlenmeli ve bu yollar üzerinde sürekli bir akış sağlanmalıdır. Ürünler müşterinin talebine göre üretilmeli ve her zaman en iyi sonuç için mükemmellik prensibi iyi anlaşılmalıdır (Aydın 2015).

Çizelge 2.2'de yalın düşüncenin beş temel prensibinin (değer, değer akışı, sürekli akış, çekme ve mükemmellik) odak noktaları özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. Yalın düşüncenin beş temel prensibi (Womack ve Jones 1996)

Aşama	Odaklanılan Noktalar
Değeri Tanımlamak	Doğru değerlendirme yapmak, iç ve dış paydaş kavramları
Değer Akışını Belirlemek	Üretim sürecini ayrıntılı bir şekilde açıklamak, değer oluşturmaya etkinlikleri tespit etmek
Akış	Değer oluşturan faaliyetlerin akışını güvence altına almak için atılma nedeni olan aktiviteleri ortadan kaldırmak, akışı aşamalara bölmek
Çekme	Ürünleri müşteriye zorla dayatmak yerine, müşterinin ihtiyaç duyduğu anda ürünleri talep etmesi, iç müşteri kavramıyla uygulanması
Mükemmellik Hedeflenmesi	Üretimde üstünlüğü hedeflemek, şeffaflık hedefleri ve yönlendirici prensipler tanımlamak

Yalın üretim prensibinde gelişen tüm faaliyetler değer kavramıyla tarif edilir. Çünkü değer, yalın düşünce için kritik bir başlangıç noktasıdır ve yalnızca müşteri tarafından tanımlanabilir. Bu nedenle değeri doğru tanımlayabilmek önemlidir. Womack ve Jones (1996) yaptıkları çalışmada değeri doğru tanımlamanın ilk ve en önemli adım olduğunu ifade etmişlerdir. Değeri üretici oluştursa da değeri doğru tanımlayabilmek için müşteri perspektifinden değere bakılması gerekmektedir. Çünkü müşterinin ihtiyaçlarına uygun bir şekilde belirli bir zamanda ve belirli bir fiyattan sunulan spesifik bir ürün veya hizmet, değer tanımının anlamlı olabilmesi için gereklidir. Bu bağlamda, değer üretimi üretici tarafından gerçekleştirilir ve müşterinin bakış açısından üreticinin var olma nedenini oluşturur (Nihal vd. 2015). Yanlış ürün veya hizmetin yanlış zamanda veya doğru ürünün erken üretilmesi sadece israf oluşturur.

Yalın düşüncenin prensipleri arasında ikinci adım olarak değer akışının analiz edilmesi yer almaktadır. Değer akışı, ürünün hammaddeden başlayarak ilk üretim biriminden müşteriye ulaşana kadar geçen süreçlerin tümünü kapsar. Bir ürünün değer akışı, birden fazla değer akışının birleşiminden oluşabilir. Bu noktada, ürünün oluşturulması için gereken her adım tanımlanarak değer akış haritası oluşturulur (Türkan 2010). Değer akışı haritası oluşturma süreci, mevcut durumdaki bilgi ve malzeme akışlarını gözlemlemek, bunları görsel olarak özetlemek ve daha üstün bir performansı

hedefleyen gelecekteki durumu hayal etme sürecini içerir. Womack ve Jones (1996), değer akışı analizi oluşturulurken üç tür eylemin varlığını tanımlamaktadır (Womack ve Jones 1996). Bu eylemler:

- Herhangi bir tartışmaya gerek kalmayacak şekilde değer yaratan faaliyet adımları,
- Teknolojik gelişmelerden kaynaklanan adımlar ve üretim gereksinimleri, üretim hattı boyunca herhangi bir değer katmayan ancak kaçınılması mümkün olmayan adımlar,
- Değer oluşturmayan ve anında ortadan kaldırılabilen fazlalık adımlar.

Yalın düşüncenin ilerleyen adımlarında sürekli akışa odaklanılır. Bu aşamada, değer yaratan faaliyetlerin sürece eklenmesi ve değer katmayan faaliyetlerin süreçten çıkarılması hedeflenir. Akışın sürekli olmasını sağlamak için süreçte gerekli iyileştirmeler yapılır ve sürecin verimliliği artırılır. Bu sayede iş akışı kesintisiz ve optimale yakın bir şekilde gerçekleştirilir (Nihal vd. 2015).

Yalın düşüncenin çekme sistemi aşaması ise müşterinin ürünü/hizmeti istediği zaman almasına olanak vermekte ve müşteri talebi olmadan üretim yapılmamasını sağlamaktadır. Böylelikle müşterinin ürüne doğru zorla itilmesi yerine ürüne doğru çekilmesi sağlanmaktadır.

Yalın düşüncenin son aşaması olan mükemmellik aşamasında ise Womack ve Jones'a göre (2003) değerler tanımlanır, değer akışı sürekli olarak sağlanırsa çekme prensibi gerçekleşir ve mükemmellik ortaya çıkar (Womack ve Jones 2003).

Yalın üretim felsefesinin temelinde, üretimde sıfır hata hedefinin gerçekleştirilmesini engelleyen yetersiz standartlaşma ve rasyonelleştirme bulunmaktadır. Bu durum iş akış süreçlerinde muda (kayıp), mura (düzensizlik) ve muri (aşırı yük) oluşumuna yol açmaktadır. Yalın üretim, bu sorunları ortadan kaldırmayı hedefler ve sürekli iyileştirme prensibine dayanır. Muda, değer yaratmayan faaliyetleri ifade eder ve bu faaliyetlerin minimize edilerek süreçlerde akışın sağlanması amaçlanır. Mura, düzensizlik ve dengesizlik anlamına gelir ve iş akışının istikrarlı bir şekilde devam etmesini engeller. Muri ise aşırı yüklenme durumunu ifade eder, yani birim zamanda gerçekleştirilemeyecek kadar fazla iş yüküdür. Yalın üretim, bu üç sorunu çözerek sürekli akışı sağlamayı ve sıfır hata hedefine ulaşmayı amaçlar. Bu nedenle, standartlaşma ve rasyonelleştirme süreçlerinde iyileştirmeler yapılması büyük önem taşır (Kefe ve Berikol 2018).

Yalın üretim prensiplerinin uygulanabilmesi için değer katmayan faaliyetlerin yani israfın ortadan kaldırılmasıyla başlar. Bu yüzden israf faaliyetlerini ve işletmeleri nasıl etkileyeceğini bilmek önemlidir. TÜS, atıkları net bir şekilde sınıflandırarak toplam yedi kategoriye yerleştirmiştir (Ohno 1998). Yalın üretimin yedi atık kategorisine ek olarak, sekizinci kategori ise çalışanların potansiyelini kullanamama, onları dinlememe ve gelişim fırsatlarını göz ardı etme gibi insan kaynakları kapasitesinin israf edilmesini temsil etmektedir. Bu durum, zamanın, fikirlerin, becerilerin, gelişimin ve öğrenme fırsatlarının kaybına neden olan bir durumu ifade etmektedir (Çiftci vd. 2021). Yalın üretimin tanımladığı sekiz israf türü; hatalı üretim, fazla üretim, fazla stok, bekleme, gereksiz işler, gereksiz taşıma, hareket ve etkin kullanılamayan insan kaynakları kapasitesidir. Çizelge 2.3'de bu sekiz israf türüyle ilgili tanımlamalar özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Sekiz israf türü (Ohno 1998'den uyarlanmıştır.)

İsraf Türü	Tanım	Açıklama
1. Hatalı Üretim	İşlem sırasında yeniden çalışma veya ek çalışma gerektiren hatalar.	- Hatalı üretim veya ürünün tamiri gereksiz kaynak israfına yol açar. - Ürün, teknik özelliklere uygun olarak üretilmediğinde atıl duruma getirilmelidir. Hatalı üretim durumunda ise ürünün onarılması gerekmektedir. Her iki durum da şirketler için zaman ve maliyet kaybına sebep olmaktadır.
2. Fazla Üretim	- Belirli bir müşteri için yapılmamış ürün. - Hiçbir ek değer olmaksızın bir ürünün, sürecin veya üretim tesisinin geliştirilmesi.	- İhtiyaç fazlası veya erken üretim gereksiz kaynak israfına sebep olur. - Müşterinin talep ettiğiinden daha fazlasını üretmek, stokların artmasına yol açar. Müşteri için değer yaratmayan gereksiz bilgi ve doküman üretimi de israf anlamına gelir.
3. Stok	Ürünlerin, ara mamullerin, ham maddelerin vb. depolanması paraya mal olur.	- Üretim için gereksiz şekilde fazla stok tutulan her şey israf anlamına gelir. - İş istasyonlarında ara mamul ürünlerin biriktirilmesi, bu ürünlerin sonraki istasyonlarda kusurlu olduğunun fark edilmesi durumu hem zaman hem de maliyet kaybına yol açmaktadır.
4. Gereksiz İşler	Belirli bir işlem adımı ürüne değer katmadığında.	- Değer katmayan iş adımları veya müşteriye değer sağlamayan işlemler israf olarak kabul edilir. - Ürünün üretiminden müşteriye teslimine kadar olan süreçte, tüm işler gereksiz faaliyetlerden arındırılmalıdır. Süreçlerdeki karmaşıklık azaltılmalı ve gereksiz kontrol ve onay işlemleri ortadan kaldırılmalıdır.

Çizelge 2.3'ün devamı

5. Taşıma	• Ürünü birkaç yere taşımak. • Ürün hareket halindeyken işlenmemekte ve dolayısıyla müşteriye değer katmamaktadır.	• Fazladan ekipman, hammadde, yarı mamul ve mamul taşımacılığı, gereksiz bir kaynak israfına yol açar. • Gereksiz malzeme ve bilgi transferi, yanlış üretim yerinin tasarımından kaynaklanan uzun taşıma mesafeleri ve belgelerin sık sık ve uzun mesafelerde dolaşması gibi faktörler, önemli kaynak israflarını ortaya çıkarır. • Gereksiz taşıma ve dolaşım faaliyetlerinin en aza indirgenmesi ve üretim sürecinin optimize edilmesi önemlidir.
6. Hareket	• Üretim tesisini işleten insanların aşırı hareketi israftır. Hareket halindeyken ürünün işlenmesini destekleyemezler. • Verilerin, kararların ve bilgilerin aşırı hareketi.	• Etkin bir şekilde organize edilmemiş iş ortamı, gereksiz insan hareketlerine yol açar ve israf oluşturur. • Sık kullanılan malzemelerin çalışma ortamına uzak olması, iş tanımında olmayan hareketler ve ofis ortamında ihtiyaç duyulan dosyaların veya araç gereçlerin yerlerinin belirsiz olması, arama faaliyetleriyle sonuçlanan hareket israflarına sebep olur.
7. Bekleme	• İnsan, ekipman veya ürün işlenmeyi beklediği için müşteriye herhangi bir değer katmamaktadır.	• Makinanın işlemini tamamlamasını veya tamir için beklemek israf anlamına gelir. • Benzer şekilde, bir bilgiyi veya insanı beklemek de israf olarak kabul edilir. • Üretim sürecine başlamadan önceki hazırlık süreleri de bekleme israfının bir örneğidir.
8. Etkin Kullanılmayan İnsan Kaynakları	• Çalışanlarının potansiyeline göre iş dağılımı yapılmaması, herkese sorumluluk verilmemesi israfı oluşturur.	• Çalışan herkesin bir birey ve her bireyin bir beyin olduğunu unutmadan uygun pozisyonlarda uygun işleri vermektir.

İsrafın azaltılmasını ya da ortadan kaldırılmasını sağlayarak paralelinde üretimin en üst düzeye çıkarılmasına yardımcı olacak temel yalın araç ve tekniklerinin bilinmesi ve uygulanması proje hedeflerine ulaşılması açısından oldukça önemlidir. Çalışma kapsamında değerlendirilen "Jidoka, Tam Zamanında Üretim (TZÜ), Toplam Üretken

Bakım (TÜB), Kanban, Kaizen, Değer Akışı Haritalama (DAH), Hücrel Üretim, Heijunka, Bilgisayarla Bütünleşik Üretim (BBÜ), SMED, Poka-Yoke, Görsel Yönetim ve Hoshin Kanri" yalın üretim sürecinde uygulanan araç ve teknikleri oluşturmaktadır.

Jidoka: Yalın üretim tekniklerinden Jidoka, Japonca'da "insan dokunuşuyla otomasyon" anlamına gelmektedir (Liker ve Morgan 2006). Otomasyon, makine ve ürünleri izleyen ve herhangi bir kusur tespit edildiğinde üretimi durduran bir sistemdir. Bu sistem, hızlı bir şekilde kalite problemlerini tespit etmek ve düzeltmek için insan müdahalesi olmadan süreci yönetmeyi amaçlar. Bu şekilde, hatalı ürünlerin üretimi durdurularak kalite standartlarının korunması ve müşterilere kusursuz ürünler sunulması sağlanır. Otomasyon aynı zamanda işçi hatalarının da önüne geçmeyi hedefler ve sürekli gelişim felsefesinin bir parçası olarak kabul edilir. Jidoka tekniğinin uygulanmasıyla hatalı ara süreçlerden sonra gelecek süreçlerin de hatalı bir çıktı üzerinden işleme alınması engellenmekte ve problemin büyümesi önlenmektedir (Tokat 2015).

Tam Zamanında Üretim (TZÜ): En kısa zamanda üretim ve en düşük hata oranıyla talep edilen miktarlarda üretimi gerçekleştirmeyi hedefleyen bir yöntemdir. TZÜ sistemi, çıktı oluşmadan önce sıradaki süreci uyarır ve bu hazırlığın yapılması için zaman sağlar. Böylece süreçler arasındaki zaman kaybı en aza indirilir. Özet olarak, "yanıt süresi" kaynaklı kayıpların süreçlerde önlenmesine yönelik bir uygulamadır (Cimorelli ve Chandler 1996).

Toplam Üretken Bakım (TÜB): Üretim ve hizmet süreçlerinde, tüm çalışanların katılımıyla, bakımın önceden planlandığı, önleyici bir yaklaşımı benimseyen, makine ve ekipman etkinliğini en üst seviyeye çıkaran bir "bakım yönetimi" yaklaşımıdır. TÜB, ürünün dolaylı olarak geliştirilmesine katkıda bulunarak, sonuca ulaşmanın iyi bir yolunu sağlar (McKone vd. 2001).

Kanban: Çekme prensibine dayalı üretimde bir önceki operasyondan bir sonraki operasyonun ihtiyaç duyduğu parçaların talep edildiği anda ve uygun miktarda temin edilmesini sağlayan bir mekanizmadır. Bu sistem, üretim sürecindeki malzeme akışını optimize etmek ve stoğun minimum düzeyde tutulmasını sağlamak amacıyla kullanılır. Kanban, operasyonlar arasındaki iletişimi kolaylaştırır ve sürekli akışın sağlanmasını destekler. Böylece, işçiler sadece ihtiyaç duyulan parçaları alarak üretimi gerçekleştirir ve aşırı stoklardan kaynaklanan israf ve maliyetler minimize edilir. Kanban, TZÜ'nün gerçekleştirilmesine yardımcı olur (Orbak 2005).

Kaizen: "Sürekli ve bitmeyen iyileşme" anlamına gelir. Kaizen, üretim sürecindeki verimliliği artırmak için yapılan küçük ve etkili değişikliklerle karakterize edilen bir süreç geliştirme yöntemidir. Bu yaklaşım, sürekli iyileştirmeye odaklanır ve her seviyede çalışanların katılımını teşvik eder. İş akışını optimize etmek, atıkları ortadan kaldırmak, kaliteyi artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla kullanılır. Küçük iyileştirmelerin bir araya gelerek büyük farklar yaratması prensibine dayanan Kaizen, sürekli olarak iş süreçlerini gözden geçirmeyi, iyileştirme fırsatlarını belirlemeyi ve uygulamayı içerir. Bu şekilde, sürekli gelişimi teşvik ederek işletmenin rekabetçiliğini artırmayı hedefler (Imai 1986).

Değer Akışı Haritalama (DAH): Süreçteki her adımı belgeleyen bir akış şeması kullanan yalın bir araç olarak tanımlanır. DAH, üretken bir süreci veya tüm tedarik zinciri ağlarını haritalamak için kullanılan bir haritalama aracıdır. Yalnızca malzeme akışlarını değil, aynı zamanda üretimi işaret eden ve kontrol eden bilgi akışlarını da haritalar (Braglia vd. 2006). Birçok yalın uygulayıcı, DAH'ı israfı belirlemek, süreç döngü

sürelerini azaltmak ve süreç iyileştirmeyi uygulamak için temel bir araç olarak görmektedir.

DAH, diğer önemli ilgili verilerle birlikte malzeme işleme adımlarını bilgi akışıyla birleştirmek için tasarlanmış bir işyeri verimlilik aracıdır. DAH, yalın yolculuğunda planlamak, uygulamak ve geliştirmek isteyen bir kuruluş için temel bir yalın araçtır. Kullanıcıların mevcut kaynaklarını en üst düzeye çıkaracak ve malzemelerin ve zamanın verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaya yardımcı olacak sağlam bir uygulama planı oluşturmaya yardımcı olur.

Hücrel Üretim/Tek Parça Akış Üretim Sistemleri: Atölye tipi üretimin işleme göre düzenlenmesi ve akış tipi üretimin ise ürüne göre düzenleme yapılarının belli özelliklerinden yararlanılarak farklı bir sentez olan "Hücrel Üretim Sistemi" geliştirilmiştir. Hücrel üretim sistemleri, sistem içinde benzer imalat karakteristiklerine sahip belli parça gruplarının ayrı yerlerde imalatı için işlem, insan makine gruplarının oluşturduğu sistemlerdir (Sharma vd. 2016). Üretim iş istasyonları ve ekipmanları, minimum taşıma veya gecikme ile üretim süreci boyunca sorunsuz bir malzeme ve bileşen akışını destekleyen ürüne göre hizalanmış bir sırayla düzenlenir.

Heijunka: Japonca'da "üretim seviyeleme" olarak da bilinen bir tekniktir. Bu yöntem, üretim sürecindeki dalgalanmaları minimize etmek ve üretim miktarını istikrarlı bir şekilde dağıtmak amacıyla kullanılır. Heijunka, işletmelerin talep değişikliklerine hızlı ve esnek bir şekilde uyum sağlar. Bu sayede, üretim sürecindeki dengesizlikler azaltılır, stok seviyeleri optimize edilir ve müşteri talepleri zamanında karşılanır. Heijunka aynı zamanda kaynakların etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu teknik, işletmelerin sürekli bir üretim akışı sağlamak ve operasyonel verimliliklerini artırmak için kullanabilecekleri önemli bir araçtır (Coleman ve Vaghefi 1994). Yalın üretim ve TUS için oldukça önemli olan bu uygulama, müşteri talebinin tahmin edilerek, talep gelmeden önce genel bir dağılım şeklinde üretimin yapılmasını sağlar.

Bilgisayarla Bütünleşik Üretim (BBÜ): Bilgisayarla bütünleşik üretim, her işlevin bir dizi otomatikleştirilmiş teknolojiyle değiştirildiği, genel üretim sürecinin otomatikleştirilmiş bir versiyonudur. BBÜ, tüm üretim sürecini otomatikleştirmek ve kontrol etmek için bilgisayarların kullanıldığı üretim yaklaşımıdır (Sharma vd. 2016). Bu entegrasyon, bireysel süreçlerin birbirleriyle bilgi alışverişinde bulunmasına ve eylemleri başlatmasına izin verir. Bilgisayar sistemleri bir ağ üzerinden iletişim kurar veya "birlikte çalışır". BBÜ sistemleri, yönetim fonksiyonlarını mühendislik, üretim ve destek operasyonları ile ilişkilendirir. Bilgisayar destekli tasarım, bilgisayar destekli mühendislik, bilgisayar destekli üretim, robotik ve üretim kaynak planlaması (Kalpakjian ve Schmid 2009) gibi ayrı uygulamaları bir araya getiren BBÜ, hızlı yanıt verebilme olanağına ve geliştirme potansiyeline sahiptir.

SMED: Bu yöntem, kurulum süresini azaltmak için Japonya'da Shigeo Shingo tarafından geliştirilmiştir. SMED, geçiş süresini bir dakikaya indirme tekniğidir. Kurulum süresi, imalatla büyük bir sorun olarak karşımıza çıkar (Devdasan vd. 2012). SMED tekniği kullanılarak, ürün değişimi sırasında zaman içindeki değişim, dahili kurulum faaliyetinin harici faaliyete dönüştürülmesi ve dahili faaliyetin basitleştirilmesiyle bunun hızlı gerçekleşmesiyle azaltılabilir.

Poka-Yoke: "Poka" kelimesi Japonca'da "dikkatsizlik", "Yoke" ise "ortadan kaldırmak" anlamına gelir. Bu iki kelimenin bir araya gelmiş hali "hata önleme" anlamını taşır. Poka-Yoke sisteminde hata oluşmadan önce önlenmesi amaçlanır (Brunner 2011).

Görsel Yönetim: Görsel yönetim, ekipleri bilgilendirmek, çalışma standartlarını uygulamak ve sorunları vurgulamak veya önlemek için işyerinde bilgilerin gösterilmesidir. Görsel yönetimi kullanmanın birçok yolu vardır ve bu kavram yalın düşüncenin derinliklerine yerleşmiştir. Kanban kartları, proje durum panoları, 5S kontrol panoları, metrik kontrol panelleri, andon ışıkları görsel yönetim araçlarına örnektir. (Cimorelli ve Chandler 1996).

Hoshin Kanri: Üst düzey kurumsal yönetimin hedeflerini ve girişimlerini kurumsal hiyerarşinin en alt düzeyine kadar dağıtma sürecini ifade eder. Şirketlerin performansını yönetmesini ve iyileştirmeler yapması amaçlanır. Hedefler, farklı departmanlar için üç ile beş yıllık olarak ayrılır (Pavlickova vd. 2022).

Birçok sektörün benimsediği bu yöntemler genellikle benzerlikler gösterse de sektörler bu yöntemleri ihtiyaçlarına ve koşullarına göre uyarlamaktadır. Ancak, yalınlaşma sadece belirli tekniklerin üretim alanında kullanılmasıyla gerçekleştirilemez. Tüm sistem, israfları ortadan kaldırma ve değeri artırma hedefini desteklemek zorundadır.

2.1.3. Yalın üretimin tarihsel gelişiminin temel aşamaları

Literatürdeki çalışmalar, yalın fikirlerin çoğunlukla Toyota tarafından kısa bir zaman önce oluşturulduğunu ve yalın düşünce tarihinin çok daha basit olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak 12. yüzyılda Venedik'in savaş gemilerini standartlaştırarak üretmesi ile tarihte ilk olarak yalın üretim uygulamaları görülmüş; 16. yüzyıla gelindiğinde Venedik'in uygulamaları çok ilerleme kat etmiş ve askeri tersanelerde Fransa Kralı III. Henry tarafından uygulamaya başlanmıştır (Womack ve Jones 1996).

"Standardizasyon" hareketinin henüz ortaya çıkmadığı emek yoğun sistemde, müşteri ve ürün odaklılığı hâkim olmuştur. Endüstri devriminin ortaya çıkmasıyla, hızla gelişen ve değişen koşullarda yetersiz kalmaya başlayan emek yoğun sistem beraberinde farklı çözümler getirmiştir.

Eli Whitney'in değiştirilebilir parçalar kavramını 1790 yılında ortaya atması işletme düzeyinde ilk standartlaşma örneği olarak ortaya çıkmaktadır. Eli Whitney değiştirilebilir parçalarla yapılmış silahları geliştirebilmek için metali şekillendiren ve silahın parçalarını ayrı ayrı üretilmesini sağlayan makineler tasarlayarak standardizasyonu iş yönetimine tanıtan ilk kişi olmuştur.

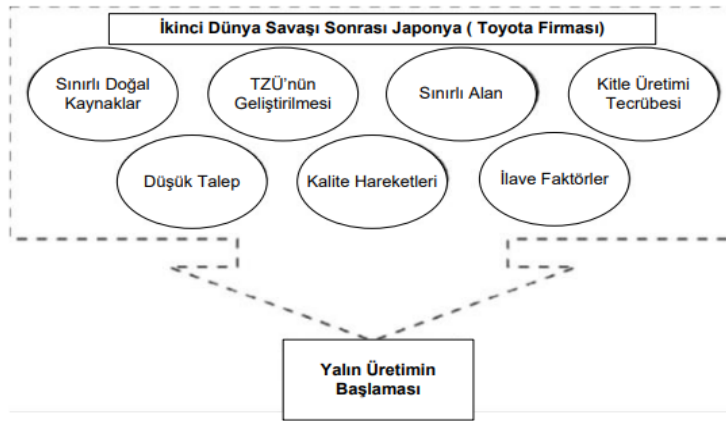
Frederick W. Taylor, 1900-1920 yılında verimlilik anlamında ilk sistematik çalışan kişilerdendir. İş sürecinde gerekli zaman standardını belirleyip, işçiler üzerinde ödül ceza sistemini geliştirmiştir (Köroğlu ve Koç 2017). Ayrıca 1911 yılında "Bilimsel Yönetimin Prensipleri" kitabıyla bilimsel yönetim ilkelerini ortaya koymuştur. İş yöntemlerinde, süreçlerinde ve operasyonlarında verimlilik elde etmek için işin standardizasyonu, zaman etütleri ve hareket etütleri gibi kavramları ortaya atmıştır. Ancak işin davranışsal yönünü görmezden gelmiş ve bu da kendisine yönelik pek çok eleştiriye yol açmıştır.

Frank/Lillian Gilbret, Taylor'un ortaya koyduğu işin parçalara ayrılarak basitleştirilmesi düşüncesinden yola çıkarak "zaman etüdü" ile "akış şeması" yöntemlerini geliştirmişlerdir. Gilbret, çalışanların motivasyonlarını ve tutumlarını da ortaya koyarak yalın üretimin kilit noktası olan "israfın ortadan kaldırılması" fikrini ortaya çıkarmıştır. Yöntemin temel amacı israfın ortadan kaldırılması, gerekli en az zaman ve çabayla istenen değerli sonuçlara ulaşılması ve üretim operasyonlarını analiz

ederek parçalara ayrılmasıyla manuel süreçlerin daha verimli hale getirilmesidir. Bu teknikler birçok alanda kullanılmıştır.

Bu gelişmeler endüstriyel verimliliği artırma yönünde 400 yıldan daha fazla bir süre öncesinde başlayan süreçler olsa da üretim sürecinin tamamına gerçekten etki eden ilk kişi Henry Ford'dur. Ford, yalın üretimin ilk uygulayıcısı olarak kabul edilir ve "sürekli akış" fikrinin temellerini atmıştır. Ford ve Charles E. Sorensen, bir üretim sisteminin tüm unsurlarını alan ve onları sürecin sürekli ve tekrarlı olmasını sağlayacak şekilde düzenleyen bir sistem geliştirmişler ve ilk hareketli otomobil montaj hattını oluşturup çalıştırmışlardır. "Model T" adı verilen aracın, elektrikli montaj bandıyla seri üretimine başlanmıştır. Bu sayede otomotiv fiyatlarında düşüş yaşanmasıyla birlikte yüksek hacimli ve düşük maliyetli üretimin önü açılmıştır. 1929 Büyük Ekonomi Krizi'ne kadar "Model T" tek markayken Alfred Sloan "General Motors" ile ortaya koyduğu model çeşitliliğiyle ilk tüketici beğenileri ve alışkanlıkları önem kazanmıştır.

Yalın üretimin israfı kaldırmaya yönelik çalışmalarla başlayan sistematik uygulamalarının kökleri çok eskilere dayansa da yakın geçmişteki temeli, İkinci Dünya Savaşı'ndan yeni çıkmış Japonya'nın yaşadığı krizin ardından elindeki kısıtlı imkanları en ideal şekilde kullanmanın yollarını aramasıyla, Taiichi Ohno önderliğinde Kiichiro Toyoda ve Shigeo Shingo ile birlikte atılmıştır. Taiichi Ohno'nun en büyük başarılarından biri, TZÜ sistemini Jidoka Sistemi ile entegre etmesi olmuştur. 1953'te Ford'un yöntemlerini incelemek için Amerika'ya yaptığı ziyaretten sonra, kendi süreçlerini geliştirmek için ilham almış, tüketicinin gelecekteki ihtiyaçlarına odaklanmanın önemi anlaşılmıştır. Öte yandan Japonya'da Toplam Kalite Yönetimi'ne ilişkin eğitimler alınarak, bu eğitimler sonunda "Toyota Üretim Sistemi" geliştirilmiştir (Marchwinski vd. 2012).



Şekil 2.1. İkinci Dünya Savaşı sonrası Japonya'da yalın üretimin başlaması (Akil 2019)

1973 yılındaki petrol krizi ile artan yakıt fiyatları, Japon otomobillerinin daha az yakıt tüketimiyle benzer bir performans sergiledikleri için kısa sürede Amerikan pazarında önem kazanmıştır. Böylece yalın üretimin verimliliği sahneye çıkmıştır. 1980'li yıllarda Kiichiro Toyoda; TZÜ, liderlik ve insana saygı olgularını geliştirmiştir.

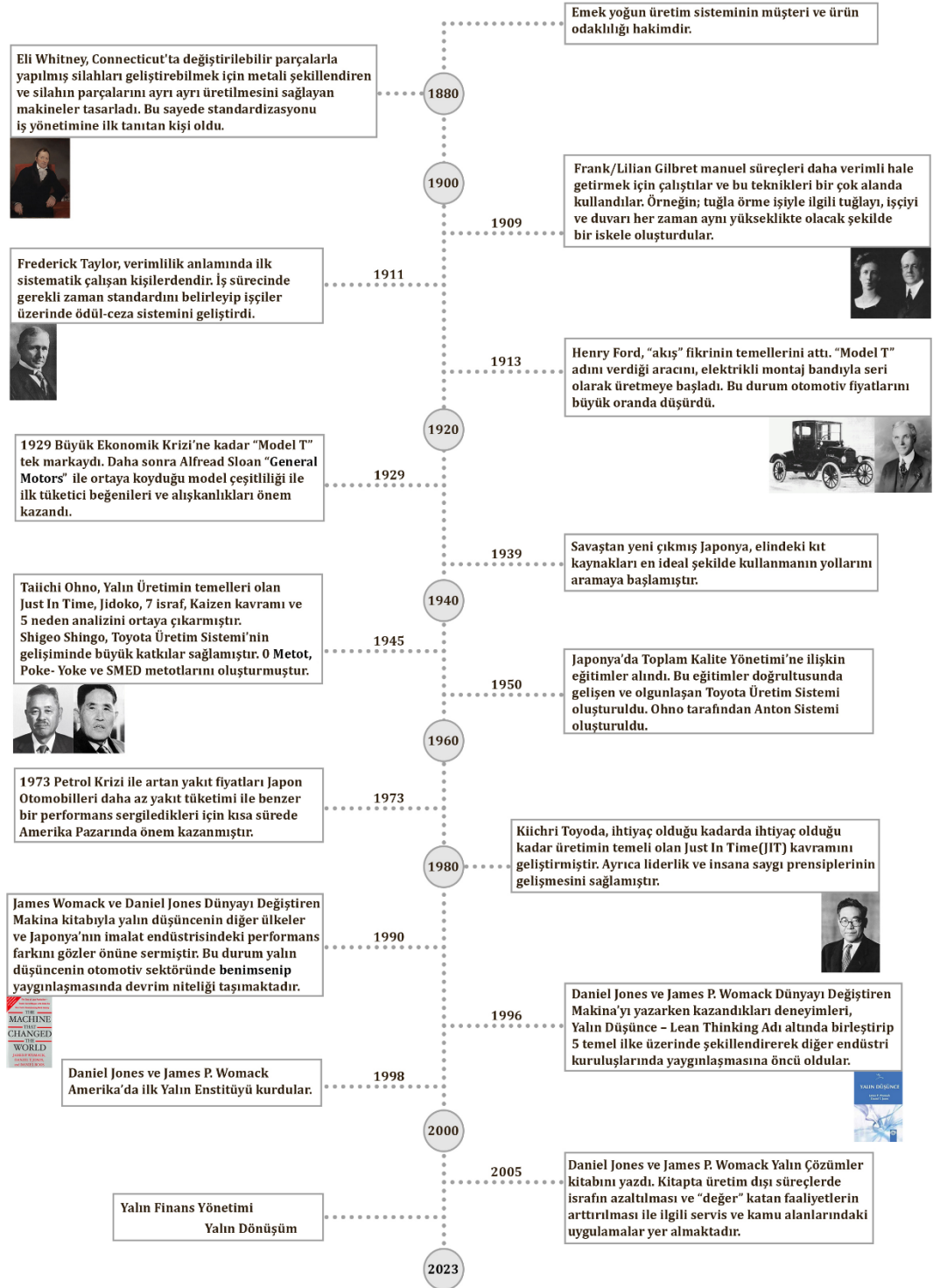
Yalın prensipleri, özellikle Toyota firması kaynaklı olmasına rağmen, "yalın" terimi ilk kez John Krafcik tarafından kaleme alınan (1988) "Yalın Üretim Zaferi - Triumph of the Lean Production System" adlı eserde kullanılmıştır. Krafcik (1988), bu

Üretim yöntemiyle kitle üretimi yapan otomotiv fabrikalarını çalışma yöntemleri, insan kaynakları politikaları ve kalite anlayışı gibi alanlarda yapılan karşılaştırmalarla "yalın" terimini açıklamıştır (Kefe ve Berikol 2018).

İlerleyen süreçlerde James P. Womack ve Daniel Jones, "Dünyayı Değiştiren Makine" adlı kitaplarıyla, yalın düşüncenin diğer ülkelerle Japonya'nın imalat endüstrisindeki performans farkını ortaya koymuştur (Womack vd. 1990). Bu durum, yalın düşüncenin otomotiv sektöründe devrim niteliğinde benimsenmesine ve yaygınlaşmasına yol açmıştır. Womack ve Jones, deneyimlerini birleştirerek "Yalın Düşünce" adıyla beş temel ilke üzerinde şekillendirdikleri kitaplarını yazarak, diğer endüstri kuruluşlarında yalın düşüncenin yaygınlaşmasında nc olmuşlardır (Womack ve Jones 1996). Ayrıca, 1998 yılında Amerika'da ilk Yalın Enstitüsü'n kurarak kurumsallaşmayı sağlamışlardır. 2005 yılında ise Womack ve Jones, "Yalın çözümler" adlı kitaplarını yazmışlardır. Bu kitapta, hizmet ve kamu sektöründe israfın azaltılması ve "değer" yaratan faaliyetlerin artırılması konularında uygulamalara yer verilmiştir.

Otomasyon ve bilgi teknolojilerine dayalı sistemlerin geliştiği günümüze yaklařtıķa yalın düşünce birçok sektörde ve sektörlerin birçok sürecinde kendine yer edinerek yalın dönüşümleri oluşturmuştur.

Küreselleşme ve rekabet koşullarının beraberinde getirdiği yalın üretim sisteminin, emek yoğun sistemden günümüze kadar geçtiği süreçleri yalın üretimin tarihsel gelişiminin temel aşamaları şekil 2.2'de özetlenmektedir.



Şekil 2.2. Yalın üretimin tarihsel gelişiminin temel aşamaları

2.2. Yalın İnşaat ve Yalın Proje Teslim Sistemi

"Yalın Düşünce" birçok sektörde olduğu gibi yapım sektöründe de önemli bir çalışma alanı niteliği kazanmıştır. Yapım sektörü yenilikleri bünyesine almak konusunda kapalı olsa da süreç içinde endüstriyel verimliliğin düşmesi yeni yöntem arayışlarını beraberinde getirmiş ve yalın düşünce de bu yöntemlerden biri olarak ortaya çıkmıştır. Yapım sektörüne uyumu sağlanan yalın üretim sistemi "Yalın İnşaat" olarak anılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde yalın inşaat yaklaşımı, yalın inşaat yöntemleri ve yapım sektöründe "Yalın Proje Teslim Sistemi (YPTS)" incelenmiştir.

2.2.1. Yalın inşaat yaklaşımı

İnşaat sektörü, diğer endüstrilerden ve özellikle üretim sektöründen birçok farklılığı bünyesinde barındırmaktadır. Bu farklılıklara sebep olan en büyük etken inşaat sektörünün benzersiz ve karmaşık ortamıdır. Yapım sektörü karmaşık bir yapıya sahip olan ve güçlü ayrımları barındıran bir sektördür. Üretim sürecinde mal sahibi, tasarımcı, ana yüklenici, alt yükleniciler, tedarikçiler gibi birçok farklı aktör yer almaktadır.

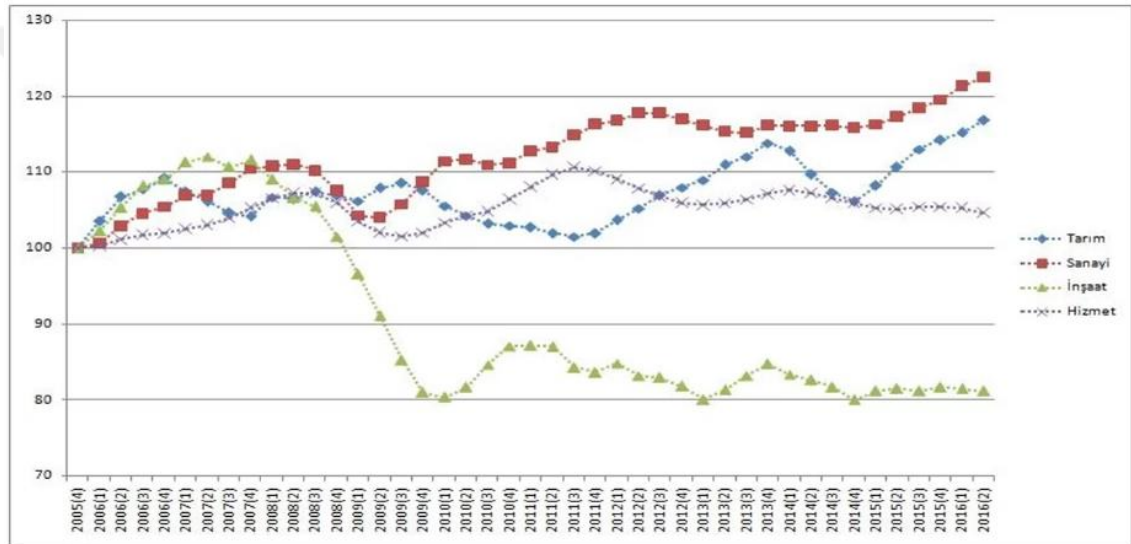
Sanayi devrimiyle birlikte imalat sektöründe yaşanan hızlı gelişimler ve değişimlerle ortaya çıkan modern yönetim felsefeleri, inşaat sektöründeki olumlu gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. İnşaat sektörünü oluşturan temel unsurlar inşaat yönetimi ve teknolojidir. İnşaat sektöründe teknolojik ilerlemeler ekipman ve bilgisayar boyutunda kendisini gösterirken, yönetim yaklaşımları açısından yenilikçi bir tutum sergilenememektedir (Akil 2019).

19. yüzyılın başlarında Henry Ford tarafından dünyaya tanıtılan kitlesel üretim modeli 100 yıl kadar endüstrilerde etkili bir iş modeli olarak başarılı olmuştur. Enflasyonun yüksek olduğu bu dönemde inşaat sektörü bu iş yapma modelinin kendi bünyesine adaptasyonunu sağlamıştır. Kitlesel üretim modelinin inşaat sektöründeki uygulanışında, müşteriye zamanla ortaya çıkan finansman maliyetlerini de içeren bir iş modeliyle bina üretimi stoklanarak satılmıştır (Arashpour vd. 2014). Bu yaklaşım, geçmişte başarılı sonuçlar vermiş olsa da günümüzde etkili olmamaktadır. Artık bu iş modeli, yani stoktaki binaları satıp finansmanı kapatma yöntemi geçerliliğini yitirmiştir. Bu durumda da yapım sektöründe finansman sorunu her geçen gün artmakta ve ciddi bir kriz oluşmaktadır.

İnşaat süreçlerindeki eksik yönetim faaliyetleri israfa yol açar ve sonuç olarak büyüme potansiyeli olmayan şirketleri ve buna bağlı olarak büyüme sorunu yaşayan ekonomiyi ortaya çıkarır (Tokat 2015). İnşaat sektöründe uzunca bir süre etkisini gösteren geleneksel iş modelinde, yapım süreçlerinde ortaya çıkan problemleri süreçte yer alan yükleniciler, iş birliği ve karşılıklı güven içinde çözmek yerine güçlü olanın sorunu diğer yüklenicilere yükleyerek iş ortaklığındaki güveni zedelemektedir. Bununla birlikte yapım sürecinde zamanında ve müşterinin beklediği kalitede yapılar üretmek yerine, yüklenicilerde "Her insan kendi davranışından, suçundan sorumludur." düşüncesi hâkim olduğundan süre, maliyet ve kaliteye dayanan performans ölçütlerine önem verilme ihtiyacı da duyulmamaktadır. Bunun engellenmesi için inşaat sektöründeki şirketlerin, üretkenliği artırmaya yönelik çabalarına odaklanarak, yapım şantiyelerini daha verimli üretim alanları haline getirmeleri önemlidir (Tokat 2015). Şu anda bulunduğumuz zaman diliminde, tüm eski düşünce modellerinin değişmesi ve tüm paydaşların tek bir ana plana uymayı taahhüt etmeleri, etkin bir yönetim modelinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Einstein problem çözümüne ilişkin ortaya koyduğu savında şunu ifade etmektedir: "Bir

problemi onu ortaya çıkaran bilinç düzeyiyle çözemezsiniz." Bu görüşe paralel olarak problemi yaratan bilinç yapısından çıkıp, bambaşka bir "iş yönetim modeli" oluşturulması oldukça önemlidir. Süre, maliyet ve kalite ölçütlerinin önemli olduğu günümüz şartlarında, iş planlarının ve sürecin uyum içinde yönetilmesi gerekmektedir. Yeni bir yönetim modeli oluşturularak bu modelde karşılıklı güven ve saygı temel alınmalıdır. Ayrıca şeffaflık ve paylaşım da önemli unsurlardır. Zaman içinde oluşan bu farkındalığa paralel olarak imalat sistemlerinde uygulanan modern teknikler ve yaklaşımlar inşaat sektörüne uyarlanmaya çalışılmıştır.

İnşaat sektöründe çeşitli yöntem ve teknikler uygulanmış olsa da inşaat sektörünün verimliliğinin düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Şekil 2.3'de görüldüğü üzere, inşaat sektörünün endüstriyel verimliliğinin 2005-2016 yılları aralığında, endüstrilerin kendi bünyelerinde kullandıkları teknikler ne kadar verimli olsa da inşaat sektöründeki adaptasyonunda verimliliği artırmak yerine verimliliğin daha da düştüğü sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.3. Yıllara göre inşaat sektörü ve endüstriyel verimliliği 2005-2016 (TÜİK, 2017)

Yapım sektöründeki düşük verimliliğin temel sebepleri tekrar yapım, eksik denetleme, proje çizimlerdeki eksiklikler, malzeme eksikliği, işçilerin yeterli bilgi ve donanımına sahip olmaması, yetersiz iletişim ve yetersiz yönetim olarak sıralanmaktadır (Dixit vd. 2017). İnşaat projelerinin benzersiz ve kompleks bir yapıya sahip olması sebebiyle performansı iyileştirmek için alınacak önlemler genellikle sıkıntılı süreçler olarak tanımlanmıştır (Arashpour vd. 2014). Amerika, İskandinavya ve İngiltere'deki araştırmalar, inşaat projelerindeki yeniden işleme oranının %35 olduğunu, işçilerin potansiyel verimliliklerinin %45 ila %65 arasında kullanıldığını, iş kazalarının proje bütçesinin %4 ila %7'si arasında gerçekleştiğini ve toplam malzemenin %11'inin israf olduğunu göstermektedir (Yalın Enstitü, 2021). Elde edilen verilere göre inşaat sektörünün çok fazla israf oluşturan bir endüstri olduğu görülmektedir. Ancak firmaların bu konudaki farkındalıkları artmakta ve verimliliğin azalmasının nedenlerini belirlemek için çeşitli yöntemler ve teknikler geliştirmek için çalışmalar yapılmaktadır. Bu durum yeni yönetim paradigmalarının adaptasyonunda israfların minimizasyonunu hedefleyen yalın üretimin uygun bir yöntem olarak seçilmesi gerektiğini ortaya çıkarmaktadır.

1990'lı yıllardan itibaren inşaat sektöründe yalın üretim prensipleri ve tekniklerinin uygulanmasına yönelik incelemelere başlanmıştır. "Yalın İnşaat" adı verilen yalın düşüncenin yapım sektörüne uygulanması, 1992'li yıllarda bir araştırma takımı tarafından başlatılan ve günümüzde hala devam eden bir çalışmadır (Koskela 1992; Koskela vd. 2002). Bu amaçla, Yalın İnşaat Uluslararası Grubu (International Group for Lean Construction - IGLC) adıyla bir yalın prensipler topluluğu oluşturulmuştur. Bu topluluk 1993 yılından beri aktif bir şekilde faaliyet göstermeye devam etmektedir.

Koskela (1992) tarafından yapılan ilk çalışma, bu paradigmanın inşaat sektörüne uygulanması konusunda bir başlangıç niteliğindedir. Koskela (1992) çalışmasında inşaat proje yönetimini, geleneksel inşaat proje yönetiminin inşaatı bir dizi dönüşüm (katma değer) faaliyeti olarak modellemesi, yeni üretim felsefesinin ise israf (katma değeri olmayan) faaliyetleri belirleyip ortadan kaldırarak rekabet gücünü artırması nedeniyle eleştirmiştir. İnşaat sektörünün yalın üretim paradigması paralelinde yeni bir üretim sistemi belirlemesini ve bu yeni paradigmanın araştırılması, incelenmesi ve sektöre adapte edilmesi gerektiğini iddia etmiştir. Koskela (2000) çalışmasında üç farklı perspektifi (dönüşüm, akış ve değer) sentezlemiş ve yalın inşaatın temelini oluşturmuştur. Koskela vd. (2002) çalışmalarında "Yalın İnşaat" kavramını ilk kez ortaya atmış ve yalın inşaatı "malzeme, zaman ve emek israfını en aza indirerek maksimum değer üretmeyi hedefleyen üretim sistemlerinin tasarlandığı bir yöntem" olarak tanımlamıştır. Koskela vd. (2002) yaptığı tanımlamadan sonra literatürde yalın inşaatı farklı araştırmacılar farklı tanımlamalarla açıklamışlardır. Çizelge 2.4'de bu tanımlamalar özetlenmektedir.

Çizelge 2.4. Yalın inşaatın farklı araştırmacılara göre tanımlamaları (Marhani vd. 2013 ve Albalkhy vd. 2020 uyarlanmıştır.)

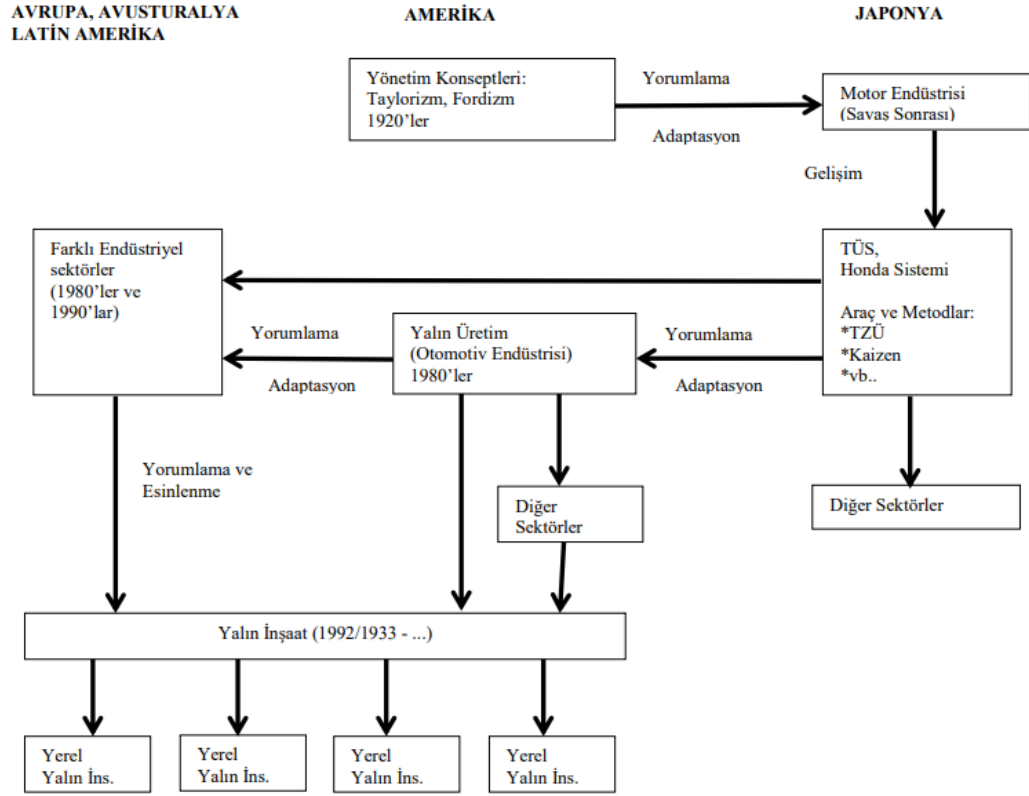
Tanım	Odaklanılan Nokta	Yazar
Yalın inşaatı tanımlayan üç ana husus vardır; ilk olarak, müşteri ihtiyaçlarını zaman ve stokta malzeme olmadan karşılamaya odaklanan benzersiz bir üretim sistemi olan yalın üretimden alınır. İkincisi, yalın inşaat, Koskela (2000) tarafından tanımlanan TFV teorisine bağlı sistemlerdir. Üçüncüsü, yalın inşaat, performansı artırmak için varyasyonu yönetmeyi amaçlar. Tek iyi varyasyon, müşterinin ihtiyaç duyduğu varyasyondur ve diğer tüm varyasyonlar kötü olanlardır.	Yalın üretim temelli, değer akışı teorisine bağlı ve müşteri odaklı bir yaklaşım	Tommelein (2015)
"Müşterinin ihtiyaç duyduğu şeyleri karlı bir şekilde teslim etmek için inşaat sürecinin iyileştirilmesi, aynı zamanda doğru sistemlere, kaynaklara ve her şeyi ilk seferde doğru şekilde teslim etmek için ölçüme sahip olunması. Maliyetten çok müşterinin bakış açısından değere odaklanır ve değer katmayan tüm faaliyetlerin "atıklarını" ortadan kaldırmaya çalışır.	Değeri oluşturmak için tüm israf kalemlerinin azaltılması ya da ortadan kaldırılması.	Hayes (2014)

Çizelge 2.4'ün devamı

"Yalın inşaat, yeni bir üretim yönetimi biçiminin inşaatı uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Yalın inşaatın temel özellikleri arasında, proje düzeyinde müşteri için performansı en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan teslimat süreci için net bir dizi hedef, ürün ve sürecin eşzamanlı tasarımı ve ürünün tasarımdan teslimata üretim ömrü boyunca üretim kontrolünün uygulanması yer alır."	Müşteri odaklı bir hedef belirleyerek sürecin eş zamanlı yürütülmesi ve süreç boyunca kontrolünün yapılması	Aziz ve Hafez (2013)
Verimlilik odaklı bir yaklaşım olan yalın inşaat, üretim veya hizmet tesislerinin planlanması ve yapımında kullanılan bir yöntemdir. Yalın inşaat yönetimi, üretim, planlama, tedarik ve kurulum aşamalarında devrim niteliğinde bir etki yapmıştır. Yalın inşaat, değer artırma ve israfları azaltma hedefleriyle başlayarak, proje teslimi için yeni ve spesifik yöntemler geliştirme yolunda ilerlemiştir.	Değer yaratma ve israfın azaltılması amacıyla üretim yönetimine dayalı bir yaklaşımdır.	Yalın İnşaat Enstitüsü (2012)
Yalın inşaat, inşaat süreçlerine uygulanan yalın üretim prensipleri veya yalın üretim düşüncesinin birleşimiyle, inşaat faaliyetlerinin yönetilmesini sağlayan bir felsefe ve yöntemler bütünüdür.	İnşaat ortamına pratik uygulama.	Lukowski (2010)
Yalın inşaat, planlama ve inşaat süreçlerinde operasyonel araştırmalar ve pratik yeniliklerin yalın ilkeler ve uygulamalarla birlikte entegre edilmesinin birleşimidir. Bu, uçtan uca tasarım ve inşaat süreçlerine uyarlanmayı gerektirir.	Yalın inşaat felsefesi, yalın inşaat süreç ve teknikleri	Abdelhamid vd. (2008)
Yalın, dengeli insan gücü, malzeme ve kaynakların optimize edilerek elde edilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, şirketlere maliyetlerin azaltılması, israfların önlenmesi ve projelerin zamanında tamamlanması konularında yardımcı olur. Ayrıca, bu yaklaşım tüm kaynakların kısıtlanması anlamına gelmez, mevcut kaynakların daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılması anlamına gelir.	Dengelenmiş insan, malzeme ve kaynak kullanımı, maliyet azaltmak, israfların minimize edilmesi ve projenin zamanında teslimi.	Lim (2008)
Yalın inşaat ve yalın üretim, genellikle bir yöntemler kümesi, bir kavram veya hatta bir kültürel ürün olarak kabul edilmektedir.	Teknikler seti, bir söylem, bir sosyoteknik paradigma	Green ve May (2005)
Yalın inşaat, Japon üretim ilkeleri ve kavramlarının inşaat süreçlerine büyük ölçekli bir şekilde entegre edilmesidir.	Üretim prensipleri, inşaat süreçleri.	Bertelsan (2004)
Yalın inşaat, mevcut yöntemlerine benzer bir şekilde kaynakların daha az kullanımıyla müşteri ihtiyaçlarının daha iyi karşılanmasını hedefler.	Müşteri gereksinimlerini karşılamak, minimum düzeyde kaynak kullanımı	Howell (1999)
Yeni üretim yaklaşımı, verimlilik, kalite ve rekabet avantajı gibi faydalar sağlamak için hızlı bir şekilde yeni tekniklerin benimsenmesini destekleyen sağlam bir temele sahiptir.	Üretim felsefesi, kalite	Koskela (1992)

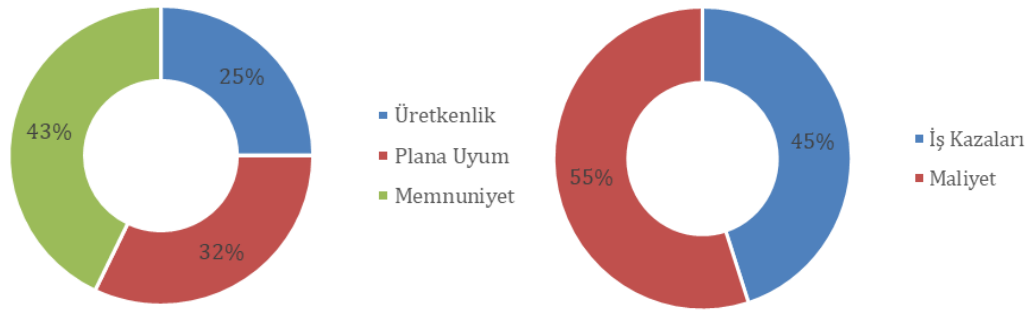
Yalın inşaatın oluşumunda sistematik etkileşim, Jorgensen ve Emmitt (2008) tarafından Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Şekilde, üretim yönetim sistemlerinin Amerika'da

başlangıcı ve bu felsefelerin özellikle Japon otomotiv endüstrisi tarafından yorumlanarak yeni bir yapıya dönüştürülmesi ve bu anlayışın tekrar Amerika ve diğer ülkelerde yayılması gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Yalın inşaatın oluşumundaki sistematik gelişimiyle birlikte Amerika ve diğer ülkelere yayılması (Jorgensen ve Emmitt 2008)

İnşaat projelerinde israf oranları %60'lara kadar çıkarken, kalite hatalarında ciddi artışlar yaşanmakta ve projelerin ise %54'ü zamanında bitirilebilmektedir. Bu gecikmeler ve israflar proje bütçelerinin aşılması maliyetlerin yükselmesiyle sonuçlanmaktadır. İnşaat sektöründe genellikle zamanında teslim edilememe, bütçe aşırımları ve kalite sorunları gibi zorluklar yaşandığını belirtmekte ve bu tür problemleri önlemek için yalın inşaatın benimsenmesinin önemli olduğunu vurgulamaktadır. Son 10 yılda, inşaat sektöründe "Yalın Düşünce (Lean Thinking)" kavramının benimsenmesi hız kazanmış ve inşaat üretimindeki sorunların, hataların ve olumsuzlukların en aza indirilmesi ile belirsizliklerin giderilmesinde büyük etkisi olmuştur (Evcimen 2021). Yalın Enstitü'nün 2022 yılında elde ettiği verilere göre, bugüne kadar gerçekleştirilen yalın inşaat uygulamalarında ulaşılan sonuçlar Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Yalın inşaat uygulamalarında ulaşılan sonuçlar (Yalın Enstitü 2022)

Yalın inşaat uygulamaları sonucunda sektörde oluşan problemlere çözüm üretme bağlamında değerlendirildiğinde; üretkenlikte %25, plana uyumda %32 ve memnuniyette %43 bir artış ile iş kazalarında %45 ve maliyetlerde %55 bir azalma gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar yalın üretim felsefesinin sektörün düzelme potansiyelinde pozitif yönde etki ettiğini göstermektedir. Yalın inşaat terimi, tasarım ve inşaat faaliyetlerini içeren bir terimdir. Bu nedenle yalın prensipleri ve tekniklerinin yapım faaliyetinin bütün süreçlerine entegre edilmesi mümkündür. Ancak bu entegrasyon sağlanırken inşaat sektörüne niteliklerine uyum sağlayacak bazı düzenlemeler yapılması da bir zorunluluktur. Yalın düşüncenin yapım sektöründe yaygınlaşmasıyla çok daha iyi sonuçlar elde edilecektir.

2.2.2. Yalın inşaat yönetimi

İnşaatta geleneksel proje yönetimi, bir TFV (dönüşüm, akış ve değer) teorik çerçevesine dayanmadığı için yetersizdir (Koskela vd. 2002). Mevcut inşaat projelerinin planlanma süreci, proje akışını faaliyetlere bölerek yürütülmektedir. Faaliyetleri tamamlayabilmek için zaman, maliyet ve kaynaklarla ilgili tahminde bulunulur ve bu kalemlerin her biri her bir faaliyete bağlanır. Daha sonra yapılacak işin çeşitli bölümlerinde faaliyetlerin mantıksal bir sırasını belirlemek için Kritik Yol Yöntemi ya da geleneksel metotlar kullanılır. Ardından ya harici olarak sözleşme yapılarak ya da dahili olarak atanarak inşaat projeleri yönetilmektedir.

Geleneksel proje yönetimi anlayışıyla yürütülen projelerde, çizelgeleme programları kullanılarak başlangıç zamanı belirlenir ve en erken başlangıç zamanında faaliyetlere başlanır. Faaliyetler, proje kontrolünü sağlamak için izlenir ve değerlendirilir. Proje kontrolleri, her aktivitenin toplam tahmini proje maliyeti ve zamanlama limitleri dahilinde olup olmadığını belirler. Gecikmeler, gerekli tamamlamayı tehdit ederse, faaliyetleri hızlandırmak veya yeniden sıralamak için önlem alınır (Koskela vd. 2002).

Mantıklı gibi görünen bu yaklaşım, çoğu zaman başarısızla sonuçlanmakta ve projelerin ilk tahmin edilen zaman ve maliyetinde sapmalar görülmektedir. Çünkü bu tür geleneksel yönetim anlayışında iş akışı ve müşteri için katma değer göz ardı edilmiştir. Projede katma değer yaratan faaliyetler uygulanırken "katma değeri olmayan faaliyetler" ihmal edilmiştir, bu nedenle ilgili tüm faaliyetlerin ele alınması imkansızdır (Çilhoroz ve

Arslan 2018). Bunun sonucu olarak katma değeri olmayan faaliyetler olan atıkları hesaba katmayan geleneksel yönetim düşük verimliliği beraberinde getirmektedir.

Günümüzde inşaat projelerinin süreci değişkenlik göstererek karmaşıklık bir şekilde ve hızla ilerlemektedir. Projelerin karmaşıklığı ve değişkenliği müşterinin (işveren), pazarın ve teknolojinin ihtiyaçlarından kaynaklanmaktadır (Çilhoroz ve Arslan 2018). Projeyi hızlandırma baskısı, yükü arttırır ve buna paralel olarak genel giderler de artar (Kosleka ve Howell 2002). Bu tür karmaşık, değişken ve hızlı olan projelerin koordine edilebilmesi, ayrıntılı Kritik Yol Yöntemi çizelgeleri ile bile garanti edilemez. Bu çizelgeler, projeyi bir dizi faaliyet olarak tasvir eder ve aralarındaki iş akışını görmezden gelir. İşin bir ekipten diğerine güvenilir bir şekilde serbest bırakıldığı varsayılır veya göz ardı edilir. Bu çizelgelere güvenen proje yöneticileri, belirsizlikle mücadele eder.

Günümüzdeki proje yöneticilerinin karşılaştığı zorlukların, proje yönetimine bütüncül bir yaklaşım gerektirdiği vurgulamaktadır (Uğur ve Apaydın 2014). Çizelge 2.5'te görüldüğü üzere, proje ve yapım yönetiminde bütünsel yaklaşım da ancak yalın yönetim ilkelerinin mevcut proje ve yapım yönetimine entegrasyonunun adaptasyonu ile mümkündür. Geleneksel inşaat projelerinin yönetimindeki problemleri çözebilmek için alternatif olarak oluşturulan yalın inşaat yönetimi, yalın anlayışın oluşturduğu üç ana hedefi takip eder. Bu hedefler müşteriye sağlanan değer maksimum düzeye çıkarılması, israfların minimize edilmesi ve üstün performansın hedeflenmesidir.

Çizelge 2.5. Yalın yönetim ilkeleri (Koskela vd. 2002 uyarlanmıştır.)

<i>Klasik yapım yönetimi.</i>	DÖNÜŞÜM	Girdilerin çıktılara dönüşümü	Üretimi etkin olarak gerçekleştirme	İş kırılım yapısı (WBS), Malzeme ihtiyaç planlaması(MRP), Organizasyonel sorumluluk şeması	Ne yapılması gerektiğine odaklanma
	Görev Yönetimi				
<i>İsrafı ortadan kaldır.</i>	AKIŞ	Malzemenin dönüşüm, muayene, sevk ve beklemeden oluşan akış	İsrafı (katma değeri olmayan faaliyetleri) ortadan kaldırma	Sürekli akış, çekme üretim kontrolü, Sürekli iyileştirme	Gereksiz işlerin minimumda yapıldığından emin olma
	Akış Yönetimi				
<i>Müşteri için değeri anla ve karşıla.</i>	DEĞER OLUŞTURMA	Müşterinin gereksinimleri doğrultusunda değer oluşturulan bir süreç	Ürünün değer kaybını (olası en iyi değere göre ulaşılan değer) ortadan kaldırma	Gereksinimleri tespit etme yöntemleri, kalite fonksiyon yayılımı	Müşteri gereksinimlerini olası en iyi şekilde karşılamaya odaklanma
	Değer Yönetimi				

İnşaat sektörü için çağdaş bir yaklaşım olarak kabul edilen yalın yaklaşım, üretim sektöründeki gibi yönetim israflarının süreçlerdeki etkinlikleri belirlenerek kabul edilmelidir. Yalın yönetim sisteminin temel hedefi, süreçlerdeki israfı ortadan kaldırarak daha üstün kalite ve daha hızlı üretim sağlamaktır. Bu nedenle, akış şeması içindeki tüm

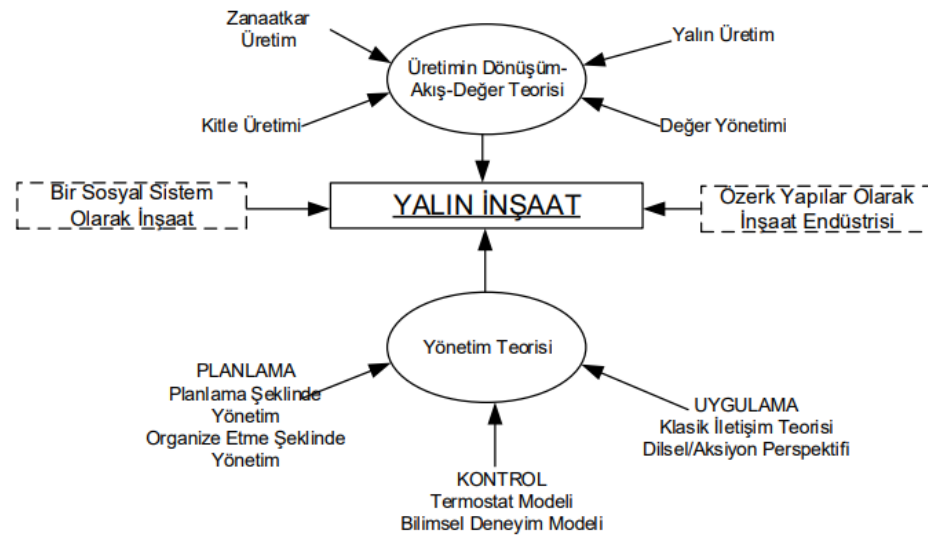
süreçler titizlikle analiz edilmeli, maliyet, kalite ve nihai ürün oluşumunu etkileyen tüm israflar doğru bir şekilde değerlendirilmelidir (Türkan 2010).

Koskela, organize etme olarak planlama, eylem/dil perspektifi ve bilimsel deney modelinin, proje yönetim teorisini daha sağlam ve modern hale getirmek için kritik olarak ihtiyaç duyulan unsurlar olduğunu öne sürmüşlerdir. Şekil 2.6 bu yeni proje yönetimi teorisinin yalın inşaatla entegrasyonunu tanımlamaktadır (Koskela 1992).

Abdelhamid (2008), yapım sektörünün birbirini tamamlayan üç şekilde anlaşılabilirliğini ve anlaşılması gerektiğini savunmaktadır:

- Koskela ve Howell'in bakış açılarına benzer proje tabanlı bir üretim süreci olarak
- Otonom araçlar sağlayan bir endüstri olarak
- Bir sosyal sistem olarak

Daha geniş olarak Şekil 2.6'da yalın inşaatı yeni üretim ve yönetim teorileri açısından tasvir etmekte ve gelecek yıllarda yalın inşaat araştırma ve uygulamalarını yönetecek yeni paradigmaların tüm cephesini tamamlamaktadır (Abdelhamid, 2008).



Şekil 2.6. Yalın inşaatın proje yönetimi (Abdelhamid 2008)

Mevcut proje yönetiminin başarısızlıkları, yeni bir yaklaşım için gereksinimlerin tanımlanmasına yardımcı olur. Bu yeni yaklaşım, genişletilmiş TFM temeline dayanmalıdır. Pratikte bu, yönetim sisteminin, her zaman daha kısa sürede bitirme baskı altında olan karmaşık ve değişken bir ortamda proje düzeyinde performansı optimize etmesi gerektiği anlamına gelir (Abdelhamid 2008). Yalın inşaatta proje yönetimi, inşaat projelerini katma değere sahip olan ve olmayan her süreci doğru tanımlayıp analiz ederek, yalın prensipler ve tekniklerin adaptasyonunun uygulanmasıyla sağlanabilir.

2.2.3. Yalın Proje Teslim Sistemi

"Proje teslim sistemi" ifadesi geleneksel olarak projenin sözleşme yapısını belirtmek için kullanılmaktadır; örneğin, tasarım-ihale-yapım (design-bid-build) ya da tasarım-yapım (design-build). Bu bağlamda "teslimat", bir işlem türü olarak anlaşılmaktadır ve anahtar soru, işlemin nasıl yapılandırılacağıdır (Kosleka ve Howell 2002). Tasarım-yapım, bir müşteriye, birden çok oyuncuyla sözleşmeler imzalamanın ve dolayısıyla eylemlerini koordine etme görevini ve riskini devralmanın aksine, etkileşimde bulunabileceği tek bir sözleşme yapan kuruluş sağlamanın bir yolu olarak görülmektedir. Buna karşılık, "Yalın İnşaat Topluluğu (YİT)", bir tesisi konseptten müşteriye taşımak için kullanılan fiili iş süreçleri açısından "teslimatı" anlar (Ballard ve Zabelle 2000). Yalın projelerin teslimatını sağlayan YPTS (Manuel ve Vieire 2009), inşaat sektöründe yalın yaklaşımın proje ve teslimat sistemini şekillendirir.

YİT'in misyonu, sermaye tesisleri tasarlamak ve inşa etmek için yeni ve daha iyi bir yol geliştirmektir. Bu yeni yol da YPTS olarak adlandırılır. YİT'in YPTS'ye dayanarak, GPTS sürecinin aşamaları (tanımla, tasarla, tedarik et, monte et ve teslim et) yalın (daha az atıkla daha hızlı ve daha etkili) olacak şekilde geliştirilmiştir. Yalın düşüncenin tüm proje aşamalarında vurgulanması, herhangi bir yalın inşaat çerçevesinin geliştirilmesi için zorunludur. Bir sonraki adım, her proje aşamasında yalın uygulamaları bütünlendiren bir dönüşümsel yol haritası geliştirmektir (Aomar 2012).

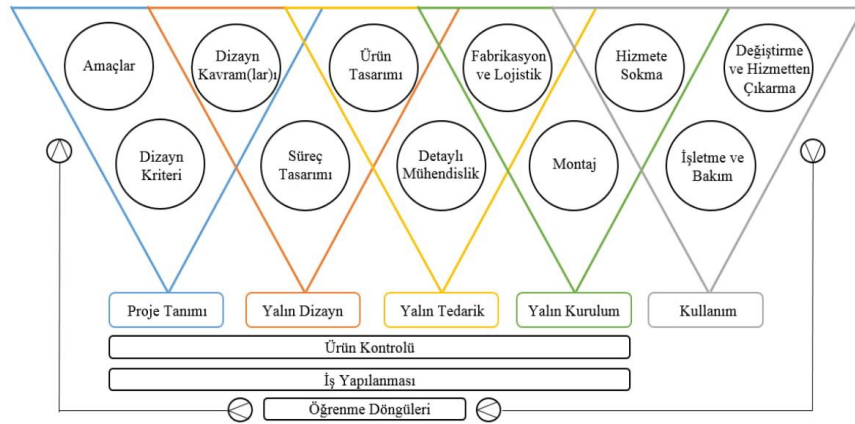
YPTS'nin temel özellikleri şunlardır (J. G. Ballard 2000):

- Proje, verimli bir şekilde yönetilen bir süreç olarak değer oluşturur.
- Mal sahipleri detaylı tasarım ve planlama evresi kapsamına dahil edilerek bilgi eksikliğinden kaynaklanan potansiyel çatışmalar engellenir.
- İnşaat sürecindeki optimizasyonlarla iş akışının düzenli ve ilerlemeye açık olmasına odaklanılır.
- Kapasite ve depolamanın dönüşken durumların üstesinden gelebilmesi sağlanır.
- Her seviyede geribildirim ağı kullanılır ve sıkıntılı zamanlarda hızlı bir adaptasyon gerçekleştirilir.

Yalın proje teslimi, YİT tarafından geliştirilen YPTS kılavuzlarının uygulanmasına odaklanmaktadır (Ballard 2008). YİT'e göre, proje teslim sisteminin ana modülleri, bunlarla sınırlı değildir. YPTS modeli, proje tanımından tasarım, tedarik ve montaja uzanan 4 birbirine bağlı üçlü veya 9 aşamada organize edilen, ayrıca her ikisi de tüm proje aşamalarını kapsayacak şekilde tasarlanmış 2 üretim kontrol modülü ve iş yapılandırma modülü olmak üzere toplamda 13 modülden oluşmaktadır (J. G. Ballard 2000).

Şekil 2.7'de görüldüğü üzere, YPTS, 4 temel evreden oluşmaktadır. Bu evreler projenin tanımlanması, yalın tasarım, yalın tedarik, yalın montaj olarak tanımlanmaktadır. Bu evrelerin doğru uygulanmasıyla inşaat sektöründe maksimum verimlilik sağlanabilir. Her aşama üç proje adımı içerir. Her üçgen, örtüşen bir proje aşamasını temsil eder ve bazı adımlar, proje tesliminin birbiriyle bağlantılı olması nedeniyle iki aşamanın parçasıdır. Bu nedenle, her proje aşamasının bir sonraki aşama üzerinde etkisi vardır ve bir önceki aşamadan etkilenir. Bir aşamada verilen kararlar diğer

aşamaları da etkiler. GPTS ile karşılaştırıldığında, YPTS genellikle göz ardı edilen farklı aşamalar arasındaki ilişkileri ve bağımlılıkları açıkça gösterir.



Şekil 2.7. YPTS sürecinin aşamaları (Ballard 2008)

YPTS'de proje ekibinin görevi sadece müşterinin istediğini tasarlamak ve uygulamak değil, öncelikle müşterinin ne istediğine karar vermesine yardımcı olmak ve böylelikle projenin ihtiyaçlarını daha doğru bir şekilde belirlemektir. Bu süreç YPTS'nin ilk aşaması olan "projenin tanımlanması" aşamasını oluşturur. Ürünün (tesis) tasarlanmasından önce ürünün nasıl kullanılacağını tasarlamak (Ballard 2008) bu aşamanın ana hedeflerindendir.

Müşteri ihtiyaçları ve paydaş talepleri, ürün ve süreç için tasarım kriterleri ve kavramsal tasarımlar arasında uyum sağlandığı zaman "proje tanımlanması" aşamasından "yalın tasarım" aşamasına geçilebilir. Yalın tasarım yalın inşaat hedeflerine ulaşılması hususundaki en önemli adımdır. Çünkü bu aşamada israfı azaltmaya yönelik kararlar tedarik ve yapım aşamalarını da doğrudan etkileyecektir. Bu aşama kavramsal tasarıma dayalı olarak süreç ve ürün tasarımının birlikte geliştirilmesi için paydaşlar arasındaki görüşmelerle devam eder. Yalın tasarım aşamasında, projede yer alan tüm paydaşlar tasarım sürecinin başından itibaren aktif bir şekilde katılım sağlamak ve mimarlar, mühendisler, yükleniciler, alt yükleniciler ve diğer proje ekipleri arasında koordinasyon içinde çalışmaktadır (Aydın 2015). Alınacak tüm kararlar müşteri değerini en üst düzeye çıkarmaya ve israfı en aza indirmeye odaklanarak verilir. Bu süreçte yeni alternatiflerin ortaya çıkması halinde proje tanımlama aşamasına geri dönülebilir.

"Yalın tedarik" aşaması, yalın tasarımda geliştirilen tasarım bileşenlerinin ve malzemelerin tedariki, teslimatı ve envanterlerin lojistik yönetiminden oluşur (Ballard 2000). Yalın inşaat yöntemine bağlı olan yalın tedarik süreci, satın alma ve nakliye faaliyetlerinde yalın prensipler ve TZÜ ilkelerinin kullanıldığı, üretim için gereken kaynakların ihtiyaç duyulduğu zamanda ve gerektiği miktarda sağlandığı bir tedarik zinciri oluşturmayı hedefler. Sürekli envanter kontrolü, zaman, depolama alanı ve aşırı stok maliyetlerinden tasarruf sağlamakta (Aydın 2015) ve bu tasarruf doğrudan maliyet kalemlerinin düşürülmesine katkıda bulunmaktadır. İnşaat şantiyesinde, iş programına uygun olarak malzemelerin düşük miktarlarda ve sık aralıklarla şantiyeye ulaştırılması (Tokat 2015) bu aşamanın temel hedeflerinden biridir. Bu amaçla, benzer ürünlere sahip üretim ve hammadde kaynaklarının tek bir tedarikçiden temin edilmesi, tedarikçi

sayısının minimum seviyede tutulması, depolama ve stoklama faaliyetlerinin azaltılması sağlanır. Geleneksel tedarik zincirinde ekonomik endişeler önemli olsa da yalın tedarik zincirinde kalite, güvenilirlik, tedarikçi tutumu, kültür ve sevkiyat performansı gibi faktörler de ekonomik etkenler kadar önemlidir (Wilson 2009). Tedarikçi ve alıcı arasındaki güven ve iş birliği seviyesi, tedarik hızı ve kalitesinin de yüksek olacağı düşüncesini desteklemektedir.

Yalın tedarik aşamasında tedarik edilen ürünlerin saha teslimatları başladığında "yalın montaj" aşamasına geçilir. Yalın montaj, ekipman ve malzemelerin veya bileşenlerin sahaya ilk teslimiyle başlar ve işin müşteriye teslim edilmesiyle biter (Ballard 2000). Bu aşamada yalın tedarik aşaması anlayışıyla şantiye alanına getirilen malzemeler şantiyede bekletilmeden ve herhangi bir gereksiz sarfiyata maruz kalmadan kullanılır. Şantiyedeki imalatlar süresince ortaya çıkabilecek her türlü malzeme, işçilik ve ekipman kullanımına ilişkin gereksiz kullanımlar ve sarfiyatlar bu aşamada kontrol altında tutulur. Bu süreçte başarının sağlanabilmesi için yalın inşaat sürecinin paydaşı olan işçinin de bu anlayışa paralel hareket etmesi de önem arz etmektedir.

Yalın inşaat anlayışı aslında sadece tasarım ve yapım aşamasıyla sınırlı değildir. Kurulundan sonra tesisin devreye alınması ve kullanılması ile "yalın kullanım" aşamasına (Ballard 2000) geçiş yapılır. Yapı yaşam döngüsünün önemli bir bileşeni olan kullanım aşaması da bu süreçte yer alır. Yapı ömrünü tamamlayana kadar olan kullanım evresinde bakım, onarım ve yenileme faaliyetleri kapsamında da yalın inşaat anlayışı sürdürülmelidir.

2.3. Endüstri 4.0

2.3.1. Endüstri Devrimlerinin Tarihsel Süreci ve Endüstri 4.0'ın Ortaya Çıkışı

Sanayi çağının başlamasından beri, teknolojik sıçramalar imalat sanayiinde paradigma değişimlerine yol açmıştır. Bu sözde değişimler veya sonradan adlandırılan "endüstriyel devrimler" genellikle sosyal, ekonomik ve politik değişimlerin bir sonucudur (Lasi vd. 2014). Günümüzde endüstriyel devrimin geldiği son nokta olan Endüstri 4.0'ın anlaşılabilmesi için tarihsel süreçte endüstri devrimlerinin evrilmelerinin arka planının da anlaşılması önem taşımaktadır.

18. yy. sonlarında İngiltere merkezli olarak ortaya çıkan ve önce Avrupa'da daha sonra tüm dünyada yayılan teknolojik gelişmeler atölye üretimi yerine fabrika üretimine geçilmesine, aletli üretim yerine makineli üretime geçilmesine ve parça başı üretimden yığın üretime geçilmesine neden olmuştur (Alçın 2016). Buhar gücü ile çalışan makinelerin üretimi, yüksek ölçekli üretim teknolojilerinin geliştirilmesi bu sürecin merkezinde yer almıştır. Sanayi sektöründe meydana gelen değişimler, Avrupa'nın diğer bölgelere kıyasla önemli bir üstünlük elde etmesine imkân sağlamış ve ortaya çıkan sonuçlarla birlikte bu dönem "Sanayi İnkılabı" (Endüstri 1.0) olarak adlandırılmıştır. (EBSO, 2015). Endüstri 1.0'ı karakterize eden dönüm noktası niteliğindeki teknolojiler su ve buharla çalışan makinelerdir. Bu yeni icat edilen makineler, çalışanların büyük miktarda ürün çıkarmasına izin verirken üretim sürecini çok daha verimli ve uygun maliyetli hale getirmiştir. Gelişen teknolojiler özellikle tekstil ve ulaşım sektörlerine önemli faydalar sağlamıştır.

Üretimin mekanikleşmesinden bir süre sonra 19. yy. ortalarına gelindiğinde teknolojinin daha da ilerlemesiyle çok önemli gelişmeler yaşanmış ve Endüstri 1.0'ın

merkezinde olan İngiltere yerini Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri'ne bırakmıştır. 1865 yılında, Henry Bessemer tarafından icat edilen ucuz çelik üretim yöntemi, teknolojik bir dönüşüme öncülük etmiştir. Bu dönüşüm, demiryolları başta olmak üzere ulaşım ağlarının gelişmesinde büyük rol oynamıştır (Başer 2011). Ulaşımın kolaylaşmasıyla birlikte ticaret de hız kazanmıştır. Aynı dönemde, Thomas Edison'un öncülüğünde elektrik teknolojisi gelişmiş ve fabrikalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu yeni ve üstün teknoloji, buhar gücünden çok daha güçlü olmasıyla beraber makinelerin gelişmesine ve üretimin büyük ölçüde artmasına yardımcı olmuştur. Böylelikle bu dönem esas olarak elektrik enerjisiyle çalışan makinelerin kullanıldığı endüstriyel süreçleri içermektedir. Su ve buharla çalışan makinelerle karşılaştırıldığında elektrikli makineler çok daha verimli, çalıştırılması ve bakımı daha kolaydır. Üstelik ilk sanayi devriminde kullanılan makinelerden daha az kaynak ve insan çabası gerektirdiği için maliyeti çok daha uygundur. Elektrik enerjisi, kapsamlı telgraf ve demiryollarıyla daha hızlı bir ulaşım sistemi, iletim ve bilgi aktarımına olanak sağlamıştır. Bu değişimlerle birlikte bu süreçte daha düzenli bir üretim tarzı olan seri üretim modeli doğmuştur. Henry Ford tarafından otomotiv sektöründe uygulanan bant tipi seri üretim tarzı, devrim niteliğinde bir etki yaratmış ve düşük maliyet, kitlesel üretim ve standart ürünler üzerine kurulmuştur. Yaşanan değişimler yeni bir endüstri dönemini ortaya çıkarmış ve bu dönem Sanayi Devrimi 2.0 (Endüstri 2.0) olarak anılmıştır (Alçın 2016).

20. yüzyılın ortalarında endüstrilerde ilk defa ortaya çıkan programlanabilir üretim sistemleri, yeni bir dönemin başlangıcını işaret etmiş ve bu dönem üretimin dijitalleşmesiyle özdeşleştirilmiştir. Bu dönemde üretim süreçlerinin elektronik ve bilgi teknolojileriyle otomasyonunun sağlanması, üretim teknolojilerine yeni bir perspektif kazandırmıştır (Soylu 2018). 1970'li yıllardan sonra ivme kazanan süreçte analog sistemlerin yerini dijital sistemler almaya başlamıştır. Önemli ilerlemelerden biri olan üç boyutlu yazıcıların gelişimiyle araç malzemelerinin üretimi artmış, tek tuşla büyük ölçekli üretimler gerçekleştirilmiş, makine kontrolünün artması ile yeni ve akıllı robotlar üretilmiş ve bu yeni nesil robotlar ucuz olmalarının yanı sıra üretim verimliliğini artırmıştır (TOBB 2016). Bilgi işlem teknikleri, dijital iletişim ve mikroelektronik bileşenlerin ortak gerçekleştirme aracı olarak kullanılmasıyla oluşan bu yapı, "Sanayi Devrimi 3.0" (Endüstri 3.0) olarak adlandırılmıştır (Achatz 2009). Bu gelişmeler, siber-fiziksel sistemlerin ve nesnelerin birbirleriyle iletişim kurmaya başlamasıyla, Dördüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 4.0)'nin sinyallerini vermiştir. Aynı zamanda, bu dönem dijital devrim olarak da anılmaktadır (Çukur vd. 2017).

Bu evrede dikkate değer bir diğer ilerleme ise yalın üretimin konusudur. Endüstri devrimleri arasındaki boşluğu dolduran unsurlardan biri olan yalın üretim, Endüstri 3.0'da temelini atmıştır. Sıfır hata, sıfır envanter ve esnek üretim prensiplerine dayanan yalın üretim, endüstriyel gelişmelerin dönüm noktası olmuştur. Bu evre, Endüstri 4.0'ın yaklaşmakta olduğunu göstermiş ve endüstriyel dönüşümün göstergesi olmuştur.

21. yüzyılın başlarına gelindiğinde, bilişim ve iletişim teknolojilerindeki önemli ilerlemeler ve internetin yaygın kullanımı, aynı zamanda yazılım alanındaki gelişmeler, akıllı sistemlerin gelişmesini sağlamıştır. Bu süreçte, fiziksel ve dijital sistemler arasında bağlantı kurabilen ve üretim süreçlerini insansız olarak yönetebilen yeni üretim sistemleri ortaya çıkmış ve bu dönem genel olarak kabul edilen adıyla Endüstri 4.0 ya da Dördüncü Sanayi Devrimi olarak adlandırılmıştır (Soylu 2018).

Endüstri 4.0 terimi, Almanya'nın Hannover kentinde düzenlenen bir fuarda ortaya çıkmış ve ilk kez 2012 yılında kullanılmıştır (Drath ve Horch 2014). Gelişmiş bir ülke olan Almanya, endüstri sektörünün ilerlemesi için 255 milyon Euro gibi önemli bir destekle, Hennig ve Bosch şirketlerinin yöneticisi Siegfried Dias ve Kagermann liderliğinde bir proje yürütülmesine olanak sağlamıştır. Proje birçok uzman tarafından desteklenmiş ve üretimde devrim niteliğinde bir değişim yaşanmıştır (Bulut ve Akçacı 2017). Benzer şekilde, Almanya'nın yanı sıra diğer endüstri lideri ülkeler de benzer arayışlar içerisine girmiş ve "Endüstri 4.0" kavramına benzer stratejiler ve adlandırmalar geliştirmişlerdir. Avrupa düzeyinde, buna "Geleceğin Fabrikaları", ABD'de "Endüstriyel İnternet" ve Çin'de ise "İnternet+" denilmektedir.

Endüstri 4.0, "siber-fiziksel sistemlerin" ortaya çıkışı olarak etiketlenebilir. Dördüncü dalganın bu gelişme simgesi, insanlar ve makineler için tamamen yeni yetenekler içermektedir. Bu yeni yetenekli cihazlar, insanların şimdi "siber-fiziksel üretim sistemi" olarak tanımladıkları her şeyi gerçekleştirmek için diğer birkaç makineyle ve üreticilerle iletişim kurabilmektedir. Gömülü sistemler, üretim, lojistik, mühendislik, koordinasyon ve yönetim süreçlerinin yanı sıra sensörler aracılığıyla doğrudan fiziksel veri toplayan ve aktüatörleri kullanarak fiziksel prosedürleri etkileyen internet hizmetlerini içerir. Bu sistemler, dijital ağlar aracılığıyla bağlantılıdır ve küresel ölçekte mevcut verileri ve hizmetleri kullanırken insan-makine arayüzleriyle donatılmıştır (Bartodziej 2016).

Çizelge 2.6'da geçmişten günümüze gelişen endüstri devrimlerinin odak noktalarıyla temel tarihsel süreci gösterilmektedir.

Çizelge 2.6. Endüstri devrimlerinin temel tarihsel süreci

	Endüstri 1.0	Endüstri 2.0	Endüstri 3.0	Endüstri 4.0
Güç kaynağı	Su ve buhar	Elektrik ve petrol		
İş gücü	Çoğu endüstriyel süreç için daha fazla işgücü ve insan kaynağı gerekliydi. Bunun nedeni arzdan daha fazla talep olmasıydı, bu da daha fazla insanın istihdam edilmesi ve uzun saatler çalışması anlamına geliyordu.	Daha az iş gücü gerekliydi ve daha fazla insan işini kaybetti. Bunun nedeni, makinelerin üstlenecekleri faaliyetlerin çoğunu gerçekleştirerek işçilerin yerini almasıdır.		
Üretim sistemleri		Mekanik makineler ve yardımcılar esas olarak büyük ölçekli üretimde kullanıldı.	Seri üretimde otomatik sistemler kullanılmaktadır; bu sistemler karmaşık insan görevlerini yerine getirme yeteneğine sahiptir.	
Büyük buluş		Üretim süreçlerinde elektriğin kullanımı bu çağda büyük bir buluştu.	Bilgisayarların ve otomasyonun tanıtımı, Endüstri 3.0'ın dönüm noktalarıydı.	
İnsan müdahalesi			Bilgi teknolojileri ve mantık işlemcileri kullanılarak üretim süreci otomatikleştirilse de tam otomasyon sağlanmadığı için hala insan müdahalesi söz konusudur.	Üretim süreçlerinin çoğunda, herhangi bir insan müdahalesi olmadan büyük miktarda veri ve teknolojilerle birbirine bağlı makineler kullanılır.

2.3.2. Endüstri 4.0 teknolojileri

Tarih boyunca sanayinin evrimi, üretim süreçlerinin devrim niteliğinde üç aşamadan geçtiği şeklinde gözlemlenebilir. Gerçekleşen bu üç endüstriyel devrimin ortak özelliği gelişen teknolojik ilerlemelerin endüstriyel devrimleri tetiklemesidir. Günümüzde gerçekleşen yeni endüstriyel devrimin tetikleyicisi olan internet ve hızlı gelişimi ise insan ve makineler arası iletişimin kurulmasına olanak sağlamıştır (Brettell ve Hollifield 2014). Her alanda yaygınlaşan internet, çeşitli sektörlerin dijitalleşmesine etki etmiştir. Endüstri 4.0 olarak bilinen bu süreç, makinelerin insana ihtiyaç duymadan kendilerini ve üretim süreçlerini yönetebilme yeteneği olarak tanımlanır (EBSO 2015). Teknolojik ilerlemenin beraberinde getirdiği Endüstri 4.0, birçok modern otomasyon sistemi, veri alışverişi ve üretim teknolojilerini içeren bütüncül bir kavramdır (Schwab 2016). Henüz başlangıç aşamasında olan Endüstri 4.0, tüm sanayi aktörlerinin birbirleriyle iletişim kurmasını, tüm verilere anlık erişimi ve bu verileri kullanarak yüksek katma değer elde etmeyi mümkün kılmaktadır.

Endüstri 4.0 kavramı, tedarik zinciri içindeki malzemelerin ve işlemlerin birleşik bir ağ üzerinden bağlanmasıyla tüm faaliyetlerin birbirleriyle bağlantılı olduğu bir iş yapma yaklaşımını ifade etmektedir. Bu terim ilk kez 2013'de Fransa'da düzenlenen Paris Fuarı'nda konuşulmaya başlanmıştır. İnternetin üretimde kullanılmasının devrim niteliğinde fırsatlar yaratacağını belirterek geleceğin senaryosunu Endüstri 4.0 başlığı altında ele alınmıştır. Bu nedenle, bu kavram, Fransa'nın imalat sektöründe bir üretim lideri haline gelmesinde önemli bir etken olarak kabul edilmektedir. Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde bilgi teknolojilerinin önemini vurgulamış ve üretimin tamamen otomasyona dayalı hale gelmesini hedefleyen bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu yaklaşımda, fabrikalar beyin gücüyle yönetilen birimlere dönüşmekte ve işlemlerin tamamen robotlar ve robotik cihazlar tarafından gerçekleştirildiği bir ortam öncelikli hale gelmektedir.

Endüstri 4.0 dönüşümü, önceki endüstri devrimlerinden farklı olarak üstel bir hızda ilerlemektedir. Bu durum, günümüz toplumunun sürekli olarak yeni ve yetenekli teknolojilere bağımlı, son derece bağlantılı ve çok yönlü olmasından kaynaklanmaktadır. Dijitalleşme, bu dönüşümün hızlanmasına katkı sağlayarak teknoloji çeşitliliğini artırmıştır. Bu yeni dönemde, ekonomik sorunlarla birlikte "kim olduğumuz" sorusunda da değişimler yaşanmaktadır. Bu dönüşümle birlikte, tüm sektörler, şirketler ve hatta ülkeler köklü bir dönüşüm süreci geçirecektir.

Endüstri 4.0'ın en dikkat çekici özelliği, üretim süreçlerinde yer alan tüm araç ve makinelerin birbirleriyle iletişim kurarak üretimin gerçek zamanlı olarak yapılmasını sağlayan çalışma prensibine sahip olmasıdır. Üretimde talep edilen verinin bulut bilişim sistemine depolanacağı bu yeni endüstri formunda zaman ve mekan kavramları aşılrken, istenilen zamanda ve yerde işlerin yerine getirilmesi sağlanmaktadır. Büyük ölçüde mühendislik bilgisi gerektiren ve sistemler arasında tam entegrasyonu sağlayan Endüstri 4.0'ın, uluslararası arenada ucuz işgücüne dayalı rekabetin yerine yüksek katma değerli üretime dayalı rekabete geçişi sağlayacağı düşünülmektedir (Alçın 2016). Endüstri 4.0 ile veri analizine dayalı kolay ve anlık bakım gibi süreçlerin uygulanmasıyla ürün maliyetlerinin düşmesi ve kullanım sürelerinin artması beklenmektedir. Yani Endüstri 4.0, makinaların, iş parçalarının, sistemlerin ve süreçlerin akıllı ağlarla birbirine bağlanması ve eş zamanlı olarak kendilerini kontrol etmesidir. İlerleyen süreçte hızla

ilerleyen Endüstri 4.0'ın temel amacı, kendi kendini yönetme yeteneğine sahip akıllı fabrikaları hayata geçirmektir. Bu nedenle, Endüstri 4.0'ı anlamak için terminolojide yoğun olarak kullanılan Endüstri 4.0 teknolojilerini bilmek önemlidir. Bu kavramların çoğunun bugün kullanılmakta olması, Endüstri 4.0'ın başlangıcını göstermekte ve gelecekte nelerin mümkün olabileceği konusunda önemli ipuçları vermektedir.

Büyük veri ve veri analitiği: Büyük veri ve veri analitiği, günümüzde işletmelerin başarısı için önemli bir stratejik unsurdur. Büyük veri analitiği, yüksek hızda yakalanan ve çeşitli kaynaklardan elde edilen büyük miktardaki verilerin toplanması, depolanması, yönetilmesi, analiz edilmesi ve değerlendirilmesi sürecini ifade eder (Vaidya vd. 2018). Bu süreç, organizasyonların karar verme süreçlerini geliştirmek, verimliliklerini artırmak ve rekabet avantajı elde etmek için kullanılır.

Büyük veri analitiği, çeşitli kaynaklardan elde edilen yapılandırılmış ve yapılandırılmamış verilerin derinlemesine analiz edilmesini sağlar. Sosyal medya paylaşımları, müşteri etkileşimleri, satış verileri, web trafiği, sensörlerden elde edilen veriler gibi farklı kaynaklardan gelen büyük veri, işletmelerin bilgiye dönüştürülebilir ve anlamlı içgörüler elde etmelerini sağlar (Sanchez vd. 2020).

Büyük veri analitiği, işletmelere birçok avantaj sağlar. Öncelikle işletmelerin müşteri davranışlarını, ihtiyaçlarını ve tercihlerini daha iyi anlamalarına yardımcı olur (Coussement vd. 2015). Bu sayede, müşterilere daha iyi hizmet sunulabilir, pazarlama stratejileri daha etkili hale getirilebilir ve müşteri memnuniyeti artırılabilir. Ayrıca, büyük veri analitiği işletmelerin operasyonel süreçlerini optimize etmelerine yardımcı olur. Veri analitiği algoritmaları kullanılarak üretim süreçleri, stok yönetimi, tedarik zinciri planlaması ve lojistik gibi alanlarda verimlilik artırılabilir, maliyetler düşürülebilir ve kaynaklar daha etkin bir şekilde kullanılabilir (Chen vd. 2020). Risk yönetimi alanında da önemli bir rol oynar. Veri analitiği sayesinde işletmeler, potansiyel riskleri belirleyebilir, güvenlik açıklarını tespit edebilir ve önleyici önlemler alabilir. Finansal hizmetler sektöründe, sahtekârlık tespiti ve kredi riski analizi gibi konularda büyük veri analitiği büyük önem taşır (RiskOptics 2021).

Diğer taraftan Ar-Ge ve inovasyon süreçlerini destekler. İşletmeler, büyük veri analitiği sayesinde pazardaki trendleri, rekabetçi ortamı ve müşteri taleplerini daha iyi anlayabilir ve yeni ürünler, hizmetler veya iş modelleri geliştirebilir. Doğru bir şekilde toplanan, yönetilen ve analiz edilen büyük veri, işletmelerin karar verme süreçlerini destekler, operasyonel verimliliği artırır, müşteri memnuniyetini sağlar, riskleri yönetir ve inovasyonu teşvik eder (Ji vd. 2022). Bu nedenle, işletmelerin büyük veri analitiği yeteneklerini geliştirmeleri ve bu alanda uzmanlaşmış ekipler kurmaları kritik öneme sahiptir.

Gerçek zamanlı bilgi işlem: Gerçek zamanlı bilgi işlem, günümüzde işletmelerin verimliliğini artırmak, rekabet gücünü yükseltmek ve müşteri memnuniyetini sağlamak için önemli bir rol oynamaktadır. Bu yaklaşım, işletmelerin operasyonel süreçlerinde gerçek zamanlı veri toplama, analiz etme ve karar verme yeteneklerini artırmak için kullanılan bir teknoloji olarak tanımlanabilir (Sebastian vd. 2015). Gerçek zamanlı bilgi işlem, birçok farklı sektörde uygulanabilir ve bir dizi avantaj sunabilir. Örneğin, üretim sektöründe gerçek zamanlı veriler sayesinde üretim hattının performansı takip edilebilir, sorunlar hızla tespit edilerek müdahale edilebilir ve verimlilik artırılabilir. Lojistik sektöründe ise gerçek zamanlı takip ve rota optimizasyonu ile teslimat süreçleri

iyileştirilebilir ve müşteri memnuniyeti artırılabilir. Gerçek zamanlı bilgi işlemin verimli bir şekilde uygulanabilmesinde yatay ve dikey entegrasyon önem taşımaktadır.

Yatay entegrasyon işletmeler arasında ortaklık, birleşme veya iş birliği yoluyla gerçekleştirilen bir stratejidir. Benzer ürünlere veya hedef kitlelere sahip olan şirketler, yatay entegrasyonla bir araya gelerek rekabet avantajı elde edebilirler. Bu, ortak pazarlama, ortak tedarik zinciri yönetimi veya ortak üretim gibi farklı şekillerde gerçekleşebilir. Yatay entegrasyon, işletmeler arasındaki iş birliğini artırarak maliyetleri düşürebilir, kaynakları daha verimli kullanmayı sağlayabilir ve pazar payını artırabilir. Ayrıca, yatay entegrasyon, işletmelerin birbirlerinden öğrenme ve inovasyon konusunda fayda sağlamalarını da mümkün kılar (Satoğlu vd. 2018).

Dikey entegrasyon ise bir şirketin tedarik zinciri boyunca farklı aşamalara sahip olması anlamına gelir. Bu, hammadde temininden üretim sürecine, dağıtım ve son kullanıcıya kadar olan süreçleri kapsar. Dikey entegrasyon, şirketlerin tedarik zincirini kontrol etmelerini, maliyetleri düşürmelerini ve operasyonel verimliliği artırmalarını sağlar. Aynı sektördeki diğer şirketlerle iş birliği yaparak veya tedarikçi veya müşterileri bünyesine katarak gerçekleştirilebilir. Dikey entegrasyon, işletmelerin daha fazla kontrol sağlamalarını, kaliteyi iyileştirmelerini ve müşterilere daha iyi hizmet sunmalarını sağlar (Dobrowoski vd. 2017).

Bulut bilişim sistemi: Bulut bilişim sistemi, günümüzde teknoloji düzeyinin yüksek bir hiyerarşiyle birleşerek kuruluşlar arasında iletişimi sağlamakta ve veri paylaşımını teşvik eden, sistem performansını iyileştiren, esnek ve çevik bir yapı sunan bir yeniliktir. Bu yenilik, işletmelere bir dizi avantaj sağlamakta ve iş süreçlerini dönüştürerek daha verimli ve rekabetçi bir hale getirmektedir (Dobrowoski vd. 2017). Bulut bilişim, bilgi ve iletişim teknolojilerinin evrimiyle birlikte ortaya çıkmış ve hızla yaygınlaşmıştır. Artık kuruluşlar, fiziksel sunuculara yatırım yapmak yerine bulut tabanlı hizmetleri tercih etmekte ve bu sayede işletim maliyetlerini azaltmakta, kaynakları daha etkin bir şekilde kullanabilmekte ve hızlı ölçeklendirme imkanı elde etmektedir. Bulut bilişim, kullanıcıların gereksinimlerine göre ölçeklenebilir bir altyapı sunmakta ve hizmetlerin anında kullanıma hazır olmasını sağlamaktadır (Alçın 2016). Ayrıca, bulut bilişim sistemi sayesinde kullanıcılar, istedikleri zaman ve yerden internete bağlı bir cihaz aracılığıyla sistemlere erişebilmekte ve verilere kolaylıkla ulaşabilmektedir. Bulut bilişim teknolojisi, veri merkezleri, sunucular, depolama birimleri, ağ altyapısı ve yazılımlar gibi unsurları bir araya getiren bir ekosistem oluşturmaktadır. Bu ekosistem, kullanıcıların ihtiyaçlarına yönelik farklı hizmet modelleri sunmakta ve esnek bir şekilde ölçeklendirilebilmektedir (Öksüz vd. 2017). Bulut bilişim, işletmelerin hızlı bir şekilde büyümesine ve yeni pazarlara açılmasına olanak tanımakta, iş süreçlerini optimize etmekte ve rekabet gücünü artırmaktadır. Ayrıca, bulut bilişim sayesinde işletmeler, veri güvenliği, yedekleme ve felaket kurtarma gibi kritik konularda daha güvenilir ve etkili çözümler elde edebilmektedir. Bu nedenle, bulut bilişim teknolojisi, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Davutoğlu vd. 2017).

Dijital ikiz/simülasyon: Günümüzde hızla gelişen teknolojiyle birlikte artan bir öneme sahip olan ve farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan bir modelleme yöntemidir. Bu yöntem, gerçek zamanlı verileri kullanarak makineleri, ürünleri ve insanları içeren sanal bir model oluşturmaya hedefler. Dijital ikiz, hesaplamalı sistemlerin temelini oluşturarak, üretim sürecinde yer alan adımların önceden analiz edilmesini ve performans tahminlerinin yapılarak sürecin iyileştirilmesini sağlar (Bahrin 2016).

Simülasyon ise, ürünlerin, üretim süreçlerinin ve malzemelerin bilgisayar ortamında gerçek zamanlı veriler kullanılarak üç boyutlu olarak taklit edilmesini ifade eder (EBSO 2015). Bu şekilde, gerçek dünyadan elde edilen verilerin kullanılmasıyla birlikte ürünler, makineler ve insanlarla birlikte fiziksel dünyanın sanal bir gerçeklik ortamı oluşturulmaya çalışılır (BCG 2015). Simülasyonlar, sanal modeller üzerinde test yapmayı mümkün kılarak, gerçek zamanlı üretim öncesi ürünlerin performansını değerlendirme imkanı sağlar. Ayrıca, en uygun kurulumun belirlenmesi ve kalite artışıyla birlikte makine kurulum sürelerinin kısalması gibi avantajlar sunar (Dobrowoski vd. 2017). Tasarım aşamasındaki ürünlerin ise 3 boyutlu simülasyonlardan faydalanılması mümkün olur ve zamanla simülasyonlar fabrika üretimlerinde daha etkin bir şekilde kullanılmaya başlanabilir (TÜSİAD 2016). Bu yöntemler, üretim süreçlerinde verimliliği artırarak maliyetleri düşürmeye ve riskleri azaltmaya yardımcı olur. Özellikle karmaşık üretim süreçleri ve yenilikçi ürünlerin geliştirilmesinde simülasyonların kullanımı büyük avantajlar sağlar.

Gömülü sistemler: Gömülü sistemler, çağımızın hızla gelişen teknolojik ortamında büyük önem taşıyan ve işlevleriyle hayatımızı kolaylaştıran unsurlardır. Bu sistemler, verilerin saklanması, işlenmesi ve gereken çıkarımların yapılması için mikro mekanizmalardan oluşur ve genellikle cihazların içerisinde yer almaktadır (Öksüz vd. 2017). Gömülü sistemler, kendilerine yüklenen görevleri yerine getirirken yerinde karar vermeyi ve farklı dağıtık sistemlerin uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu teknolojik bileşenler, siber-fiziksel sistemlerin temel yapı taşları olarak adlandırılabilir. Bir cihazın içerisinde yer alan gömülü sistem, verileri depolayabilir, işleyebilir ve hesaplama yapabilir. Ayrıca, çevresiyle iletişim kurabilme özelliğine sahiptir. Bu sayede, ürünlerin, makinelerin ve iş sistemlerinin daha akıllı hale getirilmesi mümkün olur (Dobrowoski vd. 2017).

Gömülü sistemlerin sağladığı akıllı yetenekler, yerinde karar verme yeteneği kazandırır ve merkezi olmayan karar yapılarının oluşmasını sağlar. Bu da iş sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlar ve karar alma süreçlerinin hızlanmasına katkıda bulunur. Örneğin, bir ev otomasyon sistemi içerisinde yer alan gömülü sistemler, evdeki farklı cihazların birbirleriyle iletişim kurmasını sağlar ve enerji verimliliğini artırır (Satoğlu vd. 2018). Gömülü sistemler, endüstriyel otomasyon, tıbbi cihazlar, taşıtlar, akıllı ev sistemleri gibi birçok alanda kullanılır. Bu sistemlerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte hız kazanmaktadır. Nesnelerin interneti kavramının yaygınlaşmasıyla birlikte gömülü sistemlerin önemi daha da artmıştır. Nesnelerin interneti, farklı cihazların birbirleriyle iletişim kurabildiği ve veri paylaşabildiği bir ağ oluşturur. Gömülü sistemler, bu ağın temel yapı taşlarını oluşturur ve veri alışverişini sağlamaktadır (Ashton 2009).

Auto-ID (RFID-RTLS vb. teknolojiler): Auto-ID genellikle otomatik veri toplama ile birlikte anılır. Diğer bir deyişle; varlıkları tanımlamayı, onlar hakkında bilgi toplamayı ve toplanan bilgileri el ile saymadan bilgi teknolojileri ortamında hızla değerlendirmeyi ifade eder (Kang vd. 2020). Otomatik tanımlama ve veri yakalama (Auto-ID), insan müdahalesi olmadan nesnelerin otomatik olarak tanımlanması, onlar hakkında veri toplanması ve doğrudan bilgisayar sistemlerine girilmesi yöntemlerini ifade eder. Auto-ID'nin bir parçası olarak kabul edilen teknolojiler arasında genellikle QR kodları, barkodlar, radyo frekansı tanımlama (RFID), biyometri (iris ve yüz tanıma sistemi gibi), manyetik şeritler, optik karakter tanıma, akıllı kartlar ve ses tanıma yer alır.

Auto-ID aynı zamanda yaygın olarak "Otomatik Tanımlama", "Otomatik Kimlik" ve "Otomatik Veri Yakalama" olarak da anılır (Geng 2016).

Auto-ID, özellikle görüntülerin, seslerin veya videoların analizi yoluyla veri elde etme süreci veya aracıdır. Verileri yakalamak için gerçek görüntüyü veya sesi dijital bir dosyaya dönüştüren bir dönüştürücü kullanılır. Dosya depolanır ve daha sonra bir bilgisayar tarafından analiz edilebilir. Aynı zamanda kimliği doğrulamak veya güvenli bir sisteme girme yetkisi sağlamak için de veri tabanındaki diğer dosyalarla karşılaştırılabilir (Ashton 2009). Verilerin yakalanması çeşitli yollarla yapılabilir; en iyi yöntem uygulamaya yoluladır.

Sanal ve artırılmış gerçeklik: Artırılmış gerçeklik (AG), gerçek dünyada var olan çevreden elde edilen verilerin bilgisayar tarafından üretilerek duyuşal girdiyle artırılması ve fiziksel ortamla birleştirilmesi suretiyle oluşturulan yeni bir algı ortamıdır (Graham vd. 2014). Bu kavram, Türkçe literatürde "zenginleştirilmiş", "genişletilmiş" veya "artırılmış gerçeklik" terimleriyle ifade edilir ve gerçekliğin bilgisayar tarafından değiştirilmesini temsil eder (EBSO 2015). AG kavramı, David Mizell ve Tom Caudell tarafından 1990'lı yıllarda ilk kez kullanılmıştır (Uğur ve Apaydın 2014). Azuma'ya (1997) göre, zenginleştirilmiş gerçeklik uygulamalarının üç temel karakteristik özelliği vardır: gerçek ve sanalın gerçek koşullarla birleştirilmesi, gerçek zamanlı etkileşimin sağlanması ve üç boyutlu ortamlarda bu unsurların konumlandırılması. AG, dijital objelerin kare kodlar kullanılarak gerçek objelere dönüştürülebildiği bir teknoloji olarak düşünülebilir ve gerçekliğin desteklendiği, güçlendirildiği ortamları sunar (Erbaş ve Demirel 2015). AG ortamlarında gerçek ve sanal nesneler, kullanıcılara uyumlu bir şekilde sunulur ve kullanıcının algısı geliştirilir (Bronack 2011). Bu teknoloji, normalde insanların bilişsel süreçleri ve duyularıyla fark edemeyecekleri bilgilere erişim sağlayarak gerçekliği destekler ve güçlendirir. Böylece sanal nesneler gerçek dünyaya yerleştirilerek kullanıcının algısının iyileştirilmesine katkıda bulunur (Azuma vd. 1999). AG teknolojisi, mevcut ortamla örtüşen sanal nesnelerle çalışır. AG ekranlarında, bir kamera tarafından elde edilen gerçek ve sanal bilgiler dijital olarak birleştirilir ve bir ekran üzerinde çalışanlar ve dijital ürünler veya ekipmanlar arasında bir arayüz oluşturulur (Rüßmann vd. 2015).

Otomatik yönlendirmeli araçlar (OYA): Endüstri 4.0 bağlamında, otonom, esnek ve işbirlikçi robotlar ile OYA'lar (otonom taşıma araçları), üretim süreçlerinde devrim niteliğinde bir değişimi temsil etmektedir. Bu araçlar, otomatik olarak görevlerini yerine getirebilme yeteneklerine sahiptirler ve uzun süre dış kontrol olmaksızın gerçek dünyada çalışabilirler (Dobrowoski vd. 2017). Ayrıca, insanlarla birlikte çalışabilme yetenekleri sayesinde, iş birliği içinde çalışma alanlarını paylaşabilirler, bu da süreçleri daha verimli ve ekonomik hale getirir. Endüstri 4.0'ın bir diğer önemli özelliği ise akıllı üretimdir. Gelişen bilgisayarlar ve yazılım programları, makinelerle uyumlu hale gelerek, üretim süreçlerinde büyük bir dönüşüm sağlamıştır (EBSO 2015).

Robotik sistemler: İnsanlar, her zaman kendilerine yardımcı olabilecek araçlar geliştirmek istemişlerdir ve bu düşünce, bugün bitkiler, hayvanlar ve kendilerine benzeyen cihazlar üzerinde çalışmalar yapmalarına yol açmıştır. Bu da, dijital dönüşümle birlikte bilgi teknolojilerinin üretim alanında etkisinin artmasına katkı sağlamış ve mekanik olarak çalışan akıllı makineler, bir diğer değişle robotik sistemler, 20. yüzyılın başlarında tekstil makinelerinde yardımcı iş makineleri olarak kullanılmaya başlanmıştır. Akıllı robotların insanların yerini alabilme yetenekleri ise öncelikle otomotiv montaj

hatlarında kullanılmış ve bu sayede daha hızlı, daha az hata oranına sahip ve seri üretim sağlayan üretim hatları oluşturulmuştur. Elektronik ve yazılım alanındaki ilerlemelerin de etkisiyle, yapay zeka temelli akıllı robot sistemleri hızla gelişmiştir (Rüßmann vd. 2015). Bu akıllı robotlar, programlanabilir özellikleri sayesinde kendi kendilerine iş yapabilme yeteneğine sahiptirler ve kesme, taşıma, üretim, montaj gibi çeşitli görevleri yerine getirebilirler. Özellikle hareket kabiliyetini sağlayan yeni teknolojik sistemler sayesinde, askeri, uzay, tıp, arama kurtarma, hizmet sektörü ve ev uygulamaları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaları mümkün hale gelmiştir (Satoğlu vd. 2018). Akıllı robotların sanayide kullanımı, üretim hızını artırmış, işçilik maliyetlerini azaltmış ve üretim miktarını artırmıştır. Özellikle insan hatasının önemli olduğu, insan hayatını tehlikeye atan ve dikkat gerektiren işlerde, akıllı robotların kullanımıyla birlikte tutarlı, tekrarlanabilir ve yüksek başarı oranlarına ulaşılmıştır (Gürgüze ve Türkoğlu 2019). Robotik sistemler, robotların dinamik çevresel koşullara veya üretim sisteminin parametrelerine uyum sağlayabilmesi için akıllı fabrikaların önemli bir yönünü oluşturmaktadır (Mahdavi ve Bentley 2006). Taşıma, hareket, bekleme, işleme ve hatalar dâhil olmak üzere çeşitli israf türlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Robotların kullanımı yeni bir fikir olmayan, ancak Endüstri 4.0 ile birlikte robotların rolü değişmektedir. Robotlar artık insanlar tarafından kullanılan araçlar değil, insanlarla iş birliği yapan tam otomatik sistemler haline gelmektedir. İnsanlarla iş birliği içinde çalışabilen bu esnek sistemler, iş süreçlerinde büyük ölçüde verimliliği artırmakta ve süreçler çok daha esnek bir yapıda tasarlanabilmektedir.

Eklemleri üretim: Ürünlerin katmanlardan oluşturulması için bilgisayar destekli tasarım yazılımında tasarlanan üç boyutlu modellerin kullanıldığı otomatikleştirilmiş bir süreçtir. Bu yaklaşım, üretim sürecini basitleştirirken aynı zamanda özelleştirilmiş ürünlerin kolayca üretilmesine imkan tanır (Bahrin 2016). Üç boyutlu baskı, dijital tasarımların fiziksel nesnelere dönüştürülmesini sağlayan bir dizi işlemi içerir. Bilgisayar ortamında saklanan veriler, özel cihazlar aracılığıyla katı bir şekilde üretime dönüştürülür (Andrews 2019). Bu süreç, geleneksel üretim yöntemlerinden tamamen farklı bir şekilde çalışır. Temel olarak, bilgisayar ortamında tasarlanmış üç boyutlu bir nesne, sanal olarak katmanlara ayrılır ve her katmana eklenen malzeme eritilerek üst üste bindirilir (Chua vd. 2018). Özünde, 3D baskı olarak da bilinen bu teknoloji, tasarımların hızlı prototiplerinin üretimi için ilk olarak 1970'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Ancak zamanla, gerçek parçaların üretiminde de kullanılmaya başlanmış ve patentlerin alınmasıyla birlikte ticarileştirilmiştir. İlk kez 1982'de katı bir madde basımı gerçekleştirilmiş ve 3D baskı cihazları 1995'te piyasaya sürülmüştür. 2006 yılında açık kaynaklı yazıcılar olan Regrap, kullanıcılar ve hobi meraklıları tarafından benimsenmiş ve bu da 3D baskı teknolojisinin hızla gelişmesine katkı sağlamıştır (Turner vd. 2015). Bu açık kaynaklı yazıcılar sayesinde, bilgisayar destekli tasarım programlarıyla oluşturulan dijital 3D modeller gerçek dünyada somut nesnelere dönüştürülebilir. 3D baskı teknolojisi, sadece hızlı prototipleme amacıyla kullanılan bir araç olmaktan çıkmış ve birçok sektörde kullanılan bir üretim yöntemi haline gelmiştir. Tıptan gıdaya, genetikten bilişim teknolojilerine, şehir planlamasından sanayiye, otomotivden uzay ve savunma sanayisine kadar çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. 3D baskının sunduğu yenilikçi üretim süreçleri, tasarım sürecini hızlandırırken özelleştirilmiş üretimi kolaylaştırır ve prototip maliyetlerini düşürür. Ayrıca, tıp alanında cerrahi modellerin üretimi, protezlerin yapımı ve biyomedikal araştırmalar gibi birçok alanda büyük faydalar sağlar. Bu nedenle, teknolojinin gelişimi ve yaygınlaşması gelecekte daha da büyük etkiler yaratabileceği öngörülmektedir.

Siber güvenlik: Siber güvenlik teknolojisi programları, bilgisayarları, ağları ve verileri korumayı, güvenliğini sağlamayı, iletişimin güvenliğini ve güvenilirliğini ve kaynakların ve bilgilerin yönetimini amaçlar. Akıllı fabrikalar, standart iletişim protokolleri ve değer zincirinin tüm halkaları arasında yüksek bağlanabilirlik ile çalışır (Rüßmann vd. 2015). Bilişim teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler ve dijital dönüşüm, bilgi güvenliği kavramının önemini artırmıştır. 1995 yılında bir bilişim mühendisinin ağ üzerindeki bilgisayarların güvenlik zorluklarını vurgulamasıyla birlikte, bilgi güvenliği kavramı gelişmiştir (Hansen ve Buzan 2009). Günümüzde, Endüstri 4.0 süreciyle birlikte yoğun veri paylaşımı, artan internet kullanımı ve teknolojik ilerlemeler, daha etkili savunma sistemlerinin oluşturulmasını, acil durum hazırlığının yapılmasını ve bu süreçlerin hızlandırılmasını gerektirmektedir. Dijital güvenlik kavramı, endüstriyel sistemlerin ve üretim kanallarının dijital güvenlik tehditlerine karşı korunmasını hedeflemektedir. Bu kavram, dikey ve yatay entegrasyonun ilerlemesiyle birlikte ortaya çıkmıştır. Makinelerin kimliklerinin belirlenmesi ve makinelere erişimin sağlanması gibi konular, dijital güvenlik çerçevesinde ele alınmaktadır. Dijital güvenlik, bilgisayarlar, yazılımlar, donanımlar ve ağlar üzerindeki izinsiz erişim, siber suçlar, kötü niyetli gruplar ve dijital ortamda ortaya çıkabilecek güvenlik açıklarından korunmayı amaçlayan teknolojiler ve süreçler bütünüdür. Dijital güvenlik, tehditlerin tespit edilmesiyle birlikte fiziksel ve sanal engellerin oluşturulmasını gerektirmektedir. Bölgesel ve ulusal düzeyde dijital güvenlik politikalarının geliştirilmesi, iş birliği ve koordinasyonun sağlanması da önem taşımaktadır. Bu sayede dijital güvenliğin sağlanması ve sürdürülebilir bir şekilde güçlendirilmesi mümkün olacaktır. Dijital güvenliğin genel amacı, yalnızca veri kaynaklarının korunması veya internet güvenliğinin sağlanması değildir. Aynı zamanda, bireylerin ve diğer varlıkların da dâhil olduğu klasik güvenliğini sağlamayı hedeflemektedir. Dijital güvenlik, güvenilir iletişim ve güvenli veri paylaşımı üzerine odaklanarak, bilgi güvenliği ve bilişim sistemlerinin güvenilirliğini sağlamaya yönelik önlemler almaktadır (Solms ve Niekerk 2013).

Makine öğrenimi: Makine öğrenimi, teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, belirli nesnelerin veya kavramların yeterli doğrulukla tanımlanamadığı durumlarda, bu nesnelerin veya kavramların makinelerle örnekler aracılığıyla aktarılması gereken bir süreçtir. Bu sürecin gerçekleşebilmesi için bilgisayarların, örnekleri bilgiye dönüştürebilme yeteneklerine sahip olmaları gerekmektedir. İşte bu noktada devreye makine öğrenimi algoritmaları girer. Makine öğrenimi, yapay zekâ (AI-Artificial Intelligence) yaklaşımlarının bir alt grubunu oluşturur ve veriler üzerinden tahmin yapabilen algoritmaların çalışma ve yapılarını inceleyen bir sistemdir (Dündar vd. 2021). Bu algoritmalar, önceden tanımlanmış program talimatlarını takip etmek yerine, veri tabanlı tahminler ve kararlar gerçekleştirmek için bir model oluşturarak çalışırlar (Aydın 2015).

Endüstri 4.0 süreci, diğer sanayi süreçlerinden farklı olarak, teknoloji yoğun bir dönemi içermesiyle öne çıkar. Bu süreç, diğer süreçlere kıyasla daha hızlı ilerler ve hayatımızın hemen her alanında kendini hissettirir. Gelişen teknolojik bileşenler ise Sanayi Endüstri 4.0'ın anlaşılmasına ve kolayca benimsenmesine katkıda bulunur. Bu teknolojiler, iş yapma sürecinde köklü değişikliklere yol açacak potansiyele sahiptir. Endüstri 4.0 sürecinin gelişimine katkı sağlayan teknolojileri ve ortaya çıkardığı yenilikleri anlamak, bu süreçte ilerleme için temel adımlardan biridir. Nesnelerin interneti ve bulut bilişim, Endüstri 4.0'ın ilerlemesine en büyük katkıyı sağlayan teknolojiler olarak öne çıkmaktadır (Dobrowoski vd. 2017). Ancak, bu teknolojilerin karşılaşılabileceği en

büyük sorunların siber güvenlik açıkları olduğunu söylemek de mümkündür. Çünkü gelişen teknolojilerin birlikte çalışabilirliğini ve ilerlemesini artırmak için siber güvenlik alanında yoğun çalışmalar yapılmalı ve kullanıcıların bilgilerine erişilebilirliği konusunda endişe duymamaları sağlanmalıdır. Sanayi 4.0'ın hedefi, teknolojinin tüm imkânlarının ortak bir platformda birleştirildiği, bilgiye dayalı analitik çözümlerle yönetilen, akıllı otomasyon sistemlerinin ağırlıklı olarak kullanıldığı bir düzenin oluşturulmasıdır. Endüstri 4.0 süreciyle birlikte nesneler, sistemler ve insanlar birbirleriyle bağlantılı hale gelecek ve istihdam, ekonomik büyüme, yatırım, iş dünyası ve hatta akademik çalışmalar dahi yeni fırsatlar ve tehditlerle karşılaşacaktır. Endüstri 4.0, sürekli gelişim anlayışıyla beslenen bir dönüşüm hareketi olarak görülmeli ve bu anlayışın en önemli hedefi, dijital gelişmelerle birlikte üretimi daha verimli ve rekabetçi hale getirmektir. Bu nedenle, Endüstri 4.0 ve gelişimi konusunda daha fazla çalışma yapmak ve bu alanda uzmanlaşmak, bu süreçte etkin bir şekilde yer almak için önemli bir katkı sağlayabilir (Alçın 2016).

2.4. Yalın Üretim Sürecinde Kullanılan Endüstri 4.0 Teknolojiler

2.4.1. Farklı Sektörlerde Kullanılan Teknolojiler

Yalın üretim temelde, modern teknolojilerin uygulanması ya da işletme kaynak planlamasının üzerinde durmak yerine, birçok kurumsal uygulama aracılığı ile israfi minimum düzeyde tutmayı hedefler. Diğer yandan yapılan çeşitli araştırma çalışmalarında, Endüstri 4.0 teknolojilerini uygulamanın artan esneklikten gelişmiş üretkenliğe, azalan maliyete, azaltılmış teslim süresine ve iyileştirilmiş kaliteye kadar değişen performans faydalarıyla kendini gösterir (Dombrowski vd. 2017).

Farklı sektörlerde Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanması, pek çok performans faydalarıyla karşımıza çıksa da bir yönetim şekli olmadığı için yetersiz kaldığı görülmüştür. Satoğlu vd. (2018), Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasının yalnızca yanlış yönetim veya düzensizlikten kaynaklanan sorunları çözemeyeceğini savunarak bu teknolojilerin başarıyla gerçekleştirilebilmesi için otomasyondan önce yalın faaliyetlerle uygulanmasının gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca, yaptıkları çalışmada bu teknolojilerin uygulanmasından önce ve sonra etkili bir bilgi akışının önemi de vurgulanmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında, tek başına uygulanan yalın yaklaşımın ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin, birbirine entegre edilerek uygulanması halinde çeşitli endüstriyel sektörlerin operasyonel performansının nasıl etkilendiği merak konusu olmuştur.

Endüstri 4.0 ve yalın üretim ayrıntılı incelendiğinde birbirlerine paralel olduğu fark edilmektedir. 1990'ların başlarında, otomasyon teknolojisini yalın üretime entegre etmek için yapılan çalışmalar yalın otomasyonu ortaya çıkarmıştır. Günümüzde ise, Endüstri 4.0 teknolojileri yalın otomasyon için yeni çözüm yolları oluşturarak Endüstri 4.0 ile yalın üretimi birbirine entegre etmekte ve bunun ötesinde bilgi iletişim teknolojilerinin artan entegrasyonu ile yalın üretimi geliştirmektedir. Bu da Endüstri 4.0'ın bilimsel araştırmalardan gerçek hayata geçişini hızlandırmaktadır. Ayrıca, yalın üretim sistemlerinin iş süreçlerine odaklanan bir organizasyon sağlaması nedeniyle, üretim ortamında Endüstri 4.0'ın başarılı ve sürekli olarak uygulanmasına destek sağlamaktadır (Dobrowoski vd. 2017).

Dijital dönüşüm ve ileri teknolojilerin gözetildiği gelecekteki üretim sistemlerinde, şirketler bu üretim süreçlerini otomatik hale getirmeden önce süreçlerini etkin bir şekilde belirlemek zorundadır. Çünkü endüstriyel üretim, lojistik, iş yönetimi ve süreç yönetimi, insanların ve ürünlerin akıllı taşınması için modern bilgi teknolojileri çözümleri tarafından optimize edilebilir. Endüstri 4.0, belirlenmiş süreçler, tedarikçiler ve müşteriler, görevler ve zamanlar ile belirli bir düzeyde süreç odaklılık gerektirir. Ayrıca yalın üretim sistemleri, belirlenmiş standartları ve müşteri odaklılığını yükselterek süreçleri iyileştirir ve verimliliği artırarak Endüstri 4.0'ın uygulanmasını kolaylaştırır (Dobrowoski vd. 2017). Yalın üretim felsefesinin önceliği müşteri tatminidir, böylece müşteriye tam olarak istediği değeri ve kaliteyi sağlamaktır. Tedarik süreçlerinin dijitalleşmesi nedeniyle, pazarlar alıcı pazarına daha hızlı adapte olmaktadır. Bunun sonucunda, müşteri etkisi Endüstri 4.0'ın ilerlemesiyle birlikte artmaya devam edecek ve ardından, yalın düşüncenin müşteri odaklılığı, dijitalleşme sürecinde daha da büyük bir öneme sahip olacaktır. Aynı zamanda, yeni teknolojiler, kısa teslim süreleriyle birlikte manuel yalın yöntemlerle karşılanamayan yeni müşteri gereksinimlerine ve üretim ile teslimat sürecinde %100 kaliteli ürün izlenebilirliğine de olanak tanımaktadır. Bu nedenle, bu talepleri karşılamak için gelişen müşteri gereksinimleri analiz edilmeli ve yalın yöntemler dijital teknolojilerle tamamlanmalıdır.

Yalın üretim felsefesinin temel noktalarından olan; israfın ortadan kaldırılması, sürekli gelişme aracılığıyla oluşturulan süreç mükemmelliği Endüstri 4.0'ın uygulanması için vazgeçilmezdir. Ayrıca, değer akışı analizi veya hata önleme gibi yöntemlerle Endüstri 4.0 teknolojilerine entegre edilerek akış, çekme, zamanında üretim/dağıtım gibi faaliyetler büyük ölçüde optimize edilebilir ve hızlandırılabilir. Bununla birlikte, her bir taşıma ve nakliye işlemi için yapılan veri okumalarıyla oluşturulan veri akışları, veri analizi algoritmalarıyla elde edilebilir, anormal taşıma yolları ve fazla stoklar otomatik olarak tespit edilebilir (Bauer vd. 2018).

Yalın üretim, ürün ve süreç karmaşıklığını minimize ederek, Endüstri 4.0 teknolojilerinin etkin ve maliyet-etkin kullanımını destekler. Bu nedenle, yalın süreçler, Endüstri 4.0'ın etkin ve ekonomik uygulanması için bir temel olarak değerlendirilir.



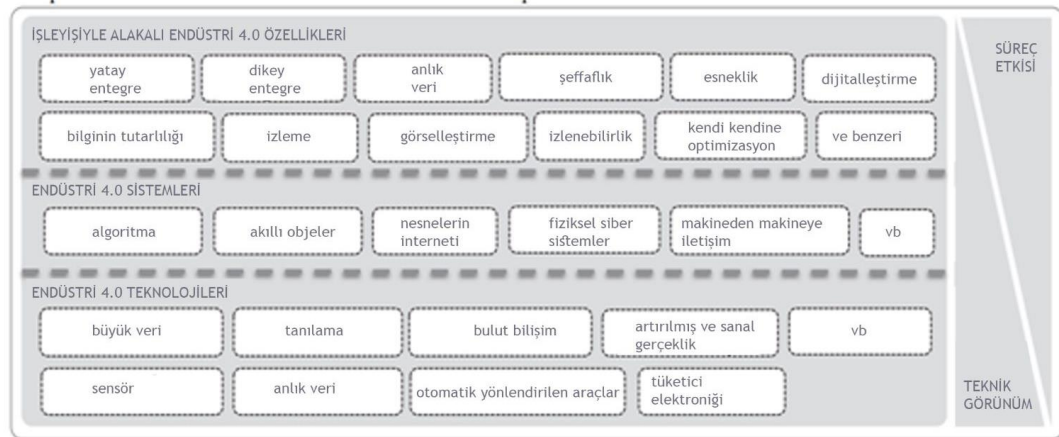
Şekil 2.8. Yalın üretim ile Endüstri 4.0'ın ortaklıkları (Mayr vd. 2018)

Endüstri 4.0 ile artan esneklik ise artan karmaşıklıkla başa çıkmayı sağlar. Şekil 2.8'de görüldüğü üzere, genel olarak bakıldığında, yalın üretim ve Endüstri 4.0'ın genel bir

uyumunu görmek mümkündür. Bu bakış açısı, karmaşıklığın azaltılması ve yalın ilkeler gibi hedeflerle ilgili benzerliklere atfedilebilir. Buna göre, her iki yaklaşım da merkezi olmayan bir şekilde yönetilmektedir (Mayr vd. 2018).

Satoğlu vd. (2018) tarafından yapılan çalışma, Endüstri 4.0 teknolojilerinin sadece yanlış yönetim veya düzensizlik kaynaklı sorunları çözme yeteneğinin sınırlı olduğunu savunmaktadır. Gerçekte, bu teknolojilerin başarıyla uygulanabilmesi için öncelikle yalın faaliyetlerin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi gerektiğini belirtmektedirler. Ayrıca, bu teknolojilerin uygulanmasından önce ve sonra etkili bir bilgi akışının önemine vurgu yapmaktadırlar. "Endüstri 4.0" ve "Yalın Üretim Sistemi" arasındaki ilişkiyi anlamak ve bu ilişkiler arasında performans ve çevresel faktörlerin incelenebilmesi için öncelikle kavramsal bir çerçeve geliştirilmesi gerektiği ifade edilmektedir (Sawhney vd. 2020).

Endüstri 4.0 kavramıyla ilgili birçok akademik makale yayınlanmıştır (Tschöpe vd. 2015). Bu makaleler, Endüstri 4.0'ın farklı yönlerine odaklanarak çeşitli terimler, tanımlar ve açıklamalar sunmaktadır. Örneğin, sensörler, aktüatörler ve RFID gibi teknolojiler, Endüstri 4.0'ın tanımlanmasında ve atölye düzeyinde uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır (Zurawski 2014). Ayrıca yatay ve dikey entegrasyon, şeffaflık ve esneklik gibi terimler, Endüstri 4.0'ın süreçle ilgili özelliklerini açıklamaktadır. Ancak, mevcut makaleler, Endüstri 4.0'ın hiyerarşik yapısını ve teknolojilerin, sistemlerin ve süreçlerin avantajlarını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymamaktadır. Bu nedenle, Endüstri 4.0 ve Yalın Üretim Sistemleri arasındaki bağlantıları analiz etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı çalışmalarda ise Endüstri 4.0'ın yaygın olarak kullanılan bileşenlerini yapılandırmak için kullanım senaryosu analizleri yapılmaktadır. Endüstri 4.0 teknolojileri, sistemleri ve süreçle ilgili özellikleri Şekil 2.9'da verilmektedir (Dobrowski, 2017).



Şekil 2.9. Endüstri 4.0 teknolojileri, sistemleri ve süreçle ilgili özellikler (Dobrowski, 2017)

Her bir kullanım durumu, YPTS'nin Endüstri 4.0'ın temelini oluşturduğu teorisini destekleyen Yalın Üretim Sistemlerine atanabilir. Ancak şirketler, ilgili en verimli Endüstri 4.0 yeniliklerini seçmek için Endüstri 4.0'ın potansiyelini analiz etmekte zorlanmaktadır. Ayrıca bu teknolojilerin YPTS'ye göre tasarlanmış süreçlerde

uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle Yalın Üretim Sistemleri ve Endüstri 4.0'a dayalı ortak bir yaklaşım gereklidir.

Jidoka 4.0: Toyota grubunun kurucusu Sakichi Toyoda tarafından bir tekstil dokuma tezgahını hata oluştuğunda otomatik olarak duracak şekilde icat etmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu sorunu önlemek amacıyla her makinede bir operatör görevlendirilirken, Jidoka ile birden çok makinenin tek bir operatör tarafından denetimine olanak tanınmış ve hata durumunda makinenin otomatik bir şekilde durması sağlanmıştır. Günümüzde ise Endüstri 4.0 dönüşümünde ihtiyaç dışı işgücünün azaltılması için üretim sistemlerinde tam otomatik sistemlere geçişi zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda bu geçiş, sensörler, mobil teknolojiler ve endüstriyel internet eşliğinde, robotik sistemler ile büyük veri ve veri analitiği tekniklerinin mevcut sisteme adaptasyonu ile mümkündür (Öksüz vd. 2017).

Firmalarda sıfır hata ile üretimi sağlayan Jidoka ile daha düşük maliyet ile hedeflenen kalitede üretim yapmak amaçlanmakta olup, hataların Endüstri 4.0 teknolojilerinden olan artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesiyle, çalışanlara gerçek zamanlı bilgi ya da simülasyon ile eğitimler verilebilir (Tissir vd. 2020).

Tam Zamanında Üretim (TZÜ) 4.0: TZÜ, doğru ürünü, doğru zamanda, yerde ve kalitede, doğru miktarda, doğru maliyetlerle sunmayı amaçlar. Endüstri 4.0 araçları bu amaca katkıda bulunabilir. Örneğin OYA, malzeme akışı içindeki nesneleri otomatik olarak taşıyabilir. Bu, insan hatalarını ve boşuna olacak yolculukları en aza indirir. Ayrıca ihtiyaçlar doğrultusunda iş istasyonlarına malzeme temini yapılmaktadır. Engel olması durumunda, ulaşım sistemi aracı alternatif bir yola yönlendirecektir (Bauernhansl vd. 2014; Kaspar ve Schneider 2015). Ayrıca, mobil teknolojiler ve akıllı ürünler de kendi kendini optimize etmeye çalışır. Bir dijital nesne belleği, gerekli her üretim parametresini saklar. Taşınan malların durumunun izlenmesiyle birlikte, OYA'da verimli bir şekilde gezinmek için kullanılır. Bu kendi kendine organizasyon, üretim için sağlam lojistik ağlar oluşturmaya yardımcı olur (Künzel 2016).

RFID, RTLS gibi Auto-ID teknolojileri, gerçek zamanlı olarak malzemeyi izlemek ve değer zincirindeki nesneleri tam olarak yerleştirmek için uygulanabilir. Bu, azaltılmış arama süresinin yanı sıra gelişmiş süreç şeffaflığı ile sonuçlanır. Ek olarak parça tanıma, yanlış bileşenlerin tanımlanmasına olanak tanır. Parçalar daha sonra çıkarılabilir, bu da Poka-Yoke fikrine katkıda bulunur. Ayrıca, RFID etiketlerinin otomatik seçimi, sürekli stok izlemeyi mümkün kılar ve sonuçta envanter seviyelerinin düşmesine neden olur. Ayrıca, tedarikçilerden otomatik bir ikmal sürecini kolaylaştırır (Fescioglu-Unver vd. 2015; Wagner vd. 2017).

TZÜ 4.0 yöntemi ayrıca büyük veri ve veri analitiği tekniklerini de uygular. Ayrıntılı gerçek zamanlı süreç bilgilerini analiz etme fırsatı, parametrelere ilişkin içgörüler sağlar, eğilimleri belirlemeye yardımcı olur ve üretim sistemi için kurallar çıkarır (Ding ve Jiang 2017). Ayrıca, kestirimci bakım eylemleri (Srinivasan ve Ganesh Prasad 2017) yoluyla makine aksamaları sürelerini azaltarak sürekli bir malzeme akışı desteklenir. Genel olarak, veri analizi, tüm tedarik zincirinin geliştirilmiş bir sistem performansına katkıda bulunma potansiyeline sahiptir (Fescioglu-Unver vd. 2015).

Bulut bilişim sistemleri sayesinde taşınan ürünlerin menşei, varış noktası ve mevcut durumu kablosuz olarak takip edilebilir, ürünlerin TZÜ teslimi sağlanmakla beraber müşteriye değer katan lojistik güvenliği de sağlanabilir (Sanders vd. 2016).

Çeşitli cihazlardan, sensörlerden, bilgisayarlardan ve OYA'lardan gerçek zamanlı tedarik zinciri verilerini alan bulut sistemleri ile alınan veriler, yorumlanabilmekte ve paydaşların efektif yönetim sağlayabilmesi için bilgiye dönüştüren büyük veri ve veri analitiği ile paylaşılabilir. Firmadaki tüm çalışanlarla bağlantılı olan bu bulut sistemi, Endüstri 4.0 teknolojilerinden olan AG ile görsel alanlara veri ve yorumlanmış bilgilerin gönderimini sağlayarak, sorunların çözüme ulaşmasının yanı sıra daha hızlı ve daha iyi kararlar alınmasına da yardımcı olmaktadır.

Kolberg ve Zühlke (2015), AG ve SG üretim hattı çalışanlarına yardımcı olan sürekli bir üretim akışı oluşturmak için kullanıldığı vurgusunda bulunmuştur. Bu bağlamda, çalışanların görüş alanında sağlanan döngü süreleri bilgisi, TZÜ sistemine katkı sağlar.

Frazier (2014) ise, TZÜ'yü küçük seri üretimi destekleyen eklemeli üretim teknolojileriyle ilişkilendirilir. Bu üretim ile gereken spesifik hammaddelerden kaynaklanan yüksek maliyetleri indirgeyebilmek amacıyla müşteri talebi göz önünde bulundurulacak şekilde daha az hammadde ve işlem süresiyle üretebilmek için eklemeli üretim teknolojilerinin hız, çok yönlülük ve uyarlanabilirlik avantajlarından yararlanılır ve TZÜ'nin gerçekleşmesine olanak sağlanır. Genel olarak, TZÜ 4.0 daha yüksek şeffaflık, daha kısa teslim süreleri ve geliştirilmiş esneklik ile kendini ortaya koyar. Bunun dışında, tedarik zinciri aktörleri daha iyi bir TZÜ birliğinden ve bozulmalara karşı gelişmiş bir dirençten yararlanır.

Toplam Üretken Bakım (TÜB) 4.0: TÜB, ekipmanların maksimum çalışma süresini sağlamak için proaktif ve önceden önlem alan bir yaklaşımı benimseyen bütüncül bir sistemdir. TÜB, her şeyden önce, otonom bakım, rutin bakım görevlerinin sorumluluğunu ve yetkisini teknisyenlerden operatörlere bırakır. Bakım uzmanlarının ortaya çıkan boş kapasitesi, önleyici bakım önlemlerinin (planlı bakım) uygulanmasına bağlıdır. Ayrıca, daha kısa ürün yaşam döngüleri, daha yüksek ürün çeşitliliği ve artan ürün karmaşıklığı, artan üretim başlatma miktarına neden olur. Sonuç olarak, erken ekipman yönetimi, yeni ürünlerin tanıtılmasını ifade eder ve kısa rampa dönemlerini gerçekleştirmeyi amaçlar (Palmarini vd. 2018).

Çeşitli Endüstri 4.0 araçları, operatörlerin daha fazla sorumluluk almalarını destekler. Özellikle SG ve AG gibi sanal temsil teknolojilerinin yanı sıra başa takılan ekranların birleşimi, eğitim ve bakım talimatlarını kolaylaştırır (Palmarini vd. 2018). Bakım, tipik olarak tekrarlanmayan ve bağlama duyarlı faaliyetleri içerdiğinden, bakım uzmanlarıyla etkileşim çok önemli hale gelir. Operatörler, sanal öğeleri görüntüleyerek uzaktan yönlendirilebilir (Benbelkacem vd. 2011). Ayrıca mobil teknolojiler ve Auto-ID teknolojileri, makine çalışması sırasında yük, aşınma ve kusurların izlenmesine olanak tanır. Arızaların erken tespiti, izolasyonu ve tanımlanması, daha az arıza süresi ve dolaylı hasarların önlenmesi ile sonuçlanır (Jardine vd. 2006).

Çapraz bağlı makinelere dayalı tahmine dayalı analitik, durum parametreleri ile varsayılanların olasılığı arasındaki korelasyonun analiz edilmesine izin verdiği için planlı bakım için yararlı bir araçtır. Geleneksel inşaat yönetiminden farklı olarak, tahmine dayalı analitik, büyük veri kümelerine (büyük veri) dayalı kusurları tahmin etmek için karmaşık algoritmalar kullanır. Sonunda, tahmine dayalı analitiğin ömür beklentisi öngörüsünün doğruluğunu artırması beklenmektedir (Kieviet 2016). Lucke vd. (2017) kullanılabilirliği artırmak ve bakım maliyetlerinin yanı sıra enerji tüketimini azaltmak için akıllı bir bakım sistemi önermektedir.

Erken ürün ve ekipman yönetiminde dijitalleşme, bir yandan planlama ve tasarım aşamaları ile diğer yandan üretim aşaması arasındaki medya süreksizliğinin ortadan kaldırılmasına katkıda bulunabilir. Tak ve çalıştır, modüler bir tasarıma ve hizmet odaklı bir mimariye dayalı teknik bir sistemin otonom entegrasyonuna olanak tanır. Böylece üretim tesisleri kolayca uyarlanabilir ve özelleştirilebilir. Hizmetler, standartlaştırılmış arabirimler aracılığıyla sağlanır ve donanım özgü özelliklerden bağımsız olarak çalışır (Zühlke 2010; Dürkop ve Jasperneite 2016). Ayrıca, dijital ikizler üretim tesislerinin gerçekçi bir simülasyonuna izin verdiği için sanal devreye alma hızlı bir başlatma eğrisine katkıda bulunur. Daha kesin olarak, döngü içinde donanım simülasyonu, simüle edilmiş bir tesis modeline karşı gerçek kontroller sağlanır (Lacour 2012).

Kanban 4.0: Kanban, kesintisiz bir malzeme tedarikini garanti etmek için önceden tanımlanmış bir stok seviyesini koruyarak sürekli bir malzeme akışını sağlamayı amaçlar. Endüstri 4.0, bu yalın yöntemi geliştirmeye katkıda bulunabilir.

Dijital ikize dayalı simülasyon yöntemleri veya fiziksel nesnelerin sanal gerçek zamanlı temsili aracılığıyla, yeni kanban döngüleri daha öngörülü bir şekilde planlanabilir ve mevcut üretim ortamına sorunsuz bir şekilde entegre edilebilir. Simülasyon, parti boyutu, stok veya teslimat sıklığı gibi ideal kanban parametrelerinin tanımlanmasını sağlar. Ayrıca, sistem parametreleri otonom olarak yenilerken harici değişiklikler dahil edilebilir (Kolberg ve Zühlke 2015).

Auto-ID uygulayarak, devam eden işin sürekli izlenmesi mümkündür. Böylece malzeme hareketlerinin şeffaflığı artırılır. Bu, gereksiz stoğu kaldırmak için hedef ve gerçek değerlerin karşılaştırılmasına olanak tanır (Sanders vd. 2016). Ek olarak, bütünsel bir bağlantı ve üretimde geliştirilmiş veri alışverişi, kendi kendini organize eden bir sistemle sonuçlanır. Böylece stok seviyesi minimuma indirilebilir.

OYA'nın uygulanması, TZÜ'ye daha fazla katkıda bulunabilir. Doldurma, tam olarak yeni malzemenin gerekli olduğu anda gelir. Sonuç olarak, atölye seviyesindeki malzeme tedariki, tek konteyner sistemi kullanılarak gerçekleştirilebilir (Kaspar ve Schneider 2015). Bu nedenle, aynı malzeme ile birkaç kap doldurma ihtiyacı ortadan kalkar.

Kanban 4.0 yönteminin değerini özetlemek gerekirse, çalışmalar Endüstri 4.0 araçlarını uygulayarak stok seviyelerinin en aza indirilebileceği ve şeffaflığın artacağı sonucuna varılabilir. Gerekli alan düşer ve sonuçta maliyet tasarrufu sağlanır. Ayrıca azaltılmış envanter, üretim süreçlerindeki darboğazların tespitini kolaylaştırır. Bu nedenle, sorunların nedenleri belirlenebilir ve karşılaşılabılır.

Kaizen 4.0: Kaizen 4.0, işletmelerin sürekli iyileştirme felsefesini benimseyerek dijital dönüşümü gerçekleştirmelerini ifade eder. Kaizen'e göre her süreçte küçük de olsa iyileştirmeler yapılabilir ve bu iyileştirmeler sürdürülebilir olmalıdır (Maarof ve Mahmud 2016). Ancak Kaizen 4.0 ile birlikte, süreçlerin tam otomasyona yönelmesi ve modern teknolojilerin kullanılması gerekmektedir.

Kaizen performansını kolaylaştırmak için, büyük veri ve analitiği, bulut sistemleri, simülasyon ve AG gibi teknolojiler Kaizen 4.0'a sürekli iyileştirmeye katkıda bulunacak şekilde destek sağlar. Üretim süreçlerinden ve akıllı cihazlar ile paydaşlardan gelen veriler, hızlı ve değişken bir bulut bilişim ortamında toplanır ve paylaşılır. Bu veriler daha sonra büyük veri analitiği tarafından analiz edilerek sürekli akış sağlayan ve

sonuç olarak Kaizen felsefesini destekleyen sonuçlara ve çözümlere ulaşılmasına katkıda bulunur.

Simülasyonun AG ile birlikteliği ise, çalışanları üretim süreçleri hakkında yeni bilgilerle güçlendirerek insan-makine ilişkisini daraltıyor. Böylece çalışanlar daha kritik hale gelir ve üretim hattında çözülmesi gereken olası sorunları bulabilirler.

Sensörler, RFID-RTLS ve diğer ileri teknolojiler, süreçlerin izlenmesi, verilerin toplanması ve gerçek zamanlı olarak analiz edilmesi için kullanılır. Sensörler, üretim ortamında gerçek zamanlı veri toplamak için kullanılırken, RFID-RTLS teknolojileri malzeme ve ürünlerin takibini sağlar. Bu teknolojiler sayesinde işletmeler, süreçlerin tam otomasyonunu gerçekleştirerek verimliliği ve kaliteyi artırabilirler. Veri analitiği ise, toplanan verilerin derinlemesine analiz edilerek süreçlerdeki iyileştirme potansiyellerinin belirlenmesine yardımcı olur (Wagner vd. 2017). Kaizen 4.0'ın sağladığı avantajlar arasında daha verimli iş süreçleri, artan kalite, azalan hatalar, işgücü verimliliğinde artış ve müşteri memnuniyetinde iyileşme yer alır. Bu yaklaşım, işletmelere rekabet avantajı sağlar ve sürekli olarak daha iyi olmaya yönelik bir kültür oluşturur. Sonuç olarak, Kaizen 4.0 ile işletmeler, veri analitiği ve diğer ileri teknolojilerin kullanımıyla sürekli iyileştirme çabalarını destekleyerek iş süreçlerinde dönüşüm sağlarlar.

Değer Akışı Haritalama (DAH) 4.0: DAH, israfı tanımlamak için değer yaratma zinciri içindeki malzeme ve bilgi akışının şeffaflığını artırır. Ardından, değer akışı tasarımında iyileştirilmiş bir hedef durumu tanımlanır. Bu optimizasyon, tedarik süresini kısaltmayı ve üretim boyunca akışı kolaylaştırmayı amaçlamaktadır (Meudt vd. 2016).

Endüstri 4.0, verilerin gerçek zamanlı olarak iletilebildiği bağlantılı bir üretim ortamına yol açar. Auto-ID'yi uygulamak, nesnelerin anında yerleştirilmesini sağlarken, büyük veri ve veri analitiği, bilgilerin konsolidasyonunu kolaylaştırır. Konsolide temel performans göstergeleri, gerçeklere dayalı karar vermeyi mümkün kılar (Bauernhansl vd. 2014). Bilgi almaya, eylemleri tetiklemeye ve süreçleri kontrol etmeye (ör. tablet, akıllı telefon ve başa takılan ekranlar) izin veren insan-bilgisayar etkileşimi cihazlarının kullanılmasıyla, bilginin paydaşlar için uzaktan alınabilir hale gelmesi sağlanır. Örneğin makine performansı, arıza süresini azaltmak için bakım personeli tarafından analiz edilebilir veya yöneticiler tarafından süreç optimizasyonunu sürdürmek için kullanılabilir. Burada DAH 4.0, günlük operasyon yönetimi için bir araçtır. Makine öğrenimi ve veri analitiği, bir değer akışı tasarımının oluşturulmasını destekler. Hedef durumlar otomatik olarak oluşturulur ve uygulamadan önce doğrulanır (Srinivasan ve Ganesh Prasad 2017). Bu yaklaşım sürekli iyileştirme sürecini destekler.

DAH 4.0'ın ana faydası, değer akışlarının gerçek zamanlı gösterimi yoluyla şeffaflığın iyileştirilmesidir. Bu, üretim süreçlerinde israfın tanımlanmasına yardımcı olur ve yalın bir değer yaratılmasına yol açar. Ayrıca, DAH gerçekleştirme çabası azalır ve kararlar gerçek zamanlı verilere dayalıdır.

Hücreyel Üretim 4.0: Hücreyel üretim, ortak proseslerde üretilen ürünlerin gruplandırılması ve tek parça akışıyla ilerlemesi prensibine dayanan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde, hücre içinde çalışan operatör sayısı üretim temposuna (takt zamanına) göre ayarlanır. Hücreyel üretim, sürekli akışı sağlayarak israfları ortadan kaldırır ve değer oranını artırırken, aynı zamanda etkili bir yalın üretim yöntemi olarak kabul edilir. Hücreyel üretim sistemi kurulumu için veri analitiği yöntemleri kullanılarak parça-makine matrisleri oluşturulabilir ve kümeleme analizi yapılabilir. Bu süreçte, robotik sistemler, malzeme yükleme, boşaltma ve taşıma işlemlerinde yardımcı olarak

önemli bir rol oynar. Bunun yanı sıra, eklemeli üretim sistemleri, makinelerin daha fonksiyonel ve birden çok işlevi gerçekleştirebildiği ve aynı zamanda alandan tasarruf sağlanan bir yapıya sahip olduğu modern üretim yaklaşımlarından biridir. Hücreli Üretim 4.0'ı benimseyen işletmeler, veri analitiği yöntemlerini kullanarak bu süreçleri kolaylaştırabilir ve dijital dönüşümle yalın üretimi daha da etkili bir şekilde gerçekleştirebilirler. Bu sayede, üretim süreçlerindeki verimlilik artar, israf azalır ve müşteri memnuniyeti en üst seviyeye çıkar. Hücreli Üretim 4.0, işletmelere daha esnek, verimli ve rekabetçi bir üretim ortamı sunarak geleceğin endüstriyel pazarında öne çıkmasını sağlar (Alçın 2016).

Heijunka 4.0: Japoncada seviyelendirme anlamını taşıyan Heijunka, üretim süreçlerini verimli hale getirme ve kaynakları daha etkin kullanma amacıyla üretim planını sabit bir orana getiren bir yöntemdir. Heijunka, hazırlık sürelerinin kısaltılması ve daha sık model değişikliklerine olanak tanınması gibi adımları gerektirir. Bu şekilde, üretim planlarındaki değişikliklere kolayca uyum sağlanabilir ve çalışanlar için daha stressiz bir ortam sağlayan düzgünleştirilmiş bir üretim planı oluşturulur.

Heijunka'nın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, Endüstri 4.0 dönüşümünde müşteri taleplerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve talep tahminleme çalışmalarının yapılması için veri analitiği yöntemlerinin tercih edilmesi önemlidir (Sawhney vd. 2020). Ayrıca, robotik sistemlerin kullanımı, makinelerin kendi kalıplarını değiştirebilmesine olanak tanır ve kalıp değiştirme sürelerini azaltırken, gömülü sistemler sayesinde üretimde hangi faaliyetlerin hangi sırayla gerçekleştirileceğine karar vermek daha kolay hale gelir. Heijunka, düzgünleştirilmiş üretim planlamasıyla işletmelere daha fazla esneklik, verimlilik ve müşteri memnuniyeti sağlayan önemli bir araç olarak endüstriyel dönüşüm süreçlerinde değerlendirilmelidir.

Bilgisayarla Bütünleşik Üretim (BBÜ) 4.0: BBÜ, imalat sektöründe dönüşümü hızlandıran ve rekabet avantajı sağlayan bir yaklaşımdır. BBÜ, tüm imalat işlevlerinin bilgisayarlar ve otomasyon sistemleri aracılığıyla bütünleştirildiği bir sistemdir. Bu sistemde, gelişmiş teknolojiler bir araya getirilerek üretim süreçleri optimize edilir ve verimlilik artırılır (Dombrowski vd. 2017). BBÜ, birçok avantajı beraberinde getirmektedir. İnsan müdahalesini azaltarak hataları minimize etmek, süreçleri daha esnek ve verimli hale getirmek, üretim planlamasını optimize etmek ve zamanı daha etkin kullanmak gibi faydalar sağlar.

BBÜ'nün başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, güçlü ve hızlı bir veri tabanına ihtiyaç vardır. Veri tabanı, üretim süreçlerindeki verilerin toplanması, depolanması ve analiz edilmesi için kullanılır. Bu veriler, süreçlerin izlenmesi, hataların tespit edilmesi, verimlilik analizleri yapılması ve iyileştirme çalışmalarının gerçekleştirilmesi için önemlidir. Ayrıca, endüstriyel internetin kullanımıyla makineler ve sistemler arasında veri paylaşımı ve iletişim sağlanarak daha entegre bir üretim ortamı oluşturulabilir (Öksüz vd. 2017). Veri analitiği, BBÜ'nün önemli bir unsuru haline gelmiştir. Bu yöntemler, büyük veri setlerinin analiz edilmesi ve değerli bilgilerin elde edilmesi için kullanılır. Veri analitiği sayesinde üretim süreçlerindeki eğilimler, sorunlar ve iyileştirme potansiyelleri tespit edilebilir. Aynı zamanda, tahminleme modelleri oluşturularak talep tahminleri yapılabilir ve üretim planlaması daha doğru ve etkin hale getirilebilir.

Endüstri 4.0 dönüşümüyle birlikte, mobil teknolojiler, gömülü sistemler, siber güvenlik ve eklemeli üretim gibi gelişmiş otomasyon sistemlerinin BBÜ altyapısına entegre edilmesi gerekmektedir. Mobil teknolojiler, üretim süreçlerinin izlenmesi ve

kontrol edilmesi için kullanılabilirken, gömülü sistemler makine ve ekipmanların akıllı ve bağlantılı hale getirilmesini sağlar. Siber güvenlik ise veri güvenliği ve üretim sistemlerinin korunması için kritik bir öneme sahiptir. Eklemeli üretim ise esnek ve özelleştirilmiş üretim taleplerine cevap verebilmek için kullanılan bir yöntemdir.

SMED 4.0: SMED, TZÜ'nün gerçekleşmesine katkı sağlamak amacıyla kurulum süreçlerinden kaynaklanan aksam süresini ve maliyeti azaltmayı amaçlar. Kalıp değişimine harcanan zaman indirgenir, küçük partilerle üretim yapmayı mümkün kılarak üretimde esneklik ve çeviklik sağlar (Teeuwen ve Grombach 2015). Endüstri 4.0 dönüşümünde hazırlık sürelerinde geçen zamanın indirgenerek küçük partilerde üretim sağlanması ise sensörler ve RFID-RTLS teknolojileri, eklemeli üretim teknolojilerinden yararlanmayı gerektirir. Öte yandan hem kalıp değiştirilme hem de taşınması güç parçaların taşıma aşamasında robotik sistemlerden de faydalanılabilir (Öksüz vd. 2017).

Mayr vd. (2018), SMED için en uygun Endüstri 4.0 teknolojisinin eklemeli üretim ve AG ikilisinden oluşturulacak kombinasyon olabileceği görüşündedir. Eklemeli üretim, minimum montaj süresi ile çeşitli ürün üretebilme avantajıyla kurulum süresi üzerinde en yüksek etkiyi sağlar. Ancak üretim hattındaki değiştirme sürelerinin azaltılmasında gereken ayarlamaların başarılı bir şekilde gerçekleşmesi gerekir. Feldmann ve Gorj (2017) SMED'in eklemeli üretime de uygulanabileceğini savunmakta ancak kurulum süreleri zaten teknolojik olarak en aza indirildiğinden, etkinin oldukça küçük olması beklenmektedir. Eklemeli üretimin yanı sıra bu ayarlamaları yapacak çalışanın öğrenme sürecini hızlandırma ve küçük ayarlamalar vb. prosedürleri takip amacıyla üretim sürecine AG dahil edilebilir (Golchev 2019).

Poka-Yoke 4.0: Poka-Yoke, operatör hatalarını önlemek ve üretim süreçlerini daha güvenli hale getirmek amacıyla kullanılan yöntemdir. Bu yöntem, hataların ortaya çıkmadan önce engellenmesi, düzeltilmesi veya tespit edilmesi üzerine odaklanır. Bu, özellikle geniş bir ürün yelpazesine sahip endüstrilerde önemlidir. Poka-Yoke, zorunlu diziler oluşturarak veya yürütme sırasında süreci gözden geçirerek ve hata durumunda durdurarak gerçekleştirilir (Brunner 2011). Poka-Yoke'nin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için ileri düzey otomasyon teknolojileriyle entegre edilmesi önemlidir.

Özellikle sensörlerin kullanımı, sistemlerin mevcut otomasyon sistemlerine entegre edilerek operatör hatalarının tespit edilmesi ve önlenmesi sağlanır. Sensörler, süreçleri izlemek, veri toplamak ve hata durumlarını algılamak için kullanılır. Bu sayede, operatörlerin yanlış adımlar atmaları veya hatalı işlemler yapmaları engellenir. Akıllı sensörler ve makine öğrenimi kullanılarak makineler, optimum ürün kalitesini sağlamak için düzensizliklere otomatik olarak uyum sağlayabilir (Michels 2016). Sonuç olarak, AG ve başa takılan ekranların yanı sıra RFID okuyucular, sıfır hata toplama elde etmek için kullanılabilir (Rammelmeier vd. 2012).

Auto-ID de Poka-Yoke 4.0 için öneme sahip bir teknolojidir. Auto-ID doğru tanımlama ve atamayı sağlar. Dijital bir ürün belleği, gerekli bileşenlerin talep edilmesini sağlar ve hatalı teslimatların belirlenmesine yardımcı olur. Bu, kusurlu parçalara değer katmayı önler. Akıllı sensörler ve makine öğrenimi kullanılarak makineler, optimum ürün kalitesini sağlamak için düzensizliklere otomatik olarak uyum sağlayabilir (Michels 2016). Sonuç olarak, AG ve başa takılan ekranların yanı sıra RFID okuyucular, sıfır hata toplama elde etmek için kullanılabilir (Rammelmeier vd. 2012). Bununla birlikte, bu teknolojilerin uygulanması sürecinde uygun eğitim ve rehberlik de sağlanmalıdır.

Operatörlerin bu teknolojileri doğru bir şekilde kullanması ve hataları önlemeye yönelik önlemleri uygulaması önemlidir.

Görsel Yönetim 4.0: Görsel yönetim, işletmenin performansını etkileyen tüm göstergelerin bir arada bulunduğu ve bu göstergelerin görsel, yalın ve şeffaf bir şekilde ilgili kişilerle paylaşıldığı bir yalın yönetim uygulamasıdır. Görsel panolar, grafikler ve diyagramlar aracılığıyla tüm göstergeler herkesin görüş alanında sergilenir, yorumlanabilir ve geliştirilebilir, böylece üretim sisteminin mevcut durumu kolayca takip edilebilir. Görsel yönetim uygulama yöntemleri 5S, Zoning ve Andon'dur (Gorecki ve Pautsch 2014).

5S, işyerini organize etmeye yönelik sistematik bir yaklaşımdır ve çalışma alanını temiz tutarak ve araçları makul bir şekilde düzenleyerek netliği artırmayı amaçlamaktadır. Böylece işyeri düzeyinde israf ortadan kaldırılmış olur. Auto-ID ve AG, 5S'nin daha verimli bir şekilde yürütülmesine yardımcı olabilir. RFID, arama süresini azaltan nesnelerin tanımlanmasını ve yerleştirilmesini sağlar (Fescioglu-Unver vd. 2015). Ayrıca, RFID etiketleri, temizleme araçları ve nesneleri için uygun talimatları saklayabilir. Sanal öğeler operatörlere aletleri nereye yerleştireceklerine rehberlik ettiğinden, AG'nin uygulanması fiziksel gölge tahtalarının yerini alabilir. Ayrıca, oyunlaştırmayı AG aracılığıyla entegre etmek, temizlik veya araçları doğru şekilde yerleştirme konusunda kazanç sağlayarak personeli motive edebilir (Pötters vd. 2017).

Zoning, görsel araçlar kullanılarak hedeflerin işaretlenmesine olanak tanır. Buna yollar, üretim hücreleri ve departmanlar dahildir. Renklerin şirket çapında kullanılması bilgi değerini artırmaktadır (Gorecki ve Pautsch 2014). Zoning, çeşitli dezavantajlar içerir. Öncelikle tabela ve bantların fiziksel olarak ayarlanması gerekmektedir. İkincisi, bu konsept esnek navigasyon için uygun değildir. İnsan-bilgisayar etkileşimi ve AG, bu eksik esnekliğin üstesinden gelmeye yardımcı olur. Doğal belirteçlere dayanan, AG aracılığıyla navigasyon için bir sistemi tanımlanır. Alternatif olarak, RFID iç mekan navigasyonu için kullanılabilir, ancak Wi-Fi veya Bluetooth ile karşılaştırıldığında akıllı telefonlara ve tabletlere yaygın olarak yüklenemez (Karimi 2015).

Andon, üretimdeki durumu ve kesintileri görselleştirmek için uygulanır ve böylece Jidoka yalın ilkesini destekler. Ek olarak andon panoları, sapmaları ortaya çıkarmak için gerçek ve hedef değerleri gösterir (Gorecki ve Pautsch 2014). Geleneksel andon lambalardan farklı olarak tabletler, akıllı telefonlar, başa takılan ekranlar ve akıllı saatler gibi insan-bilgisayar etkileşimi cihazları, kullanıcılar için hedeflenmiş bir bildirim sağlar. Böylece, operatör ve makine arasındaki mesafe ne olursa olsun, bildirimler gerçek zamanlı olarak görüntülenir. Akıllı saatler, operatörün bileğine bir bakışla harekete geçme ihtiyacını değerlendirmeye olanak tanır (Kolberg ve Zühlke 2015; Mrugalska ve Wyrwicka 2017)

Dijital panolar için, çeşitli tedarikçiler karmaşık verileri ve süreçleri gerçek zamanlı olarak görselleştirmek için çözümler sunar. İlgili verilere örnek olarak makine durumu, üretim ilerlemesi, sipariş durumu ve kapasite kullanımı verilebilir. Bu bilgilerin mobil cihazlardan alınması, konumdan bağımsız erişim ve kullanımı destekler.

2.4.2. Yapım Sektöründe Kullanılan Teknolojiler

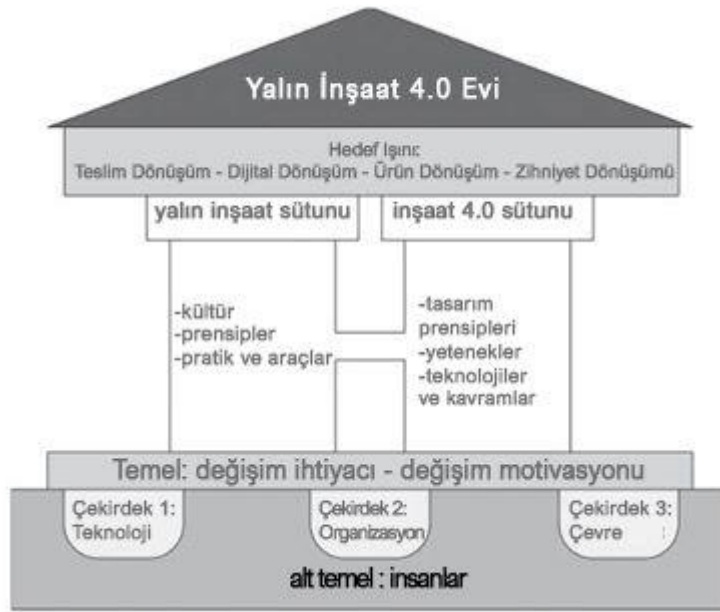
Geçmişten günümüze yaşanan değişimler ve dönüşümlerle gelişen teknolojiler tüm sektörler için katkı sağlayarak endüstrilerin yapısını ve rekabetin doğasını değiştirmiştir (Porter ve Heppelmann 2014). Gelişen teknolojilerin organizasyonların dönüşümüne

etkisinin stratejik konumu; daha fazla verimliliği, rekabeti ve yeniliği tetikleyerek dijital bir ortamın mümkün kılındığı üretimde, Endüstri 4.0'ın (Xu vd. 2018) altında yatan faydalarla kesişmektedir.

2000'lerin başında Peter Drucker, yönetim alanında önde gelen bir isim olarak, "The Economist" (2001) için verdiği bir röportajda önemli görüşler ortaya koymuştur. Drucker, üretimde meydana gelen değişikliklere dikkat çekerek artan üretkenliğin yeni kavramlarla ilişkili olduğunu belirtmektedir. Drucker, yönetimin teknikler ve prosedürlerle ilgili olmadığını vurgulayarak, yönetimin asıl amacının bilgiyi üretken hale getirmek olduğunu ifade etmektedir. Aynı zamanda, yalın düşünce, farklı bir yaklaşım anlamına gelir ve yalın çalışmaya çaba harcayan insanlar tarafından yönetimde farklı bir yaklaşımı gerektirir. Yalın proje yönetimiyle ilgili yapılan çalışmalar, Drucker'ın vizyonunu doğrulayarak "Yalın İnşaat 4.0" için de geçerlidir. Yalın yönetimin uygulanabilmesi için üç unsurun kalıcı bir denge içinde olması gerekmektedir; felsefe, kültür ve teknoloji.

Yalın düşünceden ilham alan yalın yönetim felsefesi, Endüstri 4.0 teknolojilerinin temel bir rol oynadığı uygulanmasını destekleyen teknoloji ve yöntemlerden oluşmaktadır. Bu felsefe aynı zamanda yalın dönüşümle motive edilen insanları barındıran bir kültür dönüşümünü gerektirmektedir. Yalın yönetim, teknoloji, yöntemler ve kültürün birleşimini sağlayarak sürdürülebilir ve etkili bir dönüşüm sürecini desteklemektedir. Yalın uygulamada bu üç unsurun kalıcı olarak varlığını sürdürme ihtiyacı birçok kuruluşta tanınmamaktadır ve bu durum muhtemelen bazı uygulamaların ve organizasyonel başarısızlıkların verimsiz veya sınırlı sonuçlarını açıklamaktadır. Genel olarak, organizasyonlardaki eğilim, "üretken bilgi" için fikirleri sağlayan "felsefe" ve insanların herhangi bir bilginin motoru haline gelmesi için gerekli olan "kültür" dönüşümünü çoğu zaman göz ardı ederek teknolojileri vurgulama yönündedir ve dönüşüm de genellikle ihmal edilir.

Felsefe, sırayla üretken bilgiyi oluşturan yönetim ilkeleriyle israf ve değer kavramlarına atıfta bulunur. Kültür, bir yalın dönüşüme katılmak için insanların gerekli özelliklerini ifade eder. Teknoloji, bir uygulamayı destekleyen yöntem ve teknolojileri ifade eder. Yalın yönetimin uygulanmasında gözlemlenen zorluklar nedeniyle, pek çok çalışma, yalın yönetimi imalatı uygulamak için sistematik bir metodoloji kullanma ihtiyacını öne sürerek (Solms ve Niekerk 2013), dar görüşlü yaklaşımlardan kaçınacak çerçeveler önermektedir. Benzer şekilde inşaatta, Yalın İnşaat ve Endüstri 4.0'ın daha başarılı bir şekilde uygulanmasına yol açabilecek yeterli bir entegre uygulama çerçevesi, uygulama kılavuzları ve uygun teknolojilerin sağlanmasına akademinin katkıda bulunabileceği daha sistematik uygulama yaklaşımlarına ihtiyaç vardır.



Şekil 2.10. Yalın İnşaat 4.0 Evi (Hatoum ve Nassereddine 2022)

Bu bağlamda Şekil 2.10'da Hatoum ve Nassereddine (2022) önerdiği "Yalın İnşaat 4.0 Evi" gösterilmektedir. Herhangi bir evin onu desteklemek için güçlü bir alt zemine ihtiyacı vardır ve "Yalın İnşaat 4.0 Evi"nin en önemli alt zemini "insanlar"dır. İnsan yönü, kavramsal çerçevenin her unsuruna yerleşmiştir. İlk olarak yapım sektöründeki değişimi etkileyen her teknoloji, organizasyon veya çevre faktörü doğrudan veya dolaylı olarak insanlarla ilgilidir. İnsanlar teknolojiyi geliştirir, kullanır ve özelliklerini tanımlar. Herhangi bir organizasyonun merkezinde insanlar yer alır, değişim kararlarını verir ve bunlardan ilk insanlar etkilenir. Değişim arayan kuruluşlara yardımcı olmak için destekleyici dış ortamı oluşturmak da insanların sorumluluğudur (Elghdhan vd. 2020).

İkincisi, bilimsel düşünme ve insanlara saygı öğretmenin değişimi kucaklamak ve sürekli gelişmek için önemli olduğu yalın felsefe ve ideolojilerin merkezinde insanlar yer alır (Liker 2021). İnsanlar, yapıcı çatışma için güvenli bir ortam sağlayan, katma değerlerini ve katkılarını tanıyan, yeteneklerini geliştirmeleri ve büyümeleri için onları zorlayan, iletişim ve iş birliği araçları sunan ve güven geliştiren bir organizasyonda çalışmalıdır (Seed 2015). Bu sayede daha verimli sonuçlar elde edilebilir.

İnşaat 4.0'ın sunduğu teknolojiler de insanların desteğine ihtiyaç duyar. İnşaat 4.0 teknolojilerini uygulayan bir firmanın çalışanları kendilerini tehdit altında hissederse teknolojileri başarılı bir şekilde uygulayamaz. Aksine, bu teknolojileri kullanan ve bundan maksimum faydayı elde etmek için becerilerini adapte eden insanlara "yeniliğin yazarları" olarak davranılmalıdır (Gallo vd. 2021). Bu nedenle, Yalın İnşaat 4.0'ın inşaat süreçlerine getireceği yenilikler, insan ihtiyaçlarını karşılamalı ve ilgili insanlara saygı göstermelidir ve insanlar, teknoloji ve süreçlerdeki değişim arasında istenen uyumu oluşturmanın temelini oluşturur (Hamzeh vd. 2021).

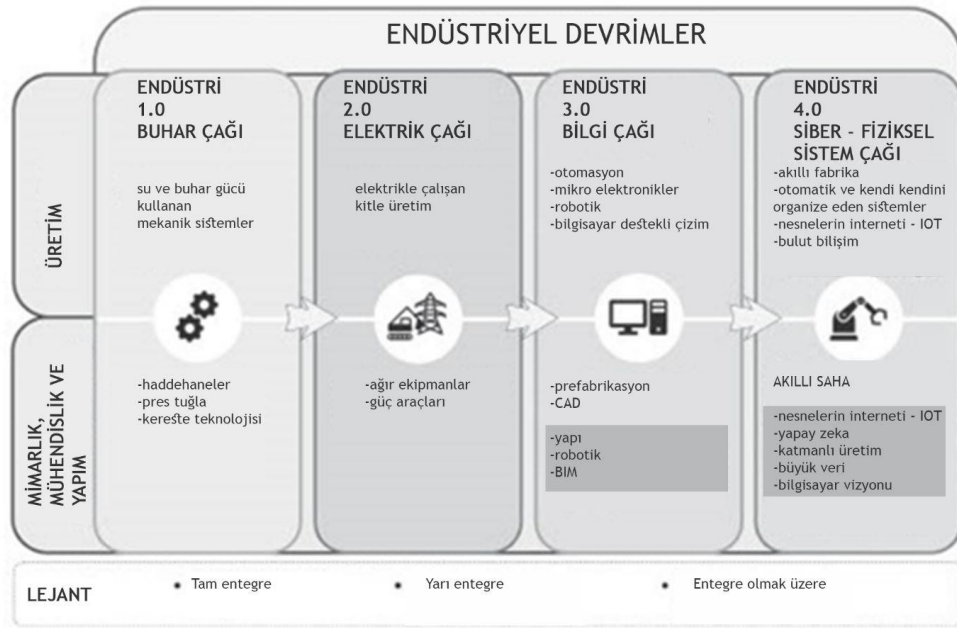
Yalın İnşaat 4.0 vizyonunu insanların uygulayabilmesi için gerekli ortam sağlanmalı ve firmaların stratejik olarak konumlandırılması gerekir. Bu nedenle bir kuruluşun Yalın İnşaat 4.0'a yönelik kararını etkileyebilecek faktörleri anlamak önemlidir. Yapım sektöründeki değişim kararlarını etkileyen üç faktör tanımlanmıştır;

teknoloji, organizasyon ve çevre faktörleri. Teknoloji faktörleri Yalın İnşaat 4.0'ın sunduğu yeniliklerle ilgilidir, organizasyon faktörleri yapım sektöründeki firmaların organizasyonel özelliklerini içerir ve çevre faktörleri, organizasyonu çevreleyen dış çevreye ve yeniliklere yansır (Hatoum ve Nassereddine 2022).

Yalın İnşaat 4.0 vizyonu, Şekil 2.10'da da görüldüğü üzere iki ana sütun olan "Yalın İnşaat" ve "İnşaat 4.0" sinerjisinden esinlenilmiştir (Hamzeh vd. 2021). "İnşaat 4.0" diğer sektörlerde olduğu gibi endüstriyel devrimlerinin dönüşümüyle günümüze ulaşmıştır. Şekil 2.11, Xu vd. (2018), Sawhney vd. (2020) ve Swenson ve Chang'a (2020) dayanan, imalat endüstriyel devrimler metaforunu kullanan imalat ve yapım sektörleri arasındaki bir karşılaştırmayı göstermektedir (Gonzalez vd. 2022).

İnşaat 1.0, ağırlıklı olarak emek odaklıyken, günümüzde yaygın olarak faaliyet gösteren pek çok uzmanlık disiplini mevcut değildir. Bu dönemde yapım sektörü için öne çıkan haddehaneler, presleme tuğla ve kereste teknolojileridir. İnşaat 2.0, 20. yüzyılın ortalarında kendini göstermeye başlamış ve sektörle ilgili birçok özel disiplin (örn. mimarlar, proje yönetimi) ortaya çıkmıştır. Yapım sürecinde ağır ekipmanlar ve elektrikli aletler yoluyla bazı otomasyonlar görülse de yapım faaliyetleri hala büyük ölçüde emek odaklıydı. Ayrıca Kurumsal Kaynak Planlaması gibi proje yönetimi yazılımları benimsenmiştir. Ancak sonuçta ortaya çıkan verimlilikler, maliyet ve zaman aşırımları birlikte çok düşüktür (Rostagi 2017). İnşaat 3.0, 20. yüzyılın sonlarında yapım sektöründe teknoloji odaklı gelişmeler yaşanmasıyla karşımıza çıkmaktadır. Prefabrikasyon, CAD yazılımları, Kritik Yol Yöntemi gibi proje yönetimle ilgili gelişmeler, yalın süreçler ve sistemler, robotik sistemler ve Yapı Bilgi Modellemesi ile yapım faaliyetlerinin daha fazla otomasyonu sağlanmıştır. İnşaat 4.0 ise günümüzde yaşanan yapım sürecine entegre gelişen dönüşümlerdir. Bunlar nesnelerin interneti, yapay zekâ, eklemeli üretim, büyük veri ve veri analitiği ile sanal ve artırılmış gerçeklik vb. olarak karşımıza çıkmaktadır (Gonzalez vd. 2022).

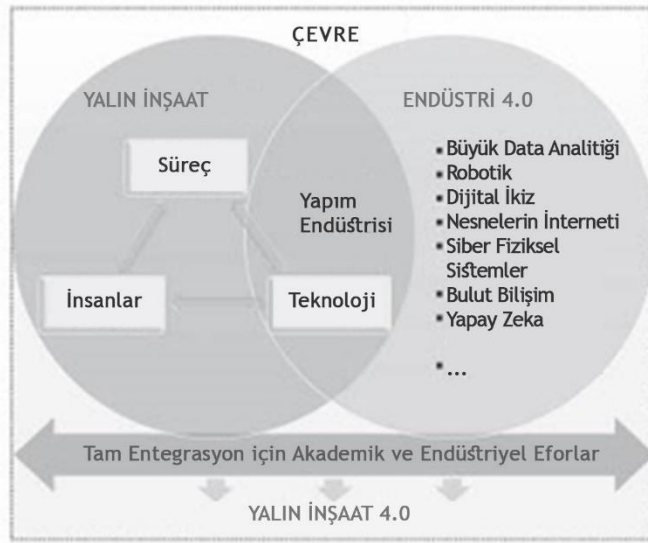
Gelişen teknolojilere ve sistemlere ayak uydurarak daha akıllı bir yapım süreci oluşturulabilir. Bugün üretim endüstrisi halen devam etmekte olan Endüstri 4.0 dönüşümünü benimsemektedir. Buna karşılık, yapım sektörünün gelenekselliği ve zor kırılan tabularından dolayı oluşan gelişen teknolojileri geniş çapta benimseme konusundaki isteksizliği, üretimde olduğu gibi "Endüstri 4.0" durumunu benimsemek için gerekli ön koşul olan "Endüstri 3.0 dönüşümünü" gerçekleştirme fırsatını ortadan kaldırmaktadır (Farmer 2016). Aslında, yapım sektöründe tedarik zinciri parçalanması, bilgi ve üretim izlenebilirliğinin zayıf entegrasyonu, düşük inovasyon seviyeleri, gelenekselleşmiş üretim yönetimi çerçeveleri gibi sorunlar vardır. Bu durum yapım sektöründe rekabet gücünü, verimliliğini, sürdürülebilirliğini ve karlılığını engellemektedir. Dahası, bu sorunların yapım sektöründe "Endüstri 3.0" durumuna geçişini geciktiren faktörlere katkıda bulunmaktadır.



Şekil 2.11. Üretim ve yapım sektörlerinin arasındaki endüstri devrimlerinin ve teknolojik ilerlemenin karşılaştırılması (Gonzalez vd. 2022)

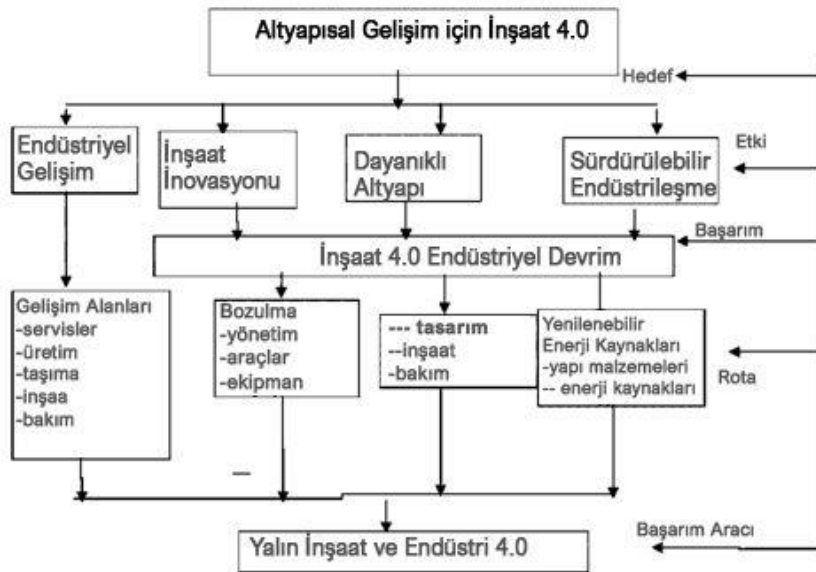
"İnşaat 4.0" konsepti, gelişen teknolojileri inşaat endüstrisinde proje üretimi ve iş süreçlerine entegrasyonu için yollar ve fırsatlar açarken (Sawhney vd. 2020), Çuvallar vd. (2020) göre bu kavramın, otomatik tedarik zincirlerinde ve üretimde hem merkezi olmayan hem de tamamen koordineli kararlar almak için sistemlerin karşılıklı ilişkilerini ve özerkliğini açıkça kabul eden uygulama için henüz sağlam, tutarlı ve eyleme geçirilebilir bir çerçeve sunulmamıştır. Ayrıca İnşaat 4.0'ın gelişen teknolojiler ile üretim yönetimi teorisi arasındaki bağlantılara dair derin bir anlayıştan yoksun olduğu öne sürülmektedir.

Bu bağlamda yalın inşaat, sırasıyla geliştirilecek ve doğrulanacak uygulamalar için üretim teorisi ilkeleri ve metodolojik bir çerçeve sağlamaktır. Aslında yalın inşaat, "ilkeler ve kültür", "uygulamalar" ve "araçlar ve yöntemler"i açıkça dikkate alan, Yalın 4.0'ın oluşturduğu "kültür-felsefe-teknoloji" üçgeninin yapım sektörüne adaptasyonu ile sektörde bir "Endüstri 4.0" dönüşümünün gerektireceği (hatta gerekli bir "Endüstri 3.0" durumuna ulaşmak için) insan-süreç-teknoloji üçgeni oluşumuna olanak sağlamaktadır (Şekil 2.12). Porter ve Heppelmann'a (2017) göre, fiziksel dünya ile akıllı ve dijital teknolojiler tarafından üretilen dijital veriler arasında, mevcut iş süreçlerinin ve sistemlerin gerçek dünya bilgilerini insanlara iletilmemesi karar verme kalitesini düşürmektedir. Onlara göre, insanın rolü hafife alınmakta ve insanların teknolojinin sahip olmadığı benzersiz motor ve bilişsel becerilere sahip olduğunu savunmaktadırlar. Buna göre, fiziksel, dijital ve insan dünyalarını etkin bir şekilde bağlamak için güçlü insan arayüzleri gereklidir. Başka bir deyişle, insan-süreç-teknoloji üçlüsünün işletmelerin ve stratejilerinin merkezinde olması gerektiğini öne sürmektedirler.



Şekil 2.12. Endüstri 4.0'ın Yalın İnşaat 4.0'a yönelik yalın ile entegrasyonu (Gonzalez vd. 2022)

Üretimde, yalın düşünce ve Endüstri 4.0 arasındaki etkileşim etrafında dönen araştırmalar yalın düşünce için mi Endüstri 4.0 gerekli, yoksa tersinin mi daha etkili olduğu konusunda net cevaplar yoktur. Ancak, yalın düşünce ile Endüstri 4.0 arasında bağlantı kurmanın mümkün olduğu ve bu birleşik stratejiyi benimseyen kuruluşlara olumlu etkiler sağladığı konusunda fikir birliği vardır. Bu bağlamda, yalın inşaatın Endüstri 4.0 teknolojileri aracılığıyla inşaatlarda operasyonları optimize etmek için yol gösterici ilkeler sağladığı savunulmaktadır ve bu entegrasyon "Yalın İnşaat 4.0" olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.13. Endüstri 4.0'ın yalın düşünce konsepti ile İnşaat 4.0'ın arasındaki karşılıklı ilişki (Lekan vd. 2020)

Şekil 2.13'te görüldüğü üzere, yalın inşaatın yapım sektöründe Endüstri 4.0'ı etkinleştirme ve iç içe geçen sinerjileri en üst düzeye çıkarma potansiyeline sahiptir. Örneğin üretimde yalın otomasyon terimi, yalın üretim ilkeleri ile Endüstri 4.0 teknolojilerinin bir karışımıdır. Ancak otomasyon, yalına yabancı bir fikir değildir, çünkü otomasyon ilkeleri, tekrar eden ve değer katan faaliyetlerin otomasyona yatkın olduğunu kabul eder dolayısıyla yalın üretim ilkelerinin bu şekilde Endüstri 4.0'a doğal bir uzantısı vardır. Satoğlu vd. (2018) çalışmalarında yalının gerçekten etkili bir Endüstri 4.0 uygulamasının üzerine inşa edilebileceğini savunur ve bir amaç duygusunun (üretim teorisi) ve problem odaklı görüşün (yalın tabanlı metodolojiler) Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanımına sunulabileceğini ifade eder. Bu görüşün yapım sektörüyle de ilişkilendirilmesi mümkündür.

Yalın inşaatın gelişebilmesi için Endüstri 4.0 teknolojileri ile olan bağlantıları ve sinerjileri göz ardı edilemeyeceği kabul edilmesi gereken bir gerçektir. Ayrıca, son otuz yıldır yalın inşaat araştırmacılarının yalın inşaat ilkeleri ile Endüstri 4.0 teknolojiler arasındaki bağlantıları araştırdığı görülmektedir. Bununla birlikte, Endüstri 4.0 tarafından yalın çerçeveler içinde tavsiye edilen ileri teknolojiler hakkındaki tartışmalar hala sınırlıdır. Bazı araştırmacılar süreç-kültür-teknolojiyi hizalayan çerçeveler ve yaklaşımlar sağlamanın önemini kavramaya başlamıştır.

Yalın İnşaat 4.0 ise literatürde henüz doğrudan ele alınmamıştır (Hamzeh vd. 2021). Bununla birlikte, bazı çalışmalar inşaat sektöründe yalın ideolojiler ile Endüstri 4.0 teknolojileri arasındaki sinerjileri araştırmıştır. Ek olarak, bazı çalışmalar İnşaat 4.0 ve Yalın İnşaat'a dayalı uygulama çerçeveleri sunmuştur. Örneğin, Lekan vd. (2020), İnşaat 4.0'a ulaşmak için hibrit bir model önermek üzere Endüstri 4.0 teknolojilerinin neden olduğu yalın düşünce alanlarını ve aksaklıkları araştırmıştır. Hatoum vd. (2021), yapım sektörü firmalarının İnşaat 4.0 teknolojilerini entegre etmek için süreçleri yeniden düşünmelerine yardımcı olmak için bir "İnşaat 4.0 Süreç Yeniden Mühendisliği" çerçevesi sunmuştur. Yalın tabanlı çerçeve, mevcut yeniden yapılandırma metodolojileri, insan-süreç-teknoloji metodolojisi ve yalın ilkeleri üzerine inşa edilmiştir (Hatoum vd. 2021). Hatoum ve Nassereddine (2022) ise "Yalın İnşaat 4.0 Evi"ni hazırlayarak Yalın İnşaat 4.0'ın başarılı bir şekilde uygulanmasına olanak sağlayacak ortam için sistematik bir yaklaşım sunmaktadır.

"Yalın İnşaat" ve "İnşaat 4.0" sütunlarını birbirine bağlayan "hedefler kirişi", "Yalın İnşaat 4.0" vizyonunun başarısıyla sağlanan dört ana endüstri dönüşümüdür. Bu dönüşümler ürün dönüşümü, teslimat dönüşümü, dijital dönüşüm ve zihniyet dönüşümüdür. Herhangi bir inşaat projesinin ana çıktısı, ister konut, ister konut dışı, altyapı veya endüstriyel tesis olsun, müşteri veya mal sahibi için inşa edilmesi gereken fiziksel yapıyı çevre varlığıdır (Barbosa vd. 2017). Sonuç olarak, bir Yalın İnşaat 4.0 vizyonu, nihai ürün üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir ve böylece bir ürün dönüşümüne yol açar. Yalın İnşaat 4.0'ın benimseyebileceği önemli bir ürün dönüşümü örneği saha dışı inşaatıdır (Sawhney vd. 2020). Son yıllarda yapım sektörü, prefabrikasyon ve modüler yapıda bir artışa tanık olmakta ve geleneksel yerinde inşaatı kademeli olarak uzaklaştırmaktadır (Razkenari vd. 2020). Bu değişimle projeler, yalın yönetim ilkelerinin ve otomasyon sistemlerinin uygulanmasının kolaylaştığı ideal bir "fabrika benzeri" ortama yerleşir (Brissi vd. 2021). Vurgulanması gereken başka bir örnek, eklemeli üretim kullanılmasıdır (Sawhney vd. 2020). Eklemeli üretim, İnşaat 4.0'ın temel teknolojilerinden biridir ve teslim süresinin azaltılması, atıkların ortadan kaldırılması,

kalite iyileştirmeleri ve maliyet tasarrufu dahil olmak üzere yalın düşünce hedeflerini destekler (El Sakka ve Hamzeh 2017)

Fiziksel varlığa ek olarak, bir inşaat projesi planlanan bütçesini aşmadan veya programın gerisinde kalmadan güvenli bir şekilde tamamlanmalıdır; proje aynı zamanda sahibinin ödediği değeri sağlamalıdır (Han vd. 2012). Bu nedenle, projenin teslimi önemlidir ve GPTS'nin dönüşümü tetikleyerek Yalın İnşaat 4.0 vizyonunda teslim sürecine katkı sağlayacak yer burasıdır.

Dijital dönüşüm ise özellikle inşaat sektöründe fiziksel dünya ile siber dünya arasında bağlantı kurarak ve dayanıklı siber-fiziksel sistemler oluşturarak temsil edilmektedir. Siber-fiziksel sistemler, fiziksel dünyayı algılayabilen, yönlendirebilen ve kontrol edebilen, maddi dünya ile akıllı dijital bileşenler arasında kesintisiz otomatik bağlantıya sahip bir sistemdir (Klinc ve Turk 2019).

Son olarak, Yalın İnşaat 4.0 ile bir zihniyet dönüşümü de sağlanabilir. Örneğin projeler, tarafların diyalogu teşvik etmesine, değerli verilere erişim sağlamak için bilgi paylaşım uygulamaları geliştirmesine, hem riskleri hem de ödülleri anlamasına ve paylaşmasına ve şeffaflığı teşvik etmesine olanak tanıyan bir katılım platformu olarak görülmelidir (Jacobsson ve Roth 2014). Proje yöneticileri gibi ekip liderleri, yaşam boyu öğrenmeyi mümkün kılan ve zorlukları kucaklamalarına, geri bildirim ve eleştirileri kabul etmelerine, hatalardan ders almalarına ve ekiplerinin entelektüel beceriler geliştirme yeteneğine inanmalarına izin veren bir büyüme zihniyeti geliştirmelidir (Owusu-Manu vd. 2020). Diğer bir örnek ise Toyota'nın 4P modelinin (Liker 2021) 2021 versiyonunun merkezine eklenen "bilimsel düşünme" anlayışıdır. Bilimsel düşünce, derin gözlemler, yinelemeli öğrenme, planların ve hedeflerin politikalarla uyumlu hale getirilmesi ve birkaç büyük sıçrama ve büyük küçük adımlarla cesur stratejiler gibi birkaç bilimsel davranışı vurgulayarak endüstrinin bilgi düzeyini genişletmelidir (Liker 2021).

Yalın İnşaat 4.0 yaklaşımı, yalın ilkeler ve araçlar ile Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanımıyla yapım sektöründe geliştirme süreçlerinin verimliliğini, kalitesini ve sürdürülebilirliğini artırmayı hedefler. Yapım süreçlerinde veri toplama, analiz etme ve karar verme yetenekleri güçlendirerek proje ve yapım yönetimi hedeflerine katkı sağlar. Yalın İnşaat 4.0'ın sağladığı faydalar arasında verimlilik artışı, maliyet azaltma, kalite kontrolü ve sürdürülebilirlik bulunur. Bu yaklaşımın benimsenmesi yapım sektöründe önemli bir dönüşüme olanak sağlayacaktır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Dünya ekonomisinin yaşadığı ekonomik krizler, imalat sektöründe üretkenliğin yavaşlamasına yol açmış ve bu durum enflasyonun ve işsizliğin artmasına sebep olmuştur. Karşılaşılan bu ekonomik sıkıntı, uluslararası ticarete rekabeti oldukça artırmıştır (Öksüz vd. 2017). Aynı zamanda pazarlardaki müşteriler, yüksek kalitede, en kısa zamanda ve düşük maliyetle ürünleri talep etmekte ve bu talepleri karşılayan firmalar piyasayı yönlendirebilmektedir. Rekabetçi baskılarla karşı karşıya olan ülkeler, günümüz dünyasında geleneksel üretim sistemlerinin firmaların stratejik hedeflerini gerçekleştirmek için yeterli olmadığını fark etmiş ve yeniden yapılandırılmaya gidilmiştir.

Yeniden yapılandırılma süreçlerinden biri olan yalın üretim paradigması, her türlü israfı yok ederek güvenilir iş akışı oluşturup, minimum sürede, mümkün olan en az maliyet ve en yüksek kaliteyle ürünler ortaya çıkarmaktadır. Yalın ilkelerin üretimdeki başarısı ve kullanımından kaynaklanan faydaları, inşaatta yalın ilkeleri benimsemenin ana motivasyonlarından biri olmuştur (Evcimen 2021). Yalın üretim felsefesinin inşaat sektöründe, üretim, planlama sürecinden yürütme ve hazır hale getirme sürecine kadar adaptasyonu ile ortaya çıkan YPTS, GPTS uygulamalarına göre zamandan kazanç, malzeme israfında düşüş, performans ve kalitede artış olduğu görülmüştür. YPTS farklı sektörlerde de uygulama alanına sahip olan, yapım sektöründe de son 10 yıldır kullanılan yeni bir proje teslim sistemidir. YPTS yaklaşımını benimseyen inşaat firmaları, iş birliği ve planlamanın güvenilirliği ve mümkün olan en az kaynak kullanımıyla inşaat uygulamalarında verimliliği artırmıştır. Gelişen teknoloji beraberinde yalın yönetim anlayışını da geliştirmiş ve farklı teknolojik uygulamaların yalın yönetim süreci hedeflerine ulaşılmasında önemli bir rol oynadığı ortaya konulmuştur. Ancak yapım sektörü yeni uygulamaya geçilen bu sistemde teknoloji ile olan birlikteliği henüz yeterince geliştirememiştir. Bu nedenle bu çalışmanın amacı Türkiye'de yapım sektöründe YPTS uygulamalarının hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayacak teknolojilerin belirlenmesi, bu teknolojilere sektörün ana aktörleri olarak yapı uzmanlarının bakış açılarının ortaya konulmasıdır.

3.2. Araştırmanın Kapsamı

Yalın düşüncenin temel yapı taşlarını "değer" ve "israf" kavramları oluşturmaktadır. Bu düşünce sistemi üretimin başlangıcından itibaren üretim sürecinin tüm aşamalarında gereksiz harcamaları ortadan kaldırarak müşteri için mükemmel değeri oluşturmayı hedefler. Yalın düşünce uygulamalarıyla sistemdeki gereksiz harcamalar sürekli olarak azaltılıp, kaynaklar daha fazla değer oluşturmaya yönlendirildiğinde, sadece firmaların kârlılığı ve rekabet gücü artmaz, müşteriler de kendilerine daha uygun, daha kaliteli, daha ekonomik ürün ve hizmetleri temin edebilirler. Bu zincir tüm sektörlerle ve tüm faaliyet alanlarına yayıldığında toplumsal refahın artmasına katkıda bulunur.

Öte yandan Endüstri Devriminden bu yana gelişen akıllı ve dijital teknolojiler çeşitli sektörlerde ilerlemeyi sağlamış, inşaat sektöründe de "İnşaat 4.0" konsepti olarak Endüstri 4.0 teknolojilerinin entegrasyonları oluşmuştur. Üzerinde araştırmalar ve çalışmalar yapılan "Yalın İnşaat" ve "İnşaat 4.0", birlikte kullanıldığı zaman daha verimli

sonuçlar elde edileceği öngörülmüştür. Çünkü yalın düşünce bir yönetim stratejisiyken Endüstri 4.0 teknolojileri teknik bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapım sektöründe birbirini tamamlayan bu sistemleri birlikte kullanırken, tasarımdan teslim kadar her aşamada uygulanması mükemmellik hedefine ulaşılmasına olanak sağlar ve YPTS'ye entegre Endüstri 4.0 teknolojilerinin entegrasyonu bu mümkün olabilir. Fakat literatürde YPTS'nin Endüstri 4.0 teknolojisiyle entegrasyonuna odaklanan ve sektördeki karşılığını inceleyen yeterince çalışma bulunmamaktadır.

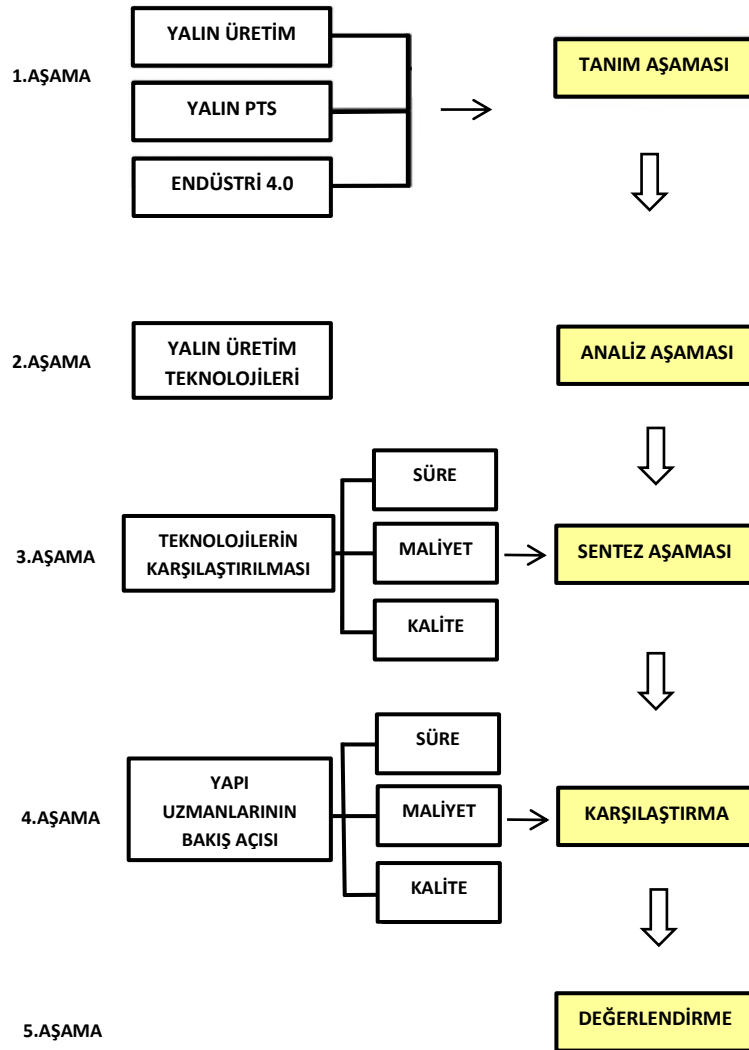
Bu nedenle çalışma YPTS sistemine adapte olmaya çalışan yapım sektörünün sorunlarına çözüm olabilecek ve YPTS'ye entegre edilebilecek Endüstri 4.0 teknolojilerini kapsamaktadır. Bu kapsamda çalışmada farklı sektörlerdeki yalın üretim uygulamalarında kullanılan Endüstri 4.0 teknolojileri incelenerek bu teknolojilerin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Söz konusu teknolojiler "büyük veri ve veri analitiği, gerçek zamanlı bilgi işlem, bulut bilişim sistemi, dijital ikiz/simülasyon gömülü sistemler, Auto-ID, sanal ve artırılmış gerçeklik, otomatik yönlendirmeli araçlar, robotik sistemler, eklemeli üretim, siber güvenlik, makine öğrenimi" olarak belirlenmiştir. Yapım sektöründe YPTS'ye entegre edilebilecek teknolojilere sektörün ana aktörleri olarak yapı uzmanlarının bakış açıları anket yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir.

3.3. Araştırmanın Yöntemi

Araştırma kapsamında yapım sektöründe YPTS'ye entegre edilebilecek Endüstri 4.0 teknolojilerinin belirlenmesi ve sektör temsilcilerinin bakış açısının ortaya konması hedeflendiği için nicel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Nicel yöntem kullanılarak yapılan bu çalışma tanım aşaması, analiz aşaması, öneri aşaması, karşılaştırma ve değerlendirme olmak üzere 5 temel aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama olan tanım aşamasında yalın üretim, YPTS ve Endüstri 4.0 kavramları tanımlanmış, 2. aşama olan analiz aşamasında farklı sektörlerdeki yalın üretim uygulamalarında kullanılan Endüstri 4.0 teknolojileri analiz edilmiş, 3. aşama olan öneri aşamasında yapım sektöründe YPTS'ye entegre edilebilecek Endüstri 4.0 teknolojilerinin tasarım aşamasından teslim sürecine kadar uygulanabilecek en uygun teknolojilerin kesişimleri belirlenmiş (Çizelge 3.1), 4. aşama olan karşılaştırma aşamasında yapı uzmanlarının YPTS'ye entegre Endüstri 4.0 teknolojilerine bakış açısını ortaya koyacak anket çalışması yapılmış, 5. ve son aşamada ise 3. ve 4. aşama sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmanın iş akışı Şekil 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Endüstri 4.0 teknolojileri ile yalın araç ve tekniklerinin kesişimleri

Üretim zorluğu/sorunu	Endüstri 4.0 araçları		Gerçek Zamanlı Bilgi İşlem	Bulut Bilişim Sistemi	Dijital İkiz / Simülasyon	Gömülü Sistemler	Auto-ID (RFID-RTLS vb. teknolojiler)	Mobil Teknolojiler	Sanal ve Artırılmış Gerçeklik	İnsan-Bilgisayar Etkileşimi	Otomatik Yönlendirmeli Araçlar	Robotik Sistemler	Eklemeli Üretim	Sensörler	Siber Güvenlik	Makine öğrenimi
	Yalın araç ve teknikleri	Büyük Veri ve Veri Analitiği														
Kalite kontrol	Jidoka	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
Yetersiz ürün														x		
Süreçler arası zaman kontrolü	Tam Zamanında Üretim (TZÜ)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	
Özerk bakım	Toplam Üretken Bakım (TÜB)		x	x		x	x		x	x						x
Planlı bakım		x	x	x	x											
Erken ürün ve ekipman yönetim			x		x								x			
Lot(parti) takibi	Kanban	x	x		x		x	x		x	x					
Aşırı Üretim		x	x			x	x							x		
Maliyet hedefine ulaşma	Kaizen	x		x	x	x	x		x	x			x	x		x
Mükemmellik aramak	Değer Akışı Haritalama	x	x	x	x		x	x		x			x			x
Tek parça akış ortamı	Hücreyel Üretim	x										x	x			



Şekil 3.1. Araştırmanın iş akış şeması

3.3.1. Anket çalışması

Sektör temsilcilerinin bakış açılarının belirlenmesi ve literatür araştırması sonucunda ortaya atılan önerinin karşılaştırılması amacıyla bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Ankette üç bölüm bulunmaktadır. Birinci bölümde, katılımcıların kişisel bilgileri (cinsiyet, yaş, eğitim durumu, çalışma yılı, görev tanımı vb.), yalın prensip ve teknikler, yalın inşaat ve Endüstri 4.0 teknolojileriyle ilgili genel bilgileri sorgulanmıştır. İkinci bölümde, proje teslim sürecinde ortaya çıkan israf seviyelerinin belirlenmesi amacıyla değerlendirme yapılmış ve beş alt bölümden oluşan her biri 3 ile 10 soru arasında olan alt bölümler tasarım, tedarik, malzeme taşıma ve kullanım, operasyon/uygulama ve diğer konularını içermiştir. Bu alt bölümler, 1'den (çok önemsiz) 5'e (çok önemli) kadar 5'li Likert tipi ölçek kullanılarak değerlendirilmiştir. Yalın inşaatın uygulanmasındaki temellerinden biri de israfın azaltılmasıdır. Bu nedenle katılımcılara sektördeki israf nedenlerinin öneminin ölçülmesi için sorular sorulmuştur. İkinci bölümde

Tokat (2015)'in "Yapım Sürecinde Karşılaşılan Olası İsrar Türleri ve Nedenleri" anket çalışmasından referans alınarak sorular hazırlanmıştır (Çizelge 3.2). Üçüncü bölüm olan son bölümde, yapım sektöründe YPTS'ye entegre edilebilecek Endüstri 4.0 teknolojilerinin tasarım aşamasından teslim sürecine kadar uygulanabilecek en uygun teknolojilerin kesişimleri belirlenmiş (Çizelge 3.1), belirlenen 6 Endüstri 4.0 teknolojisi olan "büyük veri ve veri analitiği, bulut bilişim sistemi, dijital ikiz/simülasyon, sanal ve artırılmış gerçeklik, eklemeli üretim ve makine öğrenimi" teknolojilerinin yalın inşaata süre, maliyet ve kalite etkileri sorulmuştur.

Çizelge 3.2. Yapım sürecinde karşılaşılan olası israf türleri (Tokat 2015)

A. TASARIM

- | | |
|----|--|
| A1 | Sözleşme belgelerinin hatalı oluşu |
| A2 | Yapımın başlangıcında sözleşme belgelerinin tamamlanmamış olması |
| A3 | Tasarımın değişmesi |
| A4 | Ürünlerin spesifikasyonunda alınan kararlar |
| A5 | Düşük kalite ürünlerin seçilmesi |
| A6 | Kullanılan ürünlerin boyutları konusunda dikkat eksikliği |
| A7 | Tasarımcının farklı ürünlerin imkanlarına aşına olmaması |
| A8 | Yüklenici deneyiminden tasarım aşamasında faydalanılamaması ve yapım konusunda bilgi eksikliği |

B. TEDARİK

- | | |
|----|--|
| B1 | Sipariş hatası, fazla veya az sipariş vb. |
| B2 | Az miktarda malzemenin sipariş edilmesinin mümkün olmaması |
| B3 | Uygun olmayan ürünlerin kullanımı |

C. MALZEME TAŞIMA VE KULLANIM

- | | |
|----|--|
| C1 | Malzemelerin şantiyeye taşınma/şantiyede taşınma esnasında zarar görmesi |
| C2 | Malzemelerin uygunsuz depolama sebebiyle zarar görmesi |
| C3 | Ambalajsız tedarik |
| C4 | Tek kullanımlık ambalajlar |

D. OPERASYON/UYGULAMA

- | | |
|----|--|
| D1 | Tedarikçi veya işçi hataları |
| D2 | Ekipmanın kusurlu çalışması |
| D3 | Sert hava koşulları |
| D4 | Kazalar |
| D5 | Sonradan ortaya çıkan işlerin sebep olduğu hasar |
| D6 | Yanlış malzeme kullanılması, değişim gerekmesi |
| D7 | Temel atma yöntemi |
| D8 | Hatalı planlama sebebiyle kullanılacak malzemelerin miktarının bilinmemesi |
| D9 | Kullanılacak ürünlerin çeşitleri ve boyutları ile ilgili bilgilerin yükleniciye geç ulaşması |

E. DİĞER

- | | |
|----|---|
| E1 | Teknik yetersizlikler nedeniyle ilişkisiz ve fazla sayıda malzemenin bir arada kullanılması |
| E2 | Şantiyedeki malzemelerinin kontrolünün eksikliği ve israf yönetim planının eksikliği |
| E3 | Kötü niyet veya hırsızlık nedeniyle meydana gelen kayıplar |

Yalın inşaat tekniklerinin Endüstri 4.0 teknolojileriyle birleştirilerek kullanılması, inşaat sektöründe verimliliği, kaliteyi ve rekabetçiliği artırmak için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu çalışma, yalın inşaat ve Endüstri 4.0 arasındaki ilişkiyi açıklığa kavuşturarak, sektördeki paydaşlara stratejik yönlendirmeler sağlama amacını taşımaktadır.

3.3.2. Evren ve örneklem

Araştırmanın örneklemini belirlenirken YPTS ve Endüstri 4.0 hakkında bilgisi olan yapı uzmanları popülasyonun sınırlılığını oluşturmaktadır. Türkiye'de yalın inşaat anlayışının farkındalığının yetersiz oluşu bu alanda çalışan yapım sektörü firmalarının yaygın olmamasına sebep olmuştur. Bu nedenle anket Türkiye'de yalın inşaat anlayışıyla hareket ettiği tespit edilen 5 firmanın çalışanlarına uygulanmıştır. Seçilen popülasyon nüfusu 300'dür. Bal'a göre (2001) minimum örneklem büyüklüğü şu şekilde formüle edilmiştir:

$$n = \frac{Z^2 \times q \times p \times N}{(p \times q \times Z^2) + (N - 1) \times t^2}$$

[N = Popülasyon (300), n = örneklem büyüklüğü, p = Popülasyonla ilgilenen özelliğin görülme sıklığı (0,20), q = Popülasyonla ilgilenen özelliğin gerçekleşmeme sıklığı (1 - p), Z = güven düzeyi için standart değer (%95 için 1,96), t = hata payı (0,10)]

Popülasyonla ilgilenen özelliğin görülme sıklığı az olduğu için 0,20 olarak alınmıştır. Formülasyona göre belirlenen minimum örneklem büyüklüğü 51'dir. Anket 300 çalışana uygulanmış ve 60 çalışana ulaşılabilmektedir. Yeterli örneklem büyüklüğüne ulaşılmıştır.

3.3.3. Verilerin analizi

Elde edilen veriler SPSS programında analiz edilmiştir. Demografik verilerin ve katılımcıların farkındalık düzeylerinin analizi için frekans analizi yapılmıştır. Yapım sektörü uzmanlarının yapım şantiyelerinde oluşan israfın nedenlerinin bakış açısını daha iyi ortaya koyabilmek için göreceli önem katsayıları hesaplanarak (RII) her bir israf nedeninin önem derecelerinin sıralaması elde edilmiştir. Göreceli önem katsayısı aşağıdaki formülasyonla hesaplanmıştır.

RII: Göreceli önem katsayısı (Relative Importance Index)

W: Her bir katılımcının o önermeye ilişkin verdiği 1 ile 5 arasındaki ağırlıktır. Burada 1 kesinlikle katılmıyorum, 2 katılmıyorum, 3 nötr, 4 katılıyorum ve 5 kesinlikle katılıyorum şeklindedir.

A: En yüksek ağırlık değeridir. Bu durum için 5'tir.

N: Toplam katılımcı sayısıdır.

$$RII = \frac{\sum W}{A \times N}$$

Çalışma kapsamında belirlenen teknolojilerin yalın inşaata etkisinin yapı uzmanlarının bakış açısıyla analizinin sağlanması için korelasyon analizi uygulanmıştır. YPTS'nin her aşamasında kullanılabilecek teknolojilerin kullanımlarını değerlendirirken, süre, maliyet ve kalite olan üç parametrenin tespit edilen her teknolojiye, aralarında

doğrusal bir ilişki olup olmadığı korelasyon analizi ile test edilmiştir. Ayrıca yapı uzmanlarının mesleklerine ve deneyim yıllarına göre ilgili teknolojiye ilişkin algılarının süre, maliyet ve kalite açısından değerlendirilmesine ilişkin ise ANOVA testi uygulanmıştır.



4. BULGULAR

Çalışma kapsamında yürütülen anket çalışmasının sonuçları üç bölüm olarak analiz edilmiştir. İlk bölümde katılımcı profili ve katılımcıların konuyla ilgili farkındalık düzeyleri analiz edilirken, ikinci bölümde katılımcıların israfın kaynaklandığı yapı inşaat sürecine ilişkin görüşlerinin analizi yapılmıştır. Üçüncü ve son bölümde ise hem tasarım hem yapım sürecinde YPTS'ye entegre edilebilecek teknolojilerin proje yönetim hedefleri (süre, maliyet ve kalite) açısından değerlendirilmesi sağlanmıştır.

4.1. Katılımcı profili ve farkındalık düzeyleri analizi

Yalın prensipler ve teknikleri benimseyen inşaat firmalarının ve aktörlerinin geleneksel yöntemler kullanan sektör firma ve aktörlerine göre sayıca azlığı göz önüne alındığında anket çalışmasına katılım sağlayan kişilerin katılımcı profilleri ve farkındalık düzeyleri anket sonuçlarının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çizelge 4.1'de katılımcı profili frekans dağılımı ve yüzdeleri incelendiğinde; çalışmadaki katılımcıların çoğunlukla erkeklerden (%71,2), 31-40 yaş aralığında (%45,8) ve lisans eğitimine (%55,9) sahip olan, inşaat mühendisi (%47,5), mesleki deneyimi çoğunlukla 11-15 yıl aralığında olan (%21,7), proje yöneticisi konumunda çalışan (%27,1), karma yapı fonksiyonu (%57,6) üzerine faaliyet gösteren (%66,1), 21 yıl ve üzeri sektörde bulunan firmada çalışan kişilerden oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 4.1. Katılımcı profili frekans dağılımı ve yüzdeleri

		N	Oran (%)			N	Oran (%)
Cinsiyet	Kadın	17	28,8	Çalışılan Pozisyon	Mimar	9	15,3
	Erkek	42	71,2		İnşaat Mühendisi	14	23,7
Yaş	21-30 yaş	22	37,3		Makine Mühendisi	3	5,1
	31-40 yaş	27	45,8		Elektrik Mühendisi	2	3,4
	41-50 yaş	9	15,3		Proje Yöneticisi	16	27,1
	51-60 yaş	1	1,7		PY Danışmanı	10	16,9
					Diğer	5	8,5
Eğitim Durumu	Lisans	33	55,9	Firmanın Faaliyet Alanı	Konut	7	11,9
	Yüksek Lisans	26	44,1		Ticari	8	13,6
Meslek	Mimar	17	28,8		Karma Yapı	34	57,6
	İnşaat Mühendisi	28	47,5		Diğer	10	16,9
	Makine Mühendisi	9	15,3		0-5 yıl	5	8,5
	Elektrik Mühendisi	3	5,1	Firmanın Sektörde Bulunma Yılı	6-10 yıl	5	8,5
	Diğer	2	3,4		11-15 yıl	4	6,8
Meslek Deneyimi	0-5 yıl	15	25,4		16-20 yıl	6	10,2
	6-10 yıl	15	25,4		21 yıl ve üzeri	39	66,1
	11-15 yıl	16	27,1				
	16-20 yıl	8	13,6				
	21 yıl ve üzeri	5	8,5				

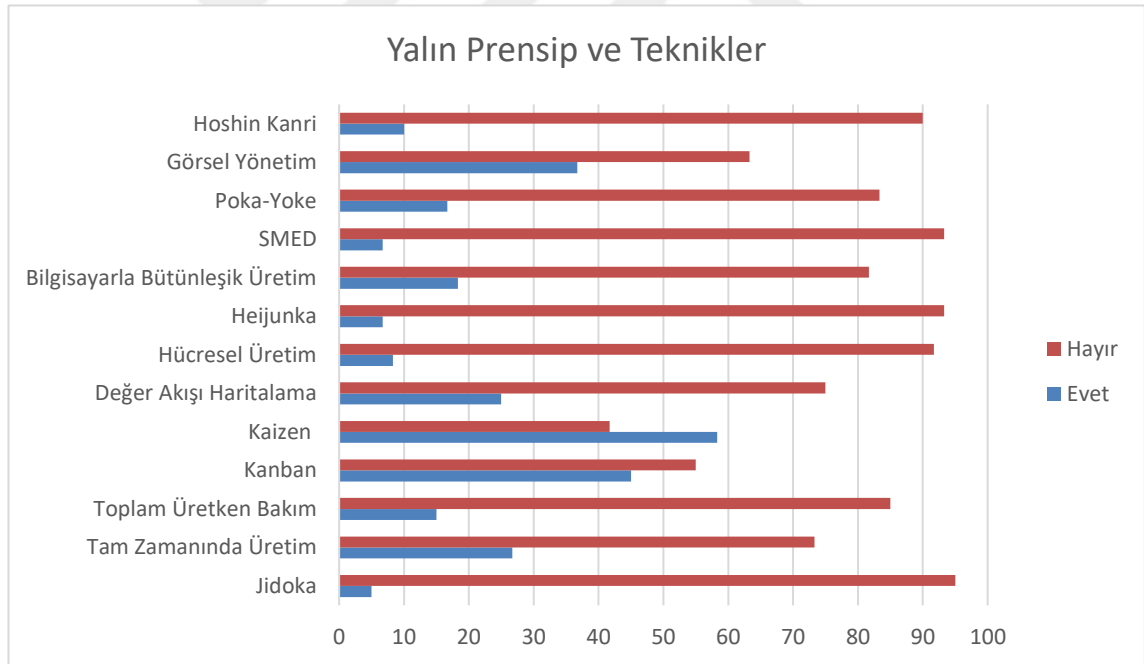
Katılımcıların yalın inşaat konusundaki farkındalık düzeylerine ilişkin sorulara verdikleri cevaplar Çizelge 4.2'de özetlenmektedir. Yapı uzmanlarının farkındalık düzeyleri incelendiğinde yalın prensip ve teknikleri bilenlerin yalın inşaat hakkında da bilgisi olduğu ve bu oranın %76,7 olduğu saptanmıştır. Ancak katılımcı profilinin sadece %33,3'ünün yalın inşaat projesinin tasarım ve/veya yapım aşamasında rol aldığı görülmüştür. Aynı zamanda %78,3'nün Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında bilgi sahibi olduğu, yalın inşaat hakkında bilgi sahibi olanlarla Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında bilgi sahibi olanların birbirine yakın oranlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Katılımcıların

%61,7'sinin yalın inşaat ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin birlikte kullanımı hakkında bilgi sahibi olduğu da elde edilen verilerden gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2. Katılımcı profilinin farkındalık düzeyi

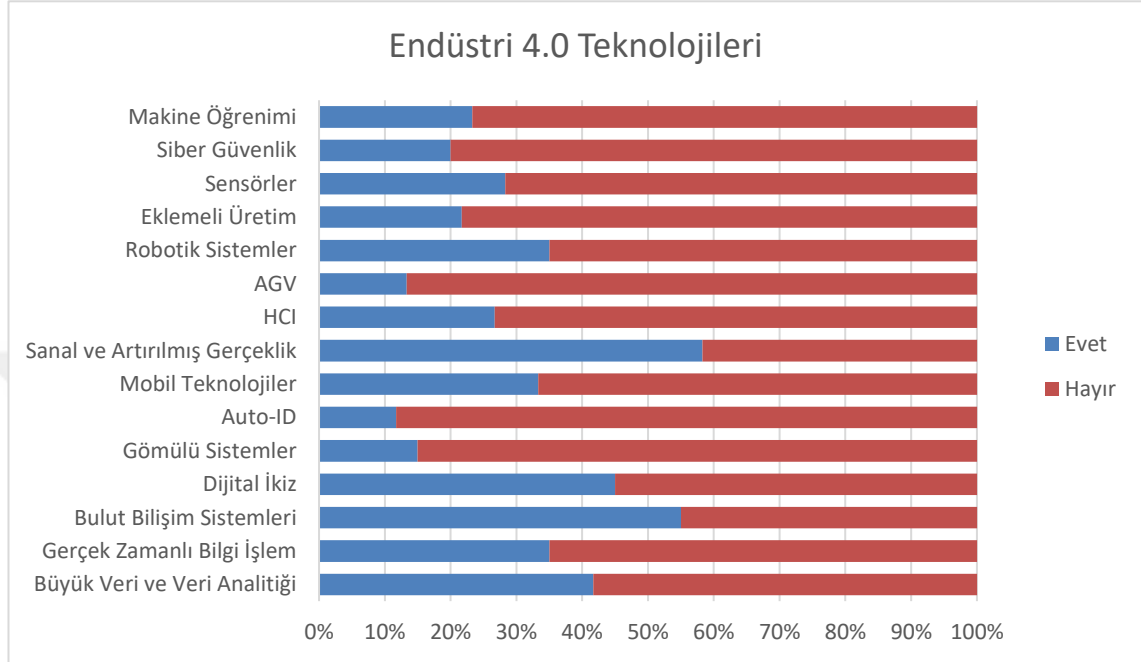
		N	Oran (%)			N	Oran (%)
Yalın prensip ve teknikler hakkında bilgi sahibi misiniz?	Evet	46	76,7	Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında bilgi sahibi misiniz?	Evet	47	78,3
	Hayır	14	23,3		Hayır	13	21,7
Yalın inşaat hakkında bilgi sahibi misiniz?	Evet	46	76,7	Yalın inşaatın Endüstri 4.0 teknolojileri ile birlikte kullanımı hakkında bilgi sahibi misiniz?	Evet	37	61,7
	Hayır	14	23,3		Hayır	23	38,3
Daha önce yalın inşaat projesinin tasarım ve/veya yapımı aşamasında rol aldınız mı?	Evet	20	33,3				
	Hayır	40	66,7				

Yalın prensip ve teknikleri hakkında bilgi sahibi olan katılımcılara hangisi ya da hangileri hakkında bilgi sahibi oldukları sorulduğunda yalın prensip ve tekniklerinden en çok bilinen il üç teknolojinin sırasıyla %58,3 oran ile "Kaizen", %45 oranıyla "Kanban" ve %36,7 oranıyla "Görsel yönetim" olduğu, en az bilinenin ise %5 oran ile "Jidoka" olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Yalın prensip ve teknikler hakkında bilgi düzeyi

Yapı uzmanlarından Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında bilgi sahibi olanların hangisi ya da hangilerini bildikleri sorulduğunda en çok bilinen ilk üç Endüstri 4.0 teknolojisinin %58,3 oranı ile "Sanal ve artırılmış gerçeklik", %55 oranıyla "Bulut bilişim sistemi" ve %41,7 oranıyla "Büyük veri ve veri analitiği", en az bilinenin %11,7 ile "Auto-ID" olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında bilgi düzeyi

4.2. İsrafın kaynaklandığı yapım sürecine ilişkin görüşlerin analizi

Her faktörün RII'si ve ana kategorisi ile birlikte sıralaması ortaya konulmuş ve önem dereceleri belirlenmiştir. Çizelge 4.3'de tasarım aşamasındaki israfın nedenlerinin sıklığı, ortalaması, standart sapması ve RII sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlara göre yapım sektöründe tasarım aşamasında en çok oluşan ilk üç israf %63,3 oranı ile "A1-Sözleşme belgelerinin hatalı oluşu", %46,7 oranı ile "A2-Yapımın başlangıcında sözleşme belgelerinin tamamlanmamış olması" ve %40 oranıyla "A8-Yüklenici deneyiminden tasarım aşamasında faydalanılamaması ve yapım konusunda bilgi eksikliği", en az oluşan israf ise %28,3 oranı ile "A7-Tasarımcının farklı ürünlerin imkanlarına aşına olmaması" durumu olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3. Tasarım aşamasında oluşan israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları

	Çok Önemsiz		Önemsiz		Kararsızım		Önemli		Çok Önemli		Mean	Std	RII	Rank
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%				
A1	-	-	6	10	3	5	13	21,7	38	63,3	4,383	0,975	0,876	1
A2	-	-	2	3,3	2	3,3	28	46,7	28	46,7	4,366	0,712	0,873	2
A3	-	-	5	8,3	5	8,3	26	43,3	24	40	4,150	0,898	0,83	4
A4	-	-	2	3,3	9	15	28	46,7	21	35	4,133	0,791	0,826	5
A5	-	-	5	8,3	9	15	23	38,3	23	38,3	4,066	0,936	0,813	6
A6	-	-	5	8,3	9	15	27	45	19	31,7	4,000	0,901	0,8	7
A7	1	1,7	3	5	8	13,3	31	51,7	17	28,3	4,000	0,882	0,8	7
A8	-	-	4	6,7	2	3,3	24	40	30	50	4,333	0,837	0,866	3

Çizelge 4.4'deki sonuçlara göre yapım sektöründe tedarik aşamasında en çok oluşan israf %58,3 oranı ile "B3-Uygun olmayan ürünlerin kullanımı", en az oluşan faktör de %25 oran ile "B2-Az miktarda malzemenin sipariş edilmesinin mümkün olmaması" durumu olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4. Tedarik aşamasında oluşan israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları

	Çok Önemsiz		Önemsiz		Kararsızım		Önemli		Çok Önemli		Mean	Std	RII	Rank
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%				
B1	-	-	2	3,3	5	8,3	21	35	32	53,3	4,383	0,783	0,876	2
B2	1	1,7	5	8,3	15	25	24	40	15	25	3,783	0,975	0,756	3
B3	-	-	1	1,7	1	1,7	23	38,3	35	58,3	4,533	0,623	0,906	1

Çizelge 4.5'deki sonuçlara göre yapım sektöründe malzeme taşıma ve kullanım aşamasında en çok oluşan israf %40 oranı ile "C2-Malzemelerin uygunsuz depolama sebebiyle zarar görmesi", en az oluşan israf ise %16,7 oranı ile "C4-Tek kullanımlık ambalajlar" olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5. Malzeme taşıma ve kullanım aşamasında oluşan israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları

	Çok Önemsiz		Önemsiz		Kararsızım		Önemli		Çok Önemli		Mean	Std	RII	Rank
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%				
C1	-	-	4	6,7	5	8,3	31	51,7	20	33,3	4,116	0,825	0,823	2
C2	-	-	2	3,3	2	3,3	32	53,3	24	40	4,300	0,696	0,86	1
C3	2	3,3	8	13,3	8	13,3	32	53,3	10	16,7	3,666	1,019	0,733	3
C4	7	11,7	9	15	17	28,3	17	28,3	10	16,7	3,233	1,240	0,646	4

Çizelge 4.6'daki sonuçlara göre yapım sektöründe operasyon/uygulama aşamasında en çok oluşan ilk üç israf %58,3 oranı ile "D4-Kazalar", %48,3 oranı ile "D6-Yanlış malzeme kullanılması, değişim gerekmesi", %46,7 oranı ile "D8-Hatalı planlama sebebiyle kullanılacak malzemelerin miktarının bilinmemesi" en az oluşan israf ise %33,3 oranı ile "D7-Temel atma yöntemi" olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6. Operasyon/Uygulama aşamasında oluşan israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları

	Çok Önemsiz		Önemsiz		Kararsızım		Önemli		Çok Önemli		Mean	Std	RII	Rank
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%				
D1	-	-	2	3,3	6	10	29	48,3	23	38,3	4,216	0,761	0,843	7
D2	-	-	1	1,7	4	6,7	32	53,3	23	38,3	4,283	0,666	0,856	5
D3	-	-	5	8,3	8	13,3	31	51,7	16	26,7	3,966	0,862	0,793	8
D4	-	-	3	5	4	6,7	18	30	35	58,3	4,416	0,829	0,883	1
D5	-	-	2	3,3	4	6,7	30	50	24	40	4,266	0,733	0,853	6
D6	-	-	1	1,7	3	5	27	45	29	48,3	4,400	0,668	0,88	2
D7	3	5	7	11,7	15	25	15	25	20	33,3	3,700	1,197	0,74	9
D8	-	-	2	3,3	4	6,7	26	43,3	28	46,7	4,333	0,751	0,866	3
D9	1	1,7	2	3,3	3	5	26	43,3	28	46,7	4,300	0,849	0,86	4

Çizelge 4.7'deki sonuçlara göre yapım sektöründe diğer etkileyen faktörler aşamasında en çok oluşan israf %50 oranı ile "E2-Şantiyedeki malzemelerinin kontrolünün eksikliği ve israf yönetim planının eksikliği", en az oluşan israf ise %30 oranı ile "E3-Kötü niyet veya hırsızlık nedeniyle meydana gelen kayıplar" olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.7. Diğer bölümünde israf türlerinin ortalama, standart ve RII sonuçları

	Çok Önemsiz		Önemsiz		Kararsızım		Önemli		Çok Önemli					
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	Mean	Std	RII	Rank
E1	-	-	1	1,7	7	11,7	35	58,3	17	28,3	4,133	0,675	0,826	2
E2	-	-	1	1,7	6	10	23	38,3	30	50	4,366	0,735	0,873	1
E3	2	3,3	4	6,7	6	10	30	50	18	30	3,966	0,990	0,793	3

4.3. Endüstri 4.0 teknolojilerinin yalnız inşaatla entegrasyonunun süre, maliyet ve kalite açısından değerlendirilmesinin analizi

Çizelge 4.8'de çalışma kapsamına dahil edilen teknolojilerin (büyük veri ve veri analitiği, bulut bilişim sistemi, dijital ikiz/simülasyon, sanal ve artırılmış gerçeklik, eklemeli üretim ve makine öğrenimi) yalnız inşaat sürecindeki etkisinin süre, maliyet ve kalite korelasyonu analizi bulguları verilmiştir. Büyük veri ve veri analitiği ve sanal ve artırılmış gerçekliğin süre ve maliyet arasında, bulut bilişim sistemi ve makine öğreniminin maliyet ve kalite arasında, dijital ikiz/simülasyon ve eklemeli üretim teknolojilerinin ise süre ve kalite arasında korelasyonlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Analizler arasında en yüksek korelasyon büyük veri ve veri analitiğinin maliyeti ve süresi arasındayken en düşük korelasyon sanal ve artırılmış gerçekliğin kalite ve süresi arasında olduğu saptanmıştır.

Çizelge 4.8. Tespit edilen teknolojilerin yalnız inşaat sürecindeki etkisinin süre, maliyet ve kalite korelasyonu

	Süre1		Maliyet1		Kalite1	
Büyük veri ve veri analitiği	r	p	r	p	r	p
Süre1	1		,750**	0,000	,610**	0,000
Maliyet1	,750**	0,000	1		,621**	0,000
Kalite1	,610**	0,000	,621**	0,000	1	
	Süre2		Maliyet2		Kalite2	
Bulut bilişim sistemleri	r	p	r	p	r	p
Süre2	1		,500**	0,000	,499**	0,000
Maliyet2	,500**	0,000	1		,702**	0,000
Kalite2	,499**	0,000	,702**	0,000	1	
	Süre3		Maliyet3		Kalite3	
Dijital ikiz/simülasyon	r	p	r	p	r	p
Süre3	1		,553**	0,000	,556**	0,000
Maliyet3	,553**	0,000	1		,553**	0,000
Kalite3	,556**	0,000	,553**	0,000	1	
	Süre4		Maliyet4		Kalite4	
Sanal ve artırılmış gerçeklik	r	p	r	p	r	p
Süre4	1		,550**	0,000	,299**	0,000
Maliyet4	,550**	0,000	1		,545**	0,000
Kalite4	,299**	0,000	,545**	0,000	1	
Kalite6	,612**	0,000	,724**	0,000	1	

Çizelge 4.8'in devamı

Eklemeli üretim	Süre5		Maliyet5		Kalite5	
	r	p	r	p	r	p
Süre5	1		,631**	0,000	,667**	0,000
Maliyet5	,631**	0,000	1		,533**	0,000
Kalite5	,677**	0,000	,533**	0,000	1	
Makine öğrenimi	Süre6		Maliyet6		Kalite6	
	r	p	r	p	r	p
Süre6	1		,690**	0,000	,612**	0,000
Maliyet6	,690**	0,000	1		,724**	0,000
Kalite6	,612**	0,000	,724**	0,000	1	

Grupların ortalama ve standart sapmalarını (STD) içeren istatistiksel analiz ve yapı uzmanlarının mesleklerinin ilgili ölçeğe ilişkin algılarının süre, maliyet ve kalite açısından değerlendirilmesine ilişkin ortalamalar, standart sapmalar ve ANOVA testi Çizelge 4.9'da özetlenmiştir. Anket formunda yer alan sosyo-demografik değişkenlerden olan mesleklerin YPTS'ye entegre olan Endüstri 4.0 teknolojileri ölçeğinin alt boyutlarına verdikleri cevaplardan oluşan veri setinin tabi tutulduğu analizler sonucunda ilgili maddelerde anlamlı farklılık bulunmamıştır ($p > 0.05$).

Çizelge 4.9. Yapı uzmanlarının mesleklerinin ilgili ölçeğe ilişkin algılarının süre, maliyet ve kalite açısından değerlendirilmesine ilişkin ortalamalar, standart sapmalar ve ANOVA sonuçları

	Mimar		İnşaat Müh.		Makine Müh.		Elektrik Müh.		Diğer Yapı Uzm.		ANOVA	
	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	F	p
Süre1	2,944	0,725	3,142	0,705	3,000	0,866	3,333	0,577	3,500	0,707	0,486	0,746
Maliyet1	3,000	0,840	3,285	0,599	3,000	0,866	3,333	0,577	4,000	0,000	1,261	0,296
Kalite1	2,944	0,802	2,821	0,772	2,888	0,927	3,333	0,577	3,500	0,707	0,578	0,680
Süre2	3,333	0,685	3,107	0,737	2,777	0,666	2,666	0,577	2,500	0,707	1,597	0,188
Maliyet2	3,166	0,618	2,785	0,832	2,777	0,666	3,000	0,000	2,500	0,707	1,001	0,415
Kalite2	3,111	0,582	2,607	0,875	2,777	0,666	3,000	0,000	2,500	0,707	1,392	0,249
Süre3	2,944	0,725	3,250	0,700	2,888	0,781	3,000	0,000	2,500	0,707	1,072	0,379
Maliyet3	3,166	0,785	3,142	0,650	2,888	0,927	3,000	0,000	2,500	0,707	0,594	0,669
Kalite3	2,888	0,676	2,857	0,848	2,777	0,833	3,000	0,000	2,500	0,707	0,160	0,957
Süre4	2,888	0,582	3,000	0,769	2,666	0,707	3,000	0,000	2,000	0,000	1,283	0,288
Maliyet4	3,000	0,594	2,750	0,645	2,555	1,013	3,000	0,000	3,000	1,414	0,756	0,558
Kalite4	3,000	0,840	2,678	0,772	2,888	0,927	3,000	0,000	3,000	1,414	0,497	0,738
Süre5	2,722	0,826	2,750	0,799	2,111	0,927	3,000	0,000	2,500	0,707	1,290	0,285
Maliyet5	2,555	0,704	2,535	0,792	2,111	0,927	3,000	0,000	2,500	0,707	0,923	0,457
Kalite5	2,888	0,758	2,571	0,790	2,111	0,927	3,000	0,000	2,500	0,707	1,681	0,168
Süre6	3,055	0,639	2,964	0,881	2,555	0,881	3,000	0,000	3,000	0,000	0,646	0,632
Maliyet6	2,944	0,725	2,821	0,722	2,333	0,866	3,000	0,000	3,000	0,000	1,206	0,319
Kalite6	2,833	0,707	2,892	0,785	2,333	0,866	3,000	0,000	3,000	0,000	1,068	0,381

Diğer taraftan Çizelge 4.10'da da görüldüğü üzere, yapı uzmanlarının mesleki deneyim sürelerine ilişkin yapılan analiz sonucunda Kalite2 (bulut bilişim teknolojisinin yalın inşaatta kaliteye etkisi), Süre4 (sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin yalın inşaatta süreye etkisi), Maliyet4 (sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin yalın inşaatta maliyete etkisi), Süre5 (eklemeli üretim teknolojisinin yalın inşaatta süreye etkisi) ve Kalite6 (makine öğrenimi teknolojisinin yalın inşaatta kaliteye etkisi) maddelerinde gruplar arasında anlamlı farklılık bulunmuştur ($p < 0.05$). Katılımcıların deneyim süresi arttıkça söz konusu teknolojilerin süre, maliyet ve kaliteye ilişkin katkılarının azaldığı görüşünün hakim olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.10. Yapı uzmanlarının tecrübe yıllarının ilgili ölçeğe ilişkin algılarının süre, maliyet ve kalite açısından değerlendirilmesine ilişkin ortalamalar, standart sapmalar ve ANOVA sonuçları

	0-5 yıl		6-10 yıl		11-15 yıl		16-20 yıl		21 yıl ve üzeri		ANOVA	
	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	F	p
Süre1	3,250	0,774	3,200	0,560	3,000	0,516	2,750	0,886	3,000	1,224	0,801	0,530
Maliyet1	3,312	0,873	3,333	0,487	3,125	0,619	2,875	0,834	3,000	1,000	0,743	0,567
Kalite1	3,375	0,806	2,800	0,560	2,625	0,619	2,875	0,834	2,800	1,303	2,181	0,083
Süre2	3,500	0,632	3,066	0,703	2,812	0,655	2,875	0,834	3,000	0,707	2,272	0,073
Maliyet2	3,250	0,774	3,000	0,534	2,625	0,619	2,875	0,640	2,400	1,140	2,345	0,066
Kalite2	3,375	0,619	2,733	0,593	2,500	0,516	2,750	0,707	2,200	1,303	4,742	0,002*
Süre3	3,187	0,750	3,066	0,703	3,125	0,619	2,875	0,834	2,800	0,836	0,448	0,774
Maliyet3	3,312	0,704	3,133	0,516	3,062	0,680	2,875	0,991	2,600	0,894	1,171	0,334
Kalite3	3,187	0,655	2,800	0,676	2,625	0,619	2,875	0,991	2,600	1,140	1,340	0,267
Süre4	3,312	0,793	3,066	0,593	2,500	0,516	2,500	0,534	2,800	0,447	4,554	0,003*
Maliyet4	3,250	0,683	3,066	0,593	2,375	0,619	2,625	0,517	2,400	0,547	5,448	0,001*
Kalite4	3,250	0,856	2,933	0,703	2,562	0,727	2,625	0,517	2,400	1,140	2,248	0,076
Süre5	2,750	1,000	3,133	0,639	2,437	0,727	2,250	0,707	2,200	0,447	2,785	0,035*
Maliyet5	2,562	0,813	2,866	0,639	2,250	,77460	2,375	0,744	2,200	0,836	1,603	0,187
Kalite5	2,937	0,928	2,733	0,457	2,312	,79320	2,375	0,744	2,600	1,140	1,520	0,209
Süre6	3,312	0,704	2,866	0,833	2,687	,70415	2,625	0,744	3,200	0,836	1,956	0,114
Maliyet6	3,062	0,853	2,800	0,676	2,500	,63246	2,750	0,707	3,000	0,707	1,317	0,275
Kalite6	3,312	0,704	2,666	0,617	2,375	,71880	2,750	0,707	3,000	0,707	4,005	0,006*

5. TARTIŞMA

5.1. Katılımcı Profili ve Farkındalık Düzeyleri Üzerinden Değerlendirme

Katılımcı profili frekans dağılımı ve yüzdeleri incelendiğinde katılımcıların genellikle genç yaş grubunda, erkek profesyonellerden oluştuğu tespit edilmiştir. Erkek katılımcıların baskınlığı, kadınların yeterince temsil edilmediği inşaat sektörünün tarihsel cinsiyet bileşimi ile uyumludur (Dainty vd. 2018). Sektördeki cinsiyet çeşitliliğinin önemini kabul etmek ve eşit fırsatları ve temsili teşvik etmenin yollarını araştırmak çok önemlidir.

31-40 yaş aralığındaki katılımcıların yoğunluğu, çalışmanın kariyer ortası aşamasındaki bireylerden iç görüşü yakaladığını göstermektedir. Bu yaş grubundaki profesyoneller, genellikle teknoloji entegrasyonu tartışmalarına değerli katkı sağlayan önemli deneyim ve bilgiye sahip kişilerdir (Ghasemzadeh vd. 1994). Bununla birlikte, genç ve yaşlı profesyonellerinkiler de dahil olmak üzere farklı bakış açılarını kapsayacak şekilde daha geniş bir yaş aralığından bakış açılarını dikkate almak önemlidir.

Lisans eğitim düzeyine sahip katılımcıların yüksek oranı, inşaat sektöründe temel akademik geçmişin yaygınlığını göstermektedir. Bununla birlikte, ileri derecelerin veya mesleki eğitimin katılımcıların teknoloji entegrasyonu anlayışı üzerindeki potansiyel etkisini kabul etmek önemlidir, çünkü bu faktörler onların bakış açılarını ve karar verme süreçlerini şekillendirebilir (Gherardi ve Nicolini 2018).

Mesleki deneyimin 11-15 yıl aralığında yoğunlaşması, çalışmanın, çeşitli zorluklarla karşılaşabilecekleri ve proje teslim uygulamalarına ilişkin iç görüşler geliştirebilecekleri kariyerlerinde kritik bir aşamadaki katılımcıları kapsadığını göstermektedir. Farklı düzeylerde deneyime sahip profesyonellerle çalışmak, Endüstri 4.0 teknolojilerinin entegrasyonu ile ilgili engellerin ve fırsatların kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayabilir (Mahamid vd. 2020).

Karma yapılı şirketlerde yönetici pozisyonlarındaki katılımcıların önemli ölçüde temsil edilmesi, teknoloji entegrasyonu girişimlerini yönlendirmede liderlik perspektiflerinin önemini vurgulamaktadır. Yöneticiler genellikle yeni teknolojilerin benimsenmesini ve uygulanmasını etkileyerek karar alma ve kaynak tahsisinde çok önemli bir rol oynar (Ogunde vd. 2019). Bununla birlikte, sektörün teknoloji entegrasyonuna hazır olup olmadığına dair bütüncül bir anlayış yakalamak için ön saflarda çalışanlar ve taşeronlar dahil olmak üzere diğer paydaşların bakış açılarını dikkate almak da değerlidir.

Yapı uzmanlarının farkındalık düzeyleri incelendiğinde yalın prensip ve teknikleri bilenlerin yalın inşaat hakkında da bilgisi olduğu, ancak katılımcı profilinin düşük bir oranının yalın inşaat projesinin tasarım ve/veya yapım aşamasında rol aldığı belirlenmiştir. Söz konusu bulgular önemli sayıda inşaat profesyonelinin yalın ilke ve teknikler hakkında bilgi sahibi olduğunu gösteren araştırmalarla uyumludur (Alarcon vd. 2018). Koskela (2018) yalın inşaat metodolojilerinin proje verimliliğini ve üretkenliğini artırması ve iyileştirilmiş proje sonuçlarına yol açması nedeniyle bu alanda bilgi sahibi olan profesyonellerin varlığının sektörün gelişmesi açısından umut verici olduğunu ifade etmektedir. Ancak, yalın inşaat projelerinin tasarım ve/veya inşaat aşamasında aktif olarak yer alan katılımcıların daha düşük yüzdesi, yalın uygulamaların benimsenmesinin ve uygulanmasının Türk yapım sektöründe yaygın olmayabileceğini düşündürmektedir.

Bu bağlamda Türkiye'de yalın inşaat ilkelerinin daha geniş bir şekilde uygulanmasını engelleyen engelleri ve zorlukları anlamak için daha fazla araştırma yapılması hususu önemli bir gerekliliktir.

Katılımcılar arasında Endüstri 4.0 teknolojileri konusunda farkındalığın yüksek olması da araştırmanın bir diğer dikkat çekici sonucudur. Dijital teknolojilerin ve otomasyonun imalat ve inşaat süreçlerine entegrasyonu ile karakterize edilen Endüstri 4.0, inşaat sektöründe devrim yaratma potansiyeline sahiptir (Li ve Skitmore 2020). Bu bağlamda çalışmanın bulguları, inşaatta dijitalleşmenin değerini benimsemeye ve tanımaya yönelik olumlu bir eğilime işaret etmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojilerin gerçek dünyadaki inşaat projelerinde pratik olarak uygulanmasını ve kullanılmasını dikkate almak önemlidir. Çünkü sadece farkındalık onların etkili bir şekilde benimsenmesi için yeterli değildir. Bilginin uygulama alanındaki karşılığı da mutlaka sahaya yansıtılmalıdır.

Hem yalın inşaat hem de Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında bilgi sahibi olan katılımcıların önemli bir yüzdesi de benzer bir şekilde umut vericidir. Bu iki alanın yakınsaması, gelişmiş proje performansı ve sürdürülebilirlik potansiyeline sahiptir. Yalın inşaat ilkelerinin Endüstri 4.0 teknolojileriyle entegrasyonu, kolaylaştırılmış süreçlere, geliştirilmiş iş birliğine ve veri odaklı karar vermeye yol açabilir (Pourrostan vd. 2021). Bununla birlikte, bu birleştirilmiş bilginin ne ölçüde gerçek uygulamaya dönüştüğünün incelenmesi ve bu yaklaşımların entegrasyonundan elde edilen faydaların ortaya konulması için bu alanda daha fazla araştırmaya duyulan ihtiyaç oldukça açıktır.

Katılımcıların bilgi sahibi oldukları yalın prensip ve tekniklerin analizi, söz konusu prensip ve teknikler hakkındaki bilgi oranlarında farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır. Katılımcılar arasında "Kaizen" konusundaki yüksek farkındalık, Kaizen'in inşaat sektöründe yaygın olarak uygulanan temel bir yalın ilke olma statüsüyle uyumludur. Alarcon vd. (2020) Kaizen'in sürekli iyileştirmeyi vurguladığına dikkati çekmiş ve her seviyedeki çalışanı süreçlerin iyileştirilmesine ve israfın azaltılmasına katkıda bulunmaya teşvik ettiğini ifade etmektedir. Katılımcıların temel ilke düzeyinde bilgi sahibi olmalarına karşın otomasyona ve hata tespitine odaklanan ve daha gelişmiş bir yalın teknik olarak karşımıza çıkan "Jidoka" ile ilgili düşük aşinalığa sahip olmaları Türk yapım sektöründe yalın inşaat anlayışının henüz erken evrelerinde olduğunu bir göstergesidir. Bu bağlamda inşaat sektörü temsilcileri arasında ileri eğitim ve bilinçlendirme için potansiyel bir alan yaratılması önemlidir. Bu amaçla söz konusu yalın prensip ve tekniklerine ilişkin farkındalığın artırılmasına yönelik çalışmalar yapılması da zorunluluktur.

Endüstri 4.0 teknolojileri bilgisi konusunda yapılan analizler "Sanal ve Artırılmış Gerçeklik" in en iyi bilinen Endüstri 4.0 teknolojisi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuç inşaat endüstrisinde sürükleyici teknolojilerin artan şekilde benimsendiğinin de bir göstergesidir. Sanal ve artırılmış gerçeklik, gelişmiş görselleştirme, gelişmiş iş birliği ve verimli proje iletişimi için fırsatlar sunma niteliğine sahiptir (Li ve Skitmore 2020). Bu teknolojiler ayrıca proje tasarımında, planlamasında ve paydaş katılımında devrim yaratma potansiyeline de sahiptir. Bu sonucun aksine, "Auto-ID" konusundaki farkındalığın düşük olması ise uygulamalarının ve yararlarının daha iyi anlaşılması gerektiğini göstermektedir.

Çalışma, inşaat sektörüne etkin entegrasyonlarını kolaylaştırmak için yalın ilkeler, teknikler ve Endüstri 4.0 teknolojilerindeki bilgi boşluklarını ele almanın önemini

vurgulamaktadır. Yalın tekniklerin ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması ve uygulanması, gelişmiş proje performansına, üretkenliğe ve yeniliğe imkan tanır (Pourroostam vd. 2021). Bu nedenle, farkındalığı artırmak ve bu kavramların inşaat proje sunumuna entegrasyonunu teşvik etmek için eğitim faaliyetleri, eğitim programları artırılmalı, bilgi paylaşım platformları geliştirilmelidir.

5.2. Katılımcıların İsrafın Kaynaklandığı Yapım Sürecine İlişkin Görüşlerinin Değerlendirilmesi

Katılımcıların israfın kaynaklarına ilişkin algılarının değerlendirilmesi de çalışmanın bir diğer aşamasını oluşturmaktadır. Yapım sektöründe oluşan israflara yönelik sorular beş aşamada (tasarım, tedarik, malzeme taşıma ve kullanım, operasyon/uygulama ve diğer) oluşturulmuş ve her aşamada oluşan israfların önem dereceleri kendi içinde değerlendirilmiştir.

Tasarım aşamasında "A1-Sözleşme belgelerinin hatalı oluşu" maddesinin israf üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu bulgusu, inşaat proje yönetimine ilişkin mevcut literatürle uyumludur. Levitt (2018) yetersiz veya hatalı sözleşme belgelerinin, tasarım hatalarına, yeniden çalışmaya, gecikmelere ve maliyet aşımalarına yol açabileceğine vurgu yapmaktadır. Bu durum hataları en aza indirmek ve proje başarısını sağlamak için geliştirilmiş sözleşme yönetimi uygulamalarına ve kapsamlı inceleme süreçlerine olan ihtiyacı vurgulamaktadır. Tasarım aşamasında oluşan israflara yönelik çalışmanın bulguları, inşaat projelerinde sözleşme belgeleri ve bilgi alışverişi ile ilgili konuların ele alınmasının önemini vurgulayan önceki araştırmaları desteklemektedir. Örneğin, Wang vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışma etkili sözleşme yönetiminin proje gecikmelerini ve maliyet aşımalarını en aza indirmedeki kritik rolünü belirterek doğru ürün boyutlandırmasını sağlamak ve israfı önlemek için proje paydaşları arasında etkili iletişim ve iş birliğinin önemini vurgulamaktadır. Bu sonuçlar, geliştirilmiş sözleşme yönetimi uygulamalarına, etkin bilgi alışverişine ve proje paydaşları arasında gelişmiş iş birliğine duyulan ihtiyacın altını çizmektedir. Bilgi teknolojileri ve görselleştirme araçlarının kullanımıyla tasarım aşamasında oluşan israf sorunlarına çözüm olabilir. İnşaat profesyonelleri, bu faktörleri ele alarak israfı azaltabilir ve yalın inşaatın verimli uygulanabilmesine katkı sağlayabilir.

Sıralama sonuçlarına göre tasarım aşamasında en az israf oluşumu, "A6-Kullanılan ürünlerin boyutlarına dikkat edilmemesi" ve "A7-Tasarımcının farklı ürünlerin imkanlarına aşına olmaması" durumları olduğu görülmektedir. Bilinçli karar verme yoluyla malzeme seçimini optimize etmek ve israfı azaltmak için tasarımcılar ve inşaat profesyonelleri arasındaki iş birliğini geliştirme potansiyelinin öneminin algılanması (Yin vd. 2022), yapım sektörü profesyonelleri tarafından bu algının yüksek olduğunu ve uygulandığını göstermektedir.

Çalışmanın tedarik aşamasına ilişkin yapım sektöründe uygun olmayan ürün kullanımının zararlı etkilerini vurgulayan bulgularının mevcut literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Alarcon ve Navarrete (2017) tarafından yapılan araştırma, yeniden işleme, malzeme israfı ve proje gecikmeleri gibi sorunları önlemek için doğru ürün seçiminin önemini vurgulamaktadır. Bu soruna bir çözüm olarak inşaat profesyonellerinin dijital ürün katalogları ve gerçek zamanlı tedarik zinciri izleme gibi Endüstri 4.0 teknolojilerini sürece entegre ederek bilinçli kararlar almaları ve uygun olmayan ürünlerin kullanımını en aza indirerek proje sonuçlarını iyileştirmeleri mümkün olduğu yapılan çalışmalarda saptanmaktadır.

Sıralama sonuçlarına göre "B1-Sipariş hatası, fazla veya az sipariş vb." tedarik aşamasında israf üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu bulgu, doğru ve verimli tedarik süreçlerinin önemini vurgulayan önceki çalışmalarla tutarlıdır. Marzouk vd. (2018)'de bu sonuca paralel olarak artan maliyetler, proje gecikmeleri ve verimsiz kaynak tahsisi dahil olmak üzere sipariş hatalarının olumsuz sonuçlarına vurgu yapmaktadır. İnşaat şirketleri, gelişmiş analitik ve otomatikleştirilmiş envanter yönetimi sistemleri gibi Endüstri 4.0 teknolojilerinden yararlanarak tedarik doğruluğunu artırabilir ve sipariş hatalarıyla ilişkili riskleri azaltabilir. Diğer taraftan sonuçlar "B2-Az miktarda malzemenin sipariş edilmesinin mümkün olmaması" ifadesinin, tedarik aşamasında en az oluşan israf olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak katılımcıların bir bölümünün bu faktörü önemli bir israf oluşturan etmen olarak gördüğü dikkat çekmektedir. Bu noktada çevrimiçi pazaryerleri ve işbirlikçi tedarik zinciri sistemleri gibi dijital platformlardan ve teknolojilerden yararlanmak, satın alma sürecini kolaylaştırmaya ve daha esnek sipariş seçeneklerini mümkün kılmaya yardımcı olabilir (Teizer vd. 2017). Literatür sonuçları, ürün seçimini geliştirmek, tedarik doğruluğunu iyileştirmek ve tedarik aşamasında kaynak tahsisini optimize etmek için Endüstri 4.0 teknolojilerinden yararlanmanın önemini vurgulamaktadır.

Malzeme taşıma ve kullanım aşamasında oluşan israf türlerine ilişkin sonuçlar değerlendirildiğinde, en çok oluşan israfın "C2-Malzemelerin uygunsuz depolama sebebiyle zarar görmesi" olması, sonuçların uygun olmayan depolama uygulamalarının malzeme bütünlüğü ve israf üretimi üzerindeki zararlı etkilerini vurgulayan önceki araştırmalarla uyumlu olduğu gözlenmektedir. El-Gohary vd. (2018) tarafından yapılan araştırma, malzeme hasarını ve hasarı önlemek için uygun depolama koşullarının önemini vurgulamaktadır. İnşaat şirketleri, gerçek zamanlı izleme sistemleri ve sensör tabanlı envanter yönetimi gibi Endüstri 4.0 teknolojilerini entegre ederek depolama uygulamalarını iyileştirilebilir, optimum çevre koşulları sağlanabilir ve malzeme hasarı en aza indirilebilir (Teizer vd. 2017). Endüstri 4.0 teknolojilerini entegre etmek, bu israf faktörlerini ele almak, depolama uygulamalarını iyileştirmek, sürdürülebilir paketlemeyi teşvik etmek ve inşaat endüstrisinde malzeme taşıma ve kullanımını optimize etmek için değerli çözümler sunabilir.

Buna karşın yapı uzmanlarının görüşüne göre en az oluşan israfın "C4-Tek kullanımlık ambalajlar" olması, literatürle örtüşmediğini göstermektedir. Literatür, israf etmenin yapı sektöründe yeterince önemsenmediğini göstermekte ve inşaat endüstrisinde artan sürdürülebilirlik endişelerini beraberinde getirmektedir. Gavilan vd. (2020) tarafından yapılan araştırmada, israf üretimini ve çevresel etkiyi en aza indirmek için tek kullanımlık ambalajları azaltma ihtiyacını vurgulamaktadır. Yeniden kullanılabilir izleme sistemleri ve akıllı paketleme çözümleri gibi Endüstri 4.0 teknolojilerini entegre etmek, daha sürdürülebilir paketleme uygulamaları sağlayabilir, israfları azaltabilir ve döngüsel ekonomi ilkelerini teşvik edebildiği ortaya koymaktadır (Su vd. 2019).

Operasyon/uygulama aşamasında oluşan israf türlerine ilişkin sonuçlar, inşaat sahalarında israfları azaltma ve güvenliği artırmada kaza önlemenin kritik rolünü vurgulamaktadır. Dong vd. (2019) tarafından yapılan araştırma yapı sektöründeki kazaları, yaralanmaları ve ölümleri önlemek için teknoloji odaklı güvenlik sistemlerini entegre etmenin önemini vurgulamaktadır. Gerçek zamanlı izleme sistemleri ve tahmine dayalı analitik gibi Endüstri 4.0 teknolojileri, potansiyel tehlikelerin belirlenmesine, güvenlik için çalışanların izlenmesine ve kaza risklerinin azaltılmasına yardımcı olabilir

(Chileshe vd. 2021). İnşaat şirketleri, kazaların önlenmesine öncelik vererek, maddi hasar, yeniden çalışma ve proje gecikmeleri dahil olmak üzere kazalarla ilişkili israfı azaltabilir.

Çalışma, ayrıca alt sıralarda yer almasına rağmen, kullanılacak ürünlerin türleri ve boyutları ile ilgili geç bilgi verilmesinin katılımcılar tarafından oldukça önemli görüldüğünü ortaya koymaktadır. Bu bulgu, gecikmiş bilgi alışverişinin inşaat projesi performansı üzerindeki olumsuz etkisini vurgulayan önceki araştırmalarla uyumludur. Alarcon ve Navarrete (2017) tarafından yapılan araştırmalar, proje sonuçlarını iyileştirmek ve israfı azaltmak için paydaşlar arasında erken ve doğru bilgi paylaşımının önemini vurgulamaktadır. Bulut tabanlı iş birliği platformları ve Yapı Bilgi Modellemesi gibi Endüstri 4.0 teknolojilerini entegre etmek, gerçek zamanlı bilgi paylaşımını kolaylaştırabilir, koordinasyonu geliştirebilir ve gecikmiş bilgilerle ilişkili riskleri azaltabilir (Zhang vd. 2021).

Ayrıca "D7-Temel atma yöntemi" operasyon/uygulama aşamasında en az oluşan israf olarak yer alsa da önemi göz ardı edilmemelidir. Bu yöntemin seçimi, operasyon/uygulama aşamasında üretkenliği, kaynak kullanımını ve israf üretimini etkileyebilir. Teizer vd. (2017) tarafından yapılan araştırma malzeme israfını en aza indirmek ve proje verimliliğini artırmak için temel atma da dahil olmak üzere inşaat süreçlerini optimize etmenin önemini vurgulamaktadır. Otonom araçlar, robotik ve gelişmiş saha izleme sistemleri gibi Endüstri 4.0 teknolojilerinden yararlanmak, optimize edilmiş temel atma yöntemlerini destekleyebilir, malzeme israfını azaltabilir ve inşaat verimliliğini artırabilir (Yuan vd. 2019).

Çalışmanın bulguları, inşaat sektöründe operasyon/uygulama aşamasında israfı azaltmada kaza önleme ve zamanında bilgi alışverişinin önemini vurgulamaktadır. Endüstri 4.0 teknolojilerini entegre etmek, güvenliği artırmada, inşaat süreçlerini optimize etmede ve kazalar ile gecikmiş bilgi teslimi gibi israf faktörlerini azaltmada çok önemli bir rol oynayabilir. İnşaat şirketleri gerçek zamanlı izleme sistemleri, bulut tabanlı iş birliği platformları ve gelişmiş otomasyondan yararlanarak operasyonel verimliliği artırabilir, güvenlik performansını artırabilir ve israfı en aza indirebilir.

Çalışmanın bulgularına göre yapım sürecinin dışında oluşan ve süreci etkileyen diğer israflardan en çok oluşanı "E2-Şantiyedeki malzemelerinin kontrolünün eksikliği ve israf yönetim planının eksikliği" olduğu ortaya konulmaktadır. Bu durum etkin malzeme kontrolü ve israf yönetimi uygulamalarının israfın azaltılmasında ve proje sonuçlarının iyileştirilmesindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Alzahrani ve Liyanage (2020) tarafından yapılan araştırma, malzeme kayıplarını önlemek, israf oluşumunu en aza indirmek ve proje verimliliğini artırmak için malzeme kontrol mekanizmaları uygulamanın önemini vurgulamaktadır. RFID izleme sistemleri, sensörler ve gerçek zamanlı izleme gibi Endüstri 4.0 teknolojileri, şantiyelerde malzemelerin doğru ve otomatik kontrolünü sağlayarak etkili envanter yönetimi ve israf azaltma sağlayabilir (Kang 2020).

Diğer israflardan en az oluşanı ise "E3-Kötü niyet veya hırsızlıktan kaynaklanan kayıplar" olarak karşımıza çıksa da oluşan israfın çözümü olarak gelişmiş güvenlik ve gözetim sistemlerini birleştirmek faydalı olabilir. Goyal vd. (2018), video analitiği ve erişim kontrol teknolojilerinin entegrasyonunun inşaat projelerinde hırsızlığı caydırabileceğini ve kayıpları azaltabileceğini öne sürmektedir. İnşaat şirketleri, gerçek

zamanlı izleme, uzaktan izleme ve veri analitiğinden yararlanarak güvenlik önlemlerini artırabilir, hırsızlık olaylarını azaltabilir ve ilgili israfları en aza indirebilir.

Bulgular yapım sürecinde israf yönetim planlarının ve malzemelerin kontrolünün olmamasının katılımcılar için son derece önemli olduğunu göstermektedir. Bu, proje yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilir israf yönetimi stratejilerinin uygulanmasının önemini vurgulamaktadır. Osmani vd. (2017), inşaat projelerinde çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için israf azaltma, geri dönüşüm ve bertaraf stratejileri dahil olmak üzere israf yönetimi planlamasının önemini vurgulamaktadır. Veriye dayalı israf yönetim sistemleri ve tahmine dayalı analitik gibi Endüstri 4.0 teknolojilerini entegre etmek, gerçek zamanlı izlemeyi, israf akışlarının optimizasyonunu ve verimli kaynak tahsisini kolaylaştırabilir (Cheng vd. 2018). Bu sayede yalın inşaatın hedeflerine katkı sağlayıp minimum israf ve maksimum değerle mükemmellik hedefine ulaşılabilir.

5.3. Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Yalın İnşaatla Entegrasyonunun Süre, Maliyet ve Kalite Açısından Değerlendirilmesinin Analizi

Tespit edilen Endüstri 4.0 teknolojilerinin (büyük veri ve veri analitiği, bulut bilişim sistemi, dijital ikiz/simülasyon, sanal ve artırılmış gerçeklik, eklemeli üretim ve makine öğrenimi) yalın inşaatla süre, maliyet ve kaliteye etkilerinin korelasyonlarının arasında yapı uzmanlarının bakış açısına göre doğrusal bir ilişki olması, birbirlerine olumlu yönde etki ettiğini göstermektedir.

Büyük veri ve veri analitiği yapım sürecinin en erken aşamalarında proje ekiplerine fayda sağlamaktadır. Ekiplerin olası gecikmeleri hesaba katmasına ve genel proje zaman çizelgesini çıkarmasına yardımcı olmak için geçmiş ve mevcut inşaat projelerinden bilgiler derler. Ayrıca malzeme, işçilik ve makineler hakkında daha doğru maliyet tahminleri yapılmasına olanak tanır ve inşaat sürecinin sonraki aşamalarında bütçeyi aşma riskini azaltır. Bu etkiler yalın inşaatla büyük veri ve veri analitiği teknolojisinin süre ve maliyet arasında korelasyonun en yüksek olduğu bulgusunu desteklemektedir.

Sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojilerinin yapım sürecine etkilerine baktığımızda proje planlama, koordinasyon ve görselleştirmeyi geliştirerek zaman yönetimi, maliyet kontrolü ve kalite güvencesinin iyileştirilmesine yol açar (Akintoye vd. 2018). Bu etkiler, yalın inşaatla sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin süre ve maliyet arasında korelasyonun en yüksek olduğu bulgusunu desteklemektedir.

Bulut bilişim sistemi, verimli veri depolama, iş birliğine dayalı iletişim ve gelişmiş analitiği mümkün kılarak, kolaylaştırılmış proje süreçlerine ve iyileştirilmiş genel performansla yol açar (Sacks vd. 2019). Bu etkiler yalın inşaatla bulut bilişim sistemi teknolojisinin yapı uzmanlarının bakış açısına göre maliyet ve kalite arasında korelasyonun en yüksek olduğu bulgusuyla uyumlu değildir. Literatür sonuçları bulut bilişim teknolojisinin maliyet düşürme noktasında faydaları olsa da süre ve kalite arasında korelasyonunun yüksek olduğunu göstermektedir.

Demografik temettünün kademeli olarak ortadan kalkması ve işçilik maliyetlerindeki artışla birlikte, işçilik maliyeti kayıpları ve şantiyede çalışan eksikliği, inşaat sektörünün kârları üzerindeki en büyük kısıtlamalar haline gelmektedir. Bu koşullar altında, inşaatla otomasyon derecesini iyileştirmek için makine öğrenimi gibi yapay zekâ teknolojilerinden yararlanmak kaçınılmaz bir eğilimdir (El Jazzer ve Nassereddine 2021). Makine öğrenimi, güvenli olmayan işçi davranışlarını tespit

ederken, yaralanmayı önleyen ve sonuç olarak kusurları ve beklemeyi önleyen operasyon merkezini uyarabilir (Mohan ve Varghese 2019). Ek olarak, kusurları tespit etmeye yardımcı olacak çeşitli denetim uygulamaları için kullanılabilir ve nakliye, aşırı işleme ve hareketi en aza indirmeye yardımcı olacak uygun müdahalede rol oynar (Karaaslan vd. 2019; Lee vd. 2020). Ayrıca, malzeme tedarikçilerinin verilerini analiz ederek gelecekteki olası çevresel, yasal veya finansal riskleri tespit etmenin yanı sıra envanteri en aza indirmek ve dikkat edilmesi gereken uzun vadeli kalemleri vurgulamak için makine öğrenimi teknolojisi kullanılabilir. Aynı zamanda proje süresini optimize ederek ve proje kaynaklarını uygun şekilde seviyelendirerek fazla üretimin nasıl en aza indirebileceğini göstermektedir. Bunun sonucunda minimum maliyet ve maksimum kalite sağlayarak YPTS hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olabilmektedir. Bu etkiler yalın inşaatta makine öğrenimi teknolojisinin maliyet ve kalite arasında korelasyonun en yüksek olduğu bulgusunu desteklemektedir.

Literatür, yapım sektöründe dijital ikiz/simülasyon kullanmanın olumlu etkilerini göstermektedir. Dijital ikiz/simülasyon hem bina düzeyinde hem de şehir düzeyinde doğru analizler, verimli çalışma, gerçek zamanlı karar, kestirimci bakım ve olası senaryoların simülasyonu için temel bir kaynak sağlar (Mohan ve Varghese 2019). Dijital ikiz/simülasyon sayesinde tam otomasyonlu veri aktarımı sağlayarak, dijital ikizin bir sistemin performansını gerçek zamanlı olarak göstermesine olanak tanır; bu, teknolojinin ana avantajı olarak kabul edilmektedir. Bu etkiler yalın inşaatta dijital ikiz/simülasyon teknolojisinin süre ve kalite arasında korelasyonun en yüksek olduğu bulgusunu desteklemektedir.

Farklı araştırma makaleleri, gerçek projeleri fiziksel olarak sergilemesine olanak sağlayan eklemeli üretimin yapım sektöründe kullanmanın olumlu etkilerini göstermektedir. Eklemeli üretim, daha az malzeme envanteri ve işçi kullanarak gereksiz hareketi, beklemeyi, nakliyyeyi ve envanteri en aza indirmeye yardımcı olmaktadır (Jewell 2019). Eklemeli üretim, çerçeve kullanımını gerektirmediği için bal peteği gibi geleneksel beton kusurlarını en aza indirir. Ayrıca, baskı sırasında oluşabilecek kusurlar, başka bir katman basılmadan önce kolayca tespit edilebilir ve tedavi edilebilir (El Sakka ve Hamzeh 2017; Izard vd. 2017). Eklemeli üretimin baskı hızı kontrol edilebildiğinden, aşırı üretimi ve aşırı işlemeyi azaltmaktadır (Chiabert ve Sini 2020; El-Sayegh vd. 2020). Eklemeli üretim, çalışanları yeni teknik dijital beceriler öğrenmeye ittiği için çalışanlar arasında daha fazla yetenek oluşturmaya yardımcı olmaktadır (Jewell 2019). Bu etkiler yalın inşaatta eklemeli üretim teknolojisinin süre ve kalite arasında korelasyonun en yüksek olduğu bulgusunu desteklemektedir.

Söz konusu Endüstri 4.0 teknolojileri arasında büyük veri ve veri analitiği teknolojisinde korelasyonunun en yüksek ve süre ile maliyet arasında olması, büyük veri ve veri analitiğinin yapı uzmanlarının bakış açısına göre yalın inşaatta en verimli sonuçlar verdiğini ve yapım süreçlerini iyileştirdiğini göstermektedir. Buna karşın farkındalığı en yüksek olan sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin, söz konusu Endüstri 4.0 teknolojileri arasında en düşük korelasyona sahip ve bunun süre ile kalite arasında olması, yapı uzmanlarının bakış açısına göre SG ve AG teknolojileri yalın inşaat sürecini kısa zamanda bitirmeye yardımcı olsa da kısa zamanda bitmesinin kaliteye etki edeceği düşüncesine sahip değillerdir. Ancak yapılan araştırmalar SG ve AG teknolojilerinin süre, maliyet ve kalite üçgenine doğrudan etki sağladığını göstermektedir.

Grupların ortalama ve standart sapmalarını içeren istatistiksel analiz ve yapı uzmanlarının mesleklerinin ilgili ölçeğe ilişkin algılarının süre, maliyet ve kalite açısından değerlendirilmesine ilişkin ortalamalar, standart sapmalar ve ANOVA testi sonuçları değerlendirildiğinde YPTS'ye entegre olan Endüstri 4.0 teknolojileri ölçeğinin alt boyutlarına verdikleri cevaplardan oluşan veri setinin tabi tutulduğu analizler sonucunda ilgili maddelerde anlamlı farklılık bulunmamaktadır ($p>0,05$). Yapı uzmanlarının mesleklerinin, YPTS'ye entegre edilen teknolojilere ilişkin algılarını önemli ölçüde etkilemediği bulgusu, bu teknolojilerin tutarlı bir şekilde anlaşılmasının ve değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Bu bulgu inşaat projelerinde işbirlikçi karar verme ve işlevler arası entegrasyonun önemini vurgulayan araştırması ile uyumludur. Belirli rolleri veya uzmanlıkları ne olursa olsun, inşaat profesyonellerinin Endüstri 4.0 teknolojilerini YPTS'ye entegre etmenin yararları ve sonuçları konusunda ortak bir anlayışa ve algıya sahip olması inşaat sektöründeki farklı profesyonel roller arasında tutarlı olduğunu göstermektedir. Yalın inşaat ilkeleri ve yöntemleri, proje teslim süreçlerini kolaylaştırmak için çeşitli paydaşlar arasında iş birliğini ve ekip çalışmasını teşvik eder. Seo vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, mimarlar, mühendisler ve müteahhitler dahil olmak üzere farklı profesyoneller arasında etkili iş birliği ve bilgi paylaşımının proje performansını önemli ölçüde iyileştirdiği ifade edilmektedir.

Diğer taraftan yapı uzmanlarının mesleki deneyim sürelerine ilişkin yapılan analiz sonucunda bazı gruplar arasında anlamlı farklılık bulunmaktadır ($p<0,05$). Katılımcıların deneyim süresi arttıkça söz konusu Endüstri 4.0 teknolojilerinin süre, maliyet ve kaliteye ilişkin katkılarının azaldığı görüşünün hakim olduğu tespit edilmektedir. Yapı uzmanlarının mesleki deneyiminin belirli teknolojilerin etkileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulgusu, teknolojinin benimsenmesinde ve algılanmasında uzmanlığın rolünü vurgulayan araştırmalarla örtüşmemektedir. Aslında deneyimli profesyonellerin teknoloji ve potansiyel uygulamaları hakkında daha derin bir anlayışa sahip olmaları daha olasıdır ve bu da onların yalın inşaatta süre, maliyet ve kalite üzerindeki etkisini daha doğru bir şekilde değerlendirmelerini sağlar (Adapure vd. 2019). Ancak literatürde yapılan çalışmalar yapım sektörünün yeniliklere kapalı olup daha gelenekselci bir yapıya sahip olduğunu göstermesi, Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında farkındalıkları yüksek olsa da söz konusu Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmemesi sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Çalışma bulgularında dikkat çeken, mesleki deneyim üzerinde anlamlı farklılık bulunan grupların (bulut bilişim teknolojisinin yalın inşaatta kaliteye etkisi, sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin yalın inşaatta süreye etkisi, sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin yalın inşaatta maliyete etkisi ve makine öğrenimi teknolojisinin yalın inşaatta kaliteye etkisi), 5 yıldan daha az tecrübe sahibi olanlar için en çok benimsenirken sadece 1'nin (eklemeli üretim teknolojisinin yalın inşaatta süreye etkisi) 6-10 yıl tecrübe sahibi olanlar için benimsendiğini göstermektedir. Bu bulgu, eklemeli üretimin süre üzerindeki etkisinin potansiyelinin daha tecrübeli yapı uzmanları tarafından farkında olunduğunu göstermektedir.

Çalışmanın bulguları, bulut bilişim teknolojisinin entegrasyonunun, yalın inşaatta kalite üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bulut bilişim teknolojisi, proje paydaşları arasında daha iyi karar vermeyi, gelişmiş iletişimi ve hata azaltmayı kolaylaştırarak verimli veri depolama, gerçek zamanlı iş birliği ve veri analitiği sağlar. Bulut bilişimin kalite üzerinde önemli bir etkisinin bulunması mevcut literatürü desteklemektedir.

Çalışma, yalın inşaatta SG ve AG teknolojisinin hem zaman hem de maliyet üzerindeki önemli etkilerini de ortaya çıkarmaktadır. SG ve AG uygulamaları, görselleştirme ve simülasyon yoluyla tasarım koordinasyonunu, inşaat planlamasını, çakışma tespitini ve maliyet tahminini geliştirir. SG ve AG teknolojisinin entegrasyonu, önceki araştırmalarla uyumlu olarak inşaat projelerinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabilir.

Analiz, eklemeli üretim teknolojisinin yalın inşaatta zaman üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. 3D yazıcı başka bir deyişle eklemeli üretim, hızlı prototiplemeye, yerinde imalata ve bina bileşenlerinin özelleştirilmesine olanak tanıyarak yapım sürecini hızlandırır (Buswell vd. 2018). Bulgu, eklemeli imalatın yalın inşaatta zaman verimliliğine katkıda bulunabileceği fikrini desteklemektedir.

Makine ğrenimi algoritmaları, kapsamlı inşaat verilerini analiz edebilir, kalıpları belirleyebilir ve kalite sorunlarını tahmin ederek kalite kontrolünü ve kusur tespitini geliştirebilmektedir (Tian vd. 2019). Bulgu, makine öğreniminin sonuçları kalite iyileştirme potansiyelini vurgulayan önceki araştırmalarla aynı çizgidedir.

6. SONUÇLAR

Günümüzde pek çok sektörde olduğu gibi yapım sektöründe de geleneksel üretim yöntemlerinin yetersiz kaldığı görülmektedir. Sektördeki hızlı değişimlerle birlikte yeni yöntem ve tekniklere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Yapım faaliyeti tasarımdan teslim tüm süreçleri kapsayan ve genellikle GPTS'nin uygulandığı bir yapıya sahiptir. Artık yeterince verimli olmayan bu sisteme alternatif olarak son yıllarda YPTS kavramı ortaya çıkmıştır. YPTS, kullanıcı taleplerini merkeze alarak, israfı önleyerek, mümkün olan en az maliyet ve sürede proje teslimini gerçekleştirmeyi hedef alan bir proje teslim sistemidir. Bu hedefi sağlarken temel ilke yapım sürecinde iken değeri olmayan faaliyetlerin tespit edilmesi ve ortadan kaldırılmasıdır. GPTS'de ise, sapmaya neden olan faaliyetler ancak tüm iş kalemleri tamamlandıktan sonra tespit edilebilir. Dolayısıyla sapmalar önlenemediği gibi sapmaya neden olan kaynakları bulmak da oldukça güçtür. YPTS ise yalın düşünce temelli çalışarak, süreçlerde katma değeri olmayan kayıpları önceden analiz eder ve kayıpları önlemeye yönelik sistematik uygulamalara imkan tanır.

Benzer olarak artan ve farklılaşan ihtiyaçlarla birlikte sanayi devrimiyle başlayan süreçten günümüze endüstri teknolojileri de birçok sektörde etkisini göstermektedir. Endüstri 4.0 teknolojileri olarak tanımlanan teknolojiler yapım sektöründe de yerini almaktadır. Ancak Endüstri 4.0 teknolojilerinin tek başına kullanılması yeterli değildir. Söz konusu teknolojilerin bir yönetim anlayışıyla birlikte kullanılması önem arz etmektedir. Bu bağlamda günümüzde yeni bir yöntem olarak teknolojinin YPTS sürecine entegrasyonu bir gereklilik haline gelmiştir. Bu çalışmada Türkiye'deki YPTS uygulamalarının hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayacak Endüstri 4.0 teknolojileri belirlenmiş ve söz konusu teknolojilere sektörün ana aktörleri olarak yapı uzmanlarının bakış açılarının ortaya konulmasına çalışılmaktadır.

Araştırmanın örneklemini belirlenirken YPTS ve Endüstri 4.0 hakkında bilgisi olan yapı uzmanları, popülasyonun sınırlılığını oluşturmaktadır. Türkiye'de yalın inşaat anlayışının farkındalığının yetersiz oluşu bu alanda çalışan yapım sektörü firmalarının yaygın olmamasına sebep olmuştur. Bu nedenle anket Türkiye'de yalın inşaat anlayışıyla hareket ettiği tespit edilen 5 firmanın çalışanlarından 300 katılımcıya uygulanan anket çalışmasıyla ilk olarak katılımcıların YPTS ve Endüstri 4.0 teknolojileri konusundaki farkındalık düzeyleri tespit edilmiştir. Daha sonra yapım sektöründe YPTS sistemine entegre edilebilecek Endüstri 4.0 teknolojileri literatür araştırması sonucu tanımlanmıştır. Yapım süreci hem tasarım hem yapım faaliyetleri ile bütüncül bir sürece sahip olduğu için hem tasarım hem yapımda rol alan yalın prensip ve teknikler ile Endüstri 4.0 teknolojileri ilişkilendirilmiş ve yalın inşaat sürecinde tasarımdan teslim kadar kullanılabilecek 6 temel Endüstri 4.0 teknolojisi tespit edilmiştir. Bu teknolojiler; büyük veri ve veri analitiği, bulut bilişim sistemi, dijital ikiz/simülasyon, sanal ve artırılmış gerçeklik ve makine öğrenimidir. Katılımcıların söz konusu teknolojilerin YPTS'nin süre, maliyet ve kalite hedeflerine katkısı hakkındaki görüşleri arasındaki korelasyon değerlendirilmiş, görüşler ayrıca mesleki deneyim süresi ve meslek disiplini açısından da karşılaştırılmaktadır.

Çalışma sonuçları yapı uzmanlarının yalın inşaat ve Endüstri 4.0 teknolojilerine ilişkin farkındalık seviyelerinin, her iki kavramı da benimseme yönünde olumlu bir eğilime işaret ettiğini ortaya koysa da yalın ilkeler, teknikler ve Endüstri 4.0 teknolojileri ile ilgili farklı düzeylerde aşinalık olduğu tespit edilmektedir. Yalın prensiplerden "Kaizen" ve Endüstri 4.0 teknolojilerinden "Sanal ve Artırılmış Gerçeklik" in ağırlıklı

olarak tanınıyor olması bu kavramların benimsenmesinde ve anlaşılmasında olumlu bir ilerleme olarak yorumlanmıştır. Bununla birlikte yalın prensiplerden "Jidoka" ve Endüstri 4.0 teknolojilerinden "Auto-ID" konusundaki farkındalığın düşük olması, inşaat projelerinde bu prensip ve teknolojilerin kullanımlarını teşvik etmek için eğitim programlarına ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu bağlamda gerek yalın üretim prensip ve teknikleri gerekse Endüstri 4.0 teknolojileri konusundaki mevcut bilgi açığını kapatmak, yalın tekniklerin ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin başarılı bir şekilde entegrasyonuna katkıda bulunarak inşaat sektöründe ilerlemeye imkan tanıyacaktır.

Bu çalışma ayrıca inşaat sürecinin farklı aşamalarında israf oluşumunu önemli ölçüde etkileyen faktörlere de ışık tutmaktadır. Bulgular yapım sürecinin her aşamasında farklı israf türlerinin bulunduğunu, bunlardan sözleşme belgeleri, uygun olmayan ürün kullanımı, malzeme kontrolü, kazalar ve israf yönetimi planları ile ilgili konuların ele alınmasının önemini vurgulamaktadır. Söz konusu faktörlere ilişkin çözüm önerileri geliştirerek yapım sürecinde israfların etkili bir şekilde azaltılması ve böylelikle verimliliğin artırılması da mümkün olacaktır.

Yapı uzmanlarının YPTS sürecine entegre edilebilecek teknolojilere bakış açısı değerlendirildiğinde sonuçlar büyük veri ve veri analitiği teknolojisinin yalın inşaat maliyet ve zaman üzerindeki etkisi açısından en yüksek korelasyonu tanımlayarak, bulut bilişim yoluyla maliyet yönetimindeki iyileştirmelerin proje çizelgeleme ve zaman verimliliği üzerindeki olumlu etkilerle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, yalın inşaat sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin kalite ve zamana etkisi arasında en düşük korelasyon gözlenmektedir. Diğer taraftan bu bulgulara neden olan temel faktörleri tanımlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu açıktır. Endüstri 4.0 teknolojilerini YPTS'ye entegre etmek, inşaat sektöründe süre, maliyet ve kaliteyi iyileştirmek için umut verici fırsatlar sunmaktadır. Çalışmanın bulguları, çeşitli teknolojiler arasındaki pozitif ve anlamlı ilişkileri ve bunların farklı proje boyutları üzerindeki etkilerini desteklemektedir. Hem tasarım hem yapım aşamasında tespit edilen Endüstri 4.0 teknolojilerinin, yalın inşaat uygulamalarını geliştirme potansiyellerini göstermektedir. Sektörde bu teknolojiler arasındaki bağımlılıkları ve korelasyonları anlamak YPTS'nin geliştirilmesi için değerli bilgiler sunacaktır.

Çalışmada farklı meslek disiplinleri arasındaki algılarda önemli farklılıkların bulunmaması, farklı rollerdeki yapı uzmanlarının Endüstri 4.0 teknolojilerini entegre etmenin potansiyel faydalarını kabul ettiğini ve bunların zaman, maliyet ve kalite yönleri üzerindeki etkileri konusunda ortak bir anlayışı paylaştığını göstermesi şeklinde yorumlamak mümkündür. Bu sonuç Endüstri 4.0 teknolojilerinin başarılı bir şekilde uygulanmasının ortak bir vizyon ve çeşitli inşaat paydaşlarının ortak çabalarını gerektirdiği fikrini desteklemektedir.

Yapı uzmanlarının mesleki deneyiminin, yalın inşaat büyük veri ve veri analitiği, bulut bilişim sistemi, sanal ve artırılmış gerçeklik, eklemeli üretim ve makine öğrenimi teknolojilerinin süre, maliyet ve kalite üzerindeki etkilerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu teknolojiler, ilgili boyutlar üzerinde önemli etkiler göstermektedir.

Özetle bu teknolojilerin yalın yapı ile entegrasyonu endüstri için büyük umut vaat etmektedir. İnşaat şirketleri, yeteneklerini kullanarak kaynakların teminini optimize edebilir, proje planlamasını ve yürütmesini iyileştirebilir, iş birliğini geliştirebilir ve sonuçta daha kısa zaman dilimlerinde ve daha düşük maliyetlerle daha yüksek kaliteli

projeler sunabilir. Farklı teknolojilerin yalın inşaat bağlamındaki etkilerini anlamının öneminin vurgulanması çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. İlgili teknolojilerden etkin bir şekilde yararlanarak, inşaat projelerinin süre, maliyet ve kalite hedeflerine daha başarılı bir şekilde ulaşmak mümkün olabilecektir. Anket sonuçlarının da ortaya koyduğu üzere yapı uzmanlarının bu konudaki tecrübe eksikliği sağlanacak faydanın sınırlı olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmanın kapsamlı bir literatür araştırması içermesi nedeniyle bu alanda yapılacak bilimsel araştırmalara altlık niteliği taşıyarak bilim alanına katkı sağlaması beklenmektedir. Ayrıca sektördeki bilgi eksikliğini ortaya koyması nedeniyle gerek lisans gerekse lisansüstü programlarda söz konusu alanlarda eğitim programlarının geliştirilmesi, sektörel eğitimler verilmesi için mevcut sistemdeki boşluğa işaret etmesi, başta yapım uzmanları olmak üzere diğer paydaşlarda da farkındalık yaratması nedeniyle uygulama alanına da katkı sağlaması hedeflenmektedir. Çalışma her ne kadar kapsamlı bir araştırmanın sonuç ürünü olsa da elde edilen bulguların uygulama alanında test edilmemiş olması çalışmanın sınırlılığını oluşturmaktadır. Gelecekte çalışma kapsamında benimsenen Endüstri 4.0 teknolojilerinin YPTS sürecinde test edilmesinin YPTS'nin gelişimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Achatz, R., Beetz, K., Broy, M., Dämbkes, H., Damm, W., Grimm, K. and Liggesmeyer, P. 2009. Nationale Roadmap Embedded Systems. ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik-undElektronikindustrie eV), Kompetenzzentrum Embedded Software & Systems.
- Adapure, M., Schwegmann, C. and Grau, D. 2019. Information technology acceptance in the architecture, engineering, and construction industry: A review. *Journal of Information Technology in Construction*, 182-200.
- Akil, Y. 2019. Tasarımından Uygulamaya Yalın İnşaat Yaklaşımı: Antalya Konut İnşaat Sektörü Üzerinde Bir Çalışma. Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Akintoye, A., McIntosh, G. and Fitzgerald E. 2018. Building Information Modeling (BIM) and virtual reality technologies in construction: Insights for sustainable development. *Sustainability*, 2737.
- Akyıldız, M. 2018. Üretim Yönetimi. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Alarcon, L. F., Proverbs, D. G. and Olomolaiye, P. O. 2018. Addressing waste on construction sites: A study of the use of lean construction techniques. *Journal of Environmental Management*, 451-462.
- Alçın, S. 2016. A New Theme For Production: Industry 4.0. *Endüstri 4.0 ve İnsan Kaynakları. Popüler Yönetim Dergisi*, 47.
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M. and Mohammadi, M. 2015. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2347-2376.
- Andrews, I. 2019. Identification of and Correction for Publication Bias.» *American Economic Review*, 2766-2794.
- Aomar, Raid Al. 2012. A lean construction framework with Six Sigma rating. *International Journal of Lean Six Sigma*.
- Arashpour, M., Wakefield, R., Blismas, N. and Lee, EWM. 2014. Analysis of disruptions caused by construction fieldwork on productivity in residential projects. *Journal of Construcion Engineering and Management*, 15-27.
- Ashton, K. 2009. That “Internet of Things” Thing: In the Real World Things Matter More than Ideas. *RFID Journal*.

- Aydın, N. 2015. Yalın Düşünce Sisteminin Üretime Sağladığı Katkılar. ABMYO Dergisi, 23-37.
- Azuma, R. T., Bailliot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. and MacIntyre, B. 1999. Recent advances in augmented reality. IEEE Computer Graphics and Applications, 34-47.
- Bahrin, M. A. K. 2016. Industry 4.0: A Review on Industrial Automation and Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) (Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)), 137-143.
- Ballard, G. and Howell, G. A. 2003. Lean project management. Building Research and Information.
- Ballard, G. and Zabelle, T. 2000. Lean Project Delivery System. Lean Construction Institute, 9.
- Ballard, J. G. 2008. The lean project delivery system: An update. University of California, Berkeley.
- Ballard, J. G. 2000. The Lean Project Delivery System™ 3, LPDS.
- Barbosa, F., et al. 2017. Reinventing construction through a productivity revolution. McKinsey Global Institute.
- Bartodziej, C. J. 2016. The Concept Industry 4.0.
- Başer, N. E. 2011. I. Sanayi Devriminde. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Bauer, H., Brandl, F., Lock, C. and Reinhart, G. 2018. Integration of Industrie 4.0 in Lean Manufacturing Learning Factories. Procedia Manufacturing, 23, 147-152.
- Bauernhansl, T., Hompel, M. T. and Vogel-Heuser, B. 2014. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg.
- BCG. 26 02 2015. https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_projec.
- Benbelkacem, S., et al. 2011. Augmented Reality Platform for Collaborative E-Maintenance Systems. Augmented Reality - Some Emerging Application Areas içinde, yazan Andrew Yeh Ching. London, UK: InTech.
- Braglia, M., Gionata Carmignani, ve Francesco Aldo Zammori. 2006. A new value stream mapping approach for complex production systems. International Journal of Production Research, 44(18): 3929-3952.

- Brettell, C. B. and Hollifield, J. F. 2014. Routledg.
- Brissi, S. G., Chong, O. W., Debs, L. and Zhang, J. 2021. A review on the interactions of robotic systems and lean principles in offsite construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 383-406.
- Bronack, S. C. 2011. The Role of Immersive Media in Online Education. *The Journal of Continuing Higher Education*, 113-117.
- Brunner, F. J. 2011. *Japanische Erfolgskonzepte: Kaizen, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance Shopfloor Management, Toyota Production System*. München, Germany: Hanser.
- Bulut, E., ve Akçacı, T. 2017. Endüstri 4.0 Ve İnovasyon Göstergeleri Kapsamında Türkiye Analizi. *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, 55-77.
- Buswell, R. A., Thorpe, T., Soar, R. and Austin, S. A. 2018. Multi-material 3D printing for construction of energy efficient buildings. *Automation in Construction*, 135-144.
- Chen, P. -T. , Lin, C. -L. and Wu, W. -N. 2020. Big data management in healthcare: Adoption challenges and implications. *International Journal of Information Management*.
- Cheng, T., Wu, P. and Teizer, J. 2018. Smart construction resource optimization using site-embedded automated construction equipment and construction resource data mining. *Automation in Construction*, 169-182.
- Chiabert, P., and Sini, F. 2020. Lean management in Additive manufacturing: a methodological proposal for quality control. Turin, Italy: Politecnico Di Torino, Master's Degree Course in Engineering and Management.
- Chileshe, N., Ndekugri, I., Rameezdeen, R. and Hoss, M. R. 2021. An integrated approach for safety performance improvement in the construction industry. *Safety Science*, 139.
- Chua, J., Basit, A. and Hassan, Z. 2018. Leadership Style and Its Impact on Employee Performance. *International Journal of Accounting & Business Management*.
- Cimorelli, S. C., and Chandler, G. 1996. Control Of Production And Materials. In: J.M. Walker.» *Handbook Of Manufacturing Engineering*, 507-574.
- Coleman, B. J., and Vaghefi, M. R. 1994. A Key To The Toyota Production System. *Production and Inventory Management Journal*; Fourth Quarter, 31.

- Coussement, K., Benoit, D. F. and Antioco, M. 2015. A Bayesian approach for incorporating expert opinions into decision support systems: A case study of online consumer-satisfaction detection. *Decision Support Systems*, 79(4): 24-32.
- Çakırlı Akyüz, N. ve Çetin, C. 2009. Yalın Organizasyon İlkeleri Ve Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma. İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul.
- Çanakçıoğlu, M. 2019. Yalın Düşünce Felsefesinde İsrarla Mücadele Araçları. *Social Sciences Research*, 270-282.
- Çankır, B. 2010. Yalın Düşünce Sistemini Uygulayan Kurumlarla Uygulamayan Kurumlarda Çalışanlarda Örgütsel Vatandaşlık Davranışı. Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Çankır, B. 2010. Yalın Düşünce Sistemini Uygulayan Kurumlarla Uygulamayan Kurumlarda Çalışanlarda Örgütsel Vatandaşlık Davranışı. Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Çiftci, S., Sağlam, A. ve Yayla, A. 2021. 21. yüzyıl becerileri bağlamında öğrenci, öğretmen ve eğitim ortamları. *Journal of Language and Literature Studies*.
- Çilhoroz, Y., ve Arslan, İ. 2018. Yalın Yönetim Yaklaşımı ve Sağlık Hizmetlerinde Uygulamaları. Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta, 156-185.
- Çukur, İ., Oylum, F. ve Sıcakyüz, A. 2017. Dijital Dönüşümün İş Süreçlerine Etkileri. İstanbul: MÜSİAD.
- Dainty, A. R., Bagilhole, B. M. and Neale, R. H. 2018. A gendered perspective on social sustainability in construction: The significance of feminization. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 370-383.
- Davutoğlu, N. A., Akgül, B. ve Yıldız, E. 2017. İşletme Yönetiminde Sanayi 4.0 Kavramı ile Farkındalık Oluşturarak Etkin Bir Şekilde Değişimi Sağlamak. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 544-567.
- Devadasan, S.R., Sivakumar, M.V., Muruges, R. and Shalij, P.R. 2012. Lean and Agile Manufacturing Theoretical. Practical and Research Futurities, PHI Learning, New Delhi.
- Ding, K. and Pingyu Jiang. 2017. RFID-based production data analysis in an IoT-enabled smart job-shop. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 1-11.

- Dixit, S., Mandal, S. N., Thanikal, J. V. and Saurabh, K. 2017. Evolution of studies in construction productivity: Asystematic literatüre review. *Ain Shams Engineering Journal*, 555-564.
- Dombrowski, U., Richter, T. and Krenkel, P. 2017. Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 1061-1068.
- Drath, R., and Horch, A. 2014. Industrie 4.0: Hit or Hype. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 56-58.
- Duman, E. 2011. Krizlerin Anatomisi: 1929 Ekonomik Buhranı Ve 2008 Küresel Krizi'nin Karşılaştırılması. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi*, 1-10.
- Dürkop, L. and Jasperneite, J. 2016. "Plug & Produce" als Anwendungsfall von Industrie 4.0.» *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2: Automatisierung içinde*, yazar Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl ve Michael ten Hompel, 59-71. Berlin, Germany: Springer Vieweg.
- EBSO. 2015. İzmir: Ege Bölgesi Sanayi Odası.
- El Sakka, F. and Hamzeh, F. 2017. 3d Concrete Printing in the Service of Lean Construction.» *Heraklion, Greece: 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 781-788.
- Elghdhan, M. G., Azmy, N. B., Zulkiple, A. B. and Al-Sharafi, M. A. 2020. Factors Affecting the Adoption of Advanced IT with Specific Emphasis on Building Information Modeling Based on TOE Framework: A Systematic Review. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 3314-3333.
- El-Sayegh, S., Romdhane, L. ve Manjikian, S. 2020. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(2): 34.
- Erbaş, Ç. ve Demirer, V. 2015. Eğitimde Artırılmış Gerçeklik Uygulamaları: Google Glass Örneği.» *Öğretim Teknolojileri ve Öğretmen Eğitimi Dergisi*.
- Evcimen, T. U. 2021. İnşaat Yönetiminde Yeni Nesil Yaklaşımlar-1 Yalın ve Çevik yönetim. *İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi*.
- Farmer, M. 2016. The farmer review of the UK construction labour model. *United Kingdom: Construction Leadership Council*.
- Feldmann, C. and Gorj, A. 2017. 3D-Druck und Lean Production. *Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien*.

- Fescioglu-Unver, N., Choi, S. H., Sheen, D. and Kumara, S. 2015. RFID in production and service systems: Technology, applications and issuesvol. Information Systems Frontiers, 17(6): 1369-1380.
- Frazier, W. E. 2014. Metal Additive Manufacturing: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance, 23: 1917-1928.
- Gallo, T., Cagnetti, C., Silvestri, C. and Ruggieri, A. 2021. Industry 4.0 tools in Lean production: A systematic literature review. Procedia Computer Science, 180, 394-403.
- Geng, H. 2016. John Wiley & Sons. Internet of Things and Data Analytics Handbook.
- Ghasemzadeh, F., Laitinen, J., Junnonen, J. M. and Sivunen, A. 1994. Identification of challenges for integrating BIM and IoT in construction project management. Automation in Construction, 42-55.
- Gherardi, S. and Nicolini, N. 2018. The power of play in digitalization of work. Journal of Management Inquiry, 42-57.
- Golchev, R. 2019. Inter-dependencies between Lean Manufacturing and Industry 4.0 - A systematic state of the art literature review. Politecnico Milano.
- Gonzalez, V. A., Hamzeh, F. and Alarcón, L. F. 2022. Lean Construction 4.0 Driving a Digital Revolution of Production Management in the AEC Industry. London, UK: Routledge.
- Gorecki, P. and Pautsch, P. R. 2014. Praxisbuch Lean Management: Der Weg zur operativen Excellence. München, Germany: Hanser.
- Graham, M., Zook, M. and Boulton, A. 2014. Augmented Reality in Urban Places: Contested Content and the Duplicity of Code. Transactions of the Institute of British Geographers, 464-479.
- Gürgüze, G. ve Türkoğlu, İ. 2019. Robot Sistemlerinde Kullanılan Algoritmalar. Türk Doğa ve Fen Dergisi.
- Hamzeh, F., Gonzalez, V., Alarcon, L. F. and Khalife, S. 2021. Lean Construction 4.0: Exploring the Challenges of Development in the AEC Industry. Lima, Peru: 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC29), 207-216.
- Han, W. S., Aminah, M. Y., Syuhaida, I. and Aun, N. C. 2021. Reviewing the notions of construction project success. International Journal of Business and Management, 7(1): 90-101.

- Hansen, L. and Buzan, B. 2009. Beyond The Evolution of International Security Studies. Special Section on: Evolution of International Security Studies, 659-667.
- Hatoum, M. B., Nassereddine, H. and Badurdeen, F. 2021. Reengineering Construction Processes in the Era of Construction 4.0: A Lean-Based Framework.» Lima, Peru: 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC29), 403-412.
- Hatoum, M. B. and Nassereddine, H. 2022. Proposing a House of Lean Construction 4.0 from.» Lean Construction 4.0, Driving a Digital Revolution of Production Management in the AEC Industry Routledge içinde, yazan Vicente A. González, Farook Hamzeh ve Luis Fernando Alarcón, 50-67. London, UK: Routledge.
- Horikiri, T., Kieffer, D. and Tanaka, T. 2013. Oobeya Article 2009. Juan José Tamayo.
- Imai, M. 1986. Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success. McGraw-Hill, New York.
- Işıkdag, Ü. 2009. İnşaat Projelerinde Süresel Planlamayı Etkileyen Faktörler ve Etki Derecelerinin Türkiye Koşullarında Belirlenmesi. TMMOB.
- Izard, J. -B. et al. 2017. Large Scale 3D Printing with Cable-Driven Parallel. Construction Robotics, 1(1): 1-8.
- Jacobsson, M. and Roth, P. 2014. Towards a shift in mindset: partnering projects as engagement platforms. Construction Management and Economics, 32(5): 419-432.
- Jardine, A. K., Lin, D. and Banjevic, D. 2006. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing, 20(7): 1483-1510.
- Jewell, N. World's largest 3D-printed building opens in Dubai after 2 weeks of construction. Inhabitat. 17 Aralık 2019. <https://inhabitat.com/worlds-largest-3d-printed-building-opens-in-dubai-after-2-weeks-of-construction/> (02 02, 2023 tarihinde erişilmiştir).
- Ji, G., Yu, M., Tan, K. H., Kumar, A. and Gupta, S. 2022. Decision optimization in cooperation innovation: the impact of big data analytics capability and cooperative modes.» SN Operations Research Forum, 335.
- Kang, M. T., Lee, S., Park, S. and Cho, Y. K. 2020. RFID-based real-time location system for construction material management: Field test and case study.» Journal of Computing in Civil Engineering, 34.

- Karagöz, K. 2018. Post Truth Çağında Yayıncılığın Geleceği. TRT Akademi, 678-708.
- Karal, F. S. 2019. Dijital Dönüşümün Proje Yöneticilerinin Yetkinlikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Karimi, H. A. 2015. Indoor wayfinding and navigation. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Kaspar, S. and Schneider, M. 2015. Lean und Industrie 4.0 in der Intralogistik: Effizienzsteigerung durch Kombination der beiden Ansätze. Productivity Management, 5: 17-20.
- Kefe, I. ve Berikol, B.Z. 2018. Yalın Üretim Sistemi ve Muhasebeye Etkileri. ISMMO.
- Kieviet, A. 2016. Digitalisierung der Wertschöpfung: Auswirkung auf das Lean Management.» Erfolgsfaktor Lean Management 2.0: Wettbewerbsfähige Verschlanke auf nachhaltige und kundenorientierte Weise içinde, yazan Hansjörg Künzel. Berlin/Heidelberg, Germany: Springe.
- Kipper, G. and Rampolla, J. 2013. Augmented Reality: An Emerging Technologies Guide to AR.
- Klinc, R. and Turk, Z. 2019. Construction 4.0 - Digital Transformation of one of the Oldest Industries. Economic and Business Review, 21(3).
- Kolberg, D. and Zühlke, D. 2015. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. IFAC-PapersOnLine, 48(3): 1870-1875.
- Koskela, L. 1992. Appllication of The New Production Philosophy to Construction. CIFE Technical Report 72, Stanford University, England.
- Koskela, L., Howell, G. and Tommelein, I. 2002. The Foundation Of Lean Construction. Resaerch Gate Publication.
- Kosleka, L. J. and Howell, G. 2002. Perceived Benefits of Using Value Engineering on Road Projects in Ghana. The Underlying Theory of Project Management Is Obsolete. Proceedings of PMI Research Conference. Washington, 293-302.
- Kömürcü, A. M. 2007. İnşaat Sektöründe Yalın Proje Yönetimi. Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Köroğlu, V. and Koç, M. 2017. Stratejik Yönetim Açısından Taylorizm Prensiplerinin Zamanımıza Yansımaları. Çağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi.

- Künzel, H. 2016. Erfolgsfaktor Lean Management 2.0: Wettbewerbsfähige Verschlinkung auf nachhaltige und kundenorientierte Weise. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer Gabler.
- Lacour, F. -F. 2021. Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen. München, Germany: Herbert Utz Verlag.
- Lasi, H., Fettke, P. and Kemper, H. G. 2014. Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, 239-242.
- Lekan, A., Clinton, A., Sunday, O., Fayomi, I. ve James, O. 2020. Lean Thinking and Industrial 4.0 Approach to Achieving Construction 4.0 for Industrialization and Technological Development. Buildings, 10(12): 221.
- Li, Y. and Skitmore, M. 2020. Integrating Building Information Modeling (BIM) and Industry 4.0 for smarter construction. Journal of Cleaner Production, 272.
- Liker, J. K. and Morgan, J. M. 2006. The Toyota way in services: the case of lean product development. The Academy of Management Perspectives, 5-20.
- Liker, J. K. 2004. The Toyota Way, 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer. New York: McGraw-Hill.
- Liker, J. K. 2021. The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer (2nd ed.). New York, ABD: McGraw-Hill.
- Lucke, D., Defranceski, M. and Adolf, T. 2017. Cyberphysische Systeme für die prädiktive Instandhaltung. Handbuch Industrie 4.0 Bd.1: Produktion içinde, yazar Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl ve Michael ten Hompel, 75-91. Berlin, Germany: Springer Vieweg.
- Maarof, M. G. and Mahmud, F. 2016. A Review of Contributing Factors and Challenges in Implementing Kaizen in Small and Medium Enterprises. Procedia Economics and Finance, 35(35): 522-531.
- Mahamid, I., El-Gohary, N. and El-Diraby, T. 2020. A Comprehensive Framework for Developing Technological Solutions for Construction Workforce Safety. Journal of Construction Engineering and Management, 146.
- Mahdavi, S. H. and Bentley, P. J. 2006. Innately adaptive robotics through embodied evolution. Proc. of the European Conference on Artificial Life.
- Manuel, S. and Vieire, O. 2009. Lean Project Ececution System-LPES.

- Maraşlı, H., Akça, C. ve Kama, A. 2016. Yalın Düşünce ve Değer Akış Haritalamasının Dondurma Üretim İşletmesinde Uygulanması. *International Journal of Academic Value Studies*, 106-120.
- Marchwinski, C., Shook, J. ve Schroeder, A. 2012. Yalın Kavram Sözlüğü. Optimist.
- Mayr , A., et al. 2018. Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 72, 622-628.
- McKone, K. E., Schroeder, R. G. ve Cua, K O. 2001. The Impact of Total. *Journal of Operations Management* 19, 39-58.
- Meudt, T., Roessler, M., Böllhoff, J. and Metternich, J. 2016. Wertstromanalyse 4.0: Ganzheitliche Betrachtung von Wertstrom und Informationslogistik in der Produktion. *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(6): 319-323.
- Michels, J. 2016. Praxisbeispiel: Intelligente Feldgeräte und selbstkorrigierende Fertigung.» *Industrie 4.0 im internationalen Kontext: Kernkonzepte, Ergebnisse, Trends içinde*, yazan Ronald Heinze, Christian Manzei ve Linus Schleupner, 162-166. Berlin, Germany: Beuth, VDE Verlag GmbH.
- Mrugalska, B. and Wyrwicka, M. K. 2017. Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering*, 182(3): 466-473.
- Naylor, J., Naim, M. M. and Danny, B. 1999. Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain. *International Journal of Production Economics*, 107-118.
- Nesan, L. J, and Holt, G. D. 1999. Empowerment in Construction: The Way Forward for Performance Improvement. Research Studies Press, Baldock.
- Nihal, T. Ö., Arslan, E., Kaya, S., Keskin, Z., ve Yiğit Ö. 2015. Sağlık kuruluşlarında yalın yönetim anlayışının değerlendirilmesinde bir eğitim araştırma hastanesi örneği. *Sağlık Akademisyenleri Dergisi*, 34-39.
- Ogunde, A., Ahiaga-Dagbui, D. and Edwards, D. J. 2019. Leadership style and project success: the role of frontline managers in construction project delivery. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 316-333.
- Orbak, A. Y. ve Bilgin S. 2005. Kanban Sisteminin Bir Uygulama Örneği. V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 25-27.
- Owusu-Manu, De -Graft , Caleb Debrah, Lydia Amissah, ve David J Edwards. «Exploring the linkages between project managers' mindset behaviour and project

- leadership style in the Ghanaian construction industry.» Engineering, Construction and Architectural Management, 2020.
- Öksüz, M. K., Öner, M. ve Öner, S. C. 2017. Yalın Üretim Tekniklerinin Endüstri 4.0 Perspektifinden. 4. Uluslararası Bölgesel Kalkınma Konferansı. Tunceli: Munzur Üniversitesi, 21-23.
- Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R. and Torabmostaedi, H. 2018. A systematic review of augmented reality applications in maintenance. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 49: 215-228.
- Porter, M. E. and Heppelmann, J. E. 2014. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. Harvard Business Review, 64-88.
- Pourrostan, T., Arashpour, M. and Safari, A. 2021. A systematic review of lean construction and Industry 4.0 integration: A step toward future development.» Journal of Management in Engineering, 37.
- Pötters, P., Klöckner, I. and Leyendecker, B. 2017. Gamification in der Montage. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 112(3): 163-167.
- Rammelmeier, T., Galka, S. and Günthner, W. A. 2012. Fehlervermeidung in der Kommissionierung. Logistics Journal Proceedings, 1-8.
- Razkenari, M., Fenner, A., Shojaei, A., Hakim, H. and Kibert, C. 2020. Perceptions of ofsite construction in the United States: An investigation of current practices. Journal of Building Engineering, 29, 101138.
- RiskOptics. Applying Big Data to Risk Management. RiskOptics. 1 Haziran 2021. <https://reciprocity.com/blog/applying-big-data-to-risk-management/> (Mart 2, 2022 tarihinde erişilmiştir).
- Rüßmann, M., et al. 2015. Industry 4.0: The Future of. The Boston Consulting Group.
- Sacks, R., Barak, R. and Belmaker, I. 2019. BIM and lean construction: Organizational and contractual considerations for the EPC industry. Journal of Management in Engineering, 1185.
- Sanchez, M., Exposito, E. and Aguilar, J. 2020. Industry 4.0: survey from a system integration perspective. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 33: 10-11.
- Sanders, A., Elangeswaran, C. and Wulfsberg, J. P. 2016. Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. Journal of Industrial Engineering and Management, 9(3): 811.

- Satoğlu, Ş., Üstündağ, A., Çevikcan, E. ve Durmuşoğlu, M. B. 2018. Lean Production Systems for Industry 4.0. Industry 4.0: Managing The Digital Transformation içinde, yazar Alp Üstündağ ve Emre Çevikcan, 43-59. Springer.
- Savcı, M. ve Haftacı, V. 2017. Değer Zinciri Analizinde Değer Yaratan Faaliyetlerin Ölçülmesinde Faaliyet Tabanlı Maliyetlemenin (Ftm) Rolünün Değerlendirilmesi. Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi.
- Sawhney, A., Riley, M. and Irizarry, J. 2020. Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment (1st ed.). London, UK: Routledge.
- Schwab, K. 2016. The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum, 31.
- Seed, W. R. 2015. Transforming Design and Construction: A Framework for Change. Lean Construction Institute.
- Shah, R. and Ward, P. T. 2003. Lean Manufacturing: Context, Practice. Journal of Operations Management, 49-129.
- Sharma, V., Dixit, A. R. and Qadri, M. A. 2016. Modeling Lean implementation for manufacturing sector. Journal of Modelling in Management, 11(2): 405-426.
- Solms, V. and Niekerk, V. J. 2013. From Information Security to Cyber Security. Computers & Security, 97-102.
- Soylu, A. 2018. Endüstri 4.0 Ve Girişimcilikte Yeni Yaklaşımlar. Denizli: Pamukkale University Journal of Social Sciences Institute.
- Srinivasan, G. and G Ganesh Prasad. 2017. The role of Intelligent Automation, Big Data and Internet of Things in Manufacturing - A Survey. Imperial Journal of Interdisci, 3(5): 934-940.
- Su, J., Ahn, C. R. and Kim, H. 2019. Promoting circular economy in the construction industry: A review. Journal of Cleaner Production, 1185.
- Süzen, E., İsmailoğlu, A. ve Kalyoncu, E. 2017. Sürdürülebilirlik, Yalın Üretim, Verimlilik Ve Yalınlık Kavramlarının Uygulamaları. Uluslararası Hakemli Ekonomi Yönetimi Araştırmaları Dergisi, 54-73.
- Şimşek İlkım, Neslihan , ve Neslihan Derin. «Dünyadan ve Türkiye’den Örneklerle Sağlık Hizmetlerinde Yalın Yönetim.» Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi, 2016: 481-502.
- Teeuwen, B., and Grombach, A. 2015. SMED: Die Erfolgsmethode für schnelles Rüsten und Umstellen. Herrieden, Germany: CETPM Publishing.

- Teizer, J., Cheng, T. and Fang, Y. 2017. Earthwork automation for excavation processes using on-site sensing and off-site optimization. *Automation in Construction*, 59-71.
- Tian, W., Kong, X., Wang, J., Xiong, B. and Skitmore, M. 2019. Applying machine learning in construction defect detection: A review and future directions. *Automation in Construction*, 103-116.
- Tissir, S., El Fezazi, S. and Cherrafi, A. 2020. Industry 4.0 impact on Lean Manufacturing: Literature Review. *IEEE 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (Logistiqua. Fez, Morocco: IEEE*, 1-5.
- Tokat, A. 2015. Türk Yapım Şantiyelerindeki İsratların ve Nedenlerinin Tespit Edilmesi ve Yalın İnşaat Uygulamalarıyla Çözüm Önerisi Geliştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Tokdemir, O. B. 2017. Yalın İnşaat. ODTÜ İnşaat Mühendisliği, Ankara.
- Toker, E. 2022. Yalın Düşünce Yöntemine Dayalı Kauçuk Hortum İmalatında Değer Akışı Haritalandırma Analizi. Maltepe Üniversitesi.
- Tschöpe, S., Aronska, K. and Nyhuis, P. 2015. Was ist eigentlich Industrie 4.0? *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110, 3, 145-149.
- Turner, L. A., Christensen, L. B. ve Johnson, R. B. 2015. Araştırma Yöntemleri Desen ve Analiz. Anı Yayıncılık, Ankara.
- Türkan, Ö. U. 2010. Üretimde Yalın Dönüşümün Temel Performans Kriterleri. *Journal of Balıkesir University Institute of Science and Technology*, 28-41.
- TÜSİAD. 2016. Türkiye'nin Küresel Rekabetçiliği İçin Bir Gereklik Olarak Sanayi 4.0. İstanbul: TÜSİAD.
- Uğur, İ., ve Şebnem Ceylan Apaydın. 2014. Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarının Reklam Beğeni Düzeyindeki Rolü. *E-Journal of New World Sciences Academy*, 146-156.
- Vaidya, S., Ambad, P. and Bhosle, S. 2018. Industry 4.0 - A glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238.
- Wagner, T., Herrmann, C. and Thiede, S. 2017. Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems. *Procedia CIRP*, 63: 125-131.
- Wilson, R. W. 2009. Mixed Methods. *Encyclopedia of Social and Cultural Foundations of Education*, 507-710.

- Womack, J. P., Jones, D. T. and Ross, D. 1990. The Machine that Changed the World. New.
- Womack, J. P., ve Jones, D. 2003. Yalın Düşünce. Optimist Yayın Dağıtım.
- Womack, J. P., and Jones, D. T. 1996. From lean production to the lean enterprise.» IEEE Engineering Management Review.
- Womack, J. P., Jones, D. T. ve Roos, D. 1990. Dünyayı Değiştiren Makina. Otomotiv Sanayi Derneği.
- Xu, G., Li, M., Chen, C. H. and Wei, Y. 2018. Cloud asset-enabled integrated IoT platform for lean prefabricated construction. Automation in Construction, 93, 123-134.
- Yıldırım, . 2019. Endüstri 4.0'a Kapsamlı Bir Bakış: 2011'den Bugüne. Düzce Üniversitesi.
- Yin, S., Du, W., Zhang, Q. and Liu, Y. 2022. An integrated BIM-based decision support system for optimizing construction material selection. Automation in Construction, 118.
- Yuan, Z., Wang, J., Li, X. and Wang, X. 2019. Construction waste reduction through an integrated management model: The case of China. Sustainability, 572.
- Zhang, C., Alashwal, M. A. and El Asmar, M. 2021. A systematic literature review of the impact of BIM on construction project performance. Automation in Construction, 125.
- Zurawski, R. 2014. Industrial Communication Technology Handbook, Second Edition. Hoboken: CRC Press.
- Zühlke, D. 2010. SmartFactory-Towards a factory-of-things. Annual Reviews in Control, 34(1): 129-138.

8. EKLER

‘Yapım Sektöründe Yalın Proje Teslim Sistemine Entegre Edilebilecek Endüstri 4.0 Teknolojileri ve Yapı Uzmanlarının Bakış Açısı’ Anket Formu

Bu anket Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalında Doç. Dr. İkbâl Erbaş danışmanlığında yürütülen yüksek lisans çalışmasına aittir. Endüstriyel verimlilik yönetiminin ihtiyacına cevap veren bir çözüm olarak ortaya çıkan Yalın Proje Teslim Sistemini benimseyen sektörler, güvenilir iş akışı oluşturarak, her türlü israfı yok ederek ve daha hızlı ürün yönetimi sağlayarak ortaya çıkacak ürünün verimliliğini artırmaya odaklanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sektörlerden biri olan yapım sektörü, Yalın Proje Teslim Sisteminin kendi bünyesine adaptasyonunu sağlamıştır. Aynı zamanda gelişen teknoloji beraberinde yalın üretim anlayışını da geliştirmiş ve farklı teknolojik uygulamalar yalın üretim sürecinin hedeflerine ulaşmasında önemli bir araç haline gelmiştir. Bu bağlamda farklı sektörlerde yalın üretim uygulamalarında kullanılan Endüstri 4.0 teknolojiler incelenerek bu teknolojilerin avantaj ve dezavantajları ortaya konulacak, yapım sektöründeki Yalın Proje Teslim Sistemlerine entegre edilebilecek teknolojilerin sizler açısından değerlendirilmesine yönelik hazırlanmıştır. Ankete katılım gönüllülük esasına dayanmaktadır. Ankete vereceğiniz cevaplar sadece çalışmayı yürüten araştırmacılar tarafından değerlendirilecek ve üçüncü şahıslarla paylaşılmayacaktır. Anketi cevaplarken anket sonuçlarının bilimsel bir araştırmayı etkileyeceğini bu nedenle cevaplarınızın doğru olması gerekliliğini lütfen dikkate alınız. Desteğiniz ve araştırmaya yapacağınız katkı için şimdiden teşekkür ederiz.

Saygılarımızla,

Kübra Toprak

Mimar

Doç. Dr. İkbâl Erbaş

Akdeniz Üniversitesi Mimarlık Fakültesi

Öğr. Üyesi

Ankete katılımınızı onaylıyor musunuz?

- ☐ Evet
☐ Hayır

I. Bölüm: Kişisel Bilgiler

1. Cinsiyetiniz nedir?
☐ Kadın
☐ Erkek
2. Hangi yaş aralığındasınız?
☐ 21-30
☐ 31-40

- ☐ 41-50
 - ☐ 51-60
 - ☐ 61 yaş ve üzeri
3. Eğitim durumunuz nedir?
- ☐ Ön Lisans
 - ☐ Lisans
 - ☐ Yüksek Lisans
 - ☐ Doktora
4. Yapım sektöründe çalıştığınız yıl nedir?
- ☐ 0-5 yıl
 - ☐ 6-10 yıl
 - ☐ 11-15 yıl
 - ☐ 16-20 yıl
 - ☐ 21 yıl ve üzeri
5. Mesleğiniz nedir?
- ☐ Mimar
 - ☐ İnşaat Mühendisi
 - ☐ Elektrik Mühendisi
 - ☐ Makine Mühendisi
 - ☐ Diğer:
6. Şu anda çalıştığınız firmanızda pozisyonunuz nedir?
- ☐ Geliştirici
 - ☐ İşveren
 - ☐ Proje Yöneticisi
 - ☐ Mimar
 - ☐ İnşaat Mühendisi
 - ☐ Elektrik Mühendisi
 - ☐ Makine Mühendisi
 - ☐ Yüklenici
 - ☐ Alt Yüklenici
 - ☐ Proje Yönetim Danışmanı
 - ☐ Satın Alma Sorumlusu
 - ☐ Tedarikçi
 - ☐ Diğer:
7. Firmanızın yapım sektöründe bulunma yılı nedir?
- ☐ 0-5 yıl
 - ☐ 6-10 yıl
 - ☐ 11-15 yıl
 - ☐ 16-20 yıl
 - ☐ 21 yıl ve üzeri
8. Şu anda bulunduğunuz firmanın faaliyet alanı nedir?
- ☐ Konut
 - ☐ Ticari
 - ☐ Kültürel
 - ☐ Eğitim Yapıları

- ☐ Sağlık Yapıları
 - ☐ Altyapı
 - ☐ Karma Yapı
 - ☐ Diğer:
9. Yalın prensipler ve teknikler hakkında bilgi sahibi misiniz?
- ☐ Evet
 - ☐ Hayır
10. Eğer cevabınız evetse hangi yalın araç ve teknikler hakkında bilgi sahibisiniz? (Birden çok işaretleyebilirsiniz)
- ☐ Jidoka
 - ☐ Tam Zamanında Üretim (TZÜ)
 - ☐ Toplam Üretken Bakım (TÜB)
 - ☐ Kanban
 - ☐ Kaizen
 - ☐ Değer Akışı Haritalama
 - ☐ Hücresel Üretim
 - ☐ Heijunka
 - ☐ Bilgisayarla Bütünleşik Üretim
 - ☐ SMED
 - ☐ Poka-Yoke
 - ☐ Görsel Yönetim
 - ☐ Hoshin Kanri
11. Yalın inşaat hakkında bilgi sahibi misiniz?
- ☐ Evet
 - ☐ Hayır
12. Daha önce yalın inşaat projesinin tasarım ve/ veya yapımı aşamasında rol aldınız mı?
- ☐ Evet
 - ☐ Hayır
13. Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında bilgi sahibi misiniz?
- ☐ Evet
 - ☐ Hayır
14. Eğer cevabınız evetse hangi Endüstri 4.0 teknolojileri hakkında bilgi sahibisiniz? (Birden çok işaretleyebilirsiniz)
- ☐ Büyük Veri ve Veri Analitiği
 - ☐ Gerçek Zamanlı Bilgi İşlem
 - ☐ Bulut Bilişim Sistemi
 - ☐ Dijital İkiz/Simülasyon
 - ☐ Gömülü Sistemler
 - ☐ Auto-ID (RFID-RTLS vb. teknolojiler)
 - ☐ Mobil Teknolojiler
 - ☐ Sanal ve Artırılmış Gerçeklik
 - ☐ İnsan-Bilgisayar Etkileşimi
 - ☐ Otomatik Yönlendirmeli Araçlar
 - ☐ Robotik Sistemler

- ☐ Eklemeli Üretim
- ☐ Sensörler
- ☐ Siber Güvenlik
- ☐ Makine Öğrenimi

15. Yalın inşaatın Endüstri 4.0 teknolojileri ile birlikte kullanımı hakkında bilgi sahibi misiniz?

- ☐ Evet
- ☐ Hayır

II. Bölüm: Proje Teslim Sürecindeki İsafların Değerlendirilmesi

Aşağıda belirtilen faktörleri proje teslim sürecinde oluşan israfların önem derecelerinin belirlenmesi açısından değerlendiriniz. Anket cevapları çok önemsiz, önemsiz, kararsızım, önemli ve çok önemli olarak sıralanmıştır. Soruları dikkatlice okuduktan sonra işaretleyiniz.

A. TASARIM	Çok önemsiz	Önemsiz	Kararsızım	Önemli	Çok önemli
Sözleşme belgelerinin hatalı oluşu	☐	☐	☐	☐	☐
Yapımın başlangıcında sözleşme belgelerinin tamamlanmamış olması	☐	☐	☐	☐	☐
Tasarımın değişmesi	☐	☐	☐	☐	☐
Ürünlerin spesifikasyonunda alınan kararlar	☐	☐	☐	☐	☐
Düşük kalite ürünlerin seçilmesi	☐	☐	☐	☐	☐
Kullanılan ürünlerin boyutları konusunda dikkat eksikliği	☐	☐	☐	☐	☐
Tasarımcının farklı ürünlerin imkanlarına aşına olmaması	☐	☐	☐	☐	☐
Yüklenici deneyiminden tasarım aşamasında faydalanılamaması ve yapım konusunda bilgi eksikliği	☐	☐	☐	☐	☐

B. TEDARİK	Çok önemsiz	Önemsiz	Kararsızım	Önemli	Çok önemli
Sipariş hatası, fazla veya az sipariş vb.	☐	☐	☐	☐	☐

Az miktarda malzemenin sipariş edilmesinin mümkün olmaması	☐	☐	☐	☐	☐
Uygun olmayan ürünlerin kullanımı	☐	☐	☐	☐	☐

C. MALZEME VE TAŞIMA	Çok önemsiz	Önemsiz	Kararsızım	Önemli	Çok önemli
Malzemelerin şantiyeye taşınma/şantiyede taşınma esnasında zarar görmesi	☐	☐	☐	☐	☐
Malzemelerin uygunsuz depolama sebebiyle zarar görmesi	☐	☐	☐	☐	☐
Ambalajsız tedarik	☐	☐	☐	☐	☐
Tek kullanımlık ambalajlar	☐	☐	☐	☐	☐

D. OPERASYON/UYGULAMA	Çok önemsiz	Önemsiz	Kararsızım	Önemli	Çok önemli
Tedarikçi veya işçi hataları	☐	☐	☐	☐	☐
Ekipmanın kusurlu çalışması	☐	☐	☐	☐	☐
Sert hava koşulları	☐	☐	☐	☐	☐
Kazalar	☐	☐	☐	☐	☐
Sonradan ortaya çıkan işlerin sebep olduğu hasar	☐	☐	☐	☐	☐
Yanlış malzeme kullanılması, değişim gerekmesi	☐	☐	☐	☐	☐
Temel atma yöntemi	☐	☐	☐	☐	☐
Hatalı planlama sebebiyle kullanılacak malzemelerin miktarının bilinmemesi	☐	☐	☐	☐	☐
Kullanılacak ürünlerin çeşitleri ve boyutları ile ilgili bilgilerin yükleniciye geç ulaşması	☐	☐	☐	☐	☐

E. DİĞER	Çok önemsiz	Önemsiz	Kararsızım	Önemli	Çok önemli
Teknik yetersizlikler nedeniyle ilişkisiz ve fazla sayıda malzemenin bir arada kullanılması	☐	☐	☐	☐	☐
Şantiyedeki malzemelerinin	☐	☐	☐	☐	☐

kontrolünün eksikliği ve israf yönetim planının eksikliği					
Kötü niyet veya hırsızlık nedeniyle meydana gelen kayıplar	☐	☐	☐	☐	☐

III. Bölüm: Yalın İnşaat ve Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Değerlendirilmesi

Aşağıda yalın inşaat teknikleri ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin ilişkilendirilmesi yapılarak yalın inşaatın hem tasarım hem de yapım sürecinde uygulanabileceği teknolojiler belirtilmiştir. Anket cevapları belirtilen Endüstri 4.0 teknolojilerinin süre maliyet ve kaliteye etkisinin çok düşük, düşük, yüksek ve çok yüksek derecelendirilmesine göre sıralanmıştır. Soruları dikkatlice okuduktan sonra size uygun dereceyi seçiniz.

1. Büyük veri ve veri analitiği teknolojisinin yalın inşaat sürecine etkisi;

	Çok düşük	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süreye Etkisi	☐	☐	☐	☐
Maliyete Etkisi	☐	☐	☐	☐
Kaliteye Etkisi	☐	☐	☐	☐

2. Bulut bilişim sistemi teknolojisinin yalın inşaat sürecine etkisi;

	Çok düşük	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süreye Etkisi	☐	☐	☐	☐
Maliyete Etkisi	☐	☐	☐	☐
Kaliteye Etkisi	☐	☐	☐	☐

3. Dijital ikiz/simülasyon teknolojisinin yalın inşaat sürecine etkisi;

	Çok düşük	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süreye Etkisi	☐	☐	☐	☐
Maliyete Etkisi	☐	☐	☐	☐
Kaliteye Etkisi	☐	☐	☐	☐

4. Sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin yalın inşaat sürecine etkisi;

	Çok düşük	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süreye Etkisi	☐	☐	☐	☐
Maliyete Etkisi	☐	☐	☐	☐
Kaliteye Etkisi	☐	☐	☐	☐

5. Eklemeli üretim teknolojisinin yalnız inşaat sürecine etkisi;

	Çok düşük	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süreye Etkisi	☐	☐	☐	☐
Maliyete Etkisi	☐	☐	☐	☐
Kaliteye Etkisi	☐	☐	☐	☐

6. Makine öğrenimi teknolojisinin yalnız inşaat sürecine etkisi;

	Çok düşük	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süreye Etkisi	☐	☐	☐	☐
Maliyete Etkisi	☐	☐	☐	☐
Kaliteye Etkisi	☐	☐	☐	☐

ÖZGEÇMİŞ

KÜBRA TOPRAK

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2020-2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2015-2019	İstanbul Okan Üniversitesi Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Mimar 2023-Devam Ediyor	Soyaş Grup Ankara
----------------------------	----------------------

ESERLER

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Toprak K., Erbaş İ. (2021). Contributions and Restrictions of Augmented Reality Implementations in Construction Management Process, 4th International Istanbul Scientific Research Congress, Istanbul, Turkey, pp.7-18.
- 2- Toprak K., Erbaş İ. (2021). Evaluation of the Contributions of the Lean Project Delivery System to Targets of Construction Contracts, 6th International Symposium on Architecture and Design, Istanbul, Turkey.