

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BİNA PROJELERİNİN YALIN İNŞAATINDA TAMPON YÖNETİMİYLE İSRAF
AZALTIMININ BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU YAKLAŞIMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Rajaa ABUELAISH

**ŞUBAT 2025
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BİNA PROJELERİNİN YALIN İNŞAATINDA TAMPON YÖNETİMİYLE İSRAF
AZALTIMININ BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU YAKLAŞIMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Rajaa ABUELAISH

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 / 02 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 26 / 02 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Vedat TOĞAN
ORCID : - - -

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

Öncelikle, bu anlamlı yolculukta bana sabır, güç ve irade bahşeden Yüce Allah’a en derin şükranlarımı sunuyorum. Onun lütfu ve rahmeti olmadan bu süreci tamamlamak mümkün olmazdı.

Bu vesileyle, yol boyunca sıcak sarılmalarıyla en büyük motivasyon kaynağım olan kızım Razan’a en içten minnettarlığımı ifade etmek istiyorum. Her adımda ışığım ve ilham kaynağım oldun.

Anneme, pes etme noktasına geldiğim anlarda gösterdiği sarsılmaz destek için minnettarım. Teşvikin bana devam etme ve sabretme gücü verdi. Uzakta olsalar da bana olan koşulsuz sevgileri ve destekleriyle başarımın temel taşlarından biri olan babama ve kız kardeşlerime teşekkür ederim. Bana olan inancınız bu zorluğun üstesinden gelmemde güçlü bir motivasyon kaynağı oldu.

Bu tezin danışmanı olan Prof. Dr. Vedat Toğan’a, hem akademik hem de kişisel olarak sağladığı paha biçilemez rehberlik ve destek için en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Mentorlüğünüz ve teşvikiniz, gelişimimde ve bu çalışmanın şekillenmesinde hayati bir rol oynadı.

Tez sürecim boyunca yapıcı geri bildirimleri ve değerli önerileriyle araştırmama büyük katkı sağlayan jüri üyelerim Prof. Dr. Tayfun Dede ve Doç. Dr. Gökhan Özçelik’e de sonsuz teşekkür ederim. Uzmanlığınız, çalışmamın zenginleşmesini sağladı.

Yapım Yönetimi ekibindeki arkadaşlarım Ümit Bahadır ve Dr. Fatemeh Mostofi’ye de destekleri ve teşvikleri için teşekkür ederim. Bu süreçteki dostluğunuz benim için çok değerliydi.

Akademik yolculuğumun bir parçası olan tüm hocalarıma rehberlikleri, bilgileri ve bana olan güvenleri için içten teşekkürlerimi sunuyorum. Katkılarınız, bu aşamaya ulaşmamda kritik bir rol oynadı. Son olarak, bu süreçte bana herhangi bir şekilde destek olan herkese şükranlarımı sunuyorum. Bu başarı, teşvikiniz, anlayışınız ve nezaketiniz olmadan mümkün olmazdı. Hepinize gönülden teşekkür ederim.

Rajaa Abuelaish

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bina Projelerinin Yalın İnşaatında Tampon Yönetimiyle İsraf Azaltımının Bilgisayar Simülasyonu Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı, baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Vedat TOĞAN’ın rehberliğinde tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, analizleri ilgili yöntem ve araçlarla gerçekleştirdiğimi, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun davrandığımı ve aksi bir durumun tespit edilmesi halinde her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/02/2025

Rajaa ABUELAISH

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	VI
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
ÖZET	XI
SUMMARY	XII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XIII
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	
1.1.1. Tampon Yönetimi	2
1.1.2. Yalın İnşaat	3
1.1.3. Tampon Yönetimi ve Yalın İnşaatın Sentezi	5
1.1.4. Tampon Yönetimine Yalın İnşaat Perspektifinden Bakış	6
1.2. Literatür Taraması.....	7
1.2.1. İnşaat Projelerinde Tampon Yönetimi	7
1.2.2. Yalın İnşaatta İsraf Türleri	12
1.3. Problem Tanımı ve Araştırma Boşluğu	20
1.4. Araştırmanın Amacı ve Hedefleri	21
1.5. Araştırmanın Önemi	22
1.6. Araştırma Metodolojisi	23
1.6.1. Araştırma Yaklaşımı	23
1.6.2. Araştırma Çerçevesi	25
1.6.3. Anket Çalışmaları	27
1.6.4. Yarı Yapılandırılmış Görüşmeler.....	31
1.6.5. Simülasyon Modeli	33
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	36
2.1. Yöntem Özeti.....	36
2.2. İş Akışı Değişkenlik Nedenlerine Yönelik Literatür İncelemesi	37
2.3. Anket Araştırması	46

2.3.1. Hedef Kitle ve Örneklem Yöntemi	47
2.3.2. Örneklem Büyüklüğü	48
2.3.3. Anket Tasarımı	49
2.3.4. Anketin Son Hali	54
2.3.5. Veri Analizi	55
2.4. Yarı Yapılandırılmış Görüşmeler	61
2.4.1. Görüşmelerin Amacı	62
2.4.2. Görüşmecilerin Profili	62
2.4.3. Görüşme Yapısı ve Soruları	63
2.4.4. Veri Yorumlama ve Çıkarımlar	64
2.5. Simülasyon Modeli	65
2.5.1. Projeye Genel Bakış	65
2.5.2. Simülasyon Tasarımı ve Kurulumu	67
2.5.3. Ayrıntılı Simülasyon Modeli	71
2.5.4. Senaryo Geliştirme ve Proje Performansı Üzerindeki Etkisi	77
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	81
3.1. İnşaat Projelerinde İş Akışı Değişkenliği Nedenleri	81
3.1.1. Katılımcı Profili	81
3.1.2. İş Akışı Değişkenliği Nedenlerinin Sıralaması	83
3.1.3. İş Akışı Değişkenliği Nedenlerinin Keşifsel Faktör Analizi	90
3.2. Uzman Görüşlerinin Simülasyon Modeline Entegrasyonu	107
3.2.1. İnşaat Projelerinde Kapasite Tamponlarının Stratejik Uygulaması	107
3.2.2. İnşaat Projelerinde İş Akışı Değişkenliğinin Sınıflandırılması	109
3.3. Simülasyon Modeli Sonuçlarının Analizi	110
3.3.1. En Uygun Kapasite Tamponunun Seçimi	113
3.3.2. En Uygun Kapasite Tamponunun Proje Performansı Üzerindeki Etkisi	122
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	132
4.1. Tez Çalışmasının Katkıları	135
4.2. Öneriler	136
4.3. Çalışmanın Sınırları	138
5. KAYNAKLAR	140
6. EKLER	164

ÖZGEÇMİŞ



Doktora Tezi

ÖZET

BİNA PROJELERİNİN YALIN İNŞAATINDA TAMPON YÖNETİMİYLE İSRAF AZALTIMININ BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU YAKLAŞIMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Rajaa ABUELAISH

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Vedat TOĞAN
2025, 163 Sayfa, 6 Sayfa Ek

İnşaat projeleri, karmaşıklık ve değişkenlik özellikleriyle tanımlanır ve bu durum, planlama verimliliği, maliyet kontrolü ve genel performans üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tampon yönetimi, değişkenliği azaltmada tanınmış bir yaklaşım olmasına rağmen, genellikle yalın inşaat prensipleriyle çelişkili olduğu şeklinde yanlış anlaşılmaktadır. Bu çalışma, inşaat projelerinde tampon yönetiminin atık azaltmadaki etkisini incelemek için karma yöntemli bir yaklaşım benimsemiştir. Değişkenliğin temel nedenlerini belirlemek amacıyla bir anket çalışması gerçekleştirilmiş, ardından yarı yapılandırılmış mülakatlar ile değişkenlik düzeyleri nicel olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgular temelinde, en uygun kapasite tamponlarının seçimini ve bunların proje performansı ve atık azaltma üzerindeki etkisini analiz etmek için bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Sonuçlar, tampon yönetiminin değişkenlik nedenlerinin analizi ile birleştirilmesinin, proje performansını artırdığını ve atıkları minimize ettiğini göstermektedir. Simülasyon sonuçları, değişkenlik analizi temelinde yapılan doğru planlama ve tampon uygulamalarının verimliliği optimize ettiğini ve yalın inşaat hedeflerini desteklediğini vurgulamaktadır. Bu araştırma, tampon yönetiminin yalın inşaat çerçevelerine entegre edilmesi için bilimsel bir temel sunmakta ve sürdürülebilir ve verimli proje teslimi için stratejik bir araç olarak benimsenmesini teşvik etmektedir.

Anahtar Kelimeler: İnşaat yönetimi, tampon yönetimi, yalın inşaat (LC), iş akışı
değişkenliği, ayrık olay simülasyonu

PhD. Thesis

SUMMARY

ASSESSMENT OF WASTE REDUCTION IN LEAN CONSTRUCTION OF BUILDING PROJECTS THROUGH BUFFER MANAGEMENT USING A COMPUTER SIMULATION APPROACH

Rajaa ABUELAISH

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Vedat TOĞAN
2025, 163 Pages, 6 Pages Appendix

Construction projects are characterized by complexity and variability, which significantly impact planning efficiency, cost control, and overall performance. Buffer management is a recognized approach for mitigating variability; however, it is often misinterpreted as contradictory to lean construction principles. This study investigates the impact of buffer management on waste reduction in construction projects by employing a mixed-method approach. A questionnaire survey was conducted to identify key causes of variability, followed by semi-structured interviews to quantify variability levels. Based on these findings, a simulation model was developed to analyze the selection of optimum capacity buffers and their effect on project performance and waste reduction. The results demonstrate that integrating buffer management with an analysis of variability causes enhances project performance and minimizes waste. Simulation outcomes highlight that accurate planning and application of buffers, grounded in variability analysis, optimize efficiency and support lean construction objectives. This research provides a scientific foundation for embedding buffer management within lean construction frameworks, encouraging its adoption as a strategic tool for achieving sustainable and efficient project delivery.

Key Words: Construction management, buffer management, lean construction (LC), workflow variability, discrete event simulation (DES)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İyileştirme döngüsü (Ballard, 2008).....	7
Şekil 2. Araştırma boşluklarının belirlenmesi ve tampon yönetimi çerçevesi	21
Şekil 3. Araştırma çerçevesi	27
Şekil 4. Anket çalışması yürütmenin temel adımları.....	28
Şekil 5. Simülasyon modeli geliştirme için yapılandırılmış yaklaşım	34
Şekil 6. İş akışı değişkenliği mekanizmalarının kavramsal modeli.....	38
Şekil 7. Keşifsel faktör analizi adımları (Williams vd., 2010).....	58
Şekil 8. Aktivite A ve B'nin akış şeması	68
Şekil 9. Faaliyetler arasındaki ilişkileri gösteren AON diyagramı.....	69
Şekil 10. %95 güven aralığı ile beş iterasyonun simülasyon sonuçları.....	71
Şekil 11. AnyLogic'te Aktivite A için DES mantıksal işlevler akış diyagram.....	74
Şekil 12. AnyLogic'te Aktivite B için DES mantıksal işlevler akış diyagramı.....	76
Şekil 13. A ve B aktivitelerinde kapasite yedekleme senaryoları için simülasyon arayüzü.....	78
Şekil 14. Anket yapılan şehirlerin frekansı	82
Şekil 15. Katılımcıların demografik profili	83
Şekil 16. İş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin faktör analizi sonucunda elde edilen veriler için verilen Scree plot.....	98
Şekil 17. İş akışı değişkenliği nedenlerinin bileşen diyagramı	102
Şekil 18. A ve B aktivitelerinin toplam süresine ilişkin AnyLogic çıktısı (Gün)	111
Şekil 19. A ve B aktivitelerinin her ekip için toplam çalışma saatlerine ilişkin Anylogic çıktısı.....	112
Şekil 20. Aktivite A için envanter boşaltma süresine ilişkin AnyLogic çıktısı.....	112
Şekil 21. Aktivite B için envanter boşaltma süresine ilişkin AnyLogic çıktısı.....	113
Şekil 22. Farklı zaman/maliyet ağırlıkları ile en yüksek puan ve seçilen kapasite tamponları.....	116
Şekil 23. Aktivite A ve B'deki değişkenlik oranlarına göre zaman iyileştirmesi	124
Şekil 24. Aktivite A ve B'deki değişkenlik oranlarına göre maliyet iyileştirmesi	126
Şekil 25. Aktivite A ve B'deki değişkenlik oranlarına göre stok atığı iyileştirmesi.....	128
Şekil 26. Aktivite A ve B'deki değişkenlik oranlarına göre bekleme atığı iyileştirmesi.....	129

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Tampon yönetimi ve yalın inşaat atıkları ile ilişkisine dair temel çalışmaların özeti	15
Tablo 2. İş akışı değişkenliği nedenleri üzerine önceki çalışmalar	39
Tablo 3. Faktörler üzerindeki araştırmacı düzenlemelerinin özeti	49
Tablo 4. Yapısal geçerlilik sonuçları	52
Tablo 5. Anketin nihai haline getirilme süreci	54
Tablo 6. Araştırma soruları ve hipotezlere göre benimsenen istatistiksel yöntemler.....	56
Tablo 7. Görüşmecilerin demografik bilgileri	63
Tablo 8. AnyLogic Ajan Kütüphanesi öğeleri.....	72
Tablo 9. AnyLogic Süreç Modelleme Kütüphanesi öğeleri	73
Tablo 10. Farklı değişkenlik oranlarına göre faaliyet süre fonksiyonları.....	77
Tablo 11. Değişkenlik nedenlerinin sıralamaları.....	85
Tablo 12. KMO ve Bartlett küresellik testi	91
Tablo 13a. Korelasyon matrisi (Bölüm 1)	92
Tablo 13b. Korelasyon matrisi (Bölüm 2).....	93
Tablo 13c. Korelasyon matrisi (Bölüm 3)	94
Tablo 14. Değişkenlik nedenlerinin ortaklık değerleri	95
Tablo 15. EFA'nın son çalıştırması ile açıklanan toplam varyans	97
Tablo 16. Faktör analizinin son çalıştırması için döndürülmüş bileşen matrisi	99
Tablo 17. Değişkenlik nedenleri faktör analizinden çıkarılan faktörlerin nedenleri	100
Tablo 18. Değişkenlik nedenlerine ilişkin faktör analizinin nihai sonuçları	101
Tablo 19. En uygun kapasite tamponlarının değerlendirilmesi: senaryolar arasında normalize edilmiş metrikler ve ağırlıklı puanlar	117
Tablo 20. Senaryolar arasında en uygun kapasite tampon seçimleri.....	120
Tablo 21. En uygun kapasite tamponlarının senaryolar arasında proje süresi ve maliyeti üzerindeki etkisi.....	123
Tablo 22. En uygun kapasite tamponlarının senaryolar arasında stok ve bekleme atıkları iyileştirmesi üzerindeki etkisi.....	127

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABM	: Temsilci Tabanlı Modelleme (Agent-Based Modeling)
AON	: Düğüm Üzerinde Aktivite (Activity on Node)
CFA	: Doğrulayıcı Faktör Analizi (Confirmatory Factor Analysis)
DBB	: Tasarla-İhale Et-Yap (Design Bid Build)
DES	: Ayrık Olay Simülasyonu (Discrete Event Simulation)
EFA	: Keşifsel Faktör Analizi (Exploratory Factor Analysis)
KMO	: Kaiser-Meyer-Olkin
LC	: Yalın İnşaat (Lean Constructon)
LPS	: Son Planlayıcı Sistemi (Last Planner System)
MCDM	: Çok Kriterli Karar Verme (Multi-Criteria Decision-Making)
MS	: Ortalama Puan (Mean Score)
PAF	: Temel Eksen Faktörlemesi (Principal Axis Factoring)
PCA	: Temel Bileşenler Analizi (Principal Components Analysis)
RII	: Göreceli Önem Endeksi (Relative Importane Index)
SAW	: Basit Toplamsal Ağırlıklandırma (Simple Additive Weighting)
SD	: Sistem Dinamiği (System Dynamics)
TPS	: Toyota Üretim Sistemi (Toyota Production System)
WIP	: Süreç İçi Çalışma (Work-In-Process)
σ	: Standart Sapma (Standard Deviation)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnşaat sektörü, doğrudan ve dolaylı olarak etkilediği alanlar (mimarlık, mühendislik, müşavirlik vb.) ve sektörler (imalat, boya, plastik, vb.) ile ülkelerin ekonomik büyümesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, inşaat sektörünün performansını artırmak için karşılaştığı temel zorlukların belirlenmesi ve ele alınması kritik öneme sahiptir (Dixit vd., 2017; Mahamid vd., 2012; Öcal vd., 2007). Sektör, sayısız etkileşimli değişken ve zorlayıcı uygulama ortamlarında faaliyet gösteren çeşitli iş akışları ile doğası gereği karmaşık ve dinamiktir (Abusalem, 2020; Farag, 2014; Poshdar, 2015). Bu durum, projelerin nadiren planlandığı gibi ilerlemesi anlamına gelmekte ve bu tür öngörülemezliklerin yönetimi, projenin başarısı için kritik öneme sahip olmaktadır (Aziz & Hafez, 2013).

İş akışı değişkenliği, inşaat projesi performansını ve verimliliğini etkileyen önemli bir faktördür (Ballesteros-Pérez vd., 2020; Gupta vd., 2012; Salhab vd., 2022). Çok sayıda çalışma, iş akışı değişkenliğinin yaygın bir sorun olduğunu ve proje performansını, maliyet aşırımları ve zamanlama gecikmelerine neden olarak önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir (Farag, 2014; Poshdar, 2015; Thomas vd., 2002). Örneğin, Shen ve Chua (2005) faaliyet sürelerindeki artan değişkenliğin genel proje döngü süresini %12 oranında uzatabileceğini göstermişlerdir. Bu durum, değişkenliğin inşaat projelerinin sonuçları üzerinde önemli bir olumsuz etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır (Javanmardi vd., 2016; Poshdar, 2015).

Uygulamada inşaat faaliyetlerinin gerçek süreleri, süreçlerin doğasında bulunan değişkenlik nedeniyle başlangıç planlarından genellikle sapmakta ve görev gecikmelerine ve genel proje takviminde kesintilere yol açmaktadır (Ballesteros-Pérez vd., 2020; Garcia-Lopez & Fischer, 2024; Javanmardi vd., 2016; Russell vd., 2014). Bu iş akışı değişkenliğinin etkilerini azaltmak için inşaat projelerinde genellikle kesintileri absorbe etmek ve iş akışı istikrarını korumak amacıyla tamponlar (buffers) uygulanmaktadır (Ballard & Howell, 1998; Fireman vd., 2023). Tampon kullanarak projeler zamanlama, sıralama ve kaynak mevcudiyetindeki dalgalanmalara rağmen ilerlemeye daha az değişkenlikle devam edebilmektedir (González vd., 2011b; Jaśkowski vd., 2021).

Yalın İnşaat (Lean Construction, LC) atıkların ortadan kaldırılmasına ve inşaat süreçlerinin istikrarına odaklanarak güvenilir iş akışları sağlamayı amaçlayan temel bir yaklaşımdır (Hopp vd., 2004; Xue & Chen, 2013). Malzeme stokları, bütçe kontenjanları, zaman tamponları ve fazla ekipman kapasitesi gibi tampon sistemleri, inşaat projelerinde değişkenliğin olumsuz etkilerini azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Poshdar vd., 2018a). Ancak, tamponların verimsiz boyutlandırılması genellikle gereksiz zaman eklemelerine yol açarak atıkların artmasına ve proje takvimlerinin etkili bir şekilde korunamamasına neden olmaktadır (Dlouhy vd., 2019; Farag, 2014). Bu nedenle, değişkenliği en aza indirmek için tampon kullanımı ile yalın prensiplere dayalı üretim sistemi performansını optimize etmek arasında bir denge sağlanması, tamponların etkin yönetimi, atıkların ortadan kaldırılması ve iş akışı istikrarının korunması hedefine ulaşmak için anahtar rol oynamaktadır (Farag, 2014; González & Alarcón, 2010; Gupta vd., 2012).

1.1.1. Tampon Yönetimi

İş akışı değişkenliği, görevlerin sisteme nasıl aktarıldığı veya lokasyonlar arasında nasıl transfer edildiğine bağlı olarak ortaya çıkar. Değişkenliği azaltmanın etkili bir yöntemi tamponların dikkatli uygulanmasıdır (Bataglin vd., 2021). İş akışı değişkenliği genellikle tamponların stratejik kullanımıyla yönetilir. Bu tamponlar, üretim akışının kritik noktalarına yerleştirilerek belirsizliklerin etkisini hafifletir ve böylece iş gücü performansını artırır (González vd., 2011b; Horman & Thomas, 2005; Lindhard vd., 2019). Öngörülebilirlik sağlamak için değişkenliğin ortadan kaldırılması gereklidir; değişkenlik devam ettiğinde, tamponlar sistem performansı üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla devreye alınabilir (Tommelein, 2020).

Tampon yönetimi, belirsizliklere karşı koruma sağlayan ve proje değişikliklerinin olası etkisini en aza indiren sağlam bir inşaat planı oluşturmaya yöneliktir. Bu yönetim, belirsizlikleri etkin bir şekilde yönetmek için tamponların faaliyet ve proje seviyelerinde tüketim ve yenilenme durumunu değerlendirir. Böylece, tampon yönetimi, risklerin genel proje performansı üzerindeki kümülatif etkisini anlamaya yönelik kapsamlı bir bakış açısı sunar; bu da daha bilinçli karar verme süreçlerini ve iyileştirilmiş proje sonuçlarını mümkün kılar (Jan & Ho, 2006).

İnşaat sektöründe tamponlar zaman, kapasite veya stok gibi farklı kategorilere ayrılır (Ballard & Howell, 1998; Fireman vd., 2023; González vd., 2011b). Zaman tamponları

gecikmelerin etkisini absorbe etmek ve projenin zamanında tamamlanmasını sağlamak için programa eklenen ekstra zaman olarak temsil edilir (Hopp & Spearman, 2001; Moonseo & Feniosky, 2004; Poshdar vd., 2018a). Diğer yandan, kapasite tamponları iş gücü ve ekipman kapasitesinde ek esneklik sağlayarak taleplerdeki dalgalanmaları absorbe eder (González vd., 2009; Thomas vd., 2002). Stok tamponları ise hammadde ve işlemdeki iş stoklarını içerir. Tüm tamponlar, üretim sürecini koruyarak akıcı bir üretim sağlamayı amaçlar (González vd., 2011b; Horman & Thomas, 2005; Lindhard & Wandahl, 2014).

İnşaat projelerindeki büyük tamponlar, işin belirsizliklere rağmen ilerlemesini sağlayarak ayrıntılı planlama gereksinimini azaltır. Bu tamponlar esneklik sağlarken, gerçek değişkenlik düzeylerini ve verimsizlikleri gizleyebilir; böylece altta yatan iş akışı sorunlarının tespit edilmesini engelleyebilir (Gupta vd., 2012; Horman & Thomas, 2005; She vd., 2021). Bu nedenle, sistem verimsizliklerini açığa çıkarmak ve sürekli operasyonel akışı sağlamak amacıyla tedarik zinciri içinde tampon profillerini (özellikle tür, konum ve boyut açısından) tanımlamak önemlidir (Alves & Tommelein, 2004).

Geleneksel tampon yönetimi, genellikle yapılandırılmış bir yaklaşımdan ziyade deneyime dayandığı için zamanlama verimliliğini optimize etmede yetersiz kalır (Kim vd., 2006). Yalın inşaat perspektifinden bakıldığında, tampon yönetimi, Ballard (2008) tarafından vurgulandığı gibi sürekli iyileştirme döngüsünün bir parçasıdır. Değişkenlik en aza indirildikten sonra, tampon boyutları ve türleri sistemdeki gerçek değişkenlikle uyumlu olacak şekilde ayarlanır. Tamponların doğru seçimi ve boyutlandırılması, üretim sürecinin stabilizasyonunu sağlar. Son aşamada, tampon boyutları kasıtlı olarak, artık değişkenliği absorbe etmek için gerekli seviyenin altına indirilir; böylece sistemde daha fazla iyileştirme ve operasyonel verimlilik sağlanır (Eck, 2003; González vd., 2009).

1.1.2. Yalın İnşaat

Günümüz inşaat projeleri artan karmaşıklık, müşteri taleplerine bağlı değişiklikler ve belirsiz koşullar gibi zorluklarla karşı karşıyadırlar (Dixit vd., 2017; Mahamid vd., 2012; Öcal vd., 2007). Bu sorunlarla başa çıkmak için birçok strateji geliştirilmiş olup, LC öne çıkan yaklaşımlardan biri olarak kabul edilmektedir. LC, değer yaratımını en üst düzeye çıkarırken israfı en aza indirmeyi amaçlar ve proje yaşam döngüsü boyunca hem verimliliği hem de sürdürülebilirliği artırmayı hedefler (Farag, 2014; Koskela, 2000). Bu alandaki araştırmalar, etkin iş akışı yönetimi ve sahada tutarlı akışın, genel inşaat performansını

önemli ölçüde iyileştirdiğini vurgulamaktadır (Daliri vd., 2021; Garcia-Lopez & Fischer, 2016; Liu & Ballard, 2009; Thomas vd., 2002).

LC, inşaat sektöründe yenilikçi bir dönüşümü temsil eder ve geleneksel yöntemlerden belirgin bir şekilde ayrılır. İlk olarak üretim sektöründe geliştirilen yalın yaklaşım, süreç verimliliğini artırmak ve müşteriler için katma değer sağlamayan faaliyetleri ortadan kaldırmak amacıyla inşaat sektörüne entegre edilmiştir (Aziz & Hafez, 2013; Bajjou vd., 2017). Toyota Üretim Sistemi (Toyota Production System, TPS) kökenli Yalın yönetim, 1990'larda ortaya çıkmış ve araştırmacıların geleneksel üretim teorilerini sorgulamaya başlamasıyla inşaat sektörünü de etkilemiştir (Ulewicz & Ulewicz, 2020). Koskela (1992) tarafından sunulan Dönüşüm, Akış ve Değer (Transformation, Flow, and Value, TFFV) üretim teorisi, LC'nin temellerini atan bütünsel bir yaklaşım sunmuş ve LC'yi kendi başına bir disiplin olarak kabul edilen bir alan haline getirmiştir (Aziz & Hafez, 2013).

LC, süreçlerde sürekli iyileştirmeler yoluyla israfı tanımlayan ve ortadan kaldıran bir dizi araç, ilke ve üretim tekniğinden oluşur (Shaour, 2022). Marhani vd. (2013) göre LC, çeşitli parametrelerin iş birliğine dayalı bir yaklaşımla minimum israfta maksimum fayda veya üretim elde edilmesini amaçlar. Aynı zamanda, LC'nin başarılı bir şekilde uygulanması, inşaat sektörüne bağlı paydaşların bu yalın kavramları ve ilkeleri nasıl anladığı, uyguladığı ve pratiğe geçirdiği ile doğrudan ilişkilidir (Bhatnagar vd., 2022).

LC, geliştirilmiş proje performansı ile iş akışı değişkenliğinin etkin yönetimi arasındaki güçlü bağlantıya vurgu yapar. Yalın yönetim, iş akışı değişkenliğinin olumsuz etkilerini en aza indirmek ve planlama güvenilirliğini artırmak için üretim sistemi boyunca sürekli bir değer akışı sağlamayı hedefler. Bu hedef, israfın azaltılması ve üretim faaliyetlerinin analiz edilerek katma değer sağlayan ve sağlamayan süreçlerin ayrıştırılması yoluyla gerçekleştirilir (Sundar vd., 2014). LC araçları, israfı azaltarak, verimliliği artırarak ve iş akışını iyileştirerek teslimat sistemlerini ve süreçlerini güçlendirerek müşteri taleplerini karşılarken (Ansah vd., 2016), aynı zamanda gereksiz taşımalar, aşırı üretim, lüzumsuz işlemler, uzun teslimat süreleri, fazla stoklar, tekrar işleri ve gereksiz hareketler gibi verimsizlikleri ortadan kaldırarak hem proje performansını hem de sektörün finansal sonuçlarını iyileştirebilmektedir (Arbulu & Zabelle, 2006).

1.1.3. Tampon Yönetimi ve Yalın İnşaatın Sentezi

Üretim ve operasyonlarda iş akışı değişkenliğini yönetmeye yönelik hem teorik hem de pratik birçok araştırma bulunmaktadır. Bu bağlamda, önerilen çeşitli yönetim felsefeleri arasında yalın yaklaşım, özellikle üretim sistemlerinde önemli performans iyileştirmeleri sağlayarak etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Koskela, 1992). Yalın yaklaşım, akışa, değer zincirine ve israfın ortadan kaldırılmasına odaklanarak süreçlerin sürekli iyileştirilmesini vurgulamaktadır (Hopp & Spearman, 2011). Bu çerçevede değer, müşteri memnuniyetiyle tanımlanmakta olup, nihai ürüne doğrudan katkıda bulunmayan üretim sistemi bileşenleri israf olarak kabul edilmektedir (Poshdar, 2015).

LC kapsamında temel hedeflerden biri, üretim ağı boyunca bilgi ve malzeme akışını stabilize etmek ve değişkenliği azaltmaktır (Ballard, 2008; Ballard & Howell, 1998). Bu istikrarı sağlamak için kullanılan yöntemlerden biri de tamponların stratejik kullanımıdır. Kapasite, zaman veya stok şeklinde olabilen tamponlar, üretim süreçlerini dış etkenlerden ve bağımlı faaliyetlerdeki değişkenliklerden korur (González & Alarcón, 2010; Hopp & Spearman, 2011). Ancak, yalın düşünce tamponları değer yaratmayan unsurlar olarak kategorize eder ve bunların azaltılmasını veya tamamen ortadan kaldırılmasını önerir (Ranadewa vd., 2018; Saurin, 2017; Womack & Jones, 2003). Tamponların olmaması sıkı şekilde kontrol edilen iş akışlarında bile üretim sistemlerini daha yüksek kesinti riskiyle karşı karşıya bırakabilir (Erdmann vd., 2012). Sonuç olarak, tamponlar çoğu üretim sisteminde verimli üretim hızını sağlamak için pratik bir gereklilik olarak kalmaktadır (Erdmann vd., 2012; González vd., 2009; Womack & Jones, 2003). Yalın düşüncenin tamponları ortadan kaldırma ideali ile pratikte onlara duyulan ihtiyaç arasındaki bu gerilim, bir “denge sorunu” ortaya çıkarmaktadır. Fazla sayıda tampon verimsizlik ve israfa yol açarken, yetersiz tamponlar ise sistemi savunmasız hale getirmektedir. Bu nedenle tampon kullanımını optimize etmek ve inşaat sistemlerindeki performansı artırmak için doğru dengenin bulunması esastır (Poshdar, 2015).

Yalın inşaat prensiplerinin yaygın uygulanmasına rağmen, değişkenliğin tamamen ortadan kaldırılması nadirdir. Bu nedenle, yalın tekniklerin uygulanmasından sonra kalan değişkenliği absorbe etmek için tamponlar önemli bir araç olmaya devam etmektedir (Ballard, 2008). Horman (2000) tamponların iş akışı değişkenliği ve süreç gereksinimleri göz önünde bulundurularak doğru şekilde boyutlandırıldığında ve yerleştirildiğinde yalnızca sistemi korumakla kalmayıp aynı zamanda değişen koşullara uyum sağlayarak performansı

iyileştirebileceğini savunmaktadır. Ancak, yanlış tampon boyutlandırılması gereksiz zaman gecikmesine ve artan israfa yol açabilir. Bu nedenle, tampon yönetiminin optimize edilmesi, inşaat projelerinde yalın hedeflerle pratik gereksinimleri dengelemek için kritik bir strateji haline gelmektedir (Horman, 2000).

1.1.4. Tampon Yönetimine Yalın İnşaat Perspektifinden Bakış

İnşaat sektöründe geleneksel yönetim uygulamaları, genellikle sezgiye ve kişisel deneyime dayanmaktadır. Bu yaklaşım, yüzeysel analizlere yol açarak hatalı veya verimsiz kararlar alınmasına neden olmaktadır (Laufer vd., 1999). Geleneksel yöntemlerle tamponlar (özellikle zaman tamponları) çoğunlukla yanlış belirlenmekte ve bu durum ciddi mali kayıplara ve proje gecikmelerine yol açmaktadır. Tampon yönetiminde geleneksel yaklaşım, belirli aktivitelerin özelliklerini analiz etmeden yalnızca ek süre biçiminde genel bir önlem eklemeyi içerir. Bu genel yaklaşım, zaman performansını yeterince koruyamadığı için tamponları değişkenliğin üstesinden gelmeye yönelik bir araç yerine israf kaynağına dönüştürmektedir. Geleneksel tampon yönetimi, tamponları yalnızca değişkenlik için statik bir önlem olarak görmekte ve bunları stratejik bir planlama unsuru olarak değerlendirmemektedir. Bu yaklaşım, tamponların belirsizliklere karşı koruma sağlama amacını yerine getirmesini engellemekte ve yanlış yerleştirildiğinde tamponlar proje yürütme sürecinde verimsizliklere yol açabilmektedir (Lee vd., 2006). Thomas vd. (2002) göre, güvenilir olmayan akışlardan kaynaklanan değişkenliği yönetmek temel bir öneme sahiptir. Değişkenlik, yönetilebilir seviyelere indirilmeli ve kalan değişkenlik iş gücü yönetim stratejileri ile ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, istikrarlı bir iş akışı, güvenilir planlama ve iyileştirilmiş proje performansı sağlamaktadır (Shen & Chua, 2005; Wambeke, 2011).

Buna karşılık, yalın inşaat tampon yönetimine daha çok veriye dayalı ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır (Bataglin vd., 2021). Yalın perspektiften tampon yönetimi, Ballard (2008) tarafından önerilen ve Şekil 1’de gösterilen bir iyileştirme döngüsüdür. Yalın tampon yönetimi, tampon kullanımını düşünmeden önce değişkenliğin kök nedenlerini ele almalıdır (Lindhard vd., 2019). Taiichi Ohno tarafından dile getirilen "nehri alçaltarak kayaları ortaya çıkarma" prensibi, yalın felsefenin fazla tamponları azaltarak üretimi engelleyen temel sorunları ortaya çıkarma yaklaşımını yansıtmaktadır (Ayers, 2006; Farag vd., 2010).



Şekil 1. İyileştirme döngüsü (Ballard, 2008)

Değişkenliğin nedenleri ele alınıp en aza indirildiğinde, tamponlar yalnızca kalan değişkenliği karşılayacak şekilde stratejik ve hassas bir şekilde eklenebilir. Bu yaklaşım, tamponları artık israf olarak değil, projede istikrar ve akışı koruma için temel bir unsur olarak görmeyi sağlar (Tommelein, 2020).

Yalın tampon yönetimi tamponların dikkatlice seçilmesi, uygun boyutlandırılması ve dinamik yerleştirilmesi gerektiğini vurgular; tamponlar, gerçek zamanlı veriler ve projenin değişen ihtiyaçları doğrultusunda sürekli olarak uyarlanır (González vd., 2009). Bu iyileştirme döngüsü değişkenliği azaltma, tamponları kalan değişkenliğe uyarlama ve yeniden değerlendirme inşaat iş akışını stabilize eder ve genel proje performansını iyileştirir (Ballard, 2008).

1.2. Literatür Taraması

1.2.1. İnşaat Projelerinde Tampon Yönetimi

Proje ortamlarında belirsizliklerin yarattığı zorluklara karşı tampon kavramı, projelerin değişkenliğe karşı korunmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiştir (Zhao vd., 2020). Tamponlar, risk paylaşımı için etkili bir mekanizma sunarak belirsizlik, karmaşıklık ve muğlaklık içinde proje kontrolü için proaktif bir koruma sağlar (Fireman vd., 2023; Hamzeh, 2009; Hu vd., 2016; Pantouvakis & Manoliadis, 2006). Tampon büyüklüğü, proje takvimini önemli ölçüde etkiler (Tukel vd., 2006; Zhang & Wan, 2019). İnşaat projelerinde değişkenliğin olumsuz etkilerini hafifletmek için tampon kullanımı, özellikle verim kaybını azaltmada önemli bir stratejidir (Hopp & Spearman, 2011). İnşaat bağlamında tamponlar

genellikle üç kategoriye ayrılır: envanter tamponları, kapasite tamponları ve zaman tamponları. Her biri görev girdileri ve performansındaki değişkenlikleri absorbe edebilir (González & Alarcón, 2010; Gupta vd., 2012; Hamzeh, 2009).

Gelişen yönetim felsefeleri, özellikle yalın inşaat, tampon özelliklerinin dikkatli bir biçimde yönetimini vurgulamaktadır (Horman & Thomas, 2005). Tamponlar aşırı büyük olduğunda israfa yol açabilir, iş akışını engelleyebilir ve performansı düşürebilir (Liu vd., 2012; Park & Peña-Mora, 2004). Geleneksel tamponlama yöntemleri çoğu zaman sistematik bir şekilde yönetilmemiştir; bu durum tamponların yetersiz yerleştirilmesi ve boyutlandırılması gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Bu nedenle, tampon yönetimi, proje performansını artırmak için ele alınması gereken kritik bir konu olarak giderek daha fazla tanınmaktadır (Alves & Tommelein, 2004; Kim vd., 2006; Park & Peña-Mora, 2004).

İnşaat projelerinde tamponların etkili yönetimi için net ve kesin bir tanım gereklidir. İnşaat yönetiminde tampon, farklı üretim bileşenleri arasındaki uyumsuzlukları düzeltmek amacıyla tasarlanmış bir fazla kaynak (zaman, envanter veya kapasite) olarak tanımlanır (Hopp & Spearman, 2011). Tamponlar, operasyonların alt döngülerini doğrudan etkileşimden izole ederek bu döngülerin yukarı veya aşağı akıştaki süreçlere daha az bağımlı çalışmasını sağlar (Howell vd., 1993). Tamponlar, üretimi değişkenlikten koruyarak daha sorunsuz bir proje yürütülmesini sağlar (Alves & Tommelein, 2004; Lee vd., 2006). Tamponlar, işlem başlangıç tarihlerini korumak ve programdaki aksamaların yayılmasını önlemek için bilinçli olarak bırakılan boş zaman (mola) olarak konumlandırılır (Jaśkowski vd., 2021). Bu çalışmada tampon, gecikmeleri veya kesintileri absorbe ederek proje program performansını korumak için kullanılan herhangi bir ekstra zaman, envanter veya kapasite olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla tamponlama, bu kaynakların yönetimi yoluyla değişkenliği en aza indirmek ve iş akışı güvenilirliğini sağlamak anlamına gelir (Kim vd., 2006).

Bu bağlamda tampon yönetimi, riskleri hafifletmek ve proje sürekliliğini sağlamak amacıyla tamponların kasıtlı olarak planlanmasını, boyutlandırılmasını ve konumlandırılmasını içeren stratejik bir yaklaşım olarak görülmektedir (Farag, 2014; González & Alarcón, 2010). Proje koşullarının ve belirsizliklerin değişimine yanıt olarak tamponların sürekli olarak değerlendirilmesi ve ayarlanmasını kapsayan tampon yönetimi, kaynakların en iyi şekilde kullanılmasını ve iş akışının verimliliğinin devamını sağlar (González vd., 2011b; Jan & Ho, 2006).

İnşaat literatüründe tamponlar için maliyet, envanter, kapasite, zaman ve plan olmak üzere beş ana tür tanımlanmış ve farklı işlevleri ortaya konmuştur (Hopp & Spearman, 2011; Risner, 2010; Russell vd., 2015). Bu tampon türleri, alan, iş gücü, ekipman, malzemeler, bilgi, zaman ve para gibi çeşitli kaynaklarla ilişkilidir. Tamponlar, projenin ihtiyaçlarına göre değişen belirli işlevlerine dayanarak tanımlanır (Bataglin vd., 2021). Tarihsel olarak, çoğu inşaat planlayıcısı ve araştırmacısı zaman tamponunu baskın tampon türü olarak kabul etmiştir. Planlayıcılar genellikle projeyi korumak için proje zaman çizelgesine ek süre eklerken, araştırmacılar bu zaman tamponunu ekleme, çıkarma veya ayarlama yöntemlerini incelemiştir. Ancak, "tampon" terimi yalnızca zamanı değil, programın sorunsuz yürütülmesini sağlayan her türlü korumayı da kapsar (Kim vd., 2006).

Zaman tamponları, bir projedeki faaliyetleri, kendilerinden önceki görevlerde yaşanabilecek gecikmelerden korumak amacıyla kullanılan yaygın bir proje yönetim stratejisidir (Jaśkowski vd., 2021). Planlama aşamasında tahsis edilen ekstra süre olarak tanımlanan zaman tamponları, belirsizlikleri telafi etmek ve iş akışındaki değişkenliklere karşı korunmak için kullanılır (Russell vd., 2012; Russell vd., 2015). Bu tamponlar, faaliyet gecikmeleri, öngörülemeyen durumlar ve zaman tahminindeki olası hatalarla ilişkili riskleri hafifletmek amacıyla kullanılır. Proje yöneticileri, zaman tamponlarını dahil ederek, bireysel görevlerin veya genel projenin zamanında tamamlanmasını sağlamak ve proje yürütümündeki değişkenlikleri dikkate almak isterler. Bu proaktif yaklaşım, proje zaman çizelgesinin bütünlüğünü korumaya ve projenin genel güvenilirliğini artırmaya yardımcı olur.

Zaman tamponu, bir görevin planlanan veya programlanan süresi ile minimum olası süresi arasındaki farkı ifade eder. Minimum süre, malzeme, ekipman ve bilgi akışlarının düzgün olduğu ve planlamanın iyi bir şekilde yürütüldüğü durumlarda bir yüklenicinin elde edebileceği en iyi performansı yansıtır (Sakamoto vd., 2002). İnşaat sektöründe, projelerin değişken doğası göz önünde bulundurulmadan, proje programlarına sabit bir yaklaşımla zaman tamponları eklemek yaygındır. Örneğin, Poshdar vd. (2018a) birçok proje yöneticisinin kendi deneyimleri ve öngörülleri doğrultusunda her göreve belirli bir oranda ekstra zaman eklediğini vurgulamaktadır. Ancak, bu tür tahminler çoğunlukla öngörülemeyen sonuçlara yol açabilmektedir. Bunun yerine, tamponları gerektiğinde gerçek zamanlı olarak ayarlayabilen, esnek ve veri odaklı matematiksel modellere dayalı yöntemler daha güvenilir bir alternatif olmaktadır (Bataglin vd., 2021). Ayrıca, bir görevin planlanan süresinin ötesine geçen her uzatma, ancak o görevin performansı ile ilgili öngörülen riskler

gibi kabul edilebilir nedenlerle gerekçelendirilmelidir. Aksi takdirde, diğer faaliyetleri kontrol altına almak ve genel proje programını aşma riskini azaltmak için önlemler alınmalıdır (Barraza, 2011). Diğer bir yaklaşım, görevlerin değişkenliğini ve önemini dikkate alarak görevlere zaman tahsis eden bir tam sayılı doğrusal programlama modeli kullanmaktır (Galindo, 2000). Bu yaklaşım, süreci daha doğru ve güvenilir hale getirebilmektedir.

İnşaat projelerinde envanter tamponlarının stratejik kullanımı, envanter yönetimi ve iş akışındaki değişkenliği kontrol etme açısından önemli iyileştirmeler sağlayarak daha iyi proje sonuçlarına katkıda bulunabilir (González vd., 2006). Envanter kontrol stratejileri, üretim hedeflerine ulaşırken tedarik belirsizliklerine karşı üretim sistemini korumak amacıyla güvenlik stoğu (envanter tamponu) bulundurmaya odaklanır (Poshdar, 2015). İnşaatta üretimi yönetmek için iş seviyesinde envanter tamponları oluşturulur (Horman & Thomas, 2005). Envanter tamponları, hammadde, bileşenler, Süreç İçi Çalışma (Work-In-Process, WIP) ve bitmiş ürünler şeklinde olabilir (González & Alarcón, 2010; Horman, 2000).

Fazla malzemeler, tedarik zinciri değişkenliklerinden kaynaklanan dalgalanmalara karşı üretim akışını koruyan bir tampon görevi görür (Tommelein, 2003). Çok aşamalı üretim sistemlerinde, işlem aşamaları arasına yerleştirilen WIP stokları, değişkenlik ve süreçler arası bağımlılığın etkisini azaltır (González vd., 2006; González vd., 2009). Bu düzenleme, bir aşamada arıza yaşadığında, ardışık aşamaların tampon dolana veya boşalana kadar üretime devam edebilmesini sağlar ve böylece üretimin sürekliliği korunur (Russell vd., 2015). Sonuç olarak, fazla malzemeler veya WIP formundaki envanter tamponları, değişkenliği azaltmada ve üretim faaliyetlerinin devamlılığını sağlamada kritik bir rol oynar (González vd., 2011b).

Horman & Thomas (2005) envanter tamponları ile inşaat iş gücü performansı arasındaki ilişkiyi araştırmak için keşifsel bir analiz gerçekleştirmiş ve optimal envanter seviyelerinin iş gücü sonuçlarını iyileştirip iyileştirmediğini belirlemeyi hedeflemiştir. Bulguları, belirli bir envanter tampon düzeyinin iş gücü performansını iyileştirdiğini ve tampon büyüklüğü ile iş gücü verimliliği arasında bir bağlantı olduğunu göstermiştir. Envanter tamponları, çoğu zaman inşaat projelerinde sezgisel olarak kullanılarak beklenmedik kesintilere karşı faaliyetleri yastıklama işlevi görür. Ancak, doğru boyutlandırılmamış envanterler sorunlara yol açabilir: aşırı tamponlar tıkanıklığa neden olarak performansı düşürebilirken, yetersiz stok üretimi aksatabilir. Thomas vd. (2005)

inşaat sahalarında malzeme eksikliklerinin yaygın olduğunu ve bu durumun sıklıkla iş gücü performansını olumsuz etkilediğini gözlemlemiştir. Tecrübeli yöneticiler deneme-yanılma yoluyla uygun tampon boyutunu belirleme konusunda gelişme gösterse de birçok kişi doğru dengeyi bulmakta zorlanmaktadır. Bu nedenle, envanter tamponlarının doğru boyutu ve yerleşiminin belirlenmesi, özellikle değişken ve belirsiz koşullarda inşaat projelerinin performansı açısından kritik öneme sahiptir (Horman & Thomas, 2005).

İnşaat projelerinde kapasite tamponlarının kullanımı, üretim talebindeki değişkenlikleri absorbe etmek için başlangıçta öngörülenden daha fazla iş gücü ve ekipman sağlanmasını içerir (Hamzeh, 2009; Horman, 2000; Horman & Thomas, 2005). Bu yaklaşım, geleneksel yönetim teknikleriyle belirsizliği ve değişkenliği ortadan kaldırmanın zor olduğu durumlarda özellikle değer kazanır. Kapasite tamponlarının başlıca avantajı, beklenmedik durumlara hızla yanıt vererek üretimi hızlandırma olanağı sağlamalarıdır (Horman & Thomas, 2005).

Kapasite tamponları fazla mesai planlama, vardiya sayısını artırma, ek kaynak bulundurma, işin bir kısmını dış kaynaklara devretme veya kaynak gereksinimlerini azaltmak için ürün ya da süreçleri yeniden tasarlama gibi yöntemlerle oluşturulabilir (Alves, 2005; Horman & Thomas, 2005). Örneğin, fazla iş gücü sağlama, planlanmış fazla mesai veya aşırı iş gücü tahsisi (overmanning) şeklinde projelerin hızlandırılması için sıklıkla uygulanır (Thomas, 2000). Ayrıca, birden fazla görevi üstlenebilen işçiler de üretim yükündeki dalgalanmalara uyum sağlamak adına kapasite tamponu işlevi görebilir (Paige, 2002).

İnşaatta kapasite tamponları genellikle fazla iş gücü veya ekipman tahsisi şeklinde temsil edilir (González & Alarcón, 2010; Paige, 2002). Bu fazla iş gücü, talep belirsizliğinin olumsuz etkilerini azaltırken, ek ekipman, makine arızaları veya parça değişimi gibi aksaklıkların neden olduğu kesintilere karşı programı korur (González & Alarcón, 2010). Çalışmalar, kapasite tamponlarının projelerin süre ve maliyet açısından performansını iyileştirdiğini göstermektedir (Horman, 2000; Thomas, 2000); ancak, tamponların etkinliği projenin genel güvenilirliği ve istikrarına bağlıdır (Poshdar, 2015). İş gücünün aşırı tahsis edilmesi verimliliği düşürebilir ve fazla iş gücünü yedekte tutmak gereksiz maliyetlere yol açabilir (González & Alarcón, 2010).

1.2.2. Yalın İnşaat İsrat Türleri

Atık azaltımı, yalın düşüncenin temel bir prensibidir. Proje yöneticileri genellikle atığı fiziksel inşaat döküntüleriyle ilişkilendirirken, yalın düşünce, inşaat süreçlerine gömülü ve gözle görülmeyen önemli israf unsurlarını da tanımlar (Ansah vd., 2016; Igwe vd., 2022). LC çerçevesinde israf, nihai üründe değer yaratmayan kaynak tüketimi olarak ifade edilir (Bajjou vd., 2017). Bu bakış açısı hem değer katan hem de değer katmayan faaliyetlerin optimizasyonunun doğrudan israfın azaltılmasıyla ilişkilendirildiğini öne sürer (Igwe vd., 2022).

Yalın üretimde, her üretim döngüsündeki faaliyetler üç ana grupta sınıflandırılır: değer katan faaliyetler, değer katmayan ancak gerekli olan faaliyetler ve tamamen değer katmayan faaliyetler (Francis & Thomas, 2020). Değer katan faaliyetler, malzemelerin veya bilginin işlev, biçim veya durumunu müşteri gereksinimlerini karşılayacak şekilde değiştiren faaliyetlerdir (Diekmann vd., 2004). Bunlar, müşterinin ödeme yapmaya istekli olduğu belirli eylemlerdir. Buna karşılık, değer katmayan ancak gerekli faaliyetler, inşaat süreci için zorunlu olsa da doğrudan nihai ürüne katkı sağlamaz. Örnek olarak süreç denetimleri, malzeme taşıma ve geçici işler veya destek faaliyetleri verilebilir (Wandahl vd., 2021).

Değer katmayan faaliyetler, müşterinin arzuladığı ürün veya hizmetin değer yaratımına katkı sağlamaksızın kaynak, zaman veya alan tüketen faaliyetlerdir (Mossman, 2005). Yalın felsefe, yedi ana israf türünü belirler: taşıma, bekleme, aşırı üretim, kusurlar, envanter, hareket ve fazla işleme (Al-Aomar, 2012; Tafazzoli vd., 2020). Son dönemde yapılan araştırmalar, kullanılmayan çalışan yaratıcılığını sekizinci bir israf türü olarak eklemiştir (Antony vd., 2012; Bajjou vd., 2017). Sekiz ana israf türü aşağıdaki gibi açıklanabilir (Bajjou & Chafi, 2021; Francis & Thomas, 2020; Rahman vd., 2012):

- Aşırı üretim: Müşteri talebini aşan miktarda malzeme üretimi, iş gücü kullanımı veya ekipman tahsisi anlamına gelir. İhtiyaç duyulmadan yapılan bu fazlalık üretim, kaynakların verimsiz kullanımına yol açar ve genellikle fazla envanter, bekleme süreleri ve yeniden işleme gibi ek israf türlerini tetikler. Gereğinden fazla veya erken üretim, sıklıkla hem miktar hem de kalite sorunlarına neden olur.
- Gereksiz taşıma: Yarı mamul, bitmiş ürünler veya malzemelerin iş istasyonları arasında uzun mesafeler kat etmesi durumudur ve nihai ürüne değer katmaz. İnşaat projelerinde, verimsiz saha lojistiği ve zayıf tedarik zinciri yönetimi genellikle

gereksiz taşımalara yol açar, bu da proje maliyetlerini artırır ve değişkenliği artırarak israf olarak kabul edilir.

- Gereksiz hareket: Çalışanların araç, parça veya malzeme aramak, iş istasyonları arasında yürümek gibi değer katmayan fiziksel aktiviteleri içerir. İnşaatta, verimsiz saha yerleşim planlaması, gereksiz kaldırma, eğilme veya yer değiştirme gibi hareketlere yol açabilir, bu da verimliliği azaltır ve yaralanma riskini artırır. Bu tür israf, yetersiz iş yöntemleri, eksik ekipman veya düzensiz çalışma alanlarından kaynaklanabilir.
- Fazla envanter: Ham madde, yarı mamul veya bitmiş ürün fazlalığını ifade eder ve depolama, taşıma ve sorumluluk gibi ek maliyetlere yol açar. İnşaatta, fazla envanter, bozulma, hırsızlık veya yüksek sermaye maliyetleri ile iş alanının daralmasına neden olduğunda israf olur. Bu fazlalık, uzun tedarik sürelerine, malzeme hasarlarına ve artan taşıma ile depolama masraflarına yol açabilir.
- Bekleme: İşlerin hemen gerçekleştirilememesi nedeniyle iş gücü, malzeme, ekipman, bilgi veya onay gibi gerekli kaynakların eksikliğinden doğan zaman kaybıdır. İnşaat projelerinde süreçlerdeki yüksek değişkenlik sıklıkla iş akışını bozar ve sonraki işlerin uzun süre beklemesine yol açar. Örneğin, iş alanı, çizimler, talimatlar, denetimler veya diğer gerekli kaynakların gecikmesi nedeniyle işçi ve ekipmanların boşa kalması.
- Hatalar: Kusurlu ürün veya bileşenlerin denetimi, üretimi, tamiri, değiştirilmesi veya imhasını içerir. Bu faaliyetler, değerli zaman ve kaynakları tüketir, projenin genel performansını ve maliyet verimliliğini olumsuz etkiler. Çoğunlukla çizim veya inşaat hatalarından kaynaklanan kusurlu işler yeniden işleme gerektirir, bu da büyük bir israf türüdür.
- Aşırı işleme: Üretim sürecindeki verimsizlikleri ifade eder; yetersiz işleme eksikliklere yol açarken, aşırı işleme müşteri gereksinimlerini aşan gereksiz yüksek kalite üretir, bu durum her iki durumda da israf olarak kabul edilir.
- Kullanılmayan çalışan yaratıcılığı: Çalışanların potansiyelinin yetersiz kullanımı veya tamamen kullanılmaması nedeniyle beceri, fikir ve iyileştirme fırsatlarının kaybını ifade eder. Bu israf türü, yalnızca genel verimliliği azaltmakla kalmaz, aynı zamanda yeniliği ve çalışan bağlılığını da engeller, bu yüzden kritik bir iyileştirme alanıdır.

Proje verimliliğini artırmak için, atık faktörlerinin yalnızca malzeme israfıyla sınırlı kalmaksızın tüm atık türlerinin analiz edilmesi gereklidir. Bu sayede daha yalın ve etkili inşaat uygulamaları için potansiyel iyileştirme alanları belirlenebilir (Bajjou & Chafi, 2020). Atık türleri bölgeye ve sektöre göre değişiklik gösterir; her biri zaman, maliyet ve oluşum sıklığını farklı derecelerde etkiler (Aravindh vd., 2022). Bu atıkların ortaya çıkması genellikle birbirine bağlı faktörlerin birleşiminden kaynaklanır ve yetersiz planlama, tüm LC atık kategorileri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu ilişkiler, çeşitli LC atık türlerinin yalnızca birbirine bağlı olduğunu değil, aynı zamanda tek yönlü veya etkileşimli olarak birbirini etkileyebileceğini göstermektedir (Formoso vd., 2015).

Özellikle, "bekleme" ve "envanter" inşaat projelerindeki akışı etkileyen kritik bileşenler olup, genel proje performansı üzerinde en büyük etkiye sahiptir (Aravindh vd., 2022; Bajjou & Chafi, 2020; Igwe vd., 2022). Bu nedenle, bu çalışma bekleme süresi ve envanter atığını incelemeye odaklanmaktadır, çünkü bu iki atık türü proje verimliliği ve üretkenlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu iki atık türüne odaklanmak, kapasite tamponlarının gecikmeleri ve fazla envanteri nasıl en aza indirebileceğini hedefli bir değerlendirme ile ele almayı mümkün kılarak atık azaltımı ve geliştirilmiş proje sonuçlarına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Tampon yönetimi ve yalın inşaat atıklarıyla ilişkisine dair önceki araştırmaları kapsamlı bir şekilde anlamak amacıyla detaylı bir literatür incelemesi yapılmıştır. Tablo 1, anahtar çalışmaları özetleyerek bunların amaçlarını, metodolojilerini, sonuçlarını, tampon türlerini ve tampon seçiminde değişkenlik nedenlerini dikkate alıp almadıklarını vurgulamaktadır. Ayrıca, bu çalışmaların tampon yönetiminin atık minimizasyonu üzerindeki etkisini analiz edip etmediklerini, özellikle bekleme ve envanter atıkları üzerinde odaklanarak değerlendirmektedir. Bu analiz, mevcut araştırma alanını ortaya koymakta ve bu çalışmanın ele almayı hedeflediği kritik boşlukları belirlemeye yardımcı olmaktadır.

Tablo 1. Tampon yönetimi ve yalın inşaat atıkları ile ilişkisine dair temel çalışmaların özeti

Kaynak	Amaç	Yöntem	Sonuç	Tampon türü	Değişkenlik nedenlerine dayanıyor	Tamponun etkisi incelendi
Tommelein & Weissenberger (1999)	Çelik yapı tedarik ve inşaat süreçlerinde tamponların yerini ve rolünü analiz etmek	Çelik süreçlerine ilişkin vaka analizi	Çelik süreçlerindeki tedarik zinciri verimliliğini artırmak ve değişkenliği azaltmak için tamponların stratejik yerlerini belirledi	Envanter	Hayır	Süreç akışının iyileştirilmesine odaklanıldı
Sakamoto vd. (2002)	İnşaat projelerinde tampon boyutu ile proje performansı arasındaki ilişkiyi incelemek	Saha çalışması ve simülasyon analizi	Tampon boyutunun proje performansını etkilediğini, optimal tamponların verimliliği ve istikrarı artırdığını tespit etti.	Zaman ve Envanter	Hayır	Tampon etkisinin üretkenlik ve iş akışı istikrarı üzerindeki etkisini değerlendirdi.
Alves & Tommelein (2003)	HVAC sektöründe tamponlama ve gruplama uygulamalarının iş akışına etkilerini anlamak için araştırma yapmak	HVAC üretim süreçlerinde vaka çalışması ve saha gözlemleri	Aşırı toplu üretim ve uygunsuz tampon boyutlandırmanın verimsizliklere ve gecikmelere katkıda bulunduğunu belirtti.	Zaman ve Envanter	Hayır	İş akışı verimsizliği ve gecikmelerine odaklandı.
González vd. (2004)	Üretim yönetimi prensipleri ve BT araçları kullanarak tekrar eden inşaat projelerinde tamponlar tasarlamak	Tampon tasarımı için üretim yönetimi teorisi ve BT araçlarını birleştiren kavramsal çerçeve	Tekrarlayan projelerde akış güvenilirliğini ve performansını artırmak için sistematik bir tampon tasarım yaklaşımı önerdi.	Zaman ve Envanter	Hayır	Akış güvenilirliğini analiz etti.
Horman & Thomas (2005)	Envanter tamponlarının inşaat iş gücü performansına etkilerini araştırmak	Envanter seviyeleri ile iş gücü performansı arasındaki ilişkiyi analiz eden vaka çalışması	Optimum envanter tamponlarının iş gücü verimliliğini artırdığını ve kaynak yetersizliğinden kaynaklanan gecikmeleri azalttığını buldu.	Envanter	Hayır	İş gücü verimliliğini artırmayı amaçladı.
Alves vd. (2006)	Tampon yönetimi dahil olmak üzere üretim sistemlerini tasarlamak için simülasyon kullanımını araştırmak	Simülasyon modelleme ve vaka çalışması	Simülasyonun tampon boyutlarını ve konumlarını optimize ederek üretim istikrarını nasıl artırdığını gösterdi.	Zaman ve Envanter	Hayır	Tamponların üretim sistemi istikrarı üzerindeki etkisini değerlendirdi.

Tablo 1'nin devamı

González vd. (2006)	Tekrar eden bina projelerinde iş akışı güvenilirliğini artırmak için WIP tamponları tasarlamak	Tekrar eden inşaat projelerinde WIP tamponlarını tasarlamak ve optimize etmek için simülasyon kullanılan vaka çalışması	İyi tasarlanmış WIP tamponlarının iş akışı sürekliliğini geliştirdiğini ve tekrarlayan projelerde kesintileri azalttığını gösterdi.	Envanter	Hayır	İş akışı sürekliliğini analiz etti.
Jan & Ho (2006)	Tampon yönetiminin inşaat projelerinde planlama ve kontrol süreçlerini nasıl iyileştirebileceğini araştırmak	Tampon zamanlaması üzerine analitik çerçeve ve vaka çalışması	Etkin tampon yönetiminin zamanlama belirsizliklerini hafiflettiğini ve proje kontrolünü geliştirdiğini tespit etti.	Zaman	Hayır	Zamanlama güvenilirliğine odaklandı.
Kim vd. (2006)	İnşaat projeleri için bir atama tampon kontrol yöntemi geliştirmek	Analitik çerçeve ve simülasyon	Atama tampon kontrolünün iş akışlarını dengeleyebileceğini ve zamanlama güvenilirliğini artırabileceğini gösterdi.	Atama Tamponları	Hayır	İş akışı stabilizasyonuna odaklandı.
Lee vd. (2006)	Eş zamanlı tasarım ve inşaat projelerindeki hataları ve değişiklikleri yönetmek için bir güvenilirlik tamponlama yaklaşımı tanıtmak	Bir vaka çalışması ile desteklenen kavramsal çerçeve	Hata ve değişimleri absorbe etmek için istikrar ve güvenilirlik tamponlarının kullanımını vurguladı, proje esnekliğini artırdı.	Güvenilirlik ve Kararlılık Tamponları	Hayır	Hata ve değişikliklerin yönetimi üzerine yoğunlaştı.
Farag vd. (2010)	Karayolu inşaat süreçlerini iyileştirmek için bulanık mantığa dayalı bir tampon değerlendirme modelini LPS ile entegre etmek	Bulanık mantığa dayalı tampon değerlendirme modeli geliştirildi ve LPS™ ile entegre edilerek otoyol projelerine uygulandı	Tamponları sistematik olarak değerlendirmek ve uygulamak için bir çerçeve sağladı ve otoyol projelerinde iş akışı güvenilirliğini geliştirdi.	Zaman ve Kapasite	Evet, bulanık mantık yoluyla değişkenliği dikkate alır ancak belirli değişkenlik nedenlerini açıkça detaylandırmaz	İş akışı güvenilirliğini inceledi ancak israfı açıkça analiz etmedi.
Barraza (2011)	Olasılıksal yöntemler kullanarak proje süre tamponlarını tahmin etmek ve tahsis etmek	Olasılıksal modelleme ve analiz	Olasılık dağılımlarına dayalı zaman kontenjanı tahmin yöntemi geliştirdi, zamanlama güvenilirliğini artırdı.	Zaman	Hayır	Tampon etkisini proje zamanlama güvenilirliği üzerinde analiz etti.
González vd. (2011a)	İnşaat projelerinde iş gücü verimliliği ile WIP tamponları arasındaki ilişkiyi incelemek	WIP tampon seviyeleri ve iş gücü verimliliği analizi	WIP tampon boyutlarını optimize etmenin iş gücü verimliliğini artırdığını ve iş akışlarını dengelediğini buldu.	WIP	Hayır	Üretkenlik etkilerini araştırdı.

Tablo 1'nin devamı

González vd. (2011b)	Güvenilir Taahhüt Modeli kullanarak WIP tamponlarını yönetmenin proje performansını nasıl iyileştirebileceğini araştırmak	İnşaat projelerinde Güvenilir Taahhüt Modeli uygulayan vaka çalışması	Etkili WIP tampon yönetiminin zamanlama performansını geliştirdiğini ve kesintileri azalttığını tespit etti.	WIP	Hayır	Zamanlama performansına odaklandı.
Bie vd. (2012)	Kritik zincir zamanlamasında faaliyetler arasındaki bağımlılığı içeren bir tampon boyutlandırma yöntemi önermek	Analitik modelleme ve simülasyon	Aktivite bağımlılığını hesaba katarak zamanlama güvenilirliğini artırmak için tampon boyutlandırma yöntemi geliştirdi.	Zaman	Kısmen (bağımlılık faktörü olarak faaliyet)	Zamanlama performansını değerlendirdi.
Gupta vd. (2012)	İnşaat verimlilik ve tampon kullanımı arasındaki ilişkiyi araştırmak	Simülasyon tabanlı vaka çalışması	Uygun tampon tahsisinin verimliliği artırdığını ve sistem kesintilerini azalttığını buldu.	Zaman ve Envanter	Hayır	Üretkenlik üzerine yoğunlaştı.
Russell vd. (2012)	İnşaat projelerindeki görev sürelerindeki zaman tamponlarının nedenlerini belirlemek	Saha çalışması ve veri analizi	Zaman tamponu gereksinimlerine katkıda bulunan faktörleri, özellikle değişkenlik ve belirsizliği vurguladı.	Zaman	Kısmen (varyasyon nedenlerini belirler ancak açık bir entegrasyon içermez)	Görev süresi güvenilirliğine etkisini değerlendirdi.
Farag (2014)	İş akışı güvenilirliğini artırmak ve varyasyonu azaltmak için bulanık tabanlı bir tampon boyutlandırma modeli geliştirmek	Bulanık mantık modelleme	Belirsizlikleri ve değişkenlikleri hesaba katarak güvenilirliği artıran bir tampon boyutlandırma modeli önerdi.	Zaman	Evet (varyasyonu tampon boyutlandırma için girdi olarak kullanır)	İş akışı güvenilirliğini vurguladı ancak israf azaltımı konusunda doğrudan bir analiz yapmadı.
Hu vd. (2015)	Tampon yönetimi yoluyla proje teslim tarihini ve maliyet performansını iyileştirmek için etkili hızlandırma yöntemlerini araştırmak	Analitik modelleme ve simülasyon	Etkili tampon yönetiminin proje gecikmelerini azalttığını ve maliyet performansını iyileştirdiğini gösterdi.	Zaman	Hayır	Proje teslim tarihleri ve maliyetleri üzerindeki etkisini değerlendirdi.
Russell vd. (2015)	LPS kullanarak inşaat projelerindeki zaman tamponlarının tahsisini ve azaltılmasını incelemek	Zaman tampon yönetimi için LPS kullanımını analiz eden vaka çalışmaları	LPS'nin gereksiz zaman tamponlarını azalttığını ve zamanlama güvenilirliğini geliştirdiğini gösterdi.	Zaman	Hayır	Zamanlama güvenilirliğine odaklandı.

Tablo 1'nin devamı

Ghoddousi vd. (2017)	Kritik zincir proje yönetimi (CCPM) kullanarak risk odaklı bir tampon tahsis modeli geliştirmek	Analitik modelleme ve vaka çalışması	Proje risklerini yönetmek ve zamanlama performansını geliştirmek için tampon tahsis modeli önerdi.	Zaman	Hayır	Zamanlama performansını değerlendirdi.
Poshdar vd. (2018a)	Varyasyonu azaltmak ve proje performansını artırmak için tampon yönetiminin rolünü araştırmak	Karma yöntem yaklaşımı: Yeni Zelanda inşaat projelerinde anketler ve simülasyon modelleme	Tampon boyutlandırma değişkenlik nedenlerinin sistematik olarak ele alınmadığını ve fazla israfa yol açtığını gösterdi.	Zaman ve Kapasite	Hayır	Genel israf ve iş akışı verimsizliği üzerine odaklandı.
Poshdar vd. (2018b)	İnşaat programlarında zaman tampon tahsisini optimize etmek için olasılıksal bir yöntem önermek	İnşaat projelerinde zaman tamponlarını optimize etmek için olasılıksal simülasyon yöntemi	Zamanlama güvenilirliğini artırmak için optimum zaman tamponlarını belirledi ancak belirli değişkenlik nedenlerini incelemedi.	Zaman	Hayır	Zamanlama güvenilirliğine odaklandı.
Dlouhy vd. (2019)	İnşaat projelerinde Takt planlama sistemlerinde tampon türlerini analiz etmek ve sınıflandırmak	Literatür incelemesi ve kavramsal analiz	Takt sistemlerinde zaman, kapasite ve envanter tamponları dahil olmak üzere farklı tampon türlerini belirledi ve iş akışı güvenilirliğini artırdı.	Zaman, Kapasite ve Envanter	Hayır	İş akışı güvenilirliğini artırmaya odaklandı.
Zhang & Wan (2019)	Gri sinir ağı kullanarak tampon izleme ve kontrolü entegre etmek ve proje performansını iyileştirmek	Sinir ağı modelleme ve simülasyon	Tampon yönetiminde adaptasyonu ve verimliliği artıran entegre bir tampon izleme yaklaşımı geliştirdi.	Zaman	Hayır	Tampon izleme verimliliğine odaklandı.
Tommelein (2020)	İş akışı güvenilirliğini artırmak için kapasite tamponlarının kullanımını araştırmak	Vaka çalışması ve analitik modelleme	Kapasite tamponlarının iş akışı güvenilirliğini artırdığını ve ticaret sıralamasındaki kesintileri azalttığını gösterdi.	Kapasite	Kısmen (iş sıralamasına odaklanmaktadır).	İş akışı güvenilirliğine odaklandı ancak bekleme veya envanter israfı gibi belirli etkileri analiz etmedi.
Zarghami vd. (2020)	Kritik Zincir Proje Yönetimi'nde (CCPM) tampon boyutlandırmaya kaynak güvenilirliğini entegre etmek	Analitik modelleme ve simülasyon	Kaynak güvenilirliğini tampon boyutlandırmaya dahil eden bir model önerdi, zamanlama performansını geliştirdi.	Zaman ve Kaynak	Kısmen, tampon boyutlandırmayı kaynak değişkenliği ile ilişkilendirerek ele alınmıştır	Zamanlama performansını değerlendirdi.

Tablo 1'nin devamı

Bataglin vd. (2021)	İnşaat projelerinde farklı tampon türlerini ve uygulama yöntemlerini analiz etmek	Vaka tabanlı analizle desteklenen tampon türlerini inceleyen kavramsal çalışma	Farklı tampon türlerini (zaman, envanter ve kapasite) tanımladı ve bunların proje performansını iyileştirmek için konuşlandırma yöntemlerini tartıştı.	Zaman, Envanter ve Kapasite	Hayır	Tampon uygulamalarını tartıştı ancak bekleme veya envanter israfını açıkça analiz etmedi.
She vd. (2021)	Ağ ayrıştırma kullanarak kritik zincir proje yönetimi (CCPM) için bir tampon boyutlandırma yaklaşımı geliştirmek	Matematiksel modelleme ve simülasyon	Tampon boyutlandırma için ağ ayrıştırma tabanlı bir yaklaşım önerdi, proje güvenilirliğini ve verimliliğini artırdı.	Zaman ve Kaynak Tamponları	Hayır	Proje güvenilirliğini artırmaya odaklandı.
Zhang & Wan (2021)	Proje performansını artırmak için darboğaz kaynak tamponu için erken uyarı zaman penceresi oluşturmak	Analitik modelleme ve simülasyon	Kritik darboğaz kaynak tamponlarını belirlemek için bir model geliştirdi, daha iyi kaynak tahsisi sağladı.	Kaynak Tamponları	Hayır	Kaynak kullanılabilirliği ve darboğaz önlemesi üzerindeki etkileri inceledi

1.3. Problem Tanımı ve Araştırma Boşluğu

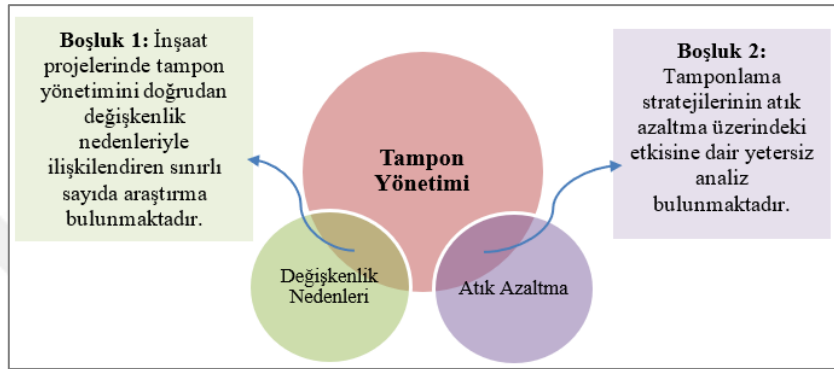
İnşaat projeleri doğası gereği iş akışı değişkenliğine karşı oldukça hassastır; bu durum ise genellikle gecikmelere, verimsizliklere ve önemli ölçüde israfa yol açar. LC ilkeleri israfı azaltmaya yönelik yaklaşımları ile giderek daha fazla benimseniyor olsa da iş akışı değişkenliğini etkili bir şekilde yönetme sorunu devam etmektedir (Farag, 2014; Han & Park, 2011). Geleneksel yaklaşımlar değişkenliğin karmaşıklıklarını ve proje programları, kaynak tahsisi ve performans üzerindeki zincirleme etkilerini göz önüne almada yetersiz kalmaktadır (Lindhard, 2014; Park & Peña-Mora, 2004). Tampon yönetimi LC ile entegre edildiğinde umut verici bir çözüm sunmaktadır. Ancak, iş akışı değişkenliği bağlamında tampon stratejileri için yapılandırılmış bir çerçevenin ve ampirik doğrulamanın olmaması bu yaklaşımın geniş çapta benimsenmesini sınırlamıştır (Abuelaish & Toğan, 2024; González vd., 2009; Tommelein, 2020).

Tampon yönetimi üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmış olmasına rağmen, az sayıda çalışma tampon yönetimi stratejilerine LC ilkelerini dahil etmiştir. LC, öncelikle iş akışı değişkenliği nedenlerini analiz etmeyi ve bunları hafifletmeyi, ardından yalnızca kalıcı ve kaçınılmaz değişkenliği ele alan tamponları uygulamayı vurgular. Zarghami vd. (2020) ile Tommelein (2020) gibi bazı araştırmacılar belirli değişkenlik nedenlerini dikkate alarak tamponları yönetmeye çalışmış olsa da, bu çabalar sınırlı ve kısmi olup, değişkenliğin belirli yönlerine odaklanmış, kapsamlı bir yaklaşım benimsememiştir.

Tampon yönetimini LC ilkeleriyle tam olarak entegre edebilmek için, tamponların özellikle israfı azaltmada yalın hedefleriyle uyumlu olduğunun ortaya konulması kritik önem taşımaktadır. Ancak, önceki araştırmaların çoğu tamponlama stratejilerinin diğer performans metrikleri üzerindeki etkisine odaklanmıştır; örneğin, zamanlama performansı ve güvenilirlik (ör., Russell vd., 2015), üretkenlik (ör., Horman & Thomas, 2005) veya tasarım değişikliklerini hafifletme (ör., Lee vd., 2006). Bu çalışmalar, tamponların bekleme ve envanter israfını azaltma gibi doğrudan israf azaltma üzerindeki etkisini büyük ölçüde göz ardı etmiştir.

Şekil 2, mevcut bilgi birikimiyle belirlenen boşlukların görsel bir temsiliyi sunarak tampon yönetimi, değişkenlik nedenleri ve israf azaltma arasındaki entegrasyon eksikliğini vurgulamaktadır. Bu boşluklar, tampon yönetiminin LC ilkeleriyle etkili bir şekilde uyumlu hale getirilerek inşaat projelerinde israfın optimize edilmesi için daha kapsamlı bir

araştırmaya duyulan kritik ihtiyacı ortaya koymaktadır. Bu boşlukların ele alınması, tampon yönetiminin hem değişkenlik nedenlerini hem de bunların artık etkilerini ele almasını sağlayarak daha sürdürülebilir ve verimli inşaat uygulamalarını teşvik edecektir. Bu araştırma, değişkenlik nedenlerini ayrıntılı bir şekilde analiz ederek ve tamponlama stratejilerinin israf azaltma üzerindeki doğrudan etkisini değerlendirerek bu boşlukları doldurmayı, böylece tampon yönetimi için kapsamlı ve yalın odaklı bir çerçeve geliştirmeyi hedeflemektedir.



Şekil 2. Araştırma boşluklarının belirlenmesi ve tampon yönetimi çerçevesi

1.4. Araştırmanın Amacı ve Hedefleri

Bu araştırmanın ana amacı, inşaat projelerinde tampon yönetimi ile israfın azaltılması arasındaki ilişkiyi incelemektir. İş akışı değişkenliğinin nedenlerini analiz ederek ve Ayrık Olay Simülasyonu (Discrete Event Simulation, DES) kullanarak, çalışma, atığı azaltan, kaynak kullanımını iyileştiren ve genel proje performansını, maliyet ve süre dahil olmak üzere artıran optimize edilmiş tampon stratejileri geliştirmeyi hedeflemektedir. Araştırmanın özel hedefleri aşağıda verilmektedir:

- Özel Hedef 1: Türkiye'deki inşaat projelerinde iş akışı değişkenliği nedenlerini tanımlamak ve önceliklendirmek.
- Özel Hedef 2: İş akışı değişkenliği nedenlerini yönetmek için en uygun tampon türlerini belirlemek.
- Özel Hedef 3: Ana iş akışı değişkenliği nedenlerinin değişkenlik oranlarını farklı perspektiflere göre nicel olarak belirlemek.
- Özel Hedef 4: Farklı iş akışı değişkenliği senaryolarında çeşitli tampon boyutları ve kapasitelerinin etkisini analiz etmek.

- Özel Hedef 5: Optimize edilmiş tampon yönetiminin, israf azaltma, maliyet ve süre gibi anahtar proje performans göstergeleri üzerindeki etkisini değerlendirmek.
- Özel Hedef 6: İnşaat projelerinde etkili tampon yönetimi stratejileri için kanıta dayalı öneriler sunmak, kaynak tahsisi ve iş akışı planlamasında karar alma süreçlerini iyileştirmek.

1.5. Araştırmanın Önemi

İnşaat sektörü, iş akışı değişkenliği, görev gecikmeleri ve azalmış sistem verimliliği gibi zorluklarla sürekli karşı karşıyadır; bu sorunlar, israfı artıran temel etkenlerdir. Ballard & Howell (1998) ile Tommelein vd. (1999) tampon yönetimi ve LC konularını incelemiş olsa da bu kavramları bütünsel bir yaklaşımla ele alan kapsamlı analizlere duyulan ihtiyaç devam etmektedir. Bu çalışmalar tampon yönetimi hakkında LC çerçevelerinde değerli bilgiler sağlamış olsa da iş akışı değişkenliğinin temel nedenlerini ele alan tampon stratejilerinin nasıl geliştirileceği konusunda henüz yeterince derinlemesine bir araştırma yapılmamıştır.

Güvenilir olmayan iş planlaması genellikle istikrarsız iş akışlarına yol açar, bu da görev gecikmeleri, sistem verimliliğinde azalma ve israfı artırır. Bu tür iş akışlarını yönetmek, iş planı güvenilirliğini artırmak için daha iyi planlama stratejileri gerektirir (Abbasian-Hosseini vd., 2018). Bu tez çalışması iş akışı değişkenliğinin nedenlerine odaklanarak inşaat iş akışlarını stabilize etmek için daha güvenilir ve etkili tampon yönetimi yaklaşımları geliştirmeyi hedeflemektedir.

Türkiye'de inşaat sektörü ulusal ekonomide önemli bir rol oynamaktadır (Gundes, 2011), ancak düşük verimlilik, yetersiz iyileşme planlaması ve iş birliği eksikliği gibi içsel sorunlarla mücadele etmektedir (Ugurlu vd., 2021). Bu sorunlar sıklıkla iş akışı değişkenliği ile ilişkilendirilir (Poshdar, 2015; Salhab vd., 2022; Wambeke vd., 2011). Türk inşaat sektörünü etkileyen faktörleri inceleyen birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen (Aladag vd., 2016; Demirkese & Ozorhon, 2017; Gündüz vd., 2013), iş akışı değişkenliğinin nedenlerini ve bu nedenlerin inşaat performansına etkilerini anlamaya yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Daha önceki araştırmalar iş akışı değişkenliğinin nedenlerini belirlemeye odaklanmışken, bu çalışma bu nedenleri doğrudan tampon yönetimi ile ilişkilendirmektedir. İş akışı değişkenliğinin belirli nedenlerine dayalı uygun tampon türlerini belirlemek için

yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışma farklı iş kollarında değişkenlik oranlarının farklılaştığını kabul ederek, tüm iş kollarında tekdüze bir değişkenlik varsayımını göz ardı etmektedir. Değişkenlik oranlarının proje performansını nasıl etkileyeceğinin senaryolaştırıldığı farklı senaryoları modellemek için bu çalışmada DES yazılımı kullanılmıştır. Böylece, değişkenliği absorbe ederken israfı minimize eden en uygun tamponların seçimi araştırılmaktadır. Bu yapılandırılmış yaklaşım, inşaat projelerinde iş akışı değişkenliği ve tampon tahsisinin yönetilmesi için sağlam bir çerçeve sunarak saha yöneticilerinin daha güvenilir zaman çizelgeleri oluşturmaya ve programa uyumun artırılmasına olanak tanıyacaktır. Böylelikle çalışmada sunulan tampon yönetimi ile ilgili detaylı anlayışın, inşaat projelerinde israfı azaltma ve verimliliği artırma çabalarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

LC üzerine yapılan araştırmalar artış gösterse de (De Carvalho vd., 2017; El Mounla vd., 2023; Rashidian vd., 2024), LC'nin tampon yönetimi ile entegrasyonunu ele alan çalışmaların azlığı önemli bir eksikliği göstermektedir. Bu yaklaşımların birleşimi, iş akışı değişkenliğini hafifleterek ve kaynak kullanımını optimize ederek proje performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir. Bu araştırma, LC ve tampon yönetiminin kesişimini analiz eden karma bir yöntem yaklaşımı benimseyerek mevcut literatürdeki boşluğu kapatmayı ve gelecekteki araştırmalara bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

Özetle, bu araştırma inşaat sektöründe tampon yönetimi ile yalın inşaat uygulamalarının entegrasyonuna yönelik kritik bir soruna çözüm sunmaktadır. Tamponlar genellikle sadece israf olarak görülse de inşaat gibi karmaşık ve öngörülemez bir sektörde bu varsayımın yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, iş akışı değişkenliğinin kök nedenleri ile uyumlu tampon yönetimini ele alarak, tampon yönetiminin yalın prensiplerle nasıl uyum sağlayabileceğine ve bu sayede israfın en aza indirilerek proje performansının nasıl iyileştirilebileceğine dair daha ayrıntılı bir anlayış sunmaktadır.

1.6. Araştırma Metodolojisi

1.6.1. Araştırma Yaklaşımı

Araştırma yaklaşımları arasında genellikle iki temel yöntem kullanılır: nitel ve nicel yöntemler. Üçüncü bir yaklaşım olan karma yöntemler ise nitel ve nicel tekniklerin bir kombinasyonunu içerir (Başkarada & Koronios, 2018; Taguchi, 2018). Nitel yöntem,

genellikle vaka çalışmaları, saha araştırmaları ve odak grupları aracılığıyla karmaşık gerçeklikleri ve belirli bağlamlardaki eylemlerin anlamını yorumlamayı amaçlar. Buna karşılık, nicel yöntem kesin, güvenilir ölçümler elde etmeye ve istatistiksel analizlere olanak tanıyan araçlar (anketler ve korelasyonel çalışmalar gibi) kullanarak gerçekliği ölçmeye odaklanır (Queirós vd., 2017).

Araştırmacılar, araştırma sorularını yanıtlamak için ihtiyaç duyulan veri türüne bağlı olarak bir yöntem seçerler: nicel yaklaşımlar için sayısal verilerden, nitel yaklaşımlar için metinsel verilerden ve karma yöntemler için her iki veri türünden birlikte faydalanırlar (Bergin, 2018). Creswell (2003), nicel ve nitel veriler arasında öncelik belirlerken araştırmacıların göz önünde bulundurması gereken çeşitli kriterleri sunmaktadır. Bu kriterler arasında literatür taramasında atıfta bulunulan çalışmalar, araştırma soruları, toplanan veri miktarı, veri türüne ilişkin tartışmanın uzunluğu ve hedef kitlenin tercihleri yer alır (Taguchi, 2018).

Leedy & Ormrod (2001) tarafından tanımlandığı üzere, nicel araştırma mevcut teorilere dayalı, kesin ve deneysel bir paradigmaya sahip bir yöntemdir. Bu yaklaşım, araştırma sürecini araştırmacıdan bağımsız olarak ele alır ve objektif veriler kullanarak gerçekliği ölçmeyi hedefler (Creswell, 2003). Amaç, önyargısız veri analizi yoluyla anlam çıkarmak ve elde edilen açıklamaları daha geniş bağlamlara uygulayarak genelleştirilebilir içgörüler sağlamaktır. Nicel araştırma, ilişkileri belirleme, doğrulama veya geçerliliğini sağlama ve teoriye katkıda bulunma amacı güder (Leedy & Ormrod, 2001).

Tipik bir nicel araştırma süreci, problem tanımlamasıyla başlar, hipotez oluşturma, literatür taraması ve nicel veri analizi ile devam eder. Bu yaklaşım, tahmin edici, açıklayıcı ve doğrulayıcı sonuçlar üretir (Bergin, 2018). Sayısal veriler genellikle SPSS, R veya Stata gibi istatistiksel yazılımlar kullanılarak analiz edilir (Queirós vd., 2017).

Nicel araştırma yöntemleri arasında tanımlayıcı, korelasyonel, gelişimsel, gözlemsel ve anket araştırmaları yer alır; bu yöntemlerin tümü deneysel veya neden-sonuç karşılaştırmalı tasarımlar içinde kullanılabilir (Williams, 2007). Sosyal bilimlerde yaygın olarak kullanılan anketler, yapılandırılmış veya açık uçlu araçlar aracılığıyla temsili örneklerden veri toplar. Anketler, fenomenler hakkında görüş, algı ve davranışlara ilişkin içgörüler sunarak yüksek temsil yeteneği ve maliyet etkinliği avantajı sağlar. Ancak, anketlerin güvenilirliği, tasarımı ve yanıtların doğruluğuna bağlıdır (Queirós vd., 2017).

Leedy & Ormrod (2001), nitel araştırmayı daha az yapılandırılmış, teori oluşturma odaklı ve doğal ortamlarda ayrıntılı deneyimlerin yakalanmasına yönelik bir yöntem olarak

tanımlar. Nicel araştırmanın aksine, nitel yöntemler keşif odaklıdır ve olguları anlamak için görüşmelere, gözlemlere ve saha notlarına dayanır (Creswell, 2003; Williams, 2007). Bu yaklaşım, değişkenleri önceden belirlemez, bunun yerine bağlam unsurlarını dinamik bir şekilde analiz ederek katılımcıların davranışlarını, görüşlerini ve düşüncelerini yakalamaya uygundur (Olds vd., 2005).

Genellikle nicel araştırmadan daha az katı olarak algılansa da nitel araştırma güvenilir bulgular elde etmek için titiz bir planlama ve metodolojik dikkat gerektirir (Koro-Ljungberg & Douglas, 2008). Nitel araştırma, araştırma sorularından örnekleme ve veri analizine kadar yapılandırılmış bir araştırma tasarımına sahiptir ve bu yönüyle anekdot verilerinden ayrılır (Queirós vd., 2017).

Nitel araştırma, önceden belirlenmiş kategoriler yerine, temaların verilerden doğal olarak ortaya çıkmasına olanak tanıyan tümevarımcı bir veri analizi yaklaşımını izler (Borrego vd., 2009). Görüşmeler, veri toplama için birincil araçtır ve yarı yapılandırılmış görüşmeler, inşaat yönetiminde özellikle etkili bir yöntemdir (DiCicco-Bloom & Crabtree, 2006). Bu yöntem, karşılıklı etkileşimi olanaklı kılarak görüşmecinin katılımcıların yanıtlarını takip etmesine ve zengin içgörüler elde etmek için sohbeti uyarlamasına olanak tanır (Galletta, 2012). Yarı yapılandırılmış görüşmeler, araştırma alanında daha önce yapılan çalışmalara dayanarak ana konuları belirleyen ancak katılımcıların yanıtlarında esneklik sağlayan iyi geliştirilmiş bir rehber gerektirir (Holloway & Wheeler, 2010).

Karma yöntem araştırmaları, nicel ve nitel veri toplama ve analizini birleştirerek hem sayısal hem de anlatı verilerini dahil ederek karmaşık araştırma sorularını daha kapsamlı bir şekilde ele almayı sağlar (Creswell, 2003; Williams, 2007).

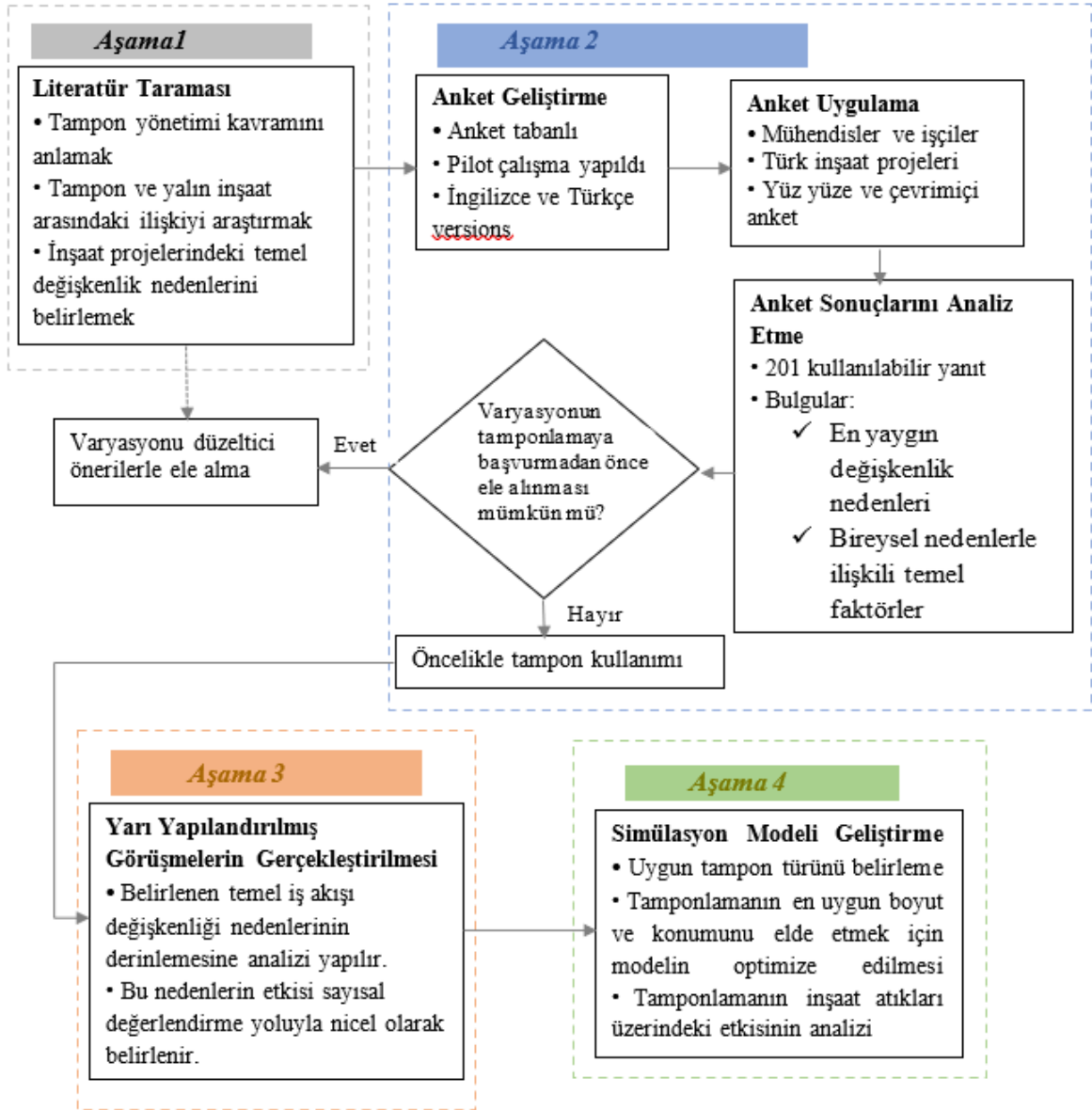
1.6.2. Araştırma Çerçevesi

Bu çalışmanın araştırma süreci, Şekil 3'de gösterilen yapılandırılmış bir çerçeveyi takip etmekte olup, dört ana aşamadan oluşmaktadır:

1. Literatür Taraması: Bu başlangıç aşamasında tampon yönetimi ve yalın inşaat üzerine mevcut araştırmalar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu inceleme, inşaat projelerinde değişkenlik nedenlerinin belirlenmesinin etkili bir tamponlama modeli geliştirmek için gerekli olduğunu ortaya koymuştur.
2. Anket Araştırması: İnşaat projelerindeki spesifik değişkenlik nedenlerini belirlemek amacıyla bir anket gerçekleştirilmiştir. Bu anket, araştırma hedeflerini ele almış ve sonraki araştırma adımlarını yönlendirmiştir. Belirlenen değişkenlik

nedenleri, bazı değişkenlik kaynaklarının azaltılabileceği hipotezi ile uyumlu olup, modelin yalnızca geriye kalan ve kaçınılmaz olan değişkenlik üzerinde tamponlama yapmaya odaklanmasını sağlamıştır.

3. Yarı Yapılandırılmış Görüşmeler: Sektör uzmanlarıyla görüşmeler gerçekleştirilerek, iş akışı değişkenliğinin en etkili nedenleri hakkında bilgi alınmıştır. Uzmanlar, bu nedenlerin göreceli etkileri hakkında yüzdeler oranlarda bilgi sağlayarak, bu girdilerin simülasyon modeline değişkenlik oranları olarak dahil edilmesine olanak tanımış ve farklı inşaat senaryolarını temsil etmiştir.
4. Simülasyon Modeli: Bu son aşamada, anket sonuçlarında belirlenen değişkenlik nedenlerini dikkate alan optimal bir tamponlama modeli geliştirilmiştir. Simülasyon modeli ayrıca tamponlamanın inşaat projelerindeki atık azaltımı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Bu, çalışmanın, değişkenlik yönetimini iyileştirerek proje performansını artırma hedefine uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

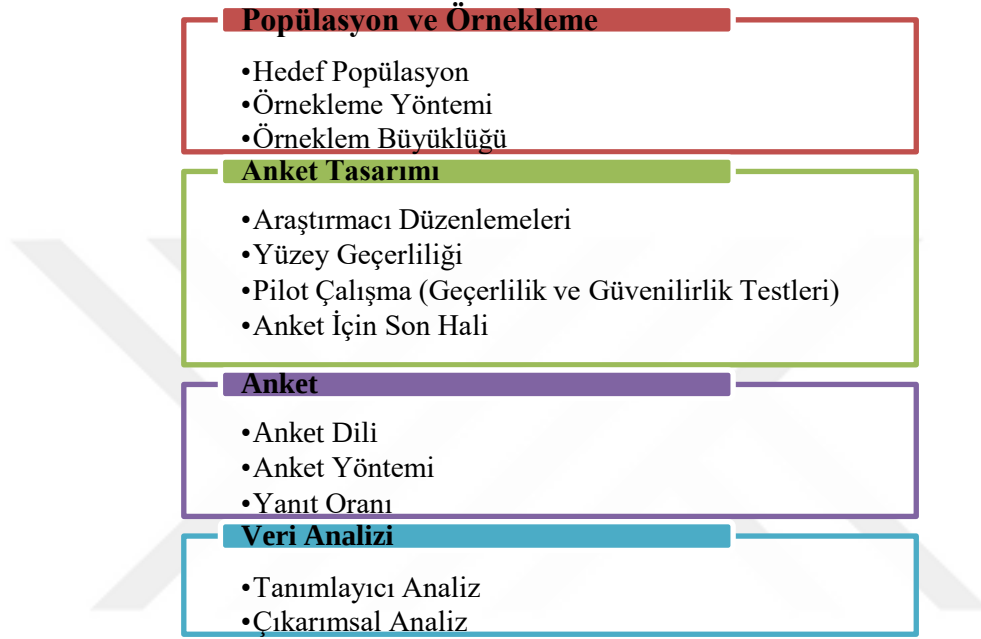


Şekil 3. Araştırma çerçevesi

1.6.3. Anket Çalışmaları

Anket çalışmaları, belirli bir popülasyondan sistematik bir şekilde bilgi toplamak için yaygın olarak kullanılan bir araştırma yöntemidir. Bu süreç, yüksek kaliteli ve güvenilir verilerin toplanmasını sağlamak amacıyla bir dizi önemli adımı içerir. Süreç, hedef kitlenin tanımlanması, uygun bir örnekleme yönteminin seçilmesi ve örneklem büyüklüğünün belirlenmesiyle başlar. Ardından, soruların düzenlenmesi, yüzey geçerliliği testlerinin yapılması ve güvenilirlik ve geçerliliği değerlendirmek için bir pilot çalışmanın gerçekleştirilmesi gibi adımları içeren anket tasarımı gelir. Tasarım tamamlandıktan sonra,

anket uygun yöntemlerle uygulanır ve optimal bir yanıt oranına ulaşmak için çaba gösterilir (Bolarinwa, 2019; Mathers vd., 2007). Toplanan veriler, anlamlı sonuçlar elde etmek için betimsel ve çıkarımsal istatistiksel araçlarla analiz edilir. Bu temel adımlar, kapsamlı bir anket çalışmasının yürütülmesine yönelik yapılandırılmış yaklaşımı özetlemekte olup Şekil 4'te görsel olarak da sunulmaktadır.



Şekil 4. Anket çalışması yürütmenin temel adımları

Bir anket çalışmasında hedef kitle, anket verilerinin temel alındığı ve sonuçların genelleştirileceği bireylerin tamamını ifade eder. Çalışma hedeflerinin belirlenmesi, bir anketin tasarımında atılan ilk adımdır. İkinci adım olarak hedef kitle tanımlanmalıdır (Mathers vd., 2007). Örnekleme, bir popülasyon içinden seçilen bir alt küme aracılığıyla tüm popülasyonun özelliklerini tahmin etmeyi ifade eder. Örneklemenin iki temel avantajı, veri toplama sürecinin daha hızlı olması ve maliyetlerin daha düşük olmasıdır (Taherdoost, 2016). Örnekleme yöntemi araştırmalarda oldukça karmaşık bir konudur, çünkü örnekleme türleri arasında birçok varyasyon, karışıklık ve örtüşme bulunmaktadır. Belirli katılımcı örneklerinin seçimi, araştırma tasarımının ve sürecinin önemli bir parçasıdır (Mathers vd., 2007). Örnekleme yöntemleri iki ana kategoriye ayrılır:

- Olasılık dışı örnekleme yöntemleri: elemanların, çalışmaya dahil edilmek üzere rastgele olmayan yöntemlerle seçildiği örnekleme yöntemleridir.

- Olasılık örnekleme: popülasyondaki elemanların rastgele seçilmesiyle gerçekleştirilir ve popülasyondaki her elemanın, örnekleme dahil edilme şansı eşit ve bağımsızdır.

Taherdoost'a (2016) göre, olasılık örneklemesinin dört ana türü bulunmaktadır:

1. Basit rastgele örnekleme: örnek, aynı boyuttaki her örneğin seçilme şansının eşit olduğu bir şekilde seçilir.
2. Sistematiik örnekleme: belirli bir başlangıç noktasının seçilmesine dayanır ve ardından popülasyondaki her k'nci (örneğin her 50'nci) eleman seçilir.
3. Tabakalı örnekleme: popülasyonun en az iki farklı alt gruba (veya tabakaya) ayrılmasını içerir, böylece aynı alt gruptaki bireyler aynı özellikleri paylaşır (örneğin cinsiyet veya yaş aralığı). Daha sonra her alt gruptan bir örnek seçilir.
4. Küme örnekleme: popülasyonun bölümlere (veya kümelere) ayrılmasına dayanır. Bu kümelerden bazıları rastgele seçilir ve ardından seçilen kümelerdeki tüm üyeler örneklemeyle dahil edilir.

Örnekleme tekniğı ve örneklem büyüklüğünün belirlenmesi, uygulamalı istatistiklerde anket tabanlı araştırma problemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Aynı şekilde, örneklem büyüklüğünün uygun olmaması hatalı sonuçlara yol açabilir. Eğer örneklem büyüklüğü çok küçükse, iyi tasarlanmış bir çalışma bile önemli etkileri veya ilişkileri tespit edemeyebilir ya da bu etkileri ve ilişkileri yeterince kesin olarak tahmin edemeyebilir. Öte yandan, örneklem büyüklüğünün gereğinden fazla olması, çalışmayı daha karmaşık hale getirebilir ve sonuçların doğruluğunu dahi olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, gereğinden büyük bir örneklem almak, çalışmanın maliyetini de artırır. Bu nedenle, örneklem büyüklüğü herhangi bir bilimsel araştırmanın temel bir faktörüdür (Faber & Fonseca, 2014).

Kapsamlı bir literatür incelemesi ve gerekli düzenlemelerle bir anket geliştirildikten sonra, yüzey geçerliliğı, maddelerin ifade netliğini değerlendirmek ve uzman geri bildirimlerini kullanarak yeni maddeler oluşturmak için kullanılır (Broder vd., 2007). Yüzey geçerliliğı değerlendirmelerinin sonuçlarına dayalı olarak genellikle ek düzenlemeler yapılır. Bu düzenlemelerden sonra, tam kapsamlı bir araştırmaya hazırlık olarak bir pilot çalışma gerçekleştirilir. Pilot çalışma, genellikle ana çalışmanın küçük bir versiyonu olarak kabul edilir ve araştırma aracının uygulanabilirliğini, süresini, maliyet etkinliğini ve tasarım uygunluğunu test eder (Dikko, 2016; Arain vd., 2010). Anket temelli araştırmalarda, toplanan verilerin geçerliliğini ve güvenilirliğini göstermesi hayati öneme sahiptir. Resmi bir pilot aşaması, aracın kabul edilebilirliğini, geçerliliğini ve güvenilirliğini değerlendirmek

için genellikle önerilmektedir (Williams, 2007). Doğru olarak kabul edilebilecek sonuçlar elde etmek için en az 30 katılımcıdan oluşan bir pilot çalışma örneklem büyüklüğünün yeterli olduğu sıklıkla belirtilmektedir (Dikko, 2016).

Geçerlilik, toplanan verilerin araştırma sorularını ne kadar iyi yanıtladığını ve araştırılan kavramlarla ne kadar uyumlu olduğunu belirtmektedir (Pierce, 2008). Araçların, ölçmek için tasarlandığı şeyi gerçekten ölçtüğünü garanti eder (Srinivasan vd., 2017). Geçerlilik üç ana kategoriye ayrılır:

- Kapsam geçerliliği: anket maddelerinin, örtük değişkeni temsil eden kavramı ne kadar iyi yakaladığını inceler (Srinivasan vd., 2017).
- Kriter geçerliliği: anket göstergelerini, ölçüm geçerli olduğunda ilişkilendirilmesi gereken bir standart değişkenle karşılaştırır.
- Yapı geçerliliği: göstergelerin, ölçmeyi amaçladıkları yapılarla mantıksal olarak ilişkili olup olmadığını ve alakasız yapılarla ilişkisiz olup olmadığını değerlendirerek teorik beklentilerle uyum sağlar (Krishnaswamy vd., 2006).

Güvenilirlik, toplanan verilerin tutarlılığını, doğruluğunu ve istikrarını sağlamaya odaklanarak bu verileri zaman içinde güvenilir olmasını mümkün kılar (Pierce, 2008). Ölçüm prosedürünün tutarlı sonuçlar üretebilme yeteneğini ele alır (Péter, 2022). Güvenilirliği değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri, 1951 yılında tanıtılan Cronbach alfa katsayısıdır (Cronbach, 1951; Santos, 1999). Bu katsayı, bir ölçek içindeki birden fazla göstergenin iç tutarlılığını değerlendirir. SPSS gibi analiz araçları kullanılarak yapılan testlerde, 0.70 veya daha yüksek bir Cronbach alfa değeri genellikle güvenilirlik için kabul edilebilir olarak değerlendirilir (Bolarinwa, 2019).

Veri analizi, anketler veya araştırmalar yoluyla toplanan bilgileri özetleyerek anlamlı sonuçlar çıkarmayı amaçlayan kritik bir süreçtir. Araştırmalarda istatistiğin temel rolü, yalnızca bir örneklem mevcut olduğunda hedef nüfus hakkında içgörüler çıkarabilmektir (Singh & Masuku, 2014). Bu aşamada, analizin odaklı ve ilgili kalmasını sağlamak için çalışmanın özgün hedefleri ve hipotezleri ile uyumlu olması önemlidir (Williams, 2007).

Tanımlayıcı istatistikler, örneklem verilerinin temel özelliklerini özetleyerek tablo, grafik ve diyagramlarla yapılandırılmış bir şekilde sunar. Bu ön analiz, örneklem dağılımlarını tanımlayarak ve daha geniş nüfus hakkında genelleme yapmayı kolaylaştırarak daha karmaşık çıkarımsal istatistiklerin temelini oluşturur (Stapor, 2020). Tanımlayıcı analiz, değişkenlerin dağılımına genel bir bakış sunar, veri aralıklarını vurgular ve çarpıklıkları belirler (Williams, 2007). Ortalama, medyan ve mod gibi merkezi eğilim

ölçütlerinin yanı sıra aralık ve standart sapma gibi değişkenlik ölçütlerini içerir. Dağılımlar arasındaki ilişkileri belirlemek için dağılım grafikleri gibi korelasyon araçları da kullanılabilir (Holt, 2002; Sutanapong & Louangrath, 2015a).

Tanımlayıcı verilerin düzenlenmesi genellikle olayların sıklığını gösteren frekans dağılımlarını içerir veya belirli kategorilerdeki sıklıkları raporlamak için verileri gruplandırmayı içerir (Holt, 2002). Uygulamalı araştırmalarda, oranlar, rasyolar ve yüzdelere gibi frekans ölçütleri, olayları sayma ve özellikleri karşılaştırma için temel istatistiksel araçlar olarak kullanılırlar (Singh & Masuku, 2014).

Çıkarımsal istatistikler, bulguları örneklemden öteye genişletmeyi, tahminler yapmayı ve daha geniş bir nüfus hakkında genellemeler yapmayı mümkün kılar (Sutanapong & Louangrath, 2015b). Tanımlayıcı istatistikler temel bir özet sağlarken, çıkarımsal yöntemler hipotezleri test etmek ve sonuçların daha geniş nüfus parametrelerini yansıtmaya olasılığını tahmin etmek için bu verileri analiz eder. İstatistiksel güvenilirlik, genellikle %95 güven aralığı gibi önceden tanımlanmış güven aralıkları kullanılarak değerlendirilir ve bu, bulguların güvenilirliğini güçlü bir şekilde gösterir (Holt, 2002).

Çıkarımsal teknikler, parametrik ve parametrik olmayan yöntemler olarak ikiye ayrılır. Parametrik istatistikler, verilerin normal dağılıma sahip olması ve aralık veya oran ölçeğine dayanması gibi belirli varsayımlar gerektirir ve nüfus parametrelerini tahmin etmeyi içerir. Bu yöntemler, veriler bu koşulları karşıladığında daha güçlüdür (Holt, 2002). Parametrik olmayan istatistikler ise, çarpık dağılımlar veya nominal/ordinal ölçekler gibi parametrik varsayımları karşılamayan veriler için uygundur. Bu yöntemler daha esnektir ve normallik varsayımlarına dayanmadığından daha geniş bir veri türü yelpazesine uyum sağlar (Gibbons & Chakraborti, 2020).

Tanımlayıcı ve çıkarımsal tekniklerin birleştirilmesiyle, araştırmacılar kapsamlı içgörüler sunabilir, hipotezleri test edebilir ve sonuçlarının geçerliliği ile uygulanabilirliğini daha geniş bağlamlarda güvence altına alabilirler (Stapor, 2020).

1.6.4. Yarı Yapılandırılmış Görüşmeler

Yarı yapılandırılmış görüşmeler, genelleştirilmiş sonuçlar yerine derinlemesine içgörüler toplamanın hedeflendiği nitel araştırmalarda özellikle etkilidir. Bu yöntem, yapılandırılmış soruların yanı sıra organik olarak ortaya çıkabilecek ilgili konuların keşfedilmesine olanak tanır ve toplanan verilerin kapsamlılığını artırır (Adeoye-Olatunde & Olenik, 2021; El Khatib vd., 2023).

Tam yapılandırılmış görüşmelerin aksine, konuşmanın akışını sınırlandırmayan yarı yapılandırılmış görüşmeler, Rubin & Rubin (2011) tarafından önerildiği gibi önceden hazırlanmış tematik bir rehberi takip eder. Ana sorular, takip soruları ve detaylandırıcı soruların dengeli kullanımı, görüşmelerin tutarlılığını sağlarken, soruların görüşme bağlamına ve katılımcıların benzersiz içgörülerine uyarlanmasına olanak tanır. Bir görüşme rehberi, genellikle konuların resmi olmayan bir şekilde gruplanmasıyla oluşturulur ve odaklanmayı sağlarken aşırı kısıtlayıcı olmadan araştırmacıya esneklik sunar (Lindlof & Taylor, 2017).

Adeoye-Olatunde & Olenik (2021), Kallio vd. (2016) ile Rabionet (2011)'e göre, yarı yapılandırılmış görüşmeler aşağıdaki beş aşamalı bir süreci takip eder:

1. Amacın belirlenmesi: görüşmenin amacı ve hedefleri açıkça belirlenmeli ve araştırma hedefleriyle uyumlu hale getirilmelidir.
2. Katılımcıların seçimi: anlamlı ve güvenilir içgörüler elde etmek için bilgili ve ilgili bir örneklem seçimi gereklidir. Katılımcılar, çalışmanın derinliğini ve uygulanabilirliğini artırmak için konuya hakimiyet ve farklı bakış açılarını dengelemelidir. Zaman ve bütçe gibi pratik kısıtlamalar, örneklem kapsamını etkileyebilir. Katılımcıların dikkatlice seçilmesi, araştırma hedeflerine ulaşmayı destekleyen güvenilirlik ve alaka düzeyini sağlar (Ruslin ve ark., 2022).
3. Görüşmelerin gerçekleştirilmesi: hazırlanan görüşme rehberini takip ederek katılımcıların yanıtlarını detaylandırmasını teşvik etmek için samimi bir ton kullanılmalıdır. Belirsizlikleri netleştirmek ve daha derin içgörüler toplamak için detaylandırıcı ve takip soruları kullanılmalıdır. Katılımcı görüşlerinin tam kapsamını yakalamak için oturumların doğru bir şekilde kaydedilmesi, ses kayıt cihazları veya ayrıntılı not alma yoluyla sağlanmalıdır.
4. Verilerin transkripsiyonu ve düzenlenmesi: görüşmeler tamamlandıktan sonra, kayıtlar kelimesi kelimesine transkribe edilmeli veya ana noktalar özetlenirken yanıtların bağlamı ve nüansları korunmalıdır. Veriler, araştırma hedefleriyle uyumlu bir şekilde sistematik olarak düzenlenmeli ve etkin analiz için kategorilere ayrılmalıdır.
5. Veri analizi: yanıtlar kodlanarak ve kategorilere ayrılarak desenler, temalar ve içgörüler belirlenmelidir. Katılımcılar arasındaki bulgular çapraz referans yapılarak tutarlılık ve güvenilirlik sağlanmalıdır. Bu içgörüler sentezlenerek araştırma

hedeflerini ele alan ve çalışmanın bulgularına önemli katkılar sağlayan sonuçlar çıkarılmalıdır.

1.6.5. Simülasyon Modeli

Simülasyon modelleme, Rashid vd. (2020) tarafından, bir gerçek dünya sürecinin sanal bir modelinin oluşturulması ve analiz edilmesi olarak tanımlanır ve gerçek dünya sürecinin performansını tahmin etmek ve öngörmek amacıyla gerçekleştirilir.

Banks vd. (2009), simülasyonu, bir gerçek dünya sisteminin matematiksel-mantıksal bir modelini tasarlamak ve bunu bir bilgisayarda denemek olarak tanımlar. Bu teknik, özellikle kaynak odaklı süreçlerde etkilidir ve alternatifleri keşfetmek ve sonuçları optimize etmek için hızlı ve maliyet açısından verimli bir yol sunar (González vd. 2011b, Poshdar, 2015). İnşaat sahalarının dinamik yapısı ve karmaşıklığı göz önüne alındığında, simülasyon, belirsizlik koşulları altında çeşitli parametrelerin etkisini analiz etmek için değerli bir araç olmaktadır (Bamana vd., 2019). İnşaat projeleri, kaynak kullanımı ve iş akışı değişkenliğinin genel performansı doğrudan etkilediği birbiriyle ilişkili süreçlerden oluşur (Farrar vd., 2004). Bu nedenle, simülasyon, tampon uygulamaları gibi farklı yönetim stratejilerini gerçek projelere uygulamadan önce test etmek için kontrollü ve risksiz bir ortam sağlar.

İnşaat operasyonlarının modellenmesi sayesinde, planlamacılar kaynaklar ve iş akışlarının nasıl etkileşimde bulunduğunu anlayabilir, verimsizlikleri belirleyebilir ve potansiyel iyileştirmeleri değerlendirebilir. Simülasyon, süreçlerin ve kaynak seviyelerinin farklı kombinasyonlarıyla deney yapma olanağı sağlar ve böylece planlamacılara, zaman ve maliyet sınırlamaları olmaksızın, proje performansı için en uygun düzenlemeyi bulma fırsatı sunar (Abbasi vd., 2020).

Başlıca simülasyon yöntemleri arasında DES, Temsilci Tabanlı Modelleme (Agent-Based Modeling, ABM) ve Sistem Dinamiği (System Dynamics, SD) yer alır. Bu yöntemlerin her biri, karmaşık sistemlerin farklı yönlerini modellemek için uygun olan kendine özgü özelliklere sahiptir.

DES, sistemleri, varlıklar ve kaynaklar içeren sıralı, mantıksal olarak düzenlenmiş etkinlikler dizisi olarak modelleyen, olay odaklı bir yaklaşımdır. DES'de, pasif varlıklar bir iş akışı boyunca ilerler ve sıralama, kaynakları alma ve bırakma gibi işlemlerden geçer (Abdelmegid vd., 2020). Bu yöntem, iş akışı değişkenliğini anlamak ve kaynak tahsisini optimize etmek gibi kritik unsurların önemli olduğu inşaat gibi kaynak yoğun süreçleri modellemek için özellikle uygundur (Huang vd., 2011).

adım ayrıca, doğru bir modelleme yapılmasını sağlamak için sistemin bileşenlerinin ve etkileşimlerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir (Law, 2015). Daha sonra, simülasyon için gerekli olan yazılım belirlenir ve modele ilişkin aktiviteler, ilişkiler, ekipler ve üretkenlik gibi girdiler toplanır (Kikolski, 2017).

Ön model tasarlandıktan sonra, sonuçlar tatmin edici olana kadar deneyler iteratif bir şekilde gerçekleştirilir (Burduk vd., 2021). Model, doğrulama ve geçerlilik süreçlerinden geçirilir. Doğrulama, modelin kavramsal çerçeveyi doğru bir şekilde yansıttığını garanti ederken; geçerlilik, modelin simülasyon hedeflerine ulaşmak için yeterli doğruluğa sahip olduğunu onaylar (Sargent, 2015). Bu adımlar yalnızca modelleme sürecinin sonunda değil, model geliştirme sürecinin her aşamasında gerçekleştirilir ve modelin kademeli olarak iyileştirilmesini sağlar.

Analiz aşamasında, farklı senaryolar modellenerek çeşitli parametrelerin etkileri incelenir ve karar vericilerin potansiyel sonuçları değerlendirmesine olanak tanınır. Senaryo analizi, üretim süreçlerindeki değişiklikleri simüle etmeyi, darboğazları belirlemeyi ve gerçek operasyonları kesintiye uğratmadan iyileştirme stratejilerini değerlendirmeyi içerir. Simülasyon sonuçlarına dayalı olarak, proje hedeflerine ulaşılmasını sağlayacak öneriler formüle edilir (AbouRizk, 2010). Örneğin, inşaat sırasında simülasyon modelleri, paydaşların çeşitli seçenekleri keşfetmesine ve uygulama sorunlarını verimli bir şekilde çözmesine olanak tanır. Bu teknikler, inşaat faaliyetlerini yönetmek ve proje gereksinimleri doğrultusunda üretim parametrelerini optimize etmek için özellikle değerli olmaktadır (Rohani vd., 2014).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Yöntem Özeti

Bu bölüm, araştırma hedeflerini gerçekleştirmek ve araştırma sorularını yanıtlamak için uygulanan metodolojiyi özetleyerek gerekçelendirmektedir. Metodoloji, dört ana bileşen etrafında yapılandırılmıştır: önceki çalışmalardan iş akışı değişkenliğine neden olan faktörlerin çıkarılması, anket çalışması, yarı yapılandırılmış görüşmeler ve simülasyon modeli. Anket çalışması, inşaat projelerindeki gecikmeler ve verimlilik sorunları gibi değişkenlik nedenlerini analiz etmek için anketlerin kullanıldığı önceki araştırmalarla uyumlu olarak birincil nicel veri toplama yöntemi olarak seçilmiştir (Jayawardena vd., 2014; KV & Bhat, 2019; Umar vd., 2020). Ayrıca, yarı yapılandırılmış görüşmeler, değişkenlik faktörlerini ve bunların inşaat projeleri üzerindeki nicel etkisini tartışmak amacıyla dâhil edilmiştir. Bu yöntemin kritik proje etkilerine dair ayrıntılı bilgiler toplamada başarılı bir şekilde uygulandığı önceki çalışmalardan da görülmektedir (KV & Bhat, 2019; Poshdar vd., 2018a; Ugurlu vd., 2021). Bulguların değerlendirilme doğruluğunu artırmak için, nicel ve nitel metodolojilerin güçlü yönlerini birleştiren karma bir yöntem benimsenmiştir.

Araştırma süreci, inşaat projelerine ilişkin mevcut literatürden çıkarılan iş akışı değişkenlik nedenlerini belirlemek, sıralamak ve analiz etmek amacıyla bir anket çalışması aracılığıyla nicel bir aşamayla başlamıştır. Bu anket yöntemi, değişkenlik nedenlerinin temel nedenlerine ilişkin yapılandırılmış ve sayısal bilgiler sağlayarak algılanan etkilerine göre istatistiksel sıralama yapılmasına olanak tanımıştır. Bunu takip eden nitel aşamada, sektör uzmanlarıyla yarı yapılandırılmış görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Bu görüşmeler, kritik değişkenlik faktörlerinin inşaat süreçlerini nasıl etkilediğine dair detaylı bir inceleme yapılmasını sağlamış ve simülasyon modelinde kullanılmak üzere değişkenlik oranlarının belirlenmesine yardımcı olmuştur.

Çalışmanın temel hedeflerinden biri, üretim sistemi zorluklarını bir simülasyon çerçevesi kullanarak modellemektir. Bu, önceki aşamalardan türetilen sayısal verilerin ve değişkenlik faktörlerinin entegrasyonunu gerektirmiştir. Uzman görüşleriyle değişkenlik oranları belirlenerek, çalışma çeşitli senaryoları simüle etmiş ve değişkenliğin proje performansı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Bu süreç, kapasite tamponlarının bu etkileri azaltmadaki rolünün analizini de içermektedir.

Karma yöntem yaklaşımı, değişkenlik nedenlerinin nicel sıralamasıyla uzmanlardan elde edilen nitel bilgileri birleştirerek kapsamlı bir metodoloji sağlamıştır. Bu entegrasyon, simülasyon modelinin inşaat senaryolarını gerçekçi bir şekilde temsil etmesine olanak tanımış ve metodolojik çerçeveyi, değişkenlik ve tampon stratejilerinin inşaat proje performansı üzerindeki etkilerini değerlendirme hedefine uygun hale getirmiştir.

2.2. İş Akışı Değişkenlik Nedenlerine Yönelik Literatür İncelemesi

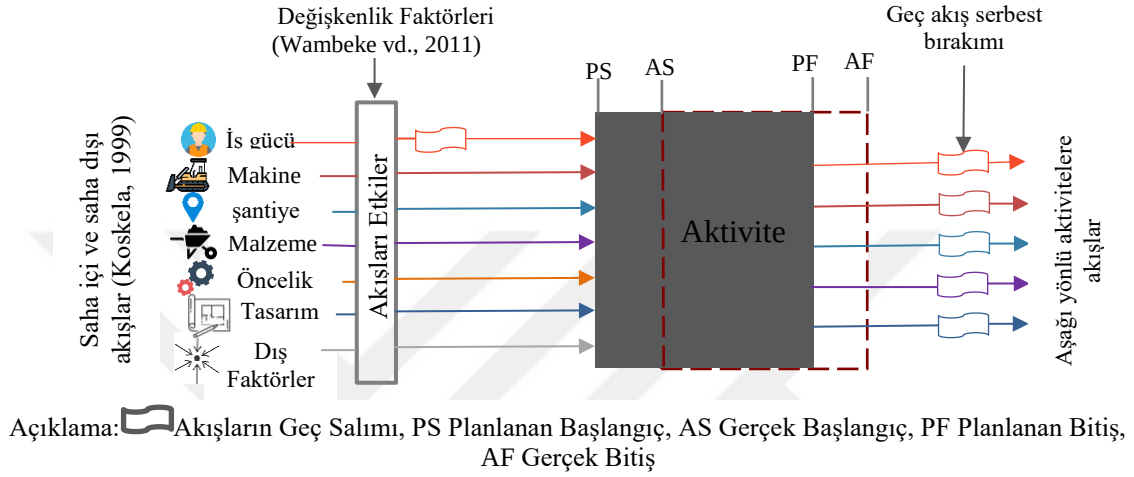
İnşaat projelerinde iş akışı değişkenliği, kaynak akışlarındaki (iş gücü, ekipman, bilgi ve malzeme) sapmaların yanı sıra dış koşullar ve ön gereksinimlerle ilgili değişiklikleri içerir (Koskela, 1999). Değişkenlik, sıklıkla üretkenlik, zaman veya kalitedeki tutarsızlık olarak ölçülen bir düzensizlik olarak tanımlanır (Hopp & Spearman, 2011). İnşaat sektöründe bu durum, üretim hızları, iş gücü verimliliği ve genel zamanlamalarda dalgalanmalar olarak kendini göstererek proje maliyetlerini artırır, planlama güvenilirliğini azaltır ve olası gecikmelere yol açar (Farag, 2014; González vd., 2009).

Bu çalışmada, iş akışı değişkenliği, inşaat sıralamaları için gerekli olan bilgi, malzeme, iş gücü, ekipman, çalışma alanı veya dış faktörlerdeki kalite veya miktardaki sapmalar olarak tanımlanmıştır. Kaynaklara bağımlı olmaksızın geniş bir tanım sunan bu yaklaşım, inşaat alanındaki önceki araştırmalarla uyumlu olup (Ballard & Howell, 1994; Horman & Thomas, 2005) değişkenliğin kapsamlı bir analizini mümkün kılmaktadır. Bu çalışma, tampon yönetim stratejilerini keşfetmek ve değişkenliğin proje performansı üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla, esas olarak olumsuz iş akışı değişkenliğine odaklanmaktadır.

Üretim sistemlerinde iş akışı değişkenliği, Şekil 6'de gösterildiği gibi, iki temel mekanizmadan kaynaklanır: değişkenlik faktörleri ve akışların yukarı akıştan aşağı akışa teslim edilmesi (Garcia-Lopez & Fischer, 2024; Wambeke vd., 2011). Bu iki mekanizma birbiriyle bağlantılıdır; çünkü değişkenlik faktörleri sıklıkla aktivite gecikmelerine yol açar ve bu da akışların geç teslim edilmesi ile sonuçlanır. Temel bir inşaat faaliyetinin en verimli şekilde yürütülebilmesi için en az yedi ön koşul sağlanmalıdır: bağlantılı işler, ayrıntılı inşaat tasarımı, bileşenler ve malzemeler, işçiler, ekipman ve aletler, alan ve dış koşullar (Koskela, 2000).

Her iki mekanizmanın da ölçülmesi, saha yöneticilerinin iş akışı değişkenliğinin temel nedenlerini daha iyi anlamalarını sağlar (Garcia-Lopez & Fischer, 2024). Bu çalışmada, inşaat iş akışı değişkenliğinin nedenleri, bu mekanizmalara göre sınıflandırılmaktadır. Bu

sınıflandırma, yukarı akış değişkenliğinin aşağı akış süreçlerini geciktirebileceği ilkelerini ele alan yalın inşaat ve üretim yönetimi prensipleriyle uyumludur. Bu mekanizmalara odaklanmak, inşaat projelerindeki değişkenliğin yapılandırılmış bir analizini ve yönetimini sağlamaya yardımcı olarak temel nedenlerin ve bunların genel sistem verimliliği üzerindeki etkilerinin belirlenmesini desteklemektedir.



Şekil 6. İş akışı değişkenliği mekanizmalarının kavramsal modeli

Yapı projelerinde iş akışı değişkenliği nedenlerini analiz etmek amacıyla, Google Scholar, Scopus ve Web of Science veri tabanlarında kapsamlı bir arama yapılmıştır. Arama, "iş akışı" (workflow), "değişkenlik" (variability), "yapı projeleri" (construction projects) ve "gecikme" (delay) gibi anahtar kelimeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Arama kapsamı, 2002 yılından itibaren yapı yönetimi alanında yayımlanmış, İngilizce dilindeki makalelerle sınırlandırılmıştır. Elde edilen ilk arama sonuçları, yapı projelerinde iş akışı değişkenliği nedenlerini belirlemek için en uygun çalışmaları seçmek amacıyla özetleri incelenerek taranmıştır. Seçilen çalışmalar daha ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve iş akışı değişkenliği nedenleri çıkarılmıştır. Bu süreç sonucunda, yapı yönetimi alanında yer alan kaynaktan elde edilen 61 neden, Tablo (2)'de özetlenmiştir. İş akışı değişkenliğinin başlıca nedenleri üzerine yapılan önceki çalışmaların kapsamlı bir incelemesi ile elde edilen iş akışı değişkenliği faktörleri ve bu faktörlerin ortaya koyulduğu çalışmalar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. İş akışı değişkenliği nedenleri üzerine önceki çalışmalar

Faktör No.	Faktör	Kaynaklar
1	Alt yükleniciler, üretim değişkenliklerinin diğerlerini nasıl etkilediğini dikkate almadan kendi görevlerine odaklanmaktadır	Gündüz vd. (2013); Lindhard & Wandahl (2014); Javanmardi vd. (2016) ve Umar vd. (2020)
2	Gerekli izinlerin alınarak işin başlamasını sağlamak	Koskela vd. (2002); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
3	Önceki işin tamamlanması	Koskela vd. (2002); Liu & Ballard (2009); Wambeke vd. (2011); Garcia-Lopez & Fischer (2016); ve KV & Bhat (2019)
4	Önceki işin kalitesi nedeniyle yeniden iş yapılması gerekliliği	Koskela vd. (2002); Love & Smith (2003); Assaf & Al-Hejji (2006); Wambeke vd. (2011); Arashpour & Arashpour (2015); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
5	Önceki işin düşük kalitesi (yeniden iş yapılmasını gerektirmeyecek seviyede olsa da)	Love & Smith (2003); Kimpland (2009); Gündüz vd. (2013); Wambeke vd. (2011); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
6	Önceden tamamlanmış işlerin denetimleri	Koskela vd. (2002); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
7	Tasarımın inşa edilebilirliği	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); Khan & Tzortzopoulos (2015); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
8	Döküman kalitesi (tasarım ve/veya çizimlerdeki hatalar)	Wambeke vd. (2011); Jayawardena vd. (2014); Khan & Tzortzopoulos (2015); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
9	Çizimle ilgili bir soru olduğunda mühendislerden geri dönüş süresi	Wambeke vd. (2011); Jayawardena vd. (2014); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
10	Sıkı şartname gereksinimleri	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
11	Kalite kontrol gereksinimleri	Kimpland (2009); Wambeke vd. (2011); Khan & Tzortzopoulos (2015) ve KV & Bhat (2019)
12	İş karmaşıklığı	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
13	İş sırası veya yöntemi iyi planlanmamış	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013) ve Jayawardena vd. (2014)
14	Düşük tekrar derecesi (görev sürekli değişiyor)	Wambeke vd. (2011)
15	Ayrıntılı çalışma yöntemi hakkında yetersiz talimat	Wambeke vd. (2011); Jayawardena vd. (2014) ve Umar vd. (2020)
16	Çalışma arkadaşlarıyla sosyal etkileşim (sohbet etmek)	Wambeke vd. (2011) ve Gündüz vd. (2013)
17	Devamsızlık	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
18	İş gücü devamsızlığı	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013) ve Umar vd. (2020)
19	Düşük moral ve/veya motivasyon eksikliği	Wambeke vd. (2011) ve Gündüz vd. (2013);
20	Görev tamamlanmadan önce yeniden atama	Wambeke vd. (2011)

Tablo 2'nin devamı

21	Ekip boyutu yetersiz	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
22	Personel değişimi (yeni çalışanlar) ile ilgili verimsizlikler	Wambeke vd. (2011) ve Ballesteros-Pérez vd. (2020)
23	Benzer görevlerde deneyim eksikliği (yani tekrarlanmayan görevlerle ilişkili bir öğrenme eğrisi)	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013) ve KV & Bhat (2019)
24	İşçi/ekibin görevi yerine getirmek için yeterli beceri/deneyime sahip olmaması	Kimpland (2009); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Lindhard & Wandahl (2014); Jayawardena vd. (2014); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
25	İşçiler ve/veya işçi-supervizör arasında dil engeli	Wambeke vd. (2011)
26	Ekipman tahsis sorunu	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Lindhard & Wandahl (2014); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
27	Sık ekipman arızaları	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013) ve Umar vd. (2020)
28	Yetersiz modern ekipman	Wambeke vd. (2011) ve Gündüz vd. (2013)
29	Ekipmanın düşük verimliliği	Wambeke vd. (2011) ve Gündüz vd. (2013)
30	Ekipman eksikliği	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
31	Kişisel Koruyucu Donanım (yetersiz, başkası tarafından kullanılıyor, yanlış yerleştirilmiş, kullanılamaz durumda)	Wambeke vd. (2011)
32	Malzemenin ihtiyaç duyulan yere taşınması gerekiyor	Arbulu vd. (2005); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Lindhard & Wandahl (2014); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
33	Malzemenin dağıtıcıdan veya tedarikçiden gelmesi	Arbulu vd. (2005); Liu & Ballard (2009); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); Lindhard & Wandahl (2014); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
34	Sıralanmış malzemelerin hasar görmesi	Arbulu vd. (2005); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
35	Malzeme boyutunda hata	Arbulu vd. (2005); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Lindhard & Wandahl (2014); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
36	Malzeme türünde hata	Arbulu vd. (2005); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Lindhard & Wandahl (2014); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
37	Aşırı kalabalık çalışma alanı / şantiye yoğunluğu	Arbulu vd. (2005); Wambeke vd. (2011); Small & Baqer (2016); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
38	Çalışma alanına zor erişim	Wambeke vd. (2011); Small & Baqer (2016); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
39	Şantiye düzeni (malzeme depolama alanı ile malzemenin iş için gerekli olduğu yer arasındaki mesafe çok fazla)	Wambeke vd. (2011); Lindhard & Wandahl (2014); Small & Baqer (2016); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
40	Tasarım veya çizimle ilgili sorulara yanıt almak için beklemek	Kimpland (2009); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)

Tablo 2'nin devamı

41	Süpervizörden rehberlik veya talimat alma ihtiyacı	Wambeke vd. (2011) ve Gündüz vd. (2013)
42	Saha yöneticisi (ustabaşı) beceri/bilgi eksikliği	Wambeke vd. (2011); Jayawardena vd. (2014) ve Umar vd. (2020)
43	Farklı taşeronlar arasında koordinasyon	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
44	Sıkı bir iş programı nedeniyle aşırı taahhüt	Kimpland (2009); Wambeke vd. (2011) ve Umar vd. (2020)
45	Usta/şefin müsaitliği	Wambeke vd. (2011) ve KV & Bhat (2019)
46	İş kapsamındaki değişiklik	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Assaf & Al-Hejji (2006); Jayawardena vd. (2014); Arashpour & Arashpour (2015); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
47	Formenin iletişim becerileri	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014) ve Umar vd. (2020)
48	Müteahhit/Mühendis ile proje yöneticisi arasındaki iletişim	Kimpland (2009); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
49	Proje yöneticisi ile formen arasındaki iletişim	Kimpland (2009); Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
50	Formen ile işçiler arasındaki iletişim	Wambeke vd. (2011); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
51	Elverişsiz hava koşulları (aşırı sıcak, rüzgar, yağmur, vb.)	Koskela vd. (2002); Liu & Ballard (2009); Wambeke vd. (2011); El-adaway (2012); Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); Lindhard & Wandahl (2014); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
52	Durağan olmayan piyasa talebi	Jayawardena vd. (2014); Arashpour & Arashpour (2015); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
53	Değişime karşı kültürel direnç	Kimpland (2009)
54	Zanaat seviyesinde teknik eğitim eksikliği	Kimpland (2009) ve KV & Bhat (2019)
55	Tamamlanmış işler için finansman ve ödeme	Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
56	Zayıf sözleşme yönetimi	Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
57	Yapım sırasında kazalar	Gündüz vd. (2013); KV & Bhat (2019) ve Umar vd. (2020)
58	Doğal afetler (sel, kasırga, deprem)	Gündüz vd. (2013) ve KV & Bhat (2019)
59	Malzeme fiyatlarında artış	Gündüz vd. (2013); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
60	Ek iş/varietyatlar için yapılan ödemelerde işveren tarafından gecikme	Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)
61	Yükleniciden taşeronlara veya tedarikçilere yapılan ödemelerde gecikme	Gündüz vd. (2013); Jayawardena vd. (2014); KV & Bhat (2019); Ballesteros-Pérez vd. (2020) ve Umar vd. (2020)

İnşaat projelerinde iş akışı değişkenliğini tetikleyen temel mekanizma, amontajdan avalağa faaliyetlerine akışların gecikmeli salınımıdır (Bertelsen vd., 2007; Hamzeh, 2009; Koskela, 2000). Tamamlandığında, amontaj faaliyetleri, birbirine bağlı takipçi bağlantıları aracılığıyla avalağa görevlerini doğrudan etkileyen akışları serbest bırakır (Garcia-Lopez &

Fischer, 2024). İnşaat süreçleri, avalağa faaliyetlerinin performansının büyük ölçüde öncekilerin zamanında tamamlanmasına bağlı olduğu karşılıklı bağımlı ağlar olarak işler (Arashpour vd., 2014; Garrido Martins vd., 2023). Amontaj görevlerinin tamamlanmasındaki değişkenlik, başlangıç zamanlarını değiştiren, gecikmelere yol açan ve bekleme sürelerini artıran şekilde avalağa verimliliği bozarak varyasyon boşluğu israfına neden olur (Hassan & El-Rayes, 2020; Liu vd., 2011; Su vd., 2024; Wambeke vd., 2011; Salhab vd., 2022). Bu bağımlılık, sürekli akışı sürdürmenin ve amontaj değişkenliğini minimize etmenin genel proje performansını iyileştirmedeki kritik rolünü vurgular.

İnşaatta yeniden işleme, proje akışını bozar, sonraki görevleri etkileyen ve planlanan faaliyet sırasını geciktiren bir değişkenlik yaratır (Josephson vd., 2002; Love & Smith, 2003). Genellikle denetimler veya saha gözlemleri sırasında tespit edilen inşaat hatalarından kaynaklanır (Arashpour & Arashpour, 2015; Gündüz vd., 2013). Küçük yeniden işler bile yüklenicileri zorlayarak, takip eden faaliyetleri geciktirir ve önemli takvim aşımına yol açar (Arashpour & Arashpour, 2015). Kötü sıralanmış veya örtüşen görevler, yeniden işi daha da kötüleştirir, avalağa faaliyet sürelerini uzatır ve gecikmeler, kalite düşüşü ve takip eden görevler için ek çaba gibi riskleri artırır (Dehghan & Ruwnapura, 2014; Garrido Martins vd., 2023). Doğru sıralama ve örtüşmeleri minimize etmek, yeniden işi azaltmak ve proje verimliliğini korumak için önemlidir.

İnşaat projeleri genellikle takvimleri karşılamak veya hızlandırmak için baskılarla karşılaşırken, planlama ve programlama uygulamaları çoğu zaman iş akışı değişkenliğini ele almakta yetersiz kalmaktadır (Farag, 2014). Faaliyet sıralaması, genellikle değişkenlik dikkate alınmadan kaynak mevcudiyetine dayalı olarak yapılır, bu da takvim güvenilirliğini zayıflatır (Lindhard vd., 2019). Salhab vd. (2022) tarafından yapılan bir araştırma, kritik faaliyetlerde iş akışı değişkenliğini %80 oranında azaltmanın, zamanında tamamlanma olasılığını %51,9 artırdığını vurgulamaktadır. Bu, her yol üzerindeki faaliyetlerdeki değişkenlik nedeniyle kritik olmayan yolların kritik hale gelme riskini ortaya koymaktadır.

Ayrıca, ardıl görevlerin önceki görev tamamlanmadan başlatılması, tamamlanmamış bilgi aktarımı nedeniyle düşük kaliteli işe yol açabilir (Dehghan & Ruwnapura, 2014). Bu koordinasyon eksikliği, iş akışı değişkenliğini artırarak takvim yönetimini karmaşılaştırır ve proje verimliliğini düşürür. Takvim baskıları nedeniyle tespit edilmeyen hatalar, yalnızca ardıl faaliyetlerin başlatılmasından sonra ortaya çıkarak, bu faaliyetlerin ilk aşamalarında önemli üretim değişkenliğine yol açar. Bu değişkenlik, planlanan sürelerin karşılanması için devam eden baskılarla birleştiğinde, uygulama hatalarına ve ek gecikmelere neden olabilir

(Han vd., 2013). Tamamlanan işlerin yetersiz denetimi, hataların devam etmesine ve tüm iş akışının performansını bozmasına neden olarak sorunu daha da kötüleştirir (Arashpour & Arashpour, 2015).

İnşaat faaliyetlerinin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için birkaç önkoşul gereklidir; bu önkoşullar yerine getirilmediğinde, iş akışı güvenilirliğini engeller ve proje performansını tehlikeye atar (Garcia-Lopez & Fischer, 2016; Koskela, 2000; da Rocha vd., 2016). Hava durumu, işçi grevleri ve ekipman arızaları gibi değişkenlik faktörleri, saha yöneticilerinin kontrolü dışında olup projede zincirleme gecikmelere yol açabilir (Garcia-Lopez & Fischer, 2024). Koskela (2000), verimliliği etkileyen yedi değişkenlik kategorisini belirlemiştir: bağlantılı işler, detaylı tasarım, malzemeler, işçiler, ekipman, alan ve dış koşullar. Wambeke vd. (2011), yönetim, denetim ve bilgi akışını sekizinci bir kategori olarak eklemiştir. Bu önkoşulların değerlendirilmesi, iş akışı değişkenliğini anlamak ve azaltmak için önemlidir; proje performansını iyileştirmeye ve kesintileri en aza indirmeye yönelik bilgiler sunar (da Rocha vd., 2016). Aşağıdaki paragraflar, yedi kategoriye odaklanarak bu faktörleri inceleyecek olup, önkoşul işleri zaten ele alınmıştır.

Tasarım aşamasındaki doğuştan gelen değişkenlik ve belirsizlikler, iş akışını bozarak, geleneksel planlama yöntemlerinin tasarımıyla ilgili zorlukları ele almakta yetersiz kalmasına neden olur (Gündüz vd., 2015). Etkili bir tasarım planlaması, belirli hedeflerin ve bu hedeflere ulaşmak için gereken görevlerin tanımlanmasını gerektirir (Shehab vd., 2023). Yetersiz tasarım detayları, nihai tasarım aşamasında çözilememiş zorluklar bırakarak değişkenliğe yol açar ve bu da doğru inşaat tahminleri ve işletme maliyet hesaplamalarını engelleyen eksik veya belirsiz çizimlere neden olur (KV & Bhat, 2019; Kasım vd., 2017). Ayrıca, müşteri tasarım bilgisi eksiklikleri, örneğin değişiklikleri yansıtan güncellenmiş çizimler, bu sorunları daha da kötüleştirir (Ballesteros-Pérez vd., 2020; Koskela, 2000). Bu hayati bilgi eksikliği, inşaatın uygulanmasını zorlaştırarak, gecikmeler ve yeniden işleme olasılığını artırır (da Rocha vd., 2016; Kazaz vd., 2012). Proje karmaşıklığı, tasarım ve kapsam değişiklikleri, izin sorunları ve inşa edilebilirlik zorlukları gibi faktörler, tasarım aşamasında iş akışı değişkenliğine katkıda bulunan unsurlar olarak belirlenmiştir (Günhan & Arditi, 2007; Khan & Tzortzopoulos, 2015).

Gerekli kaynakların, malzemeler ve ekipmanlar dahil, temin edilmesi, güvenilir bir iş akışının sürdürülebilmesi için esastır (da Rocha vd., 2016). İnşaatte değişkenlik, şu gibi sorunlardan kaynaklanabilir: (1) malzemelerin gerektiği zamanda temin edilememesi, (2) yanlış malzeme teslimatı ve (3) fazla envanter birikimi (Arbulu vd., 2005; Umar vd., 2020).

Malzeme ile ilgili gecikmeler, işçilerin malzemeleri beklemek zorunda kalmalarına ve bu durumun projedeki diğer aşamaları etkilemesine neden olarak iş akışını ve genel proje performansını bozar (Arbulu vd., 2005; Wambeke, 2011). Malzeme akışı değişkenliğini azaltmak, işçi birikintilerini en aza indirir ve daha güvenilir bir iş akışı sağlar (Liu & Ballard, 2009). Fazla envanter, malzeme eksiklikleri ve yanlış teslimatlar, gecikmelere, kötü işçilik ve maliyet aşımına katkıda bulunur (Arbulu vd., 2005; Umar vd., 2020). Enflasyon, inşaat malzemeleri, iş gücü ve makinelerin maliyetini etkileyerek, iş akışı değişkenliğine katkıda bulunur ve sık sık bütçe revizyonları ile proje maliyet aşımına yol açar (Musarat vd., 2021). Enflasyonun etkisini yönetmek, proje maliyetlerini istikrara kavuşturmak ve genel proje başarısını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Musarat vd., 2020b).

İş gücü ile ilgili faktörler, iş akışı verimliliğini önemli ölçüde etkiler; düşük verimlilik genellikle gecikmelere ve kesintilere yol açar (Lindhard vd., 2019). İş akışı değişkenliği, istikrarsız iş gücü akışları ve düşük iş gücü motivasyonundan kaynaklanabilir (Javanmardi vd., 2016; Palaniappan vd., 2007). Kişisel hastalık ve ailevi sorunlar nedeniyle artan devamsızlık, iş akışını bozan, verimliliği düşüren ve ek personel işe almayı gerektiren bir sorun haline gelmiştir (Kocakulah vd., 2016; Gangai, 2014). Etkili planlama, iş gücü de dahil olmak üzere kaynakları uygun şekilde tahsis etmeli, iş akışı tutarlılığını korumalı ve kesintileri en aza indirmelidir (Hamzeh vd., 2019).

Etkisiz bir çalışma ortamı, kötü koşullar ve düşük motivasyonla karakterize edilen, çalışan verimliliğini daha da engeller (Handayani vd., 2021). İnşaat gibi sektörlerde, özellikle liderlik eksikliği nedeniyle işçiler arasında düşük moral, iş akışı değişkenliğine katkıda bulunur (Alhaji Ali vd., 2017; Radjawane & Darmawan, 2022). Nitelikli işçilerin performansı, verimlilik için çok önemlidir; yetersiz performans ve iş gücü eksiklikleri nedeniyle kalabalıklaşma verimsizliklere yol açar (Chandrasekar, 2011; Uğurlu vd., 2021). Şantiyelerdeki aşırı kalabalık, iş akışını engelleyebilir ve gecikmeleri artırabilir (Alhaji Ali vd., 2017; Ballesteros-Pérez vd., 2020). Sonuç olarak, düşük verimlilik, sadece görev hacminin artırılmasından değil, tahmin edilemeyen iş akışlarından kaynaklanır. İş akışı değişkenliği, kesintiler, beklenmeyen değişiklikler ve yetersiz planlamadan kaynaklanır, bu da proje takvimlerinde belirsizliğe yol açar (Liu vd., 2011).

İnşaat iş akışı değişkenliğinin kaynakları arasında gecikmiş ekipman ve malzeme teslimatları, ekipman arızaları, alet arızaları ve işin fiziksel gereklilikleri yer alır (Ballesteros-Pérez vd., 2020). Etkisiz ekipman yönetimi, kötü bakım uygulamaları, yetersiz tedarik planlaması ve yetersiz verimlilik analizleri gibi faktörler, inşaat verimliliğini önemli

ölçüde engelleyebilir (Gurmu & Aibinu, 2017). Vinçler, forkliftler ve aletler gibi temel ekipmanların temin edilememesi, iş gücü verimliliğini bozar ve verimliliği olumsuz etkiler (Dai vd., 2009).

Önleyici bakım stratejilerinin uygulanması, ekipman arızalarını azaltabilir ve verimlilik kayıplarını hafifletebilir (Wireman, 2005). İskeleler ve vinçler gibi kritik ekipmanların eksikliği, uygulama hatalarına, aksamalara yol açabilir ve maliyet, zaman ve kalite sonuçlarını olumsuz etkileyebilir (Attar vd., 2012). Ekipman kıtlığı durumunda, işçilerin verimliliği ve morali düşer, bu da performansı daha da olumsuz etkiler (Danso, 2014). Ekipman tahsisi sorunları, iş akışı değişkenliğine daha da katkı sağlar, inşaatın genel etkinliğini azaltır (Gündüz vd., 2015). Vinçler ve dozerler gibi temel inşaat makinelerinin sık sık arızalanması, operasyonları aksatarak gecikmelere ve verimsiz kaynak kullanımına neden olur, bu da proje takvimlerini ve verimliliği zayıflatır (KV & Bhat, 2019; Funso vd., 2016).

Şantiye yerleşimi, inşaat projelerinde iş akışını etkileyen önemli bir faktördür, çünkü geçici ofislerin, işçi dinlenme alanlarının, vinçlerin, depolama alanlarının, erişim noktalarının ve diğer kritik unsurların yerleştirilmesini içerir (Small & Baqer, 2016; Umar vd., 2020). Zayıf şantiye yerleşim planlaması, iş akışı değişkenliğini kolaylaştırabilir ve proje operasyonlarında aksamalara yol açabilir (Salhab vd., 2022). Fiziksel olarak kısıtlı alanlarda nitelikli işçilerin kalabalıklaşması, özellikle birden fazla yüklenicinin aynı anda çalıştığı durumlarda, araçlara erişimde zorluklar, artan araç kaybı, güvenlik tehlikeleri ve verimsiz ekip yönetimi gibi sorunlara yol açabilir (Jarkas & Radosavljevic, 2013). Bu sıkışıklık, genellikle proje kapsamı ve süresine göre fazla işçi istihdam edilmesinden kaynaklanır ve iş akışı değişkenliğine önemli ölçüde katkıda bulunarak verimliliği azaltır (Alhaji Ali vd., 2017). Kalabalık bir iş sahası, doğrudan iş gücü performansının, verimliliğin ve takvim gecikmelerinin azalmasıyla ilişkilidir. Çalışma alanı kullanılabilirliği azaldıkça, ekip verimliliği de düşer (Guo, 2002; Thomas vd., 2006).

Zayıf yönetim uygulamaları, inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğine ve azalan verimliliğe önemli ölçüde katkıda bulunur (Ballesteros-Pérez vd., 2020; Gurmu & Aibinu, 2017). Jayawardena vd. (2014) tarafından yapılan bir araştırma, Sri Lanka'daki konut inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğinin temel nedenlerini finansal sorunlar, sözleşme belgeleri arasındaki anlaşmazlıklar, kötü koordinasyon ve öngörülemez olaylar olarak belirlemiştir. Benzer şekilde, Kimpland (2009) verimliliği etkileyen önemli bir faktör olarak yavaş yanıt

sürelerini vurgulamış, Wambeke vd. (2011) ise kötü kaliteli planlar, gerçekçi olmayan zaman çizelgesi talepleri ve nitelikli personel eksikliğini ana etkenler olarak göstermiştir.

Etkili sözleşme yönetimi, iş akışı aksaklıklarını azaltmak için kritik öneme sahiptir. Kötü sözleşme yönetimi, performans belirsizliklerine, finansal baskılara ve gecikmelere yol açarak iş akışı değişkenliğine katkıda bulunur (Sümer & Arditi, 2022). Geç ödemeler, iş gücü moralini düşüren ve proje akışını bozan bir diğer önemli gecikme nedenidir (Culfik vd., 2014; Kazaz vd., 2012). Ödenmeyen geç ödemeler, yüklenicilerin işçilere ödeme yapmasını veya gerekli malzemeleri temin etmesini engelleyerek finansal baskılara yol açabilir ve bu da proje takvimlerini ve kalitesini daha da etkileyebilir (Kazaz vd., 2012; Peters vd., 2019).

Düşük verimlilik, genellikle yüksek değişkenlik ve belirsizlikten kaynaklanan, inşaat endüstrisinde önemli bir zorluk olup, daha iyi proje planlaması ve kontrolüne olan ihtiyacı vurgulamaktadır (Salazar vd., 2022). Denetçiler ve işçiler arasındaki zayıf iletişim, etkili proje yürütümüne yönelik en büyük engellerden biri olarak sıkça belirtilmektedir (Loganathan vd., 2018). Yanlış iletişim, kötü koordinasyona, verimsizliklere ve gecikmelere yol açarak iş akışı değişkenliğine katkıda bulunur. Ayrıca, inşaat projelerinde farklı iş kolları arasındaki karmaşık karşılıklı bağımlılıklar, bir iş kolunun üretim kapasitesindeki değişkenliğin sonraki görevleri aksatmasına ve iş akışı değişkenliğini artırmasına neden olabilir (Sacks & Harel, 2006; Javanmardi vd., 2016).

Dışsal faktörler, aşırı hava koşulları ve dalgalanan pazar talepleri, inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğinin önemli kaynaklarıdır (Barriga vd., 2005; El-adaway, 2012). Örneğin, yağmur gibi olumsuz hava koşulları, zanaatkarların evlerine gönderilmesine yol açarak iş akışının tamamen kesilmesine neden olabilir (Arashpour & Arashpour, 2015; Liu & Ballard, 2009). Hava koşullarıyla ilgili faktörler, aşırı sıcaklıklar, yağmur, kar ve rüzgar gibi, inşaatta iş akışı değişkenliğine özgü katkıda bulunan faktörlerdir (Koskela, 1999).

2.3. Anket Araştırması

Bu bölümde, inşaat projelerindeki iş akışı değişkenlik nedenlerine ilişkin verilerin toplanmasında kullanılan birincil nicel yöntem olarak kullanılan anket çalışmasının detayları tanıtılmaktadır. Anket, sektördeki profesyonellerin belirli değişkenlik nedenlerinin sıklığı hakkındaki görüşlerini elde etmek amacıyla tasarlanmıştır. Devam eden alt bölümlerde,

anketin geliştirilmesi, tasarımı ve nihai hale getirilmesi ile anlamlı sonuçlar elde etmek için uygulanan veri analiz teknikleri açıklanmaktadır.

2.3.1. Hedef Kitle ve Örneklem Yöntemi

Araştırma hedefleri doğrultusunda, nicel çalışma iki farklı grubu hedef almıştır: mühendisler ve işçiler. Farklı sorumluluk seviyelerindeki çalışanların bakış açılarının incelenmesi bu grupların ortak katkılarıyla inşaat projeleri başarılı bir şekilde tamamlanabildiği için önemli olmaktadır temel teşkil etmektedir (Wambeke vd., 2011).

Bu çalışmada, nüfusun tüm üyelerinin eşit seçilme şansına sahip olmasını sağlayan basit rastgele örneklem yöntemi kullanılmıştır. Tabakalı rastgele örneklem ve küme örneklem yöntemleri, seçilen grupların nüfusun genel oranlarını doğru şekilde yansıtmayabileceği ya da katılımcıların anlamlı kümelere ayrılmasının zorluğu nedeniyle tercih edilmemiştir.

Hedef katılımcılar iki ana gruba ayrılmıştır:

1. Şantiye yönetim grubu: bu grup proje yöneticileri, şantiye mühendisleri, teknik ofis mühendisleri ve kontrol mühendislerini içermektedir. Bu profesyoneller genellikle planlama, tasarım ve inşaat gibi proje aşamalarına katılmaktadırlar. Görevleri arasında ayrıntılı proje planları oluşturmak, ana yüklenicilerle yakın iş birliği içinde çalışmak ve şantiyedeki faaliyetleri izlemek ve kontrol etmek bulunmaktadır. Bu kapsamlı katılım, onlara şantiye ortamındaki iş akışı değişkenliklerini anlamada derin bir bilgi sağlamaktadır (Montalbán-Domingo vd., 2024). İş akışlarını yönetmedeki bu merkezi rolleri nedeniyle bu hedef kitle grubunun, bu çalışmada kritik öneme sahip olan iş akışı değişikliği nedenlerini belirleme ve değerli bilgiler sunacağı düşünülmektedir.
2. Operasyonel grup: bu grup ustabaşılar ve işçilerden oluşmaktadır. Ustabaşılar, günlük üretim faaliyetlerini denetleyen ve şantiye yönetimi ile işçiler arasında aracılık yapan bir rol üstlenmektedir (Badger vd., 2012; Uwakweh, 2005). İş akışı güvenilirliğini sağlamak için ekipman ve makineleri organize eder, inşaat yöntemlerini ve prosedürlerini uygular ve şantiye faaliyetlerini denetlerler (Salazar vd., 2022). Ustabaşılardan iş gücü ile doğrudan etkileşimleri, sahada karşılaşılan pratik zorluklar ve değişkenlik nedenlerine ilişkin kritik bilgiler elde edilmesine katkı vereceği tahmin edilmektedir.

Bu çalışma, inşaat projelerindeki iş akışı değişkenlik nedenlerini şantiye yönetimi ve operasyonel katılımcılar olmak üzere iki grubun bakış açısından analiz etmeye odaklanmıştır. İki farklı pozisyon seviyesinin (şantiye yönetimi ve operasyonel) iş akışı değişkenlik nedenlerine ilişkin puanlarını karşılaştırmak için Mann-Whitney U testi kullanılmıştır. Bu parametrik olmayan test, %5 anlamlılık düzeyinde iki bağımsız örnek arasındaki anlamlılık ilişkilerini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Takim, 2009). Bu istatistiksel yaklaşım, şantiye yönetimi ve operasyonel katılımcılar arasındaki algılardaki farklılıkları belirlemek için sağlam bir çerçeve sunmuş ve bulguların güvenilirliğini artırmıştır.

2.3.2. Örneklem Büyüklüğü

Örneklem büyüklüğünü tahmin etmek için gereken istatistiksel güce bağlı olarak farklı yöntemler kullanılabilir. Cochran (1977), büyük popülasyonlar için temsil edici bir örneklem boyutunu hesaplamak amacıyla bir denklem geliştirmiştir. Popülasyon büyüklüğü bilinmediğinde, örneklem büyüklüğü Denklem (1) kullanılarak hesaplanabilir: (Sutanapong & Louangrath, 2015a):

$$n = \frac{z^2 pq}{e^2} \quad (1)$$

Burada, n : örneklem büyüklüğünü, z : istenen güven düzeyine karşılık gelen standart normal dağılımın kritik değerini (örneğin, %95 güven düzeyi için 1.96), p : popülasyondaki ilgili özelliğe sahip bireylerin tahmini oranını ve e : istenen hata payını göstermektedir. q ise $(1-p)$ olarak ifade edilir.

Bu formül kullanılarak (buraya formül için kullandığın değişken değerlerini belirtelim: Örneği z , p , e kaç olarak dikkate alındı) çalışmada 201 katılımcıdan oluşan bir örneklem büyüklüğü elde edilmiştir.

Çalışmada inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliklerinin belirlenmesi için geliştirilen anket 300 kişiden oluşan atılımcıya dağıtılmıştır. Katılımcılar ile hem yüz yüze hem de çevrim içi (online) olarak anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu anketlerden 201'i eksiksiz ve kullanılabilir şekilde geri dönmüş, %67'lik bir yanıt oranı sağlanmıştır (125'i yüz yüze, 76'sı çevrimiçi yanıt). Bu yanıt oranı benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Örneğin, Umar vd. (2020) %46,9'luk, KV & Bhat (2019) %65'lik bir yanıt oranlarını elde ederken. Culfık vd. (2014) Türkiye'deki inşaat projelerindeki gecikme

nedenlerine yönelik bir çalışmada 151 yanıt almıştır. Bu yüksek yanıt oranı, bulguların güvenilirliğini ve temsil kabiliyetini artırarak sonraki analizler ile daha genelleştirilebilir çıkarımların elde edilmesine imkan sağlayacağı düşünülmektedir.

2.3.3. Anket Tasarımı

Çalışmada kullanılan anketin ön tasarımı inşaat projelerindeki değişkenlik nedenleriyle ilgili literatür incelemesinden elde edilen faktörler doğrultusunda yapılmıştır. Literatür incelemesine dayanılarak inşaat projelerindeki değişkenlik nedenlerine ilişkin 61 faktör Tablo 2’de özetlenmiştir. Sunulan bu faktörler bir araya getirilerek ön anket hazırlanmıştır. Bu anket, nihai versiyonun oluşturulması için üç aşamada revize edilmiştir: ön düzenleme, yüzey geçerliliği ve pilot çalışma.

Ön anket formunda sunulan faktörler, özellikle literatür incelemesinden elde edilen faktörler, oldukça genel bir yelpaze oluşturmaktaydı. Bu nedenle, bu faktörler, katılımcılar tarafından daha anlaşılabilir ve inşaat projelerine daha uygulanabilir hale getirilmek üzere revize edilmiştir. Ayrıca, bazı tekrarlayan faktörler de çıkarılmıştır. Bu ön inceleme süreci sonucunda 24 faktör çıkarılmış 6 faktör ise değiştirilmiştir (bkz. Tablo 3). Yapılan bu düzenlemeler anket formuna dahil edildikten sonra anketin ilk versiyonu elde edilmiştir. Ardından bu ilk versiyona yüzey geçerliliği ve pilot çalışması uygulanmıştır.

Onaylanan 38 değişkenlik nedeni, sekiz ana kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoriler şunlardır: ön koşul işleri, detaylı tasarım ve çalışma yöntemi, malzemeler ve bileşenler, insan gücü, ekipman ve araçlar, şantiye sahası, yönetim/denetim/bilgi akışı ve dış ortam koşulları.

Tablo 3. Faktörler üzerindeki araştırmacı düzenlemelerinin özeti

No.	Faktör	Durum	Kategori
1	Sadece kendi görevlerine odaklanan, diğer işlerin görevlerini dikkate almayan alt yükleniciler	Kaldırıldı	-
2	Gerekli izinlerin alınarak işin başlamasını sağlamak	Onaylandı	Ön koşul işleri
3	Önceki işin tamamlanması	Onaylandı	Ön koşul işleri
4	Önceki işin kalitesi nedeniyle yeniden iş yapılması gerekliliği	Onaylandı	Ön koşul işleri
5	Önceki işin düşük kalitesi (yeniden iş yapılmasını gerektirmeyecek seviyede olsa da)	Onaylandı	Ön koşul işleri
6	Önceden tamamlanmış işlerin denetimleri	Onaylandı	Ön koşul işleri
7	Tasarımın inşa edilebilirliği	Kaldırıldı	-
8	Döküman kalitesi (tasarım ve/veya çizimlerdeki hatalar)	Değiştirildi	Detaylı tasarım ve çalışma yöntemi

Tablo 3'ün devamı

9	Çizimle ilgili bir soru olduğunda mühendislerden geri dönüş süresi	Kaldırıldı	-
10	Sıkı şartname gereksinimleri	Kaldırıldı	-
11	Kalite kontrol gereksinimleri	Kaldırıldı	-
12	İş karmaşıklığı	Onaylandı	Detaylı tasarım ve çalışma yöntemi
13	İş sırası veya yöntemi iyi planlanmamış	İki faktöre ayrıldı	Ön koşul işleri / Detaylı tasarım ve çalışma yöntemi
14	Düşük tekrar derecesi (görev sürekli değişiyor)	Kaldırıldı	-
15	Ayrıntılı çalışma yöntemi hakkında yetersiz talimat	Kaldırıldı	-
16	Çalışma arkadaşlarıyla sosyal etkileşim (sohbet etmek)	Kaldırıldı	-
17	Devamsızlık	Birleştirildi	İnsan gücü
18	Hastalık, yaralanma, ailevi veya kişisel nedenler nedeniyle geç gelen veya erken ayrılan kişiler	Birleştirildi	İnsan gücü
19	Düşük moral ve/veya motivasyon eksikliği	Onaylandı	İnsan gücü
20	Çalıştığınız iş/görev tamamlanmadan başka bir iş/göreve aktarılma	Onaylandı	İnsan gücü
21	Ekip boyutu yetersiz	Onaylandı	İnsan gücü
22	Personel değişimi (yeni çalışanlar) ile ilgili verimsizlikler	Onaylandı	İnsan gücü
23	Benzer görevlerde deneyim eksikliği (yani tekrarlanmayan görevlerle ilişkili bir öğrenme eğrisi)	Değiştirildi	İnsan gücü
24	İşçi/ekibin görevi yerine getirmek için yeterli beceri/deneyime sahip olmaması	Onaylandı	İnsan gücü
25	İşçiler ve/veya işçi-supervizör arasında dil engeli	Kaldırıldı	-
26	Ekipman tahsis sorunu	Onaylandı	Ekipman ve araçlar
27	Sık ekipman arızaları	Onaylandı	Ekipman ve araçlar
28	Yetersiz modern ekipman	Değiştirildi	Ekipman ve araçlar
29	Ekipmanın düşük verimliliği	Kaldırıldı	-
30	Ekipman eksikliği	Değiştirildi	Ekipman ve araçlar
31	Kişisel Koruyucu Donanım (yetersiz, başkası tarafından kullanılıyor, yanlış yerleştirilmiş, kullanılamaz durumda)	Kaldırıldı	-
32	Malzemenin ihtiyaç duyulan yere taşınması gerekiyor	Onaylandı	Malzemeler ve bileşenler
33	Malzemenin dağıtıcıdan veya tedarikçiden gelmesi	Kaldırıldı	-
34	Sıralanmış malzemelerin hasar görmesi	Değiştirildi	Malzemeler ve bileşenler
35	Malzeme boyutunda hata	Onaylandı	Malzemeler ve bileşenler
36	Malzeme türünde hata	Onaylandı	Malzemeler ve bileşenler
37	Aşırı kalabalık çalışma alanı / şantiye yoğunluğu	Onaylandı	Şantiye sahası
38	Çalışma alanına zor erişim	Onaylandı	Şantiye sahası
39	Malzeme deposu ile çalışmada gereken yer arasındaki mesafenin fazla olması	Kaldırıldı	-
40	Tasarım veya çizimle ilgili sorulara yanıt almak için beklemek	Onaylandı	Yönetim/denetim/bilgi akışı
41	Süpervizörden rehberlik veya talimat alma ihtiyacı	Kaldırıldı	-
42	Saha yöneticisi (ustabaşı) beceri/bilgi eksikliği	Kaldırıldı	-
43	Farklı taşeronlar arasında koordinasyon	Onaylandı	Yönetim/denetim/bilgi akışı
44	Sıkı bir iş programı nedeniyle aşırı taahhüt	Onaylandı	Yönetim/denetim/bilgi akışı
45	Usta/şefin müsaitliği	Kaldırıldı	-
46	İş kapsamındaki değişiklik	Onaylandı	Yönetim/denetim/bilgi akışı

Tablo 3'ün devamı

47	Formenin iletişim becerileri	Kaldırıldı	-
48	Müteahhit/Mühendis ile proje yöneticisi arasındaki iletişim	Onaylandı	Yönetim/denetim/bilgi akışı
49	Proje yöneticisi ile formen arasındaki iletişim	Onaylandı	Yönetim/denetim/bilgi akışı
50	Formen ile işçiler arasındaki iletişim	Onaylandı	Yönetim/denetim/bilgi akışı
51	Elverişsiz hava koşulları (aşırı sıcak, rüzgar, yağmur, vb.)	Onaylandı	Dış ortam koşulları
52	Durağan olmayan piyasa talebi	Kaldırıldı	-
53	Değişime karşı kültürel direnç	Onaylandı	Yönetim/denetim/bilgi akışı
54	Zanaat seviyesinde teknik eğitim eksikliği	Kaldırıldı	-
55	Tamamlanmış işler için finansman ve ödeme	Değiştirildi	Yönetim/denetim/bilgi akışı
56	Zayıf sözleşme yönetimi	Onaylandı	Yönetim/denetim/bilgi akışı
57	Yapım sırasında kazalar	Kaldırıldı	-
58	Doğal afetler (sel, kasırga, deprem)	Kaldırıldı	-
59	Malzeme fiyatlarında artış	Değiştirildi	Malzemeler ve bileşenler
60	Ek iş/varietyatlar için yapılan ödemelerde işveren tarafından gecikme	Kaldırıldı	-
61	Yükleniciden taşeronlara veya tedarikçilere yapılan ödemelerde gecikme	Kaldırıldı	-

İlk anket proje yöneticileri, formenler ve işçilerden oluşan 13 kişilik katılımcıya sunulurken, anketin amaçlanan kavramı ölçüp ölçemeyeceği, alakasız maddelerin çıkarılması veya yeni maddelerin eklenmesi konularında görüş bildirmeleri istenmiştir. Katılımcıların yorumları doğrultusunda, anketin ilk taslağının revizyonu gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, yönetim/denetim/bilgi akışı kategorisinden iki maddenin çıkarılması ve iki yeni maddenin eklenmesi yapılmıştır: bunlardan biri detaylı tasarım ve çalışma yöntemi kategorisine, diğeri ise malzemeler ve bileşenler kategorisine eklenmiştir.

Pilot çalışma kapsamında, anketin uygulanabilirliğini, açıklığını ve doldurma süresini değerlendirmek amacıyla toplam 32 anket dağıtılmıştır. Pilot çalışma kapsamında tamamlanan anketler, geçerlilik ve güvenilirlik analizleri için SPSS programında incelenmiştir. Bu çalışmada, Cronbach alfa ile ölçülen anketin güvenilirliği 0.960 olarak belirlenmiş olup, bu değer kabul edilebilir eşik değer olan 0.7'nin üzerindedir. Bu yüksek güvenilirlik skoru, anketin güvenilir olduğunu ve farklı durumlarda tutarlı sonuçlar üretebileceğini göstermektedir.

Kapsam geçerliliği, araştırma tasarımı ve literatür taraması aşamalarında, incelenen kavramların doğru tanımları verilerek sağlanmıştır. Yüzeysel geçerlilik, anketin açıklığı ve uygunluğu ile ilgili olarak mühendisler ve işçilerden alınan geri bildirimler doğrultusunda

sağlanmıştır. Ancak, karşılaştırılabilecek standart bir değişkenin olmaması nedeniyle bu araştırmada kriter geçerliliği uygulanmamıştır. Son olarak, yapısal geçerlilik, iki normal dağılım gösteren rastgele değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçmek için SPSS aracılığıyla Pearson korelasyon katsayısı kullanılarak değerlendirilmiştir. Pearson korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında değişmektedir; 0 değeri, doğrusal bir ilişkinin olmadığını gösterir. Korelasyon katsayısının -1 veya +1'e yaklaşması, güçlü negatif veya pozitif bir doğrusal ilişkiyi ifade eder (Schober & Schwarte, 2018).

Pearson korelasyon katsayısı değerlerine ek olarak, anlamlılık düzeyleri de incelenmiştir. Araştırma aracı, anlamlılık değeri 0.05'ten küçük olduğunda geçerli kabul edilmektedir (Schober & Schwarte, 2018). Tablo 4, Türk inşaat projelerinde "iş akışı değişkenliği nedenleri" başlığı ile yapılan anketin toplam yapısıyla her bir maddesi arasındaki Pearson korelasyonlarına dayalı olarak yapısal geçerlilik sonuçlarını sunmaktadır. Tüm korelasyon değerleri beklenen yönde olup, 0.05 güven düzeyi ve serbestlik derecesi ($N=32-2=30$) için standart Pearson katsayısı >0.349 'un üzerindedir. Ayrıca, tüm korelasyonlar $p < 0.05$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur.

Tablo 4. Yapısal geçerlilik sonuçları

Faktör	Korelasyonlar	Toplam
Çalışmaya başlamak için gerekli izinlerin alınması	Pearson Korelasyonu	.358*
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.044
Planlanan faaliyetlerin sıralaması	Pearson Korelasyonu	.412*
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.019
Önceki işlerin tamamlanmamış olması	Pearson Korelasyonu	.617**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Tamamlanmış işler için yapılması gereken denetimler (Kalite testleri vb.)	Pearson Korelasyonu	.453**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.009
Önceki işlerin kalitesizliği nedeniyle yeniden yapılmanın gerekli olması	Pearson Korelasyonu	.627**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Önceki işlerin düşük kalitesi nedeniyle tadilatın gerekli olması	Pearson Korelasyonu	.738**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Tasarım ve/veya çizimlerdeki hatalar	Pearson Korelasyonu	.580**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.001
Uygulama projelerinin yeterince detaylandırılmaması	Pearson Korelasyonu	.558**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.001
İşin zorluğu	Pearson Korelasyonu	.512**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.003
İyi planlanmamış çalışma yöntemi	Pearson Korelasyonu	.708**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Malzemenin şantiye sahası içerisinde ihtiyaç duyduğunuz yere taşınması	Pearson Korelasyonu	.370*
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.037
Malzemenin tedarik süresinin fazlalığı	Pearson Korelasyonu	.463**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.008
Malzemelerin depolanma problemleri (Çok fazla veya bozuk malzeme depolama)	Pearson Korelasyonu	.706**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000

Tablo 4'ün devamı

Malzeme boyutunda hata	Pearson Korelasyonu	.704**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Malzeme tipinde hata	Pearson Korelasyonu	.661**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Enflasyon (Malzeme fiyatlarındaki artış)	Pearson Korelasyonu	.466**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.007
İşçilerin/ekiplerin beceri/tecrübe/eğitim eksikliği	Pearson Korelasyonu	.778**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Düşük üretkenlik	Pearson Korelasyonu	.706**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Hastalık, yaralanma, ailevi veya kişisel sebeplerden dolayı geç kalma ve/veya işten erken ayrılma	Pearson Korelasyonu	.622**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Moral ve/veya motivasyon eksikliği	Pearson Korelasyonu	.670**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Üzerinde çalıştığınız iş tamamlanmadan önce başka bir işe/göreve geçmek	Pearson Korelasyonu	.773**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Ekip sayısının yetersizliği	Pearson Korelasyonu	.759**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Yeni personele işin devredilmesi ile ilgili verimsizlikler	Pearson Korelasyonu	.810**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Uygun ekipmanın bulunmaması	Pearson Korelasyonu	.679**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Ekipman arızaları	Pearson Korelasyonu	.679**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Ekipman için teknik eğitimin yetersizliği	Pearson Korelasyonu	.675**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Aktiviteler için ekipman dengelenmesi problemi	Pearson Korelasyonu	.766**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Aşırı kalabalık çalışma alanı/şantiye tıkanıklığı	Pearson Korelasyonu	.561**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.001
Şantiye sahasına zor erişilmesi	Pearson Korelasyonu	.756**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Detaylı sözleşme olmaması	Pearson Korelasyonu	.530**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.002
Tamamlanan işler için düzensiz finansman ve ödeme	Pearson Korelasyonu	.710**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Tasarım veya çizimle ilgili sorulara geç cevaplar verilmesi	Pearson Korelasyonu	.675**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Değişime karşı kültürel direnç (Yeni teknolojilerin kullanılmaması vb.)	Pearson Korelasyonu	.714**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Farklı yükleniciler arasındaki koordinasyon eksikliği	Pearson Korelasyonu	.758**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Esnek ve gerçekçi olmayan iş programı	Pearson Korelasyonu	.703**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
İşin kapsamındaki değişiklikler	Pearson Korelasyonu	.671**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Proje paydaşları (proje müdürü, şantiye şefi, ustabaşı, işçiler vb.) arasındaki kötü veya eksik iletişim	Pearson Korelasyonu	.727**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.000
Kötü hava şartları (Aşırı sıcak, soğuk, rüzgar, yağmur vb.)	Pearson Korelasyonu	.509**
	Anlamlılık (2 yönlü)	0.003
Toplam	Pearson Korelasyonu	1
	Anlamlılık (2 yönlü)	

* Korelasyon 0.05 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır (2 yönlü).

** Korelasyon 0.01 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır (2 yönlü).

2.3.4. Anketin Son Hali

Anket tasarımı, literatür taraması, yapılan ön düzenlemeler, yüzey geçerliliği ve pilot çalışma aşamalarından geçmiştir. Her aşamada, anket daha net ve ilgili maddeleri içeren en iyi versiyonları geliştirmek amacıyla yeniden düzenlenmiştir. Bu süreçte bazı maddeler değiştirilmiş, bazıları çıkarılmış ve bazıları ise diğer maddelerle birleştirilmiştir. Tablo 5, her aşamada yapılan düzenlemeleri ve ankete dahil edilen son madde sayısına ulaşılan kadar süreçte elenen faktörleri özetlemektedir.

Tablo 5. Anketin nihai haline getirilme süreci

Bölümler	Değişiklik Süreci					Nihai Faktörler
	Ön İnceleme	Yüzeysel Geçerlilik			Pilot Çalışma	
		Silinen	Değiştirilen	Yeni	Silinen	
Ön koşul işleri	6	-	1	-	-	6
Detaylı tasarım ve çalışma yöntemi	3	-	-	1	-	4
Malzemeler ve bileşenler	5	-	1	1	-	6
İnsan gücü	7	-	1		-	7
Ekipman ve araçlar	4	-	-	-	-	4
Şantiye sahası	2	-	-	-	-	2
Yönetim/denetim/bilgi akışı	10	2	2	-	-	8
Dış ortam koşulları	1	-	-	-	-	1

Nihai hale getirilen anket, inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerini ele alan sekiz ana grup başlığı altında toplam 38 maddeden oluşmaktadır. Değişiklik sürecinin ardından, anket maddeleri, SPSS kullanılarak verilerin etkili bir şekilde girilmesi ve analiz edilmesini kolaylaştırmak amacıyla sistematik olarak yeniden kodlanmıştır. Başlangıçta İngilizce olarak geliştirilen anket, Ek 1-A'da sunulmaktadır. Türkçe dilinin katılımcılar tarafından daha iyi anlaşılmasını sağlayacağı ve daha doğru ve gerçekçi yanıtlar alınmasına olanak tanıyacağı düşünülmüş, nihai anket Türkçeye çevrilmiştir. Anketin Türkçe versiyonu Ek 1-B'de yer almaktadır.

Acha'ya (2018) göre, veriler kategorik ve sürekli veri olarak sınıflandırılabilir; sıralı (ordinal) ve ad nominal (nominal) veriler kategorik, aralık (interval) ve oran (ratio) veriler ise sürekli veri olarak kabul edilir. Bu çalışmada, anket hem nominal hem de ordinal veri içermektedir. Nominal veriler, anketin genel bilgiler kısmında kullanılmıştır. Ordinal veriler ise katılımcıların 5 dereceli Likert ölçeği üzerinden perspektiflerini belirtmelerine olanak tanımak için kullanılmıştır. Bu bağlamda, anket iki bölümden oluşmaktadır:

- Bölüm A: Genel bilgiler (6 sorudan oluşmaktadır, S1'den S6'ya kadar). Bu bölümdeki veriler nominal verilerdir.

- Bölüm B: Katılımcılardan, inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerini derecelendirmelerini talep eder (38 maddeden oluşur, 8 gruba ayrılmıştır). Bu bölümdeki veriler ordinal verilerdir.

Katılımcıların sıralı düzeydeki sorulara olan tutumlarını belirlemek için Likert ölçeği kullanılmıştır. Likert ölçekleri, bir soru veya ifadeye verilen yanıtların bir dizi seçenikle ölçülmesini sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Holt, 2014a; Jamieson, 2004). Likert'e göre, herhangi bir nesneye veya konuya yönelik tutumlar, aynı temel negatiften pozitive uzanan bir boyutta değişkenlik gösterir (Johns, 2010). Genellikle beş yanıt kategorisi bulunur, ancak dört ila yedi yanıt kategorisi arasında değişen ölçekler de mevcuttur (Jamieson, 2004). Bu çalışmada, tüm sorular için (A Bölümü soruları hariç) 1 (çok düşük) ile 5 (çok yüksek) arasında değişen beş dereceli Likert ölçeği kullanılmıştır. Beş dereceli ölçeğin norm haline gelmesinin nedeni, yeterli seçenek sunma ile katılımcılar için işleri yönetilebilir kılma gibi çelişen hedefler arasında bir denge kurmasıdır (Johns, 2010).

Anket, Haziran 2023'te karma bir yöntemle gerçekleştirilmiştir; anketler hem yüz yüze dağıtılmış hem de çevrimiçi olarak sunulmuştur. Yüz yüze anketler, Trabzon'daki inşaat sahalarındaki katılımcılara yönelik olarak uygulanmış, çevrimiçi dağıtım ise Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden daha geniş katılım sağlanmasına olanak tanımıştır. Bu yaklaşım, farklı alanlardaki katılımcılara ulaşma konusundaki lojistik zorluklara çözüm sunarken çeşitli bir örneklem grubu elde edilmesini sağlamıştır.

2.3.5. Veri Analizi

Bu çalışmada hem tanımlayıcı hem de çıkarımsal istatistiksel yöntemler kullanılmış olup, ilgili bölümlerde detaylandırılmıştır. Tanımlayıcı analiz için, anketin Bölüm B'sinde sunulan ve inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerini temsil eden faktörlerin sıralanmasında Göreceli Önem Endeksi (Relative Importance Index, RII) kullanılmıştır.

Parametrik bir teknik olan Keşifsel Faktör Analizi (Exploratory Factor Analysis, EFA), inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin anketten elde edilen verilerin normal dağıldığı ve parametrik analiz için gerekli varsayımları karşıladığı tespit edildiği için uygulanmıştır. EFA, değişkenler arasındaki ilişkileri analiz ederek temel faktörlerin tanımlanmasında önemli bir rol oynamış ve değişkenlik nedenlerinin daha derin bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır.

Buna ek olarak, Mann-Whitney testi, eşit olmayan büyüklükteki iki örnek grubunun (katılımcıların %20'si operasyonel düzeyde, %80'i saha yönetimi düzeyinde) algılarını

karşılaştırmak için uygulanmıştır. Bu asimetrik örneklem dağılımı nedeniyle, Mann-Whitney testi, normallik varsayımına dayanmayan güvenilir bir karşılaştırma yöntemi olarak tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, iki katılımcı kategorisi arasında iş akışı değişkenliği faktörlerine ilişkin bakış açılarındaki farklılıklar hakkında sağlam içgörüler sunmuştur.

Tablo 6, araştırma soruları ve hipotezlere göre kullanılan istatistiksel yöntemleri özetlemektedir.

Tablo 6. Araştırma soruları ve hipotezlere göre benimsenen istatistiksel yöntemler

Araştırma sorusu	Araştırma hipotezi	İstatistik türü
Türk inşaat projelerinde en önemli değişkenlik nedenleri nelerdir?	Türk inşaat projelerindeki iş akışı değişkenlik nedenleri önem derecesine göre sıralanabilir.	RII
Değişkenlik nedenlerini özetleyen ana faktörler nelerdir?	Değişkenlik nedenleri, ana temel nedenleri özetleyen belirgin faktörlere gruplandırılabilir.	EFA
İnşaat projelerindeki değişkenlik nedenleri, saha yönetimi ve operasyonel görüş açısından farklılık gösterir mi?	H0: İnşaat projelerindeki değişkenlik nedenleri, saha yönetimi ve operasyonel bakış açısına göre farklılık göstermez. H1: İnşaat projelerindeki değişkenlik nedenleri, saha yönetimi ve operasyonel bakış açısına göre farklılık gösterir.	Mann-Whitney U testi

Daha önce değinildiği üzere anketten toplanan veriler nominal ve ordinal veri türlerini içermektedir. Jamieson (2004), ordinal verilerin analizinde ortalama ve standart sapma gibi tanımlayıcı istatistiklerin uygun olmadığını belirtmiştir. Bunun yerine, yanıt ölçeklerinden elde edilen anket verileri genellikle RII yöntemiyle analiz edilir (Holt, 2014b). Bu çalışmada, RII yöntemi, anketin B Bölümündeki maddeleri analiz etmek ve sıralamak için kullanılmıştır. RII değerlerinin elde edilmesinde Denklem (2) kullanılmıştır (Gunduz vd., 2015; Umar vd., 2020):

$$RII = \frac{\sum_{i=1}^n i * \text{Frekans}_i}{A * N} \times 100 \quad (2)$$

Burada, i : $A_{\min}$ ile $A_{\max}$ (bu durumda 1 ile 5) arasında değişmektedir, A : yanıt ölçeğindeki en büyük tam sayıyı ifade eder ($A_{\max} = 5$), N : toplam katılımcı sayısını temsil eder. $(\text{Frekans} \times 100) / N$ terimi, SPSS kullanılarak hesaplanan geçerli yüzdelik değeri ifade eder. Bu geçerli yüzdelik oranları, Denklem (2) kullanılarak Microsoft Excel yardımıyla RII'yi hesaplamak için kullanılmıştır. RII değerleri 0 ile 100 arasında değişir ve daha yüksek RII skorları, daha yüksek önemi ifade eder.

Mann-Whitney U testi, normal dağılıma sahip olmayan veriler ve küçük örneklem boyutlarıyla başa çıkmadaki dayanıklılığı sayesinde iki bağımsız grubun sıralamalarını karşılaştırmak amacıyla seçilmiştir. İş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin bireysel maddelerdeki puanların iki farklı pozisyon seviyesinden (şantiye yönetimi ve operasyonel) gelen gruplar arasında karşılaştırılması için, Mann-Whitney U testi %5 anlamlılık düzeyinde iki bağımsız örnek arasındaki herhangi bir anlamlı ilişkiyi ölçmek amacıyla kullanılmıştır (Cheng vd., 2004; Takim, 2009).

Mann-Whitney U testi, iki grubun ortalamalarının birbirinden farklı olup olmadığını belirlemek için yaygın olarak kullanılan parametrik olmayan bir testtir. p -değerleri, her bir madde için 0.05 anlamlılık düzeyinde sıfır hipotezin reddedilme olasılığını tahmin eder. Bir maddenin p -değeri 0.05'ten küçükse, sıfır hipotez reddedilir (Arditi vd., 2013). Başka bir deyişle, p -değeri 0.05'ten küçükse, bu durum şantiye yönetimi ve operasyonel grupların inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin algılarının anlamlı bir şekilde farklılık gösterdiği anlamına gelir.

Çoklu doğrusal bağımlılık, bağımsız değişkenlerin yüksek düzeyde ilişkili olduğu bir durumdur ve genellikle iş akışı değişkenliği nedenleri arasında görülür; bu durum, faktör analizini uygun bir analitik araç haline getirir. Faktör analizi, karmaşık ilişkileri basitleştirerek değişkenleri temel faktörler altında gruplandırarak ilişkili verilerdeki gizli yapıları tanımlar (Hair vd., 2019). Çoklu doğrusal bağımlılığın varlığı nedeniyle, bu çalışma inşaat projelerindeki iş akışı kesintilerine katkıda bulunan temel değişkenlik faktörlerini belirlemek için EFA uygulamaktadır.

Faktör analizi yöntemleri, EFA ve Doğrulamalı Faktör Analizi (Confirmatory Factor Analysis, CFA) dahil olmak üzere, faktör yapılarını değerlendirir ancak farklı amaçlara hizmet eder. EFA, faktör yapılarını önceden belirlenmiş bir beklenti olmadan keşfederek teori oluşturmayı desteklerken CFA, belirli faktör hipotezlerini test ederek önceden tanımlanmış yapılar gerektirir (Kline, 2016). Bu çalışma, EFA'yı veri uygunluğunu kontrol etme, çıkarım yöntemlerini seçme, rotasyon tekniklerini belirleme, faktörleri tanımlama ve adlandırma gibi bir süreci izleyerek uygulamaktadır (Taherdoost vd., 2014; Williams vd., 2010). Şekil 7 bu kilit metodolojik hususları vurgulayarak EFA sürecini özetlemektedir.



Şekil 7. Keşifsel faktör analizi adımları (Williams vd., 2010)

Adım 1: Verilerin faktör analizine uygunluğunun değerlendirilmesi

Güvenilir ve yorumlanabilir faktör analizi sonuçları elde etmek için temsil edici ve yeterince büyük bir örneklem büyüklüğü gereklidir, çünkü bu durum sağlam korelasyon katsayıları ve anlamlı faktör yapıları sağlar (Henson & Roberts, 2006; Widaman, 2012). Bu çalışmada, 201 katılımcıdan oluşan bir örneklem büyüklüğü, 120'nin üzerindeki örneklem büyüklüklerini kullanan önceki inşaatla ilgili araştırmalara dayanarak (Wambeke vd., 2011), EFA için yeterli görülmüştür.

Değişkenler arasındaki ilişkileri değerlendirmek için bir korelasyon matrisi (R-matrisi) incelenmiştir. Her değişken kendisiyle mükemmel şekilde korelasyon gösterir (diyagonal elemanlar = 1), diğer elemanlar ise değişkenler arasındaki korelasyon katsayılarını temsil eder. 0.3'ün üzerindeki korelasyon katsayıları, değişkenler arasında yeterli ortak varyansı gösterir ve faktör analizi yapılmasını destekler (Taherdoost vd., 2014; Williams vd., 2010). 0.3'ten düşük korelasyon katsayıları veya diğer değişkenlerle aşırı yüksek korelasyon gösteren değişkenler ($R > 0.9$) çoklu bağlantı sorunlarını önlemek için gözden geçirilmiştir.

EFA için örneklem uygunluğunu ve veri uygunluğunu doğrulamak amacıyla iki istatistiksel test uygulanmıştır:

- Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Ölçümü: 0.5'in üzerinde bir KMO indeksi, değişkenler arasında ortak varyans bulunduğunu ve gizli faktörlerin varlığını

doğrular; bu da veri setinin faktör analizi için uygun olduğunu gösterir (Howard, 2016).

- Bartlett Küresellik Testi: Bartlett testinden elde edilen anlamlı bir sonuç ($p < 0.05$), korelasyon matrisinin bir birim matris olmadığını gösterir ve değişkenler arasındaki ilişkilerin faktör çıkarımı için yeterli olduğunu doğrular (Ayarkwa vd., 2012a; Howard, 2016).

Bu adımlar, veri setinin doğru ve anlamlı bir faktör analizi yapmak için gerekli kriterleri karşıladığını garanti altına almıştır.

Adım 2: Faktör çıkarımı

Faktör çıkarımı için kullanılan çeşitli yöntemler arasında Temel Bileşenler Analizi (Principal Components Analysis, PCA), Temel Eksen Faktörlemesi (Principal Axis Factoring, PAF), görüntü faktörlemesi, maksimum olabilirlik, alfa faktörlemesi ve kanonik faktörleme yer alır (Howard, 2016; Taherdoost vd., 2014; Williams vd., 2010). Bu yöntemler arasında, PCA ve PAF en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Özellikle PCA, birçok istatistiksel yazılım paketinde varsayılan yöntem olarak sunulduğundan sıkça tercih edilmektedir (Reio & Shuck, 2015; Taherdoost vd., 2014).

PCA'nın amacı, büyük değişken setlerini, gözlemlenen varyansın mümkün olduğunca fazlasını koruyarak yoğunlaştırmaktır; bu süreçte temel yapılar açıkça yorumlanmayabilir. PCA, ortak ve benzersiz varyansı değerlendirerek, ortak varyansa bağlı ölçüm hatasını azaltmayı hedefler (Conway & Huffcutt, 2003; Henson vd., 2004). Bu çalışmada PCA, değişken setini sadeleştirmek için tercih edilmiştir. Howard (2016), Reio & Shuck (2015) ve Taherdoost vd. (2014) tarafından sağlanan rehberliğe dayanarak, gizli yapıları doğrudan çıkarmadan değişkenlerin basitleştirilmesine odaklanılmıştır.

Adım 3: Rotasyon yönteminin seçimi

Çoğu faktör analisti, doğrudan faktör çıkarım çözümlerinin genellikle yetersiz olduğunu ve faktör yüklemelerini netleştirerek başlangıçtaki belirsizlikleri azaltmak için rotasyonun gerekli olduğunu kabul etmektedir. Rotasyon, referans eksenlerinin manipüle edilmesiyle, faktör yapılarının basitliğini ve yorumlanabilirliğini artırır (Reio & Shuck, 2015; Taherdoost vd., 2014).

Rotasyonun temel amacı, öğelerin bir faktör üzerinde güçlü yüklemeler yaparken diğer faktörlerde minimum yükleme gösterdiği açık bir faktör yapısı elde etmektir (Field, 2005; Suhr, 2006; Williams vd., 2010). Rotasyon teknikleri, ortogonal (ör. quartimax, varimax) ve oblique (ör. promax, direct oblimin) yöntemleri içerir. Ortogonal rotasyon faktörler arasında

ilişkiye izin vermezken, oblique rotasyon faktörlerin birbiriyle ilişkili olmasına olanak tanır; bu da genellikle daha fazla tercih edilmesini sağlar (Howard, 2016; Taherdoost vd., 2014; Williams vd., 2010).

Ortogonal rotasyonlar, özellikle Varimax, birçok istatistiksel yazılımda varsayılan yöntemdir ve faktör yapılarının yorumlanabilirliğini artırarak yüklemeler arasındaki varyansı artırma yetenekleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Thompson, 2009). Bu avantajları göz önünde bulundurarak, bu çalışmada Varimax rotasyon yöntemi benimsenmiştir (Howard, 2016).

Adım 4: Faktör saklama yöntemi

Faktör çıkarımından sonra, saklanacak faktör sayısının belirlenmesi, EFA ve PCA süreçlerinde kritik bir adımdır (Taherdoost vd., 2014). Hem fazla hem de yetersiz faktör çıkarımı, sonuçları olumsuz etkileyebilir (Costello & Osborne, 2019). Saklanan faktörlerin, veri setindeki varyansın büyük bir kısmını açıklaması gerekir (Van der Eijk & Rose, 2015; Suhr, 2006).

Bu amaçla kullanılacak farklı yöntemler farklı sonuçlar verebilir (Taherdoost vd., 2014). En popüler yöntemlerden biri olan Kaiser kriteri, Eigenvalue (özdeğer) > 1 olan faktörleri saklar; çünkü daha küçük özdeğerlere sahip faktörler minimal ortak varyansı temsil eder ve hariç tutulur (Suhr, 2006). Bir diğer yaygın yöntem olan Scree Testi, özdeğerleri azalan sırada görselleştirir ve eğrinin düzleştiği "dirsek" noktasında saklama kesimini tanımlar (Hooper, 2012). Bu çalışmada, Kaiser kriteri (Eigenvalue > 1) esas alınmış ve doğrulama amacıyla Scree grafiği de kullanılmıştır.

Başarılı bir faktör analizinin önemli bir ölçütü, açıklanan varyanstır. Sosyal bilimlerde %50-60 arasında bir kümülatif varyans genellikle yeterli kabul edilir (Hooper, 2012). Bu çalışmada, %50'lik bir eşik benimsenmiştir.

Ortak varyans, her bir değişkenin analizde diğerleriyle paylaştığı varyansı temsil eder ve rotasyon sırasında değişkenlerin tutulup tutulmayacağına karar vermede yardımcı olur. Aynı zamanda örneklem yeterliliğini de gösterir (Field, 2005). PCA başlangıçta tüm varyansın ortak olduğunu varsayar (ortak varyanslar 1 olarak belirlenir); ancak faktörler çıkarıldıktan sonra güncellenmiş ortak varyanslar, her değişkenin faktörlerle paylaştığı varyansı yansıtır (Field, 2009; Suhr, 2006). Yüksek ortak varyans değerleri, temel bileşenlerin orijinal varyansın büyük kısmını yakaladığını gösterirken, düşük ortak varyanslar açıklanamayan varyansı işaret eder (Larose & Larose, 2015). Sosyal bilimlerde genellikle 0.40 ile 0.70 arasında ortak varyans değerleri yaygındır (Costello & Osborne,

2019; Taherdoost vd., 2014). 0.40'ın altındaki değerler, ilişkisiz maddelere veya ek faktörlere işaret edebilir (Taherdoost vd., 2014). Bu çalışmada, 0.5'in altındaki ortak varyans değerine sahip değişkenler çıkarılmış ve tüm kalan değişkenler bu eşik değeri karşılayana kadar faktör analizi tekrarlanmıştır.

Faktör yükleri, PCA'daki bileşen ağırlıklarına benzer şekilde, her bir değişken ile yüklendiği faktör arasındaki korelasyon gücünü yansıtır (Larose & Larose, 2015). Güçlü faktör yükleri (genellikle 0.40'ın üzerinde), faktöre sağlam bir katkıyı işaret ederken, zayıf yükler veya çapraz yüklenmeler, değişkenin çıkarılmasını gerektirebilir (Hooper, 2012). Faktör yüklerinin anlamlılığı için yaygın olarak kabul edilen bir kesim noktası 0.5'tir (Costello & Osborne, 2019). Bu çalışmada, çapraz yüklenen maddeler hariç tutulmuş ve her faktörün kararlı ve yorumlanabilir olması sağlanmıştır.

Adım 5: Yapıların Yorumlanması ve Etiketlenmesi

Yorumlama, bir yapıya atfedilebilecek değişkenleri seçme ve bu yapıya bir ad verme sürecidir. Yapıların etiketlenmesi teorik, öznel ve tümevarımsal bir süreçtir (Pett vd., 2003). Yorumlama, araştırmacının hangi değişkenlerin bir faktöre ait olduğunu incelemesini ve bu faktöre bir ad veya tema vermesini içerir (Williams vd., 2010). Yapıların etiketlerinin, teorik ve kavramsal amacı yansıtmaları büyük önem taşır (Taherdoost vd., 2014). Daha yüksek faktör yüklerine sahip olan bu değişkenler, her bir faktörün temsil ettiği temel örtük değişkenin doğasını tanımlamak için kullanılır (Hooper, 2012). Bu çalışmada, her bileşen için yüksek yükleme faktörüne dayalı olarak faktör etiketleme yapılmıştır.

2.4. Yarı Yapılandırılmış Görüşmeler

Bu araştırmada, yarı yapılandırılmış görüşmeler, iş akışı değişkenliğine katkıda bulunan temel faktörlerin nicel etkilerini uzman görüşleriyle yakalamak amacıyla kullanılmıştır. Bu yaklaşım, açık uçlu verilerin toplanmasını kolaylaştırmakla kalmayarak, aynı zamanda katılımcıların deneyimlerini ve algılarını serbestçe ifade etmelerine olanak tanımaktadır (Adeoye-Olatunde & Olenik, 2021; Kallio vd., 2016; Ruslin vd., 2022). Bu faktörlere ilişkin ayrıntılı ve nitel veriler toplanarak, simülasyonları bilgilendirmek ve kapasite tamponlarının iş akışı kesintilerini hafifletme üzerindeki etkilerini daha ileri düzeyde değerlendirmek için güvenilir değişkenlik oranları oluşturulması hedeflenmiştir.

2.4.1. Görüşmelerin Amacı

Yarı yapılandırılmış görüşmeler, inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğine neden olan faktörlerin nicel etkilerini anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. EFA sonuçlarına göre, kaynaklarla ilgili faktörler, inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğinin başlıca nedenleri olarak belirlenmiş ve bu faktörlerin etkilerinin daha derinlemesine anlaşılmasını gerektirmiştir. Görüşmelerin temel amacı, bu faktörlerin pratik sonuçlarını sektör profesyonelleriyle tartışmak ve simülasyon senaryolarında kullanılabilecek sayısal değişkenlik oranlarını elde etmektir.

Uzmanlardan doğrudan veri toplanmasıyla gerçekleştirilen görüşmelerin aşağıda verilen hedeflere ulaşılmasına katkıda bulunması amaçlanmıştır:

- Faktörlerin önemini doğrulama: EFA sonuçlarında vurgulanan kaynaklarla ilgili faktörlerin iş akışı aksaklıklarına neden olma açısından önemini ve etkisini doğrulamak.
- Sayısal değişkenlik oranlarını belirleme: Kalitatif verileri, kaynak değişkenliğinin etkilerini temsil eden belirli sayısal değerlere dönüştürmek. Bu değerler, farklı senaryolarda iş akışı değişkenliğini doğru bir şekilde modellemek ve simüle etmek için gereklidir.
- Tampon stratejisini geliştirme: Kaynak faktörlerinden kaynaklanan iş akışı değişkenliğini hafifletmek için en uygun strateji olarak kapasite tamponlarının seçimini yönlendirmek amacıyla uzman görüşleri toplama.

Sonuç olarak, görüşmelerin amacı, simülasyon modelinin gerçekçi verilere dayanmasını sağlamak ve böylece iş akışı üzerindeki değişkenliğin etkilerini ve kapasite tamponlarının israfı en aza indirme potansiyelini değerlendirmede çalışmanın doğruluğunu artırmaktır.

2.4.2. Görüşmecilerin Profili

Araştırmanın odak noktasına uygun belirli kriterlere dayalı olarak görüşmecilerin seçilmesi için amaçlı örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Bu rastgele olmayan örnekleme tekniği, iş akışı değişkenliği ve kaynak tahsisi zorluklarını yönetme konusunda doğrudan deneyime sahip katılımcıların kasıtlı olarak seçilmesini sağlamıştır (Faber & Fonseca, 2014; Taherdoost, 2016). Kaynaklarla ilgili faktörlerin inşaat proje takvimlerine etkisini bilen

bireyleri hedefleyerek, bu faktörlerin proje zaman çizelgeleri üzerindeki etkisiyle doğrudan ilişkili ayrıntılı bilgilerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Görüşmeciler, inşaat projelerinde kilit roller üstlenen profesyonellerden oluşmaktadır. Bunlar arasında proje yöneticileri, teknik yöneticiler ve saha yöneticileri bulunmaktadır. Her katılımcının sektörde önemli ölçüde deneyime sahip olması, sundukları bilgilerin pratik bilgiye dayalı olmasını ve çalışmanın iş akışı değişkenliğini tampon stratejileriyle yönetmeye odaklanmasıyla uyumlu olmasını sağlamıştır. Tablo 7, görüşmecilerin pozisyonlarını, deneyim yıllarını ve kurumsal bağlılıklarını özetlemektedir.

Tablo 7. Görüşmecilerin demografik bilgileri

No.	Pozisyon	Deneyim (yıl)	Kuruluş
1	Proje müdürü	15	Yüklenici
2	Teknik müdür	9	Yüklenici
3	Teknik müdür	9	Yüklenici
4	Şantiye şefi	7	Yüklenici
5	Şantiye şefi	8	İşveren

2.4.3. Görüşme Yapısı ve Soruları

Yapı sektörü uzmanları olan proje yöneticileri, teknik yöneticiler ve saha yöneticilerinden oluşan beş seçilmiş uzmanla birebir yüz yüze yapılan yarı yapılandırılmış görüşmeler, inşaat iş akışlarını etkileyen değişkenlik faktörleri hakkında ayrıntılı ve özel bilgiler toplamak ve modelleme amaçları için uygun değişkenlik oranlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Görüşmelerin bireysel olarak yapılması, her uzmanın deneyim ve bakış açısının tam anlamıyla keşfedilmesine olanak tanıyarak odaklanmış ve kişiselleştirilmiş bir tartışma ortamı sağlamıştır.

Görüşmeler, çalışmanın ana hedeflerini ele almak üzere tasarlanmış üç temel soru etrafında şekillenmiştir:

- Kaynaklarla ilgili faktörlerin alakası ve etkisi: her uzmana, EFA sonuçlarıyla tanımlanan ekipman ve iş gücü gibi kaynaklarla ilgili faktörlerin önemi ve etkisini doğrulaması istenmiştir. Tartışmalar, bu faktörlerin pratikteki alakasını ve inşaat sahalarında iş akışı kesintilerine katkısını doğrulamayı amaçlamıştır.
- Değişkenlik oranları: uzmanlardan, kaynak faktörlerinin değişkenlik oranları için uygun yüzdeleri belirlemeleri istenmiştir. Görüşmelerin bu kısmı, ekipman ve iş gücü değişkenliğinin inşaat iş akışlarını ne ölçüde etkilediğini nicel olarak ifade etmek için derinlemesine tartışmaları içermiştir. Hedef, farklı senaryoları temsil

etmek için simülasyon modelinde kullanılabilecek gerçekçi ve uygulanabilir değişkenlik oranlarını türetmektir.

- Kapasite tamponlarının uygunluğu: son olarak, uzmanlardan kapasite tamponlarının iş akışı kesintilerini hafifletmek için bir strateji olarak kullanımına dair görüşlerini paylaşmaları istenmiştir. Tartışmalar, kaynaklarla ilgili değişkenliğin etkisini en aza indirmek için kapasite tamponlarının pratikliği ve etkinliği ile gerçek dünya zorluklarını ve kısıtlarını ele almıştır.

Görüşmelerin yüz yüze formatı, uzmanların yanıtlarının daha derinlemesine incelenmesine olanak tanıyarak gerektiğinde takip sorularının adapte edilmesini sağladı. Bu yaklaşım, görüşmelerin zengin ve ayrıntılı veriler sağlamasını ve nihayetinde inşaat projelerine uygulanabilir değişkenlik oranları ve tampon stratejileri hakkında kapsamlı bir anlayışa ulaşılmasını sağlamıştır.

Bu tartışmalardan elde edilen bilgiler, değişkenlik oranlarının son halini belirlemede ve simülasyon senaryolarında kullanılacak oranların pratik gerçeklikleri yansıtmasını sağlamada önemli bir rol oynamıştır.

2.4.4. Veri Yorumlama ve Çıkarımlar

Görüşme verilerinin analizi, inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğine katkıda bulunan kaynaklarla ilgili faktörlerin, özellikle ekipman ve iş gücünün, önemine ilişkin uzmanlar arasında güçlü bir fikir birliği olduğunu ortaya koymuştur. Beş uzmanın tamamı, bu faktörlerin inşaat zaman çizelgelerini etkileyen kritik bir rol oynadığını ve bunların ele alınmasının etkili proje yönetimi için temel olduğunu kabul etmiştir.

Görüşmeler sırasında, uzmanlardan dört tanesi, kaynaklarla ilgili faktörlerin etkisini temsil etmek için değişkenlik oranlarını üç farklı seviyeye ayırma konusunda fikir birliğine varmıştır:

- Düşük Değişkenlik: 20-40%
- Orta Değişkenlik: 40-60%
- Yüksek Değişkenlik: 60-80%

Bu seviyelerin, inşaat projelerinde tipik olarak karşılaşılan değişkenlik aralığını yeterince temsil ettiği değerlendirilmiştir. Uzmanlar, bu yüzdelerin, ekipman ve iş gücü sorunlarının normal koşullarda iş akışını ne derece bozabileceğini etkili bir şekilde yansıttığını vurgulamışlardır.

Ancak, beşinci uzman, kaynaklarla ilgili aksaklıkların nadiren 80-100% seviyelerine kadar yükselebileceğini belirterek dördüncü bir değişkenlik seviyesi ekleme olasılığını önermiştir. Bu uzman, nadir ve ciddi durumlarda, kaynaklarla ilgili kesintilerin bu seviyeye çıkabileceğini ifade etmiştir. Bununla birlikte, diğer dört uzman, böyle aşırı bir değişkenliğin yaygın olmadığını açıklayarak, inşaat yöneticilerinin genellikle bu tür kesintiler kritik bir eşiğe ulaşmadan önce önleyici tedbirler aldıklarını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, beşinci uzman, dördüncü seviyenin teorik olarak geçerli olabileceğini kabul etmekle birlikte, pratikte sık karşılaşılmamasının olası olmadığını ifade etmiştir.

Beş uzmanın tamamı, kaynaklarla ilgili iş akışı değişkenliğinin etkisini azaltmak için kapasite tamponlarının etkili bir strateji olduğu konusunda hemfikir olmuştur. Kapasite tamponlarının, ekipman ve iş gücü bulunabilirliğindeki dalgalanmaların neden olduğu aksaklıkları hafifletmek için pratik bir çözüm sunduğunu tartışmışlardır. Uzmanlar, kapasite tamponlarının iş akışı sürekliliğini korumaya yardımcı olduğunu ve özellikle değişkenlik oranlarının orta ve yüksek seviyelerde olduğu durumlarda önemli gecikme riskini azalttığını vurgulamışlardır.

2.5. Simülasyon Modeli

Bu çalışmada, tampon yönetiminin inşaat iş akışları üzerindeki etkisini analiz etmek için simülasyon yöntemi kullanılmıştır. Farklı kapasite tampon seviyelerini içeren çeşitli senaryolar modellenerek atıkların en aza indirildiği ve performansın artırıldığı en uygun yapılandırma belirlenmiştir. Bu yaklaşım, yalnızca sistem tasarımındaki sınırlılıkları ortaya çıkarmakla kalmayıp aynı zamanda performans iyileştirme fırsatlarını da vurgulamaktadır (Wu vd., 2010). Gerçek dünya süreçleri ile simüle edilmiş tampon senaryoları arasındaki sonuçların karşılaştırılmasıyla, kapasite tamponlarının iş akışı değişkenliğini ve süreç atıklarını azaltmadaki etkinliği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, bu simülasyon tabanlı analiz, inşaat operasyonlarının optimize edilmesine yönelik değerli içgörüler sağlamaktadır.

2.5.1. Projeye Genel Bakış

Bu çalışma, Trabzon'da yer alan bir havaalanı binası projesi üzerine bir vaka çalışmasına odaklanarak süreci AnyLogic simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Model, iki kritik ve ardışık inşaat faaliyetini simüle etmektedir: çelik yapının montajı ve ardından gelen boyama faaliyeti. Bu faaliyetler, farklı alt yükleniciler tarafından

gerçekleştirilmekte olup, birbirleriyle bağlantılı bir şekilde yürütülmektedir. Özellikle, çelik yapının bir kısmı tamamlandığında, boyama faaliyeti hemen bu bölümde başlamakta ve her bir parça ilerledikçe süreç örtüşmeli olarak devam etmektedir.

İlk faaliyet, 24 kamyonla şantiyeye teslim edilen toplam 1243 çelik modülünün montajını kapsamaktadır. Her kamyon üç günde bir gelmekte olup, montaj süreci denetim, bağlama, montaj ve yönlendirme işlemlerini gerçekleştiren dört uzman ekibin koordinasyonunu gerektirmektedir. Ekipler, çelik modüllerin verimli ve doğru bir şekilde montajını sağlamak için sıralı bir şekilde çalışmaktadır. Aktivite süreleri ve modül montaj miktarları hakkındaki model verileri, saha sorumluları ile yapılan görüşmelerden elde edilmiş olup, simülasyonun herhangi bir spesifik proje için kesin sonuçlar üretmesi amaçlanmamıştır. Bunun yerine, model, sistem davranışını anlamayı ve kapasite tamponlarının uygulanması ve etkilerine dair içgörüler sunmayı hedeflemektedir.

Modelin ikinci faaliyeti olan boyama işlemi, dört kamyonla teslim edilen 2112 boyama kutusunu kapsamaktadır; her kamyon her gün şantiyeye ulaşmaktadır. Çelik montajına benzer şekilde, bu faaliyet de denetim, yükleme, boyama ve kalite kontrol ekipleri tarafından yürütülmektedir. Boyama ekipleri, tamamlanan çelik yapı bölümlerinin etkin bir şekilde boyanmasını ve kalite standartlarını karşılamasını sağlamak amacıyla kesintisiz çalışmaktadır. Bu faaliyet için kullanılan veriler, saha ziyaretlerinden, ölçümlerden ve şirket uzmanlarıyla yapılan görüşmelerden elde edilerek, inşaat operasyonlarının doğru ve pratik bir şekilde tasvir edilmesini sağlamıştır.

Doğru ve etkili bir simülasyon modeli geliştirmek için birden fazla saha ziyareti gerçekleştirilmiş, doğrudan ölçümler yapılmış ve inşaat şirketi uzmanlarıyla detaylı görüşmeler yapılmıştır. Şirket, kapsamlı dokümantasyon sağlamış ve ilgili verileri paylaşarak araştırmaya güçlü bir destek sunmuştur. Bu kapsamlı yaklaşım, simülasyon modelinin gerçek dünya koşullarını yansıtmalarını sağlayarak, kapasite tamponlarının sistem performansı üzerindeki etkisinin anlamlı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Şekil 8, bu vaka çalışmasında modellenen iki faaliyetin yapısını özetlemektedir. Şekil 8, bir inşaat projesindeki Aktivite A (çelik yapı montajı) ve Aktivite B (boyama süreci) için ardışık iş akışlarını görsel olarak temsil etmektedir. Her bir aktivite, sorunsuz bir uygulama ve iş akışı sürekliliğini sağlamak için farklı ancak birbirine bağlı adımları içermektedir.

Aktivite A, çelik modüllerin montajına odaklanmakta ve modülleri teslim eden kamyonların sahaya gelmesi ve hazırlanmasıyla başlar. Kamyonun manevrası yapıldıktan sonra, modüller açılır ve tahsis edilen ekip tarafından kontrol edilir. Modüller kontrolü

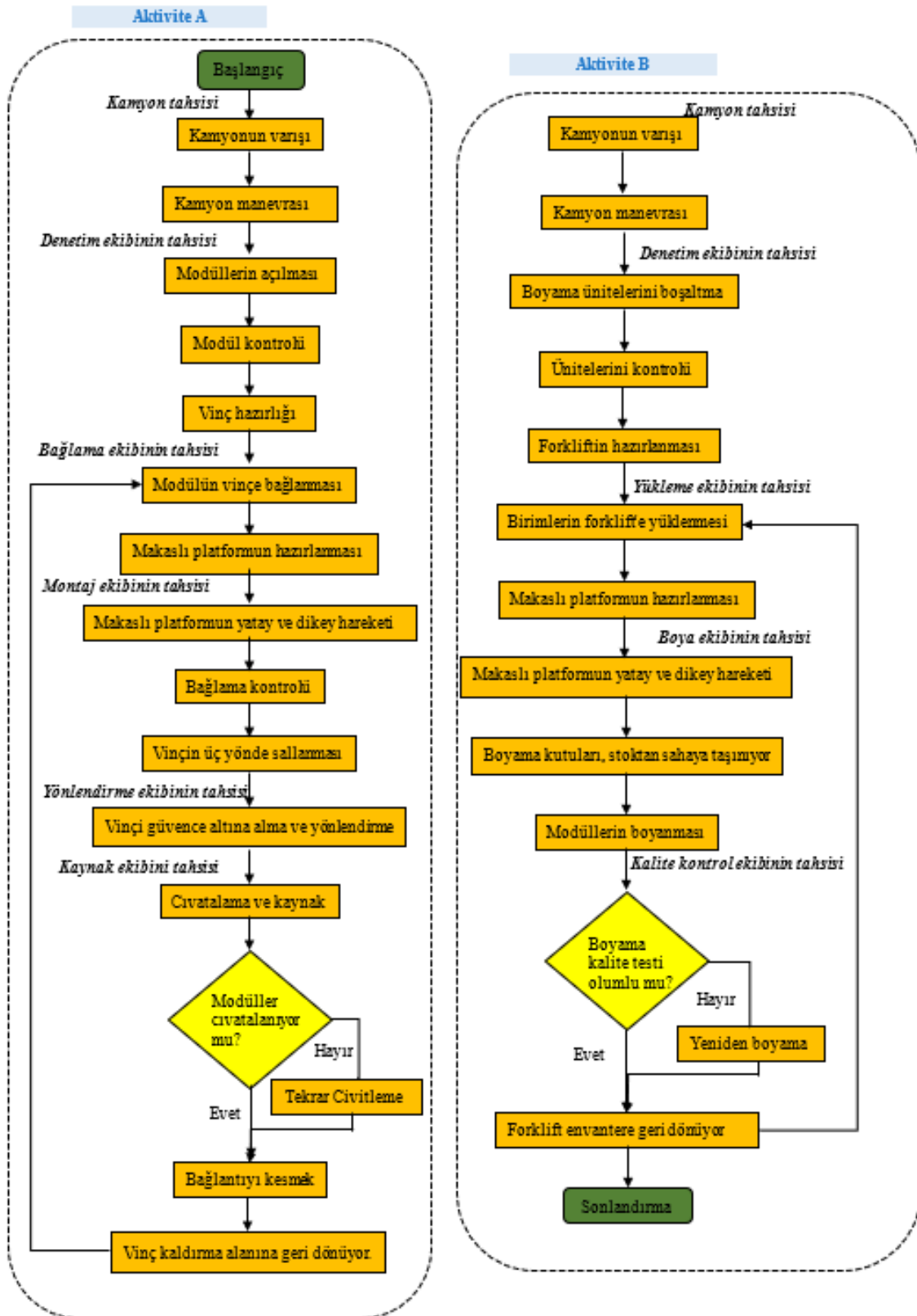
geçtikten sonra, vinç ve bağlama ekibi kaldırma işlemi için hazırlanır. Modüller vince bağlanır ve makaslı platform, sonraki işlemler için hazırlanır. Montaj ekibi, modülleri konumlandırırken, yönlendirme ekibi modüllerin doğru bir şekilde yerleştirilmesini sağlar. Daha sonra civatalama ve kaynak ekipleri modülleri sabitler ve montajın düzgünlüğünü doğrulamak için kontroller yapılır. Herhangi bir sorun tespit edilirse, yeniden civatalama işlemi gerçekleştirilir. Tüm modüller güvenli bir şekilde sabitlendikten sonra, vinç kaldırma alanına geri döner ve süreç bir sonraki modül seti için tekrar edilir.

Aktivite B, çelik modüllerin boyama sürecini içerir ve kamyonlardan boyama ünitelerinin indirilmesi ve ardından kontrol edilmesiyle başlar. Forklift, boyama ünitelerini envanterden sahaya taşımak için hazırlanır. Saha alanında, boyama ekipleri modülleri boyama işlemine başlar ve kalite kontrol ekibi tarafından testler yapılır. Eğer herhangi bir ünite kalite testinden geçemezse, standartlara uygunluğu sağlamak için yeniden boyama işlemi gerçekleştirilir. Boyama ve kalite kontrol işlemleri tamamlandıktan sonra forklift, bir sonraki parti için envantere geri döner. Bu süreç, tüm üniteler boyanıp gerekli kalite standartlarına uygun hale getirilene kadar devam eder.

Bu iş akışları, kaynak tahsisi, görev sıralaması ve kalite kontrolünün entegrasyonunu vurgulayarak hem projedeki aktivitelerin etkinliğini hem de verimliliğini artırmayı amaçlar. Yapılandırılmış bu süreç görevlerin sistematik bir şekilde gerçekleştirilmesini ve herhangi bir aksaklığın hızla ele alınmasını sağlayarak iş akışı sürekliliğini korur.

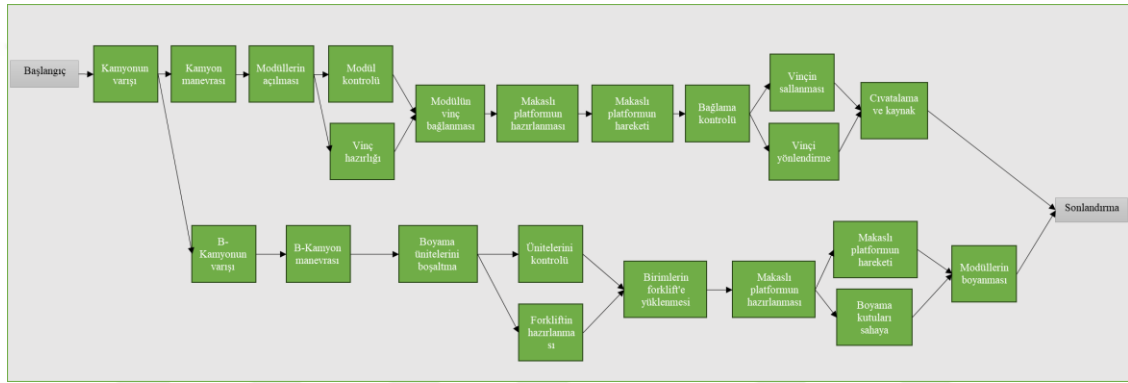
2.5.2. Simülasyon Tasarımı ve Kurulumu

Bu çalışmada, DES inşaat iş akışlarını yüksek doğrulukla modelleme kabiliyeti nedeniyle tercih edilmiştir. DES, çelik modüllerin montajı ve boyanması gibi olayların sırasını ve zamanlamasını analiz etmek için kaynaklar ve aktiviteler arasındaki dinamik etkileşimleri yakalayarak, farklı kapasite tampon stratejilerinin proje performansı üzerindeki etkilerinin, özellikle zaman, maliyet ve atık açısından değerlendirilmesine olanak tanır. DES'te incelenen senaryo, ayrık olaylar veya aktiviteler dizisi olarak modellenir. Varlıklar belirli bir giriş oranında modele girer ve modelin elemanlarından birer birer sıralı olarak geçer (Zankoul, 2015).



Şekil 8. Aktivite A ve B'nin akış şeması

Alt faaliyetler arasındaki ilişkileri ve bağımlılıkları daha ayrıntılı analiz etmek amacıyla, Şekil 9’te gösterildiği gibi bir Düğüm Üzerinde Aktivite (Activity on Node, AON) diyagramı oluşturulmuştur. Bu diyagram, faaliyetlerin mantıksal sırasını yapılandırılmış bir şekilde görselleştirerek öncül-ardıl ilişkilerini net bir şekilde tanımlamaktadır. Bu bağımlılıkların haritalandırılması, simülasyon modelleme sürecinin daha doğru bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamakta ve yürütme akışının gerçek dünya inşaat proje dinamikleriyle uyumlu olmasını garanti etmektedir. Bu yapılandırılmış yaklaşımın entegrasyonu, simülasyon modelinin güvenilirliğini artırarak iş akışı değişkenliği ve tampon yönetimi stratejilerinin daha hassas bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 9. Faaliyetler arasındaki ilişkileri gösteren AON diyagramı

Simülasyon için AnyLogic yazılımı, gelişmiş yetenekleri ve karmaşık sistemleri yönetme esnekliği nedeniyle seçilmiştir (Taiwo vd., 2022). AnyLogic, DES, SD, ABM gibi birden fazla simülasyon metodolojisini tek bir ortamda desteklemektedir. Bu özellik, kaynakların tahsis edildiği ve görevlerin doğuştan gelen değişkenliklerle yürütüldüğü gerçek inşaat süreçlerini modellemek için ideal olmaktadır. AnyLogic’in özellikleri, simülasyon sırasında verimli görselleştirme, senaryo analizi ve hata tespiti sağlar, potansiyel modelleme sorunlarını önlemeye yardımcı olur. Ayrıca yazılım, hassasiyet analizi yapılmasını kolaylaştırmakta ve koşullardaki değişikliklere en duyarlı kaynakların belirlenmesine olanak tanımaktadır (Abbasi vd., 2020). DES için, her sürecin planlanan zamanlamasında tüm sistemin mantıksal işlevlerini içeren bir akış diyagramı öncelikle geliştirilmiş ardından AnyLogic ortamında simüle edilmiştir.

Üçgen dağılım, inşaat görev sürelerini modellemek için kullanılan yaygın bir yöntem olarak benimsenmiştir (Han & Park, 2011; Rashid vd., 2020). Bu dağılım, sürekli bir dağılım

olup iki pozitif zaman sınırı (minimum ve maksimum) ile sınırlıdır ve aralık içinde benzersiz bir moda (tepe değerine) sahiptir.

Dağılım, basit, sezgisel ve hesaplama açısından verimli olup, proje planlamasında değişkenliği modellemek için kullanılmaktadır (Koulinas vd., 2020; Mohammadi & Spross, 2023). Ayrıca üçgen dağılım, görev süreleri hakkında çok fazla geçmiş veriye sahip olunmadığında ve görev sürelerinin en olası değerlerinin deneyime dayalı olarak belirlenmek istenildiği durumlarda güvenilir bir modelleme yöntemi sunmaktadır (Koulinas vd., 2020).

Başlangıç DES modeli, AnyLogic ortamında tekrarlamalı olarak geliştirilmiş ve test edilmiştir. Doğrulama, modelin kavramsal çerçeveyi doğru şekilde temsil ettiğini; geçerlilik ise modelin gerçek dünya inşaat operasyonlarını yansıttığını göstermektedir. Doğrulama ve geçerlilik, model geliştirme süreci boyunca sürekli olarak göz önünde bulundurulmuştur (Sargent, 2015). Modelin performansı, davranışının gerçek sistem operasyonlarıyla karşılaştırılması yoluyla değerlendirilmiştir. Simülasyon, şantiyelerde gözlemlenen gecikme ve kaynak kullanımı modellerine benzer sonuçlar göstermiştir.

DES modeli uygulanarak, ekipman veya iş gücünde bir artış olmadan girdideki artışın (örneğin, ek görevler) süreç gecikmelerine yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin gerçek dünya kısıtlarını simüle etme kabiliyetini doğrulamıştır. Nihai model, bir saha uzmanı tarafından gözden geçirilmiş ve kapasite tampon stratejilerini analiz etmek için modelin kullanılabilirliği üzerinde mutabık kalınmıştır.

Simülasyon beş kez çalıştırıldıktan sonra, ortalama değerden yüzde sapma %0.19 olarak hesaplanmıştır. Bu, simülasyon sonuçlarının ortalama değerinin ± 0.19 içinde kalacağına dair 95% güven düzeyi sağladığını ve bu çalışmanın amaçları için kabul edilebilir bir hassasiyeti temsil ettiğini göstermektedir.

İnşaat yönetiminde, simülasyon yinelenmelerinin optimum sayısını seçmek, güvenilir proje modelleme sonuçlarına ulaşmak için kritik öneme sahip olmaktadır. Ayarkwa vd. (2012b) tarafından özetlenen metodoloji doğrultusunda, hata payı Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır:

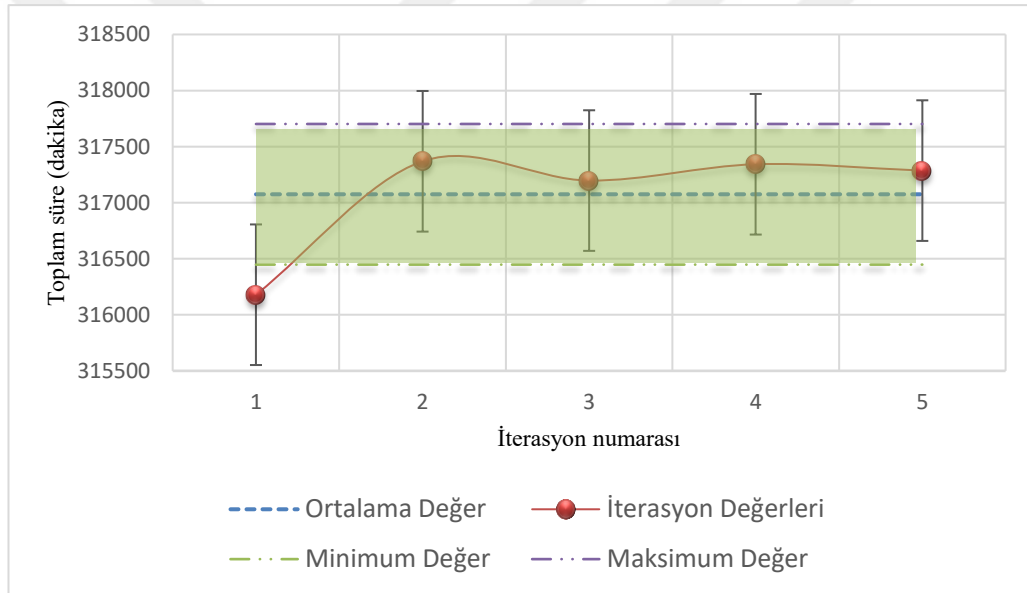
$$\text{Hata payı} = t \times \frac{\text{Standart Sapma}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Burada, t : %95 güven düzeyi ve beş örneklem büyüklüğü için t -dağılımından elde edilen kritik değeri temsil eder; standart sapma ise simülasyon sonuçlarındaki değişkenliği ölçer. Hesaplanan hata payı, beş yinelenme ile yüksek düzeyde güven ve doğruluk

sağlandığını göstererek, simülasyon senaryoları için bu yöntemin uygunluğunu destekler. Bu çalışma için hata payı Denklem (3) aracılığı ile $2.776 \cdot 505.006 / (\sqrt{5}) = 626.947$ dakika olarak hesaplanmıştır.

Hata payı beş yinelemeden elde edilen ortalama değere bölünerek yüzdelik sapma hesaplanmış ve bu sapmanın kabul edilebilir bir aralıkta olduğu doğrulanmıştır: Ortalama Yüzdesi = (Hata payı) / (ortalama değer) = $626.947 / 317074.69 = 0.0019 = \%0.19$

Bu durumu görsel olarak göstermek için Şekil 10'da beş yinelemeden elde edilen ortalama değer ile hata payı birlikte sunulmuştur. Gölgeleştirilmiş alan %95 güven aralığını temsil eder ve değişkenliğin minimum düzeyde olduğunu, değerlerin ortalama etrafında sıkıca kümелendiğini göstermektedir.



Şekil 10. %95 güven aralığı ile beş iterasyonun simülasyon sonuçları

2.5.3. Ayrıntılı Simülasyon Modeli

Çalışmada Faaliyet A ve B için geliştirilen simülasyon modelini kapsamlı bir şekilde açıklamak için modelde kullanılan unsurların tanımlanması önem arz etmektedir. Simülasyon modeli, AnyLogic yazılımında iki temel kütüphaneyi kullanmaktadır: Ajan Kütüphanesi ve Süreç Modelleme Kütüphanesi. Bu iki kütüphane, iş akışı süreçlerinin inşası ve simülasyonu için temel bileşenlerdir (Borshchev, 2014).

Ajan Kütüphanesi, modelin yapısal birimlerinin temelini oluşturur ve sistem içinde bağımsız varlıkların temsil edilmesini sağlar (Zankoul, 2015). Bu ajanlar, gerçek dünyadaki

davranışları simüle etmek için birbirleriyle ve çevreyle etkileşimde bulunan dinamik unsurları temsil etmektedir.

Süreç Modelleme Kütüphanesi, ayrık olay modellemeyi destekler ve ajanların (örneğin, varlıklar, müşteriler, ürünler veya parçalar) çeşitli süreçlerden geçtiği gerçek dünya sistemlerinin simülasyonunu sağlar. Bu süreçler genellikle kuyruklar, gecikmeler ve kaynak kullanımı gibi operasyonları içerir (Borshchev, 2018). Bu kütüphane, kaynak kısıtlamaları ve faaliyetler arasındaki bağımlılıkları da içeren iş akışı karmaşıklıklarının modellenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Çalışmada geliştirilen simülasyon modelin oluşumu için her bir kütüphaneden kullanılan spesifik unsurlar sırasıyla Tablo 8 ve 9'da ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Bu unsurlar, simülasyon modelinin temel yapı taşlarını oluşturarak süreçlerin, kaynakların ve faaliyetler arasındaki bağımlılıkların doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlar.

Tablo 8. AnyLogic Ajan Kütüphanesi öğeleri

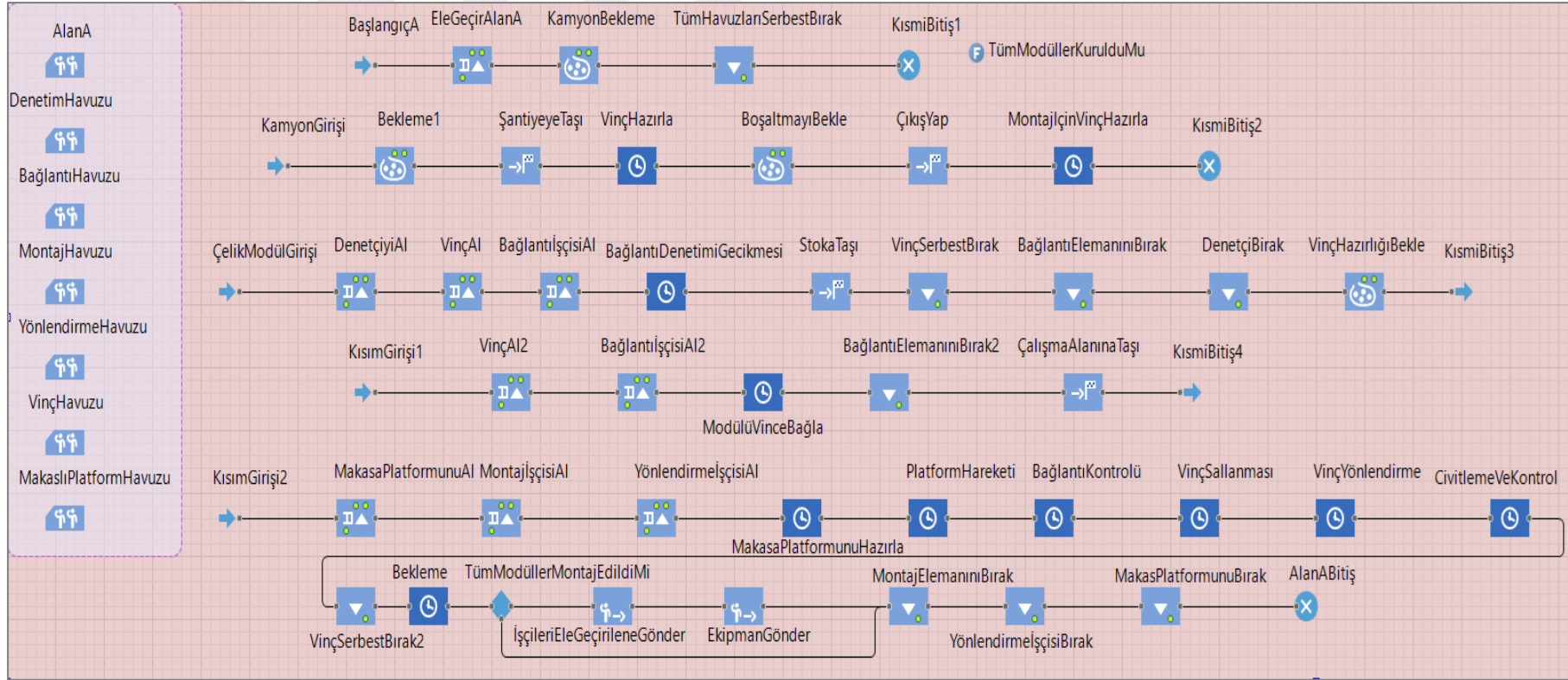
Ajan Kütüphanesi		
	Ajan	Sistemde işçiler, forkliftler ve vinçler gibi bağımsız varlıkları temsil eder ve birbirleriyle etkileşim içinde çalışır.
	Parametre	Her bir ajanın üretkenlik oranları veya kullanılabilirlik gibi belirli özelliklerini tanımlar.
	Olay	Modeldeki kamyon varışı gibi zaman veya koşula bağlı eylemleri simüle eder.
	Değişken	Süreç takibi için önemli olan, mevcut görev süreleri veya bitirilmiş kamyon sayısı gibi gerçek zamanlı verileri saklar.
	Koleksiyon	Çelik modüller gibi herhangi bir nesne grubunu temsil eder.
	Fonksiyon	Kapasite tampon tipine göre ekip kapasitesini hesaplama gibi, simülasyon modelinde tekrar kullanılabilir bir mantık veya hesaplama bloğunu ifade eder.
	Zamanlama	Çalışma saatleri, kaynakların kullanılabilirliği veya bakım rutinlerini tanımlamak için gereklidir.
	Ajana bağlantı	Modeldeki farklı ajanlar arasında etkileşim veya veri alışverişi sağlayan bir bağlantıyı veya referansı temsil eder, örneğin çelik modüllerin kamyonla bağlantısını kurmak.

Tablo 9. AnyLogic Süreç Modelleme Kütüphanesi öğeleri

Süreç Modelleme Kütüphanesi		
	Yol	Modeldeki varlıkların konumlar arasında hareketini veya akış yönünü temsil eder.
	Nokta Düğümü	Varlıkların durabileceği, etkileşimde bulunabileceği veya karar alabileceği belirli bir konumu tanımlar.
	Çekici	Ajanların hareketini veya konumlandırılmasını etkileyen ve genellikle onları kendine çeken bir noktadır.
	Yutucu	Tamamlanan varlıkların modelden çıktığı bitiş noktasını temsil eder.
	Gecikme	İş sürelerini veya iş akışındaki bekleme sürelerini simüle eder.
	Kaynak Havuzu	Vinçler, forkliftler ve işçiler gibi kaynakların kullanılabilirliğini ve tahsisini yönetir.
	Ele Geçir	Bir görev veya aktiviteyi gerçekleştirmek için gerekli bir kaynağı veya ajanı yakalar.
	Serbest Bırak	Görevler tamamlandıktan sonra kaynakları serbest bırakır, böylece sonraki aktiviteler için kullanılabilir hale gelir.
	Kaynağı Gönder	Kaynakları veya varlıkları, önceden tanımlanmış mantık veya koşullara dayalı olarak belirtilen bir hedefe veya aktiviteye yönlendirir.
	Hareket Et	Varlıkların veya kaynakların bir konumdan diğerine hareketini modeller.
	Giriş	Modelde varlıkların bir sürece veya aktiviteye giriş yaptığı noktayı işaretler.
	Çıkış	Varlıkların bir süreçten veya aktiviteden çıkış yaptığı noktayı işaretler.
	Bekleme	Varlıkların bir süre boyunca durduğu veya sürece devam etmeden önce bir koşulun karşılanmasını beklediği durumu ifade eder.
	Çıkış Seçimi	Varlıklar için belirtilen koşullara veya olasılıklara dayalı olarak bir sonraki süreç akışını veya yolu belirler.

Yapım sürecine ait simülasyon modeli Tablo 8 ve 9'da tanımlanan öğelerin kullanılmasıyla oluşturulmuş ve Şekil 11 ve 12'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 11, Aktivite A için DES mantığını göstermektedir. Simülasyon, saat 08:00'de çelik modüller taşıyan ilk kamyonun sahaya gelmesi ve tüm gerekli kaynakların (denetim, bağlama, montaj ve yönlendirme ekipleri ile vinç ve makaslı platform gibi ekipmanlar) hazırlanması ile başlar. Kamyon siteye vardığında çelik modüller envanter (depo; stok) alanına yönlendirilir ve vinç, bağlama ekibi ve denetim ekibi envanter alanında hazır pozisyonda bekletilir. Her çelik modül, sırasıyla vinç tarafından kamyonlardan alınır ve denetim ekibi tarafından kontrol edilir. Bu işlem, kamyondaki tüm 50 modül için tekrarlanır. Tüm modüller işlendiğinde kamyon serbest bırakılır ve sahadan ayrılır; aynı zamanda denetim ekibi de serbest bırakılır.

Sonrasında, vinç ve bağlama ekibi bir modülü vinçe bağlamak için tahsis edilir ve bu modül çalışma alanına taşınır. Aynı anda, makaslı platform, montaj ekibi ve yönlendirme ekibi modülü çalışma alanındaki belirlenen yerine (attractor ile tanımlanan) monte etmek üzere tahsis edilir. Bu sıra, her modül için tekrar edilir.



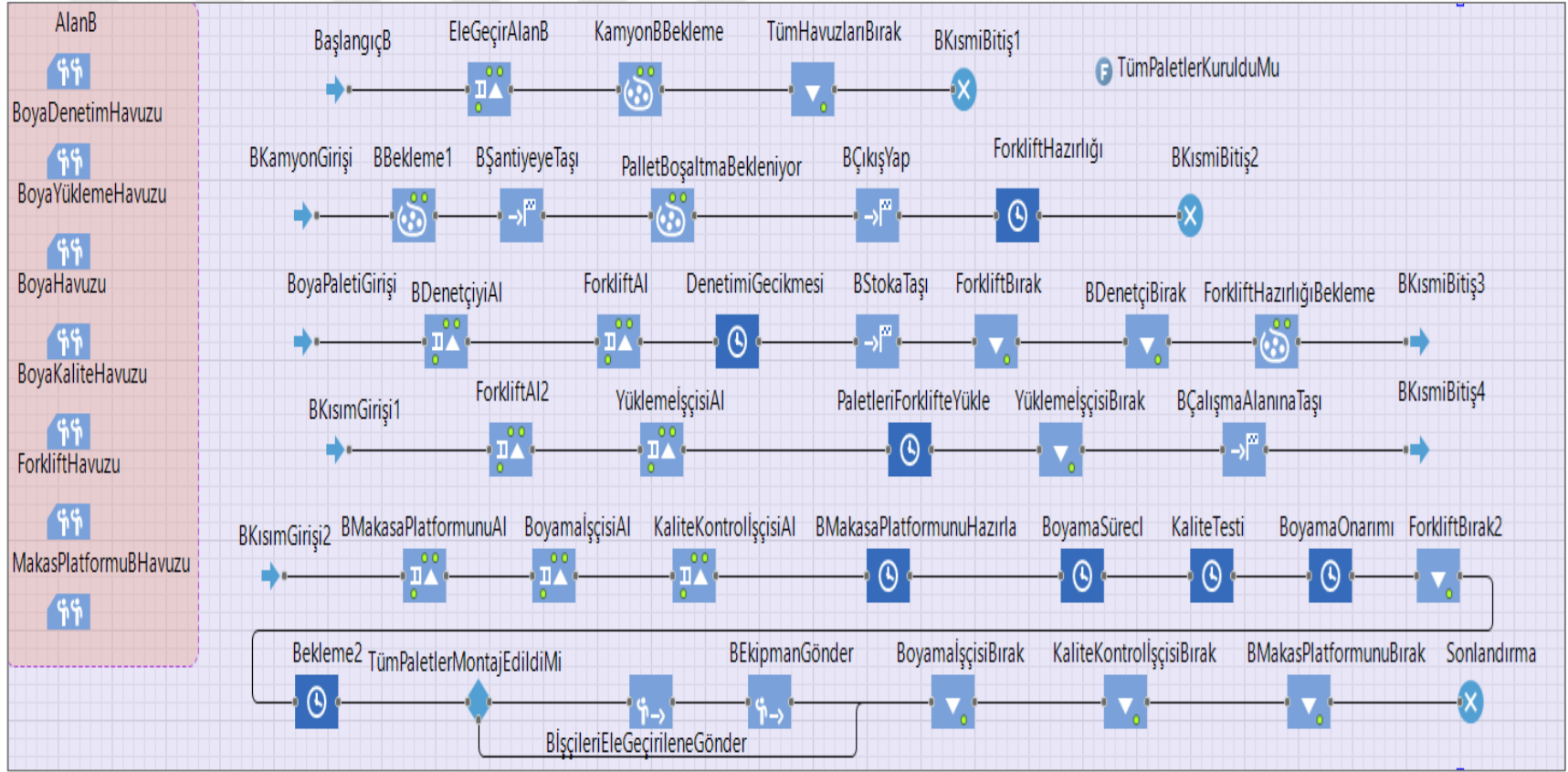
Şekil 11. AnyLogic'te Aktivite A için DES mantıksal işlevler akış diyagramı

Aktivite B için DES mantığı Şekil 12'de gösterilmektedir. Aktivite B, Aktivite A'nın 50%'si tamamlandığında başlatılır. Bu, Aktivite A için toplam 24 kamyonun 12 tanesinin teslimatı sonrasında Aktivite B'nin ilk kamyonunun şantiyeye gelmesi olarak tanımlanır.

Aktivite B için ilk kamyonun gelmesiyle birlikte forklift ve denetim ekibi görevlendirilerek kamyonun boşaltılması ve içeriklerinin boyama envanter alanına taşınması sağlanır. Kamyon tamamen boşaltıldıktan sonra, sahadan çıkar ve denetim ekibi serbest bırakılarak şantiyedeki istasyonlarına geri döner.

Ardından forklift ve yükleme ekibi, boyama paletlerini envanterden çalışma alanına taşımaya başlar. Paletler teslim edildikten sonra, makaslı lift ve boyama ekibi de dahil olmak üzere ek kaynaklar görevlendirilerek çalışma alanında boyama işlemi başlatılır. Boyama işlemi sırasında, boyanan modüllerin kalite kontrolünü yapmak üzere bir boyama kalite kontrol ekibi görevlendirilir.

Bu süreç, envanterdeki tüm paletler kullanılana kadar devam eder. Bu süre zarfında yeni bir kamyon gelirse, süreç baştan tekrar edilir. Eğer yeni bir kamyon gelmezse, tüm görevlendirilen kaynaklar serbest bırakılır ve bir sonraki kamyon gelene kadar başlangıç pozisyonlarına geri döner. Simülasyon, son kamyonun gelen tüm boyama paletlerinin işlenip boyanmasıyla tamamlanır.



Şekil 12. AnyLogic'te Aktivite B için DES mantıksal işlevler akış diyagramı

2.5.4. Senaryo Geliştirme ve Proje Performansı Üzerindeki Etkisi

İş akışı değişkenliği ve tampon stratejilerinin proje performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla üç simülasyon senaryosu geliştirilmiştir. Her bir senaryo, farklı değişkenlik seviyeleri ve tampon kapasitesinin proje süresi, maliyet ve atıklar (envanter ve bekleme süreleri) gibi temel performans metriklerini nasıl etkilediğine dair içgörüler sunmaktadır.

1. Planlanmış senaryo: bu senaryo, iş akışında herhangi bir değişkenlik olmadığı varsayılarak ideal koşullar altında projeyi modellemektedir. Faaliyetler, planlanan sürelerinde ilerler ve bu durum temel değerler olarak dikkate alınmaktadır. Planlanmış senaryo, değişkenlik ve tampon stratejileri içeren senaryolarla karşılaştırma yapılabilmesi için bir referans noktası oluşturmaktadır.
2. Tamponlar olmadan farklı değişkenlik oranları ile ilgili senaryolar: bu senaryolarda, faaliyet sürelerindeki gerçekçi dalgalanmaları simüle etmek için uzman geri bildirimlerine dayalı olarak değişkenlik eklenmiştir. A ve B faaliyetlerine sırasıyla düşük, orta ve yüksek belirsizlik seviyelerini temsil eden üç değişkenlik seviyesi (%20-40, %40-60 ve %60-80) uygulanmıştır. Farklı değişkenlik oranlarında her bir faaliyetin süreleri Tablo 10'da gösterilmektedir. Bu senaryolar, özellikle envanter ve bekleme süreleri açısından değişkenliğin proje zaman çizelgeleri, kaynak kullanımı ve atıklar üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır.

Tablo 10. Farklı değişkenlik oranlarına göre faaliyet süre fonksiyonları

	Faaliyet	Planlanan Değer (dk)	Değişkenlik Oranı		
			Düşük	Orta	Yüksek
A	Muayene Kanca Gecikmesi/Modül	3	Üçgen (3,6,4.19)	Üçgen (4.2,4.79)	Üçgen (4.8,5.4)
	Kancayı Vinçe Bağlama/Modül	5	Üçgen (6,6.99)	Üçgen (7,7.99)	Üçgen (8,9)
	Vinç Yönlendirme/Modül	3	Üçgen (3,6,4.19)	Üçgen (4.2,4.79)	Üçgen (4.8,5.4)
	Cıvatalama ve Yeniden Cıvatalama Kontrolü/Modül	5	Üçgen (6,6.99)	Üçgen (7,7.99)	Üçgen (8,9)
B	Muayene Gecikmesi/Kamyon	5	Üçgen (6,6.99)	Üçgen (7,7.99)	Üçgen (8,9)
	Palet Yükleme	5	Üçgen (6,6.99)	Üçgen (7,7.99)	Üçgen (8,9)
	Boyama/Palet	500	Üçgen (600,699)	Üçgen (700,799)	Üçgen (800,900)
	Kalite Testi	15	Üçgen (18,20.99)	Üçgen (21,23.99)	Üçgen (24,27)
	Yeniden Boyama	15	Üçgen (18,20.99)	Üçgen (21,23.99)	Üçgen (24,27)

3. Her aktivite için farklı değişkenlik oranlarına göre en uygun kapasite yedeği kullanmaya yönelik senaryolar: bu senaryo, A ve B aktiviteleri için her değişkenlik

oranına uygun şekilde özelleştirilmiş en uygun kapasite yedeklerinin kullanımını incelemektedir. Kapasite yedekleri, fazla mesai (1 veya 2 saat ekleme) ve fazla iş gücü sağlama (ekip büyüklüğünü 1, 2 veya 3 kişi artırma) gibi stratejileri içermektedir. Bu yedekleme seçenekleri, kaynak tahsisinde esneklik sağlayarak iş akışı değişkenliğinden kaynaklanan gecikmeleri azaltmayı hedeflemektedir. Kapasite yedekleme stratejilerinin görsel bir özeti Şekil 13'de sunulmaktadır. Kapasite yedeklerinin entegrasyonu ile bu senaryo, değişkenliğin proje performansı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmayı amaçlamaktadır.



Şekil 13. A ve B aktivitelerinde kapasite yedekleme senaryoları için simülasyon arayüzü

Şekil 13'ye göre, simülasyon modeli çalıştırıldığında ilk açılan arayüz penceresi, A ve B aktiviteleri için iki temel parametrenin ayarlanmasına aracılık etmektedir. Birinci parametre, 0, %20, %40 veya %60 olmak üzere dört seçeneği bulunan değişkenlik oranıdır. İkinci parametre ise kapasite tamponu olup şu seçenekleri içermektedir: "Plan Durumu" (kapasite tamponunun olmadığı durum), "Aşırı istihdam 1," "Aşırı istihdam 2," "Aşırı istihdam 3," "Fazla mesai 1" ve "Fazla mesai 2."

Simülasyon modeli, bu iki parametre için yapılan seçimlere göre işlemektedir. İstenilen değişkenlik oranı ve kapasite tamponu seçildikten sonra, model bu girdilere göre dinamik olarak ayarlanır. Özellikle, modelde tanımlı değişkenler seçilen seçeneklere bağlı olarak güncellenir ve uygun senaryoların yürütülmesi sağlanır. Bu değişkenler, her ekibin kapasitesi ve çalışma programını yöneten fonksiyonlarla bağlantılıdır, böylece seçilen

değişkenlik oranı ve kapasite tamponunun aktiviteler üzerindeki etkisi doğru bir şekilde simüle edilmiş olunur.

Her bir senaryonun performansı aşağıdaki metrikler üzerinden değerlendirilmektedir:

- Zaman: değişkenlik ve tamponların zaman çizelgeleri üzerindeki etkisini yansıtan, her senaryo için toplam proje süresidir.
- Maliyet: gecikmelerin, ek kaynakların ve tampon stratejilerinin maliyete olan etkileridir.
- Atık (Stok ve Bekleme Süreleri): iş akışı kesintilerinden kaynaklanan stok birikimi ve boşta kalma süresidir.

Bu senaryoların karşılaştırılmasıyla, değişkenlik ve tampon stratejilerinin proje performansını nasıl etkilediği değerlendirilmektedir. Bu analiz, inşaat iş akışlarının optimize edilmesine yönelik pratik bilgiler sağlayarak yöneticilere proje gecikmelerini, maliyetlerini ve atıklarının en aza indirmek için etkili kaynak planlaması ve tampon uygulaması konusunda rehberlik etmesi beklenilmektedir.

Zaman ve stok dinamiklerini animasyonlu simülasyon modeline dahil etmek, görselleştirme yeteneklerini önemli ölçüde artırmakta ve kullanıcının simülasyon ilerledikçe zaman ve stok verilerindeki gerçek zamanlı güncellemeleri izlemelerine imkan sağlamaktadır. Bu gelişmiş görselleştirme, AnyLogic'in Analiz Paleti kullanılarak ve zaman ve stokla ilgili temel simülasyon sonuçlarını sunmak için bir grafik kullanıcı arayüzü tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu unsurların entegrasyonu, sistem performansını simülasyon süresi boyunca kapsamlı bir şekilde görselleştirme imkanı sunmaktadır.

Uygulamada, dinamik verileri kaydetmek için Veri Seti ögesi ve sonuçları erişilebilir ve kullanıcı dostu bir formatta göstermek için Çubuk Grafik ögesi kullanılır (Borshchev, 2018). Simülasyon sırasında bu sonuçlar sürekli olarak güncellenir ve sistem performansının gerçek zamanlı bir takibi sağlanır. Simülasyonun sonunda nihai sonuçlar sunulur. Simülasyon, A ve B aktivitelerinin tamamlanması için gereken süreyi kapsamaktadır. Bu süreler, her aktivite için ilk kamyonun girişinden tüm kaynakların son kamyonun çıkışından sonra serbest bırakılmasına kadar ölçülmektedir. Ayrıca, aktivitelere katılan her ekibin çalışma saatleri, simülasyon sırasında ekibin ne kadar süreyle kullanıldığının toplamı alınarak hesaplanır ve süreç boyunca dinamik olarak güncellenen çubuk grafiklerde gösterilir. Stok dinamikleri de etkili bir şekilde modellenmiş olup, stok seviyelerindeki değişiklikler her simülasyon döngüsünde stokların boşaltılması için gereken süreyi belirlemek üzere izlenmiştir. Bu çıktılar, modeldeki değişkenlere doğrudan bağlıdır ve

zaman veya stok oranlarıyla ilgili verilerin sürekli güncellenmesini sağlar. Bu entegrasyon, simülasyonun, her iki aktivite için seçilen değişkenlik oranları ve kapasite tamponlarının gerçek zamanlı etkilerini doğru bir şekilde yansıtmasını sağlar ve proje performansına ilişkin ayrıntılı ve dinamik bir görünüm sunar.

Çeşitli simülasyon senaryolarından elde edilen sonuçlar, karşılaştırma ve analiz sürecini kolaylaştırmak için sistematik bir şekilde Excel'de düzenlenmiştir. Aktivite süreleri, ekip çalışma saatleri ve stok seviyeleri gibi temel metrikler Excel'e aktarılmış ve her senaryo için en uygun seçeneklerin belirlenmesine olanak tanıyacak şekilde yapılandırılmıştır. Ayrıca, simülasyonla türetilen süreler ve çalışma saatlerine dayalı olarak maliyet hesaplamaları da Excel'de yapılmıştır. Bu yaklaşıml, en uygun simülasyon sonuçlarının seçimi için hem performans hem de maliyet metriklerini dikkate alarak karar verme sürecinin kapsamlı ve veriye dayalı olmasını sağlamıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümü, bir önceki bölümde detayları verilen çalışma metodolojisi uyarınca gerçekleştirilen işlemler sonucunda elde edilen bulguları sunarak Türk inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerinin ayrıntılı bir analizine değinmektedir. Ayrıca, uzman görüşmelerinden elde edilen bilgiler tartışılarak, değişkenlik oranı yüzdelerinin simülasyon modeline entegrasyonu ele alınmaktadır. Bölüm, farklı senaryolar üzerinden sonuçları analiz ederek tampon yönetiminin proje performansı üzerindeki etkisini incelemekte ve kapasite tamponlarının atık, zaman ve maliyet üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Son olarak, en uygun kapasite tamponlarının kullanıldığı ve kullanılmadığı senaryoların karşılaştırılması yapılmakta ve bu analizler yalın inşaat prensipleri bağlamında ele alınarak sunulmaktadır.

3.1. İnşaat Projelerinde İş Akışı Değişkenliği Nedenleri

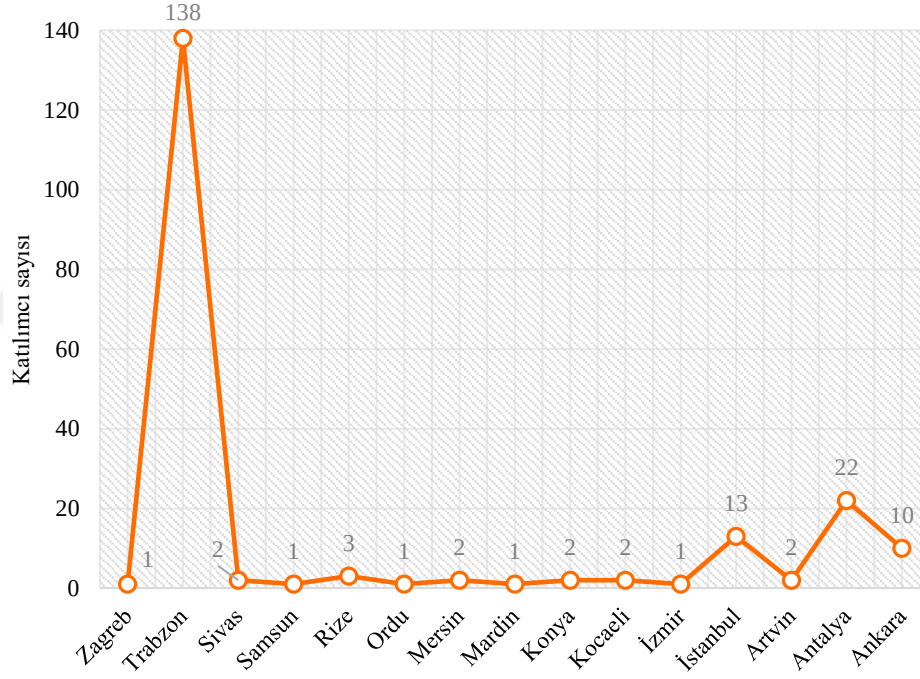
Türk inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğinin temel nedenlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen anket çalışmasının sonuçları analiz edilerek, anket yanıtları, her bir faktörün önemini belirlemek için ortalama puanlar, standart sapmalar ve sıralamalar gibi istatistiksel ölçütler kullanılarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, değişkenlik nedenlerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamış ve keşifsel faktör analizi yoluyla bu nedenler gruplandırılarak, tanımlanan faktörler arasındaki temel kalıplar ve ilişkiler ortaya konmuştur. Bu analiz, iş akışı değişkenliği nedenlerinin daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

3.1.1. Katılımcı Profili

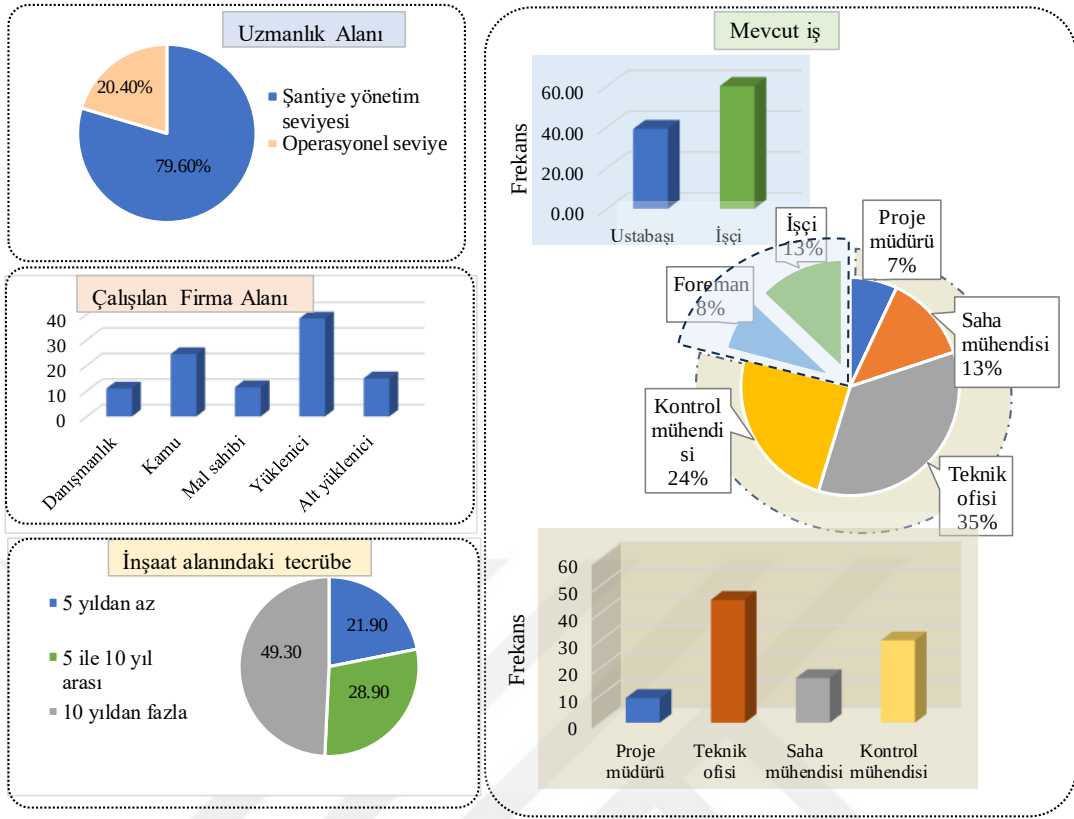
Demografik bilgiler, sağlam ve anlamlı bir nicel analiz gerçekleştirmek için kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma, inşaat saha operasyonlarında ve proje denetiminde aktif olarak yer alan mühendisler ve işçileri hedef almıştır; çünkü bu grupların uzmanlıkları ve bakış açıları, inşaat iş akışlarındaki değişkenliğin anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır (Wambeke vd., 2011).

Toplanan 201 anketin 138'i (%69) Trabzon'dan gelmiştir. Bu yüksek yanıt oranı, anketlerin yüz yüze dağıtılması sayesinde elde edilmiştir ve bu yöntem yanıtların doğruluğunu artırmıştır. Geri kalan yanıtlar ise Türkiye'nin farklı şehirlerindeki çeşitli inşaat sahalarından çevrimiçi olarak toplanmıştır. Katılımcıların dağılımı Şekil 14'de verilmektedir.



Şekil 14. Anket yapılan şehirlerin frekansı

Katılımcıların demografik profilleri Şekil 15'de özetlenmiştir. Katılımcıların yaklaşık yarısı inşaat sektöründe 10 yıldan fazla iş deneyimine sahipken, %79.6'sı farklı uzmanlıklara sahip şantiye yönetim pozisyonlarında görev yapmaktadır. Katılımcıların büyük bir çoğunluğu yüklenici firma çalışanlarıdır.



Şekil 15. Katılımcıların demografik profili

3.1.2. İş Akışı Değişkenliği Nedenlerinin Sıralaması

İnşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerini belirlemek amacıyla, önceki literatür ve pilot çalışma sürecinden elde edilen 38 neden tanımlanmıştır. İnşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin Ortalama Puan (Mean Score, MS), Standart Sapma (Standard Deviation, σ), RII ve Mann-Whitney U testi hesaplamaları Tablo 11'de gösterilmektedir.

Farklı iş akışı değişkenliği nedenlerinin ortalama değerleri, bu nedenlerin katılımcıların bakış açısına göre önemini göstermek amacıyla belirlenmiştir. Eğer bir neden için ortalama değer 3.00 veya üzerinde ise, bu neden inşaat projelerinde önemli bir iş akışı değişkenliği nedeni olarak sınıflandırılmıştır. Bu eşik değeri, önceki çalışmalarda kullanılan yaygın bir anlamlılık kriteridir (Udawatta vd., 2015). Tablo 11'de görüldüğü üzere, 33 iş akışı değişkenliği nedeninin ortalama değerleri 3.00 eşik değerini aşmış ve bu nedenle inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerini yansıtan önemli nedenler olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, bu değişkenlik nedenlerinin düşük standart sapma değerleri elde ettiği de

dikkat çekici olup bu durum, katılımcıların bu maddelerle ilgili fikirlerinin tutarlı olduğunu göstermektedir (Yuan, 2013).

RII'nin ortalama değeri 0.67 olarak hesaplanmıştır. Bu sonucun değerlendirilmesi için, RII'nin nötr değeri hesaplanmış ve ortalama RII değeri ile karşılaştırılmıştır. Beşli derecelendirme ölçeği kullanılarak iş akışı değişkenliği nedenleri için yapılan puanlamanın ortalaması 3.00 olarak alınmış ve RII'nin nötr değeri $(3/5) = 0.60$ olarak hesaplanmıştır; burada (5), kullanılan derecelendirme ölçeğini, (3) ise bu ölçeğin ortalamasını ifade etmektedir. Görüldüğü üzere, 0.67'lik ortalama RII değeri, 0.60'lık nötr RII değerinden büyüktür. Bu durum, bu nedenlerin inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerini ölçmedeki önemini göstermektedir.



Tablo 11. Değişkenlik nedenlerinin sıralamaları

İnşaat projelerinde değişkenlik nedeni	Genel				Şantiye yönetim grubu				Operasyonel grup				Mann–Whitney U- p Seviyesi
	MS	RII	σ	Sıralama	MS	RII	σ	Sıralama	MS	RII	Σ	Sıralama	
Enflasyon (Malzeme fiyatlarındaki artış)	4.21	0.84	0.98	1	4.24	0.85	0.97	1	4.07	0.81	1.03	1	0.33
Uygulama projelerinin yeterince detaylandırılmaması	3.69	0.74	1.07	2	3.74	0.75	1.11	2	3.49	0.70	0.90	6	0.10
Tamamlanan işler için düzensiz finansman ve ödeme	3.66	0.73	1.08	3	3.67	0.73	1.13	4	3.63	0.73	0.89	2	0.51
İşin kapsamındaki değişiklikler	3.65	0.73	1.04	4	3.69	0.74	1.06	3	3.51	0.70	0.98	5	0.28
Tasarım ve/veya çizimlerdeki hatalar	3.60	0.72	1.15	5	3.64	0.73	1.15	6	3.44	0.69	1.16	8	0.31
İşçilerin/ekiplerin beceri/tecrübe/eğitim eksikliği	3.60	0.72	1.09	6	3.66	0.73	1.09	5	3.34	0.67	1.06	16	0.05
Esnek ve gerçekçi olmayan iş programı	3.52	0.70	1.14	7	3.58	0.72	1.18	7	3.29	0.66	0.93	17	0.08
İyi planlanmamış çalışma yöntemi	3.51	0.70	1.08	8	3.54	0.71	1.11	9	3.41	0.68	0.95	9	0.41
Ekip sayısının yetersizliği	3.51	0.70	1.07	9	3.54	0.71	1.09	8	3.39	0.68	1.00	13	0.35
Önceki işlerin düşük kalitesi nedeniyle tadilatın gerekli olması	3.46	0.69	1.20	10	3.48	0.70	1.23	13	3.39	0.68	1.05	12	0.44
Proje paydaşları (proje müdürü, şantiye şefi, ustabaşı, işçiler vb.) arasındaki kötü veya eksik iletişim	3.43	0.69	1.20	11	3.49	0.70	1.20	12	3.22	0.64	1.19	23	0.18
Çalışmaya başlamak için gerekli izinlerin alınması	3.43	0.69	1.13	12	3.51	0.70	1.11	10	3.12	0.62	1.17	29	0.05
Tasarım veya çizimle ilgili sorulara geç cevaplar verilmesi	3.42	0.69	1.17	13	3.49	0.70	1.15	11	3.15	0.63	1.22	28	0.11
Önceki işlerin kalitesizliği nedeniyle yeniden yapılmanın gerekli olması	3.40	0.68	1.30	14	3.39	0.68	1.35	18	3.46	0.69	1.12	7	0.95
Planlanan faaliyetlerin sıralaması	3.40	0.68	0.99	15	3.48	0.70	0.96	14	3.10	0.62	1.02	31	0.03*
Üzerinde çalıştığınız iş tamamlanmadan önce başka bir işe/göreve geçmek	3.40	0.68	1.08	16	3.41	0.68	1.07	17	3.37	0.67	1.11	15	0.73
Farklı yükleniciler arasındaki koordinasyon eksikliği	3.38	0.68	1.08	17	3.46	0.69	1.09	15	3.10	0.62	1.00	32	0.03*

Tablo 11'in devamı

Detaylı sözleşme olmaması	3.37	0.67	1.19	18	3.41	0.68	1.20	16	3.20	0.64	1.12	26	0.23
Yeni personele işin devredilmesi ile ilgili verimsizlikler	3.36	0.67	1.12	19	3.39	0.68	1.14	19	3.27	0.65	1.05	20	0.47
Önceki işlerin tamamlanmamış olması	3.35	0.67	1.06	20	3.34	0.67	1.05	21	3.39	0.68	1.09	11	0.65
Malzemenin tedarik süresinin fazlalığı	3.35	0.67	1.02	21	3.29	0.66	1.00	24	3.59	0.72	1.09	4	0.09
Düşük üretkenlik	3.29	0.66	1.13	22	3.33	0.67	1.14	23	3.12	0.62	1.10	30	0.23
Kötü hava şartları (Aşırı sıcak, soğuk, rüzgar, yağmur vb.)	3.28	0.66	1.17	23	3.28	0.66	1.15	25	3.29	0.66	1.25	18	0.82
Değişime karşı kültürel direnç (Yeni teknolojilerin kullanılmaması vb.)	3.27	0.65	1.07	24	3.36	0.67	1.05	20	2.93	0.59	1.10	34	0.03*
Uygun ekipmanın bulunmaması	3.25	0.65	1.07	25	3.22	0.64	1.08	26	3.39	0.68	1.02	14	0.48
Ekipman için teknik eğitimin yetersizliği	3.25	0.65	1.13	26	3.34	0.67	1.14	22	2.90	0.58	1.04	35	0.01*
Ekipman arızaları	3.17	0.63	1.08	27	3.11	0.62	1.08	29	3.41	0.68	1.05	10	0.11
Malzemenin şantiye sahası içerisinde ihtiyaç duyduğunuz yere taşınması	3.15	0.63	1.17	28	3.04	0.61	1.16	30	3.61	0.72	1.09	3	0.01*
Moral ve/veya motivasyon eksikliği	3.15	0.63	1.17	29	3.14	0.63	1.13	27	3.20	0.64	1.33	24	0.81
Malzeme boyutunda hata	3.06	0.61	1.33	30	3.03	0.61	1.34	31	3.22	0.64	1.31	22	0.42
Tamamlanmış işler için yapılması gereken denetimler (Kalite testleri vb.)	3.06	0.61	1.20	31	3.02	0.60	1.22	32	3.22	0.64	1.15	21	0.42
Malzeme tipinde hata	3.06	0.61	1.29	32	3.01	0.60	1.29	33	3.27	0.65	1.30	19	0.25
Aktiviteler için ekipman dengelenmesi problemi	3.01	0.60	1.07	33	3.13	0.63	1.03	28	2.54	0.51	1.10	38	0.00*
İşin zorluğu	2.95	0.59	0.97	34	2.93	0.59	1.02	34	3.00	0.60	0.77	33	0.69
Aşırı kalabalık çalışma alanı/şantiye tıkanıklığı	2.85	0.57	1.09	35	2.76	0.55	1.04	35	3.20	0.64	1.23	25	0.06
Malzemelerin depolanma problemleri (Çok fazla veya bozuk malzeme depolama)	2.84	0.57	1.18	36	2.76	0.55	1.14	36	3.15	0.63	1.28	27	0.06
Şantiye sahasına zor erişilmesi	2.74	0.55	1.15	37	2.76	0.55	1.15	37	2.68	0.54	1.13	36	0.70
Hastalık, yaralanma, ailevi veya kişisel sebeplerden dolayı geç kalma ve/veya işten erken ayrılma	2.71	0.54	1.08	38	2.73	0.55	1.05	38	2.63	0.53	1.22	37	0.68
Ortalama	3.31	0.67	0.63	-	3.33	0.67	0.66	-	3.25	0.65	0.49	-	0.41

* Mann-Whitney U istatistik değerlerinin $P < 0.05$ düzeyinde anlamlı olması, iki katılımcı grubu arasındaki değerlendirmelerin önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir.

Tablo 11’de sunulan RII’ye göre sıralanmış inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenleri arasında genel olarak, iş akışı değişkenliğinin en önemli üç nedeni aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

- Enflasyon (Malzeme fiyatlarındaki artış)
- Uygulama projelerinin yeterince detaylandırılmaması
- Tamamlanan işler için düzensiz finansman ve ödeme

"Enflasyon (Malzeme fiyatlarının artışı)", Türk inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğinin en önemli nedeni olarak sıralanmıştır. Bunun nedenlerinden biri, son yıllarda Türkiye’deki enflasyon nedeniyle yapı malzemesi fiyatlarının yıllık olarak artış göstermesidir. Sonuç olarak, enflasyon, malzeme fiyatlarının yükselmesinde önemli bir rol oynamakta ve bu durum projenin başlangıç ve nihai maliyetleri arasında sapmalara yol açmaktadır (Musarat vd., 2021). Bu sapma, inşaat projelerindeki önemli akışlardan biri olan planlanmış maliyet üzerinde değişkenliğe neden olmaktadır (Musarat vd., 2020a). Bu bağlamda, Musarat vd. (2020b), enflasyon oranındaki bir değişimin malzeme fiyatlarını artırarak proje maliyetlerinin aşılmasına yol açtığını belirtmiştir. Yapı malzemeleri, herhangi bir inşaat projesinin temel bileşenleridir ve fiyatlarındaki değişiklikler, projenin iş akışı güvenilirliğini etkileyebilir (Musarat vd., 2020a). Bu durum, Kazaz vd. (2012) tarafından da desteklenmiş, enflasyon ile malzeme fiyatlarındaki sürekli artış arasında yakın bir ilişki olduğu ifade edilmiştir. Bu bağlantı, istikrarsız enflasyonun malzeme fiyatları üzerinde önemli bir etkiye sahip olma olasılığıyla açıklanabilir.

İnşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenleri arasında ikinci sırada yer alan önemli neden, "Uygulama projelerinin yeterince detaylandırılmaması" dır. Bu sonuç, proje uygulama detaylarının iş akışı stabilitesi üzerindeki potansiyel önemini ve güçlü etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Türkiye’de en yaygın inşaat sözleşmelerinden biri, Tasarla-İhale Et-Yap (Design Bid Build, DBB) sözleşmesidir (Sümer & Arditi, 2022). DBB sözleşmeleri, tasarımcı ve yüklenicinin uygulama detaylarına ilişkin farklı yorumlara sahip olabilmesi veya inşaat aşamasında öngörülemeyen koşullar veya sorunlarla karşılaşabilmesi nedeniyle daha fazla değişikliğe yol açabilir (Ling, 2004). İş akışı stabilitesini iyileştirmek, gerekli detayların uygun zamanda mevcut olmasını sağlamayı gerektirir. Öte yandan, yetersiz uygulama detayları iş akışı değişkenliğine neden olabilir. Bu durum, ön koşul çalışmalarının mevcudiyetinde dalgalanmalara yol açarak, sonraki faaliyetlerin sorunlarını artırır ve kaynakların verimli bir şekilde hazırlanmasını ve kullanılabilirliğini daha zor hale getirir. Bu bulgu, Thomas vd. (2002) tarafından yapılan geçmiş bir çalışmaya benzemektedir. Bu

çalışmada, faaliyet uygulama detaylarının doğru, eksiksiz ve zamanında sağlanmasının, ardışık faaliyetlerde iş akışı değişkenliğini azaltmak için inşaat projelerinde her zaman bir endişe kaynağı olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, Umar vd. (2020), belirsiz ve yetersiz uygulama detaylarının inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğinin en önemli nedenlerinden biri olduğunu ortaya koymuştur.

"Tamamlanan işler için düzensiz finansman ve ödeme" olarak tanımlanan iş akışı değişkenliği nedeni, toplam 38 adet olarak tanımlanan inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenleri arasında üçüncü sırada yer almıştır. Bu sonuç, Türk inşaat projelerinde birçok işverenin gecikmiş ödemelerden elde ettiği faiz kazancı ile açıklanabilir (Yildiz vd., 2016). Düzensiz ödemeler, bir projenin tamamlanma olasılığını azaltmaktadır. Ayrıca, geç ödemeler ve ödeme yapılmaması, özellikle malzeme ve ekipman temininde iş akışı değişkenliklerine neden olmaktadır. Bu etki, nakit akışı zorluklarıyla ilişkilidir (Peters vd., 2019). Bu sonuca paralel olarak, Culfık vd. (2014), işverenin yüklenicinin hakediş ödemelerindeki gecikmelerinin, Türk inşaat sektöründe zaman değişkenliğinin en yaygın üç nedeninden biri olduğunu tespit etmiştir. Kazaz vd. (2012), büyük ölçekli ve yüksek bütçeli inşaat projelerinde çoğu işverenin hakediş ödemelerini zamanında yapmada zorluk yaşadığını, bunun da ana yüklenicilerin alt yüklenicilere ve tedarikçilere geç ödeme yapmasına neden olduğunu belirtmiştir.

Bulgular, inşaat projelerinde iş akışı değişkenliği nedenleri arasında önerilen 38 neden içinde " Şantiye sahasına zor erişilmesi" faktörünün 37. sırada yer aldığını, yani son sıradan bir önceki sırada olduğunu göstermektedir. Bu neden için $MS = 1.15$, $RII = 0.55$ ve $\sigma = 2.74$ değerleri hesaplanmıştır. Katılımcılar, bu nedenin iş akışı değişkenliği açısından önemli olmadığını düşünmektedir; çünkü $MS < 3$ ve $RII < 0.60$ değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi, inşaat sahasının konumu ve düzeninin tahmin ve planlama sürecindeki temel girdilerden biri olması ve Türk inşaat projelerinde dikkatlice ele alınmasıdır. Bu sonuca paralel olarak, Wambeke (2011), saha koşullarına bağlı olarak erişimde zorlukların artık iş akışı değişkenliği nedeni olmadığını bulmuştur. Ancak, bunun değişen inşaat sahası koşullarından mı yoksa yüklenicilerin aldığı önlemlerden mi kaynaklandığı bilinmemektedir. Öte yandan, Russell vd. (2012), çalışma alanına erişimin, inşaat sahalarında zaman değişkenliğinin en ciddi nedenlerinden biri olduğunu belirtmiştir.

Sonuçlar, ankette listelenen 38 iş akışı değişkenliği nedeni arasında en az önemli nedenin " Hastalık, yaralanma, ailevi veya kişisel sebeplerden dolayı geç kalma ve/veya işten erken ayrılma" olduğunu göstermektedir ($MS = 2.71$, $RII = 0.54$ ve $\sigma = 1.08$). Çalışan sayısı,

projeye tahsis edilen kapasitenin dengelenmesi için kritik öneme sahiptir. Bu kapasitedeki ani ve büyük dalgalanmalar, iş akışı stabilitesi üzerinde olumsuz etkilere ve dolayısıyla ekip üretkenliğinde düşüşe yol açabilir (Kocakulah vd., 2016). Bunun yanı sıra, devamsızlığın etkileri arasında iş akışının kesintiye uğraması ve üretkenlikte azalma yer almaktadır (Prasad vd., 2019). Bu sonuç, Wambeke vd. (2011) tarafından yürütülen bir çalışmanın bulgularıyla çelişmektedir. Söz konusu çalışma, başlangıç zamanları ve görev süreleri açısından değerlendirildiğinde, iş akışı değişkenliğinin en önemli bireysel nedenlerinden birinin çalışanların geç gelmesi ve/veya erken ayrılması ile ilgili olduğunu belirtmiştir.

Mann-Whitney U testi, iki grup arasındaki ortalamaların farklı olup olmadığını belirlemek için yaygın olarak kullanılan parametrik olmayan bir testtir (Cheng vd., 2004; Takim, 2009). P-değerleri, her bir madde için sıfır hipotezinin 0.05 anlamlılık düzeyinde reddedilme olasılığını tahmin eder. Bir maddenin p-değeri 0.05'ten küçükse, sıfır hipotezi reddedilir (Arditi vd., 2013). Diğer bir deyişle, p-değeri 0.05'ten küçükse, şantiye yönetimi ve operasyonel grupların inşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin algılarının önemli ölçüde farklı olduğu anlamına gelir.

Mann-Whitney U testi sonuçları, iki katılımcı grubu arasında iş akışı değişkenliğinin altı nedeni konusunda algılarda anlamlı bir fark olduğunu göstermiştir: planlanan faaliyetlerin sıralaması, farklı işler arasındaki koordinasyon, değişime kültürel direnç, ekipmanla ilgili teknik eğitim eksikliği, malzemelerin ihtiyaç duyulan yere taşınması gerekliliği ve ekipman tahsisi problemi.

Yönetim ve planlama ile ilgili iş akışı değişkenliği nedenlerini algılamada katılımcı gruplar arasında heterojen bir görüş olduğu gözlemlenmiştir; bu nedenler arasında farklı işler arasındaki koordinasyon, değişime kültürel direnç ve planlanan faaliyetlerin sıralaması yer almaktadır. Mann-Whitney U sonuçlarına göre, şantiye yönetimi katılımcıları bu iş akışı değişkenliği nedenlerini anlamlı derecede daha yüksek puanlamışlardır. Bu durumun, şantiye yönetim düzeyindeki katılımcıların projeye bir bütün olarak odaklanmaları ve planlama faaliyetleri ile koordinasyon konularıyla daha fazla ilgilenmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan, operasyonel katılımcılar, malzemelerin taşınması ve faaliyetlerin sorunsuz ve sistematik bir şekilde uygulanmasını sağlamak gibi inşaat faaliyetlerinin günlük yönetimiyle ilgilenmektedir ve bu nedenle “malzemelerin ihtiyaç duyulan yere taşınması gerekliliği” maddesini daha yüksek puanlamışlardır. Bu sonuç, Loganathan vd. (2018) tarafından da doğrulanmıştır; ustabaşı ve işçilerin genellikle diğer ekiplerle koordinasyonda doğrudan yer almadıkları belirtilmiştir. Bununla birlikte,

ustabaşların inşaat sahasında malzeme yönetiminden de sorumlu olması yaygın bir durumdur (Soemardi & Pribadi, 2018). Bu nedenle, Montalbán-Domingo vd. (2024), iş akışı değişkenliğini azaltmak için ustabaşların inşaat yönetimi konusundaki deneyimlerinin artırılmasını önermiştir. Ayrıca, operasyonel düzeyde ve işverenler, tasarımcılar ve tedarikçiler gibi dış aktörler arasında etkili iletişim ve koordinasyonu geliştirmek, malzeme sorunlarını azaltmak ve sorunların çözümü için geçen süreyi kısaltmak açısından kritik öneme sahiptir (Liu & Ballard, 2009).

Ekipmanla ilgili teknik eğitim eksikliği ve ekipman tahsisi problemleri de iki katılımcı grubu arasında algılar açısından istatistiksel olarak farklı bulunmuştur. Tablo 11’te görüldüğü üzere, şantiye yönetimi katılımcılarının RII puanı, operasyonel gruba göre nispeten yüksektir. Bunun bariz bir nedeni, şantiye yönetimi katılımcılarının %59.2’sinin teknik ofis mühendisleri ve kontrol mühendisleri olmasıdır; bu gruptakilerin sorumlulukları ekipman montajı, tahsisi, bakımı ve eğitim desteği sağlamaya odaklanmaktadır. Faaliyetleri tamamlamak için gereken tüm kaynakların (malzeme, ekipman vb.) mevcut olması, güvenilir bir iş akışı yaratmak için gereklidir (da Rocha vd., 2016). Bu kaynakların karşılanamaması, güvenilir iş akışını engeller ve dolayısıyla proje performansını olumsuz etkiler (Koskela, 2000).

3.1.3. İş Akışı Değişkenliği Nedenlerinin Keşifsel Faktör Analizi

Faktör analizinden anlamlı sonuçlar elde edebilmek için analizden önce çeşitli konuların ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle, faktör analizine başlamadan önce veri setinin faktör analizi için uygunluğu test edilmiştir.

Öncelikle, bu araştırma verilerine ait korelasyon matrisi için KMO değeri 0.89 olarak hesaplanmıştır (Tablo 12), bu da faktör analizi yapılmasının kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Bartlett Küresellik Testi anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Bu sonuçlara dayanarak, 38 değişkenin (iş akışı değişkenliği nedenleri) sıfır ve bir değerlerinden (kimlik matrislerinden) anlamlı şekilde farklı olduğu ve birbirleriyle önemli derecede korelasyon gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 12. KMO ve Bartlett küresellik testi

Madde		İlk Çalıştırma	Altıncı Çalıştırma
KMO Örneklem Yeterliliği Ölçüsü		0.891	0.886
Bartlett Küresellik Testi	4292.643	4292.643	2066.702
	703	703	210
	0.000	0.000	0.000
Cronbach Alfa		0.942	0.905

Korelasyon matrisinin incelenmesi, korelasyon katsayıları değerlerinin 0.3'ten büyük olduğundan emin olmak için yapılır. Eğer korelasyon katsayıları 0.3'ün üzerinde değilse, bu durum faktör analizinin uygun olmayabileceğini gösterebilir (Taherdoost vd., 2014; Williams vd., 2010). Başka bir deyişle, 0.3'lük bir faktörleşme değeri, faktörlerin verilerdeki ilişkisinin yaklaşık %30'unu açıkladığını gösterir. Pratikte, bu durum değişkenlerin üçte birinin çok fazla varyans paylaştığını ve bu nedenle değişkenlerin birbiriyle mi yoksa bağımlı değişkenle mi ilişkili olduğunu belirlemenin zorlaştığını (çoklu doğrusal bağlantı) ifade eder (Williams vd., 2010). Bu çalışmada, oldukça fazla sayıda korelasyon katsayısının 0.3'ten büyük olduğu görülmüştür, bu da Tablo 13'te gösterildiği gibi faktör analizinin uygun olduğunu önermektedir.

Tablo 13a. Korelasyon matrisi (Bölüm 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1																
2	.457**	1															
3	.178*	.382**	1														
4	.419**	.427**	.262**	1													
5	.154*	.206**	.437**	.362**	1												
6	.197**	.225**	.483**	.332**	.754**	1											
7	0.078	0.021	.149*	0.108	.305**	.258**	1										
8	.146*	0.126	.145*	0.045	.261**	.260**	.645**	1									
9	.140*	0.101	.214**	.320**	.307**	.298**	.209**	.247**	1								
10	.172*	.179*	.305**	.177*	.494**	.463**	.283**	.414**	.299**	1							
11	.097	.215**	.194**	.199**	.199**	.174*	0.053	-0.034	.144*	.199**	1						
12	.141*	.212**	.429**	.186**	.373**	.384**	.252**	.281**	.231**	.392**	.459**	1					
13	.117	.212**	.340**	.205**	.451**	.438**	.195**	.177*	.268**	.382**	.493**	.492**	1				
14	0.091	.160*	.417**	.182**	.369**	.443**	.324**	.203**	.270**	.336**	.308**	.522**	.667**	1			
15	0.054	.193**	.360**	.181*	.431**	.444**	.315**	.222**	.186**	.376**	.284**	.444**	.662**	.857**	1		
16	0.081	0.131	.169*	0.057	0.122	.219**	-0.019	0.109	0.023	.158*	0.137	.140*	.267**	.165*	.159*	1	
17	0.043	0.09	.307**	.149*	.260**	.279**	.299**	.308**	.311**	.463**	.265**	.317**	.366**	.288**	.312**	0.075	1
18	0.02	0.134	.352**	.149*	.412**	.380**	.349**	.291**	.301**	.406**	.256**	.321**	.346**	.316**	.356**	-0.001	.707**
19	.175*	0.071	.268**	0.105	.246**	.223**	.192**	0.086	.313**	.251**	.279**	.295**	.405**	.366**	.297**	0.01	.439**
20	.174*	.159*	.227**	0.068	.407**	.346**	.236**	.190**	.259**	.418**	.396**	.356**	.451**	.312**	.295**	0.085	.511**
21	0.057	0.001	.231**	0.074	.360**	.295**	.205**	.266**	.332**	.379**	.217**	.230**	.335**	.254**	.202**	0.138	.385**
22	0.112	0.067	.343**	0.054	.394**	.428**	.273**	.247**	.331**	.440**	.188**	.396**	.476**	.399**	.368**	.145*	.489**
23	-0.009	0.045	.257**	0.087	.310**	.276**	.178*	.263**	.312**	.387**	.178*	.240**	.344**	.309**	.301**	0.098	.464**
24	0.071	0.079	.319**	.198**	.372**	.315**	.323**	.164*	.245**	.373**	.220**	.379**	.455**	.414**	.380**	0.059	.351**
25	-0.002	0.063	.316**	0.081	.290**	.397**	.313**	.188**	.286**	.373**	.296**	.376**	.420**	.512**	.459**	0.089	.408**
26	0.083	0.102	.159*	0.07	.311**	.345**	.301**	.242**	.195**	.340**	.250**	.250**	.290**	.361**	.341**	.168*	.470**
27	.147*	.169*	.241**	.171*	.297**	.362**	0.095	0.11	.236**	.254**	.259**	.140*	.366**	.291**	.310**	.303**	.414**
28	0.129	0.13	.305**	.239**	.253**	.225**	.179*	0.101	.392**	.298**	.311**	.337**	.353**	.395**	.342**	0.066	.323**
29	.148*	.145*	.352**	.189**	.272**	.325**	.301**	.219**	.342**	.319**	.168*	.287**	.413**	.470**	.418**	.150*	.357**
30	0.031	0.066	.290**	.145*	.324**	.326**	.349**	.410**	.204**	.437**	.139*	.258**	.265**	.235**	.242**	.178*	.386**
31	-0.016	0.01	.407**	0.073	.397**	.416**	.358**	.367**	.187**	.511**	0.109	.371**	.397**	.384**	.390**	.185**	.433**
32	0.078	0.031	.226**	0.071	.210**	.188**	.524**	.543**	.162*	.351**	-0.015	.246**	.243**	.346**	.320**	.171*	.391**

Tablo 13a'nın devamı

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
33	0.074	0.126	.216**	0.038	.256**	.226**	.250**	.363**	0.043	.396**	0.035	0.082	.182**	.219**	.197**	.179*	.287**
34	0.037	0.119	.314**	0.025	.263**	.292**	.172*	.270**	0.111	.406**	0.068	.261**	.380**	.348**	.316**	.183**	.375**
35	0.024	0.09	.216**	0.138	.317**	.314**	.286**	.366**	.230**	.446**	.225**	.262**	.345**	.345**	.339**	.161*	.329**
36	-0.068	0.009	.180*	.140*	.307**	.314**	.368**	.327**	.268**	.337**	.212**	.186**	.291**	.268**	.219**	.179*	.334**
37	0.043	0.052	.398**	0.041	.339**	.336**	.212**	.228**	.239**	.438**	.155*	.273**	.400**	.426**	.388**	.173*	.383**
38	-0.005	0.036	.323**	0.059	.188**	.253**	.185**	0.13	.225**	.242**	.290**	.350**	.263**	.326**	.293**	0.044	.303**

Tablo 13b. Korelasyon matrisi (Bölüm 2)

	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
18	1																
19	.430**	1															
20	.529**	.517**	1														
21	.413**	.356**	.536**	1													
22	.554**	.504**	.570**	.482**	1												
23	.490**	.398**	.514**	.566**	.627**	1											
24	.369**	.353**	.362**	.381**	.495**	.335**	1										
25	.430**	.341**	.413**	.329**	.463**	.354**	.679**	1									
26	.480**	.410**	.394**	.335**	.434**	.368**	.435**	.576**	1								
27	.452**	.411**	.416**	.376**	.461**	.406**	.397**	.455**	.585**	1							
28	.305**	.461**	.374**	.263**	.455**	.349**	.405**	.403**	.326**	.338**	1						
29	.308**	.459**	.311**	.282**	.485**	.427**	.418**	.445**	.464**	.466**	.635**	1					
30	.358**	.215**	.298**	.307**	.429**	.491**	.347**	.345**	.324**	.321**	.308**	.412**	1				
31	.452**	.301**	.367**	.374**	.476**	.452**	.422**	.419**	.349**	.300**	.313**	.422**	.608**	1			
32	.322**	.286**	.245**	.318**	.302**	.366**	.334**	.400**	.433**	.286**	.229**	.370**	.460**	.483**	1		
33	.261**	.248**	.247**	.344**	.255**	.346**	.211**	.199**	.368**	.291**	.248**	.334**	.444**	.425**	.480**	1	
34	.387**	.334**	.409**	.431**	.479**	.540**	.414**	.455**	.468**	.418**	.226**	.395**	.450**	.532**	.473**	.515**	1
35	.433**	.257**	.392**	.377**	.417**	.532**	.344**	.393**	.336**	.343**	.320**	.369**	.442**	.540**	.386**	.431**	.602**
36	.352**	.194**	.365**	.480**	.318**	.377**	.309**	.360**	.317**	.279**	.169*	.305**	.402**	.472**	.384**	.286**	.438**
37	.388**	.437**	.433**	.349**	.434**	.431**	.354**	.456**	.363**	.414**	.346**	.419**	.440**	.576**	.456**	.406**	.526**
38	.247**	.282**	.203**	.144*	.344**	.176*	.267**	.363**	.293**	.219**	.409**	.384**	.212**	.342**	.260**	.247**	.270**

Tablo 13c. Korelasyon matrisi (Bölüm 3)

	35	36	37	38
35	1			
36	.614**	1		
37	.452**	.448**	1	
38	.246**	.233**	.311**	1

******. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*****. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

İnşaat projelerindeki iş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin 38 madde için, çıkarım yöntemi olarak PCA ve dönüşüm yöntemi olarak Varimax kriteri kullanılarak EFA gerçekleştirilmiştir. PCA, her bir bileşenle veri setinden maksimum varyansı çıkarmak ve çok sayıda değişkeni daha az sayıda bileşene indirmek için kullanılır (Conway & Huffcutt, 2003; Henson vd., 2004). Kabul edilebilir bir çözüme ulaşmak için, faktör analizi birden fazla kez tekrarlanabilir ve her çalıştırmada bir veya daha fazla iş akışı değişkenliği nedenini eleterek faktör analizi gereksinimlerinin tamamının karşılanması sağlanabilir. Her analiz tekrarlandığında, önerilen gereksinimlerin tüm iş akışı değişkenliği nedenleri için kontrol edilmesi ve doğrulanması gerekir (Reio & Shuck, 2015). Altı kez tekrarlanan EFA sonucunda, 17 iş akışı değişkenliği nedeni elenmiş ve geriye kalan 21 iş akışı değişkenliği nedeni dört bileşen altında düzenlenmiştir.

İlk faktör analizi çalıştırması, iş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin 38 madde üzerinde gerçekleştirildikten sonra, Kötü hava şartları (Aşırı sıcak, soğuk, rüzgar, yağmur vb.) için ortaklık (communality) değerinin 0.50'den düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, Tablo 14'te gösterildiği üzere, bu değişkenin dahil edilmediği ikinci bir çalıştırmanın yapılmasını gerektirmiştir.

Tablo 14. Değişkenlik nedenlerinin ortaklık değerleri

No.	Faktör	Çıkarım ortaklık değerleri	
		İlk çalıştırma	Altıncı çalıştırma
1	Çalışmaya başlamak için gerekli izinlerin alınması	0.651	0.648
2	Planlanan faaliyetlerin sıralaması	0.670	0.644
3	Önceki işlerin tamamlanmamış olması	0.654	Üçüncü çalıştırmada çıkarıldı
4	Tamamlanmış işler için yapılması gereken denetimler (Kalite testleri vb.)	0.666	0.595
5	Önceki işlerin kalitesizliği nedeniyle yeniden yapılmanın gerekli olması	0.763	Beşinci çalıştırmada çıkarıldı
6	Önceki işlerin düşük kalitesi nedeniyle tadilatın gerekli olması	0.775	Beşinci çalıştırmada çıkarıldı
7	Tasarım ve/veya çizimlerdeki hatalar	0.785	Beşinci çalıştırmada çıkarıldı
8	Uygulama projelerinin yeterince detaylandırılmaması	0.772	Beşinci çalıştırmada çıkarıldı
9	İşin zorluğu	0.649	Altıncı çalıştırmada çıkarıldı
10	İyi planlanmamış çalışma yöntemi	0.542	Üçüncü çalıştırmada çıkarıldı
11	Malzemenin şantiye sahası içerisinde ihtiyaç duyduğunuz yere taşınması	0.741	Beşinci çalıştırmada çıkarıldı
12	Malzemenin tedarik süresinin fazlalığı	0.658	0.503
13	Malzemelerin depolanma problemleri (Çok fazla veya bozuk malzeme depolama)	0.713	0.703
14	Malzeme boyutunda hata	0.771	0.838
15	Malzeme tipinde hata	0.737	0.796
16	Enflasyon (Malzeme fiyatlarındaki artış)	0.536	Üçüncü çalıştırmada çıkarıldı
17	İşçilerin/ekiplerin beceri/tecrübe/eğitim eksikliği	0.633	0.600
18	Düşük üretkenlik	0.697	0.622

Tablo 14'ün devamı

19	Hastalık, yaralanma, ailevi veya kişisel sebeplerden dolayı geç kalma ve/veya işten erken ayrılma	0.598	0.557
20	Moral ve/veya motivasyon eksikliği	0.706	0.583
21	Üzerinde çalıştığınız iş tamamlanmadan önce başka bir işe/göreve geçmek	0.589	Dördüncü çalıştırmada çıkarıldı
22	Ekip sayısının yetersizliği	0.643	0.607
23	Yeni personele işin devredilmesi ile ilgili verimsizlikler	0.628	Üçüncü çalıştırmada çıkarıldı
24	Uygun ekipmanın bulunmaması	0.541	Üçüncü çalıştırmada çıkarıldı
25	Ekipman arızaları	0.666	Dördüncü çalıştırmada çıkarıldı
26	Ekipman için teknik eğitimin yetersizliği	0.709	0.504
27	Aktiviteler için ekipman dengelenmesi problemi	0.733	0.518
28	Aşırı kalabalık çalışma alanı/şantiye tıkanıklığı	0.720	Altıncı çalıştırmada çıkarıldı
29	Şantiye sahasına zor erişilmesi	0.713	Altıncı çalıştırmada çıkarıldı
30	Detaylı sözleşme olmaması	0.556	0.547
31	Tamamlanan işler için düzensiz finansman ve ödeme	0.697	0.654
32	Tasarım veya çizimle ilgili sorulara geç cevaplar verilmesi	0.707	Üçüncü çalıştırmada çıkarıldı
33	Değişime karşı kültürel direnç (Yeni teknolojilerin kullanılmaması vb.)	0.611	0.503
34	Farklı yükleniciler arasındaki koordinasyon eksikliği	0.671	0.610
35	Esnek ve gerçekçi olmayan iş programı	0.643	0.640
36	İşin kapsamındaki değişiklikler	0.689	0.514
37	Proje paydaşları (proje müdürü, şantiye şefi, ustabaşı, işçiler vb.) arasındaki kötü veya eksik iletişim	0.573	0.537
38	Kötü hava şartları (Aşırı sıcak, soğuk, rüzgar, yağmur vb.)	0.498	İkinci çalıştırmada çıkarıldı

Çıkarım Yöntemi: Temel Bileşen Analizi (PCA)

Elde edilen temel bileşenler, açık değişkenlerin varyansına katkılarına göre sıralanmıştır. Bu sıralama, birinci temel bileşenin mümkün olduğunca fazla varyansı açıklamasını, ikinci temel bileşenin ise kalan varyansın mümkün olduğunca fazlasını açıklamasını ve bu şekilde diğer temel bileşenler için de sırayla devam etmesini sağlar. Her bir faktör, toplam varyansın belirli bir yüzdesini açıklamaktadır. Bir faktörün özdeğeri birden küçükse, bu faktörün benzersiz bir faktör olarak temsil edilecek kadar toplam varyansı açıklayamadığı kabul edilir. Ayrıca, yeterince varyans açıklamayan faktörlerin nihai çözümde yer alması değerli olmayabilir ve bu nedenle dikkate alınmaz (Suhr, 2006).

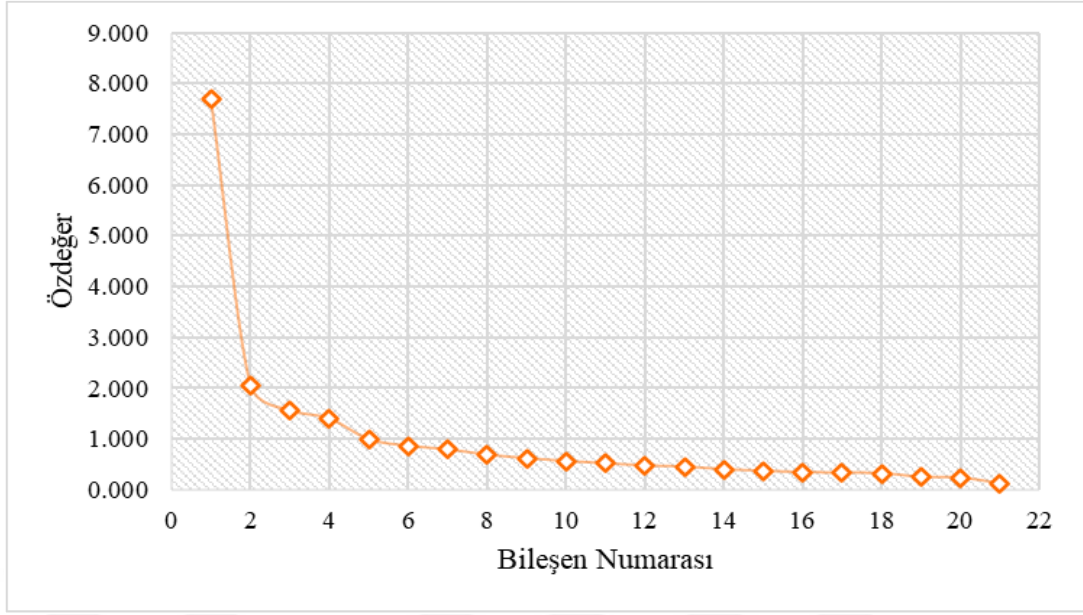
Tablo 15'te gösterilen özdeğerlere göre, faktör analizi için son tekrarda dört bileşenin seçilmesi önerilmektedir; çünkü bu bileşenlerin özdeğerleri 1.0'dan büyüktür. Toplam Varyans Açıklama tablosunun ilk sütunu, kalan 21 faktörün her biri için bir özdeğer içermektedir ve bu 21 özdeğerin toplamı 21'e eşittir. Bu özdeğerler azalan sırayla düzenlenmiştir; sütunun en üstünde en büyük değer, en altında ise en küçük değer yer almaktadır. Bu 21 faktör arasında, Faktör 1 örneklemdeki en büyük varyansı açıklamakta,

Faktör 21 ise en küçük varyansa katkıda bulunmaktadır. Faktör 1 için ilgili özdeğer 7.699'dur; bu, toplam 21 varyansın 7.699'unun Faktör 1'e atfedilebileceği anlamına gelmektedir.

Tablo 15. EFA'nın son çalıştırması ile açıklanan toplam varyans

Bileşen	Başlangıç özdeğerleri			Çıkarım kareler yüklemeleri toplamı			Dönüşüm kareler yüklemeleri toplamı		
	Toplam	Varyans %	Kümülatif %	Toplam	Varyans %	Kümülatif %	Toplam	Varyans %	Kümülatif %
1	7.699	36.661	36.661	7.699	36.661	36.661	3.926	18.697	18.697
2	2.061	9.813	46.474	2.061	9.813	46.474	3.841	18.292	36.990
3	1.564	7.447	53.921	1.564	7.447	53.921	3.026	14.409	51.399
4	1.397	6.654	60.575	1.397	6.654	60.575	1.927	9.176	60.575
5	.989	4.708	65.283						
6	.858	4.087	69.370						
7	.790	3.763	73.134						
8	.683	3.255	76.388						
9	.616	2.934	79.322						
10	.556	2.650	81.972						
11	.516	2.458	84.429						
12	.469	2.234	86.663						
13	.451	2.147	88.810						
14	.396	1.888	90.698						
15	.366	1.743	92.440						
16	.339	1.615	94.055						
17	.328	1.564	95.619						
18	.320	1.523	97.143						
19	.247	1.176	98.318						
20	.232	1.104	99.422						
21	.121	.578	100.000						

SPSS 22 ile hazırlanan ve Şekil 16'te gösterilen, iş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin faktör analizi sonucunda elde edilen veriler için oluşturulan scree plot incelendiğinde, toplamda 21 temel bileşen bulunmasına rağmen eğrinin x-ekseninde 4 noktasında düzleşmeye başladığı gözlemlenmektedir ve bu nokta, korunacak bileşen sayısını tanımlamaktadır.



Şekil 16. İş akışı değişkenliği nedenlerine ilişkin faktör analizi sonucunda elde edilen veriler için verilen Scree plot

Tablo 15’te gösterilen toplam varyans açıklama değerleri, üç alt bölüme ayrılmıştır: başlangıç özdeğerleri, çıkarım kareler yüklemeleri toplamı ve dönüşüm kareler yüklemeleri toplamı. Dönüşüm kareler yüklemeleri, rotasyon sonrası özdeğerleri ve varyansı sunmaktadır. Rotasyon, çıkarılan bileşenler tarafından açıklanan kümülatif yüzde varyansını korurken, bu varyansı bileşenler arasında daha eşit bir şekilde dağıtır. Kalan dört bileşen tarafından açıklanan toplam kümülatif varyans yüzdesi olan %60.58, kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir. Birinci bileşen, varyansın %18.69’unu, ikinci bileşen %18.29’unu, üçüncü bileşen %14.41’ini ve dördüncü bileşen %9.18’ini açıklamaktadır. Sonuç olarak, dört bileşenli bir model, bu çalışmaya dahil edilen Türk inşaat sahalarındaki değişkenlik nedenlerini yansıtan maddelerle ilgili verileri yeterince temsil etmiştir.

Belirlenebilir faktör sayısının kararlaştırılmasının ardından, bir sonraki adım bu faktörler için faktör yüklerinin raporlanması olmuştur. Faktör yükleri, bileşen puanı ile faktör arasındaki korelasyonu temsil eder ve daha yüksek faktör yükleri, faktörün bileşen içindeki önemini artırır. Bu çalışmada 0.50 eşik değeri kullanılmıştır; bu eşik değerinin altında bir faktör yüküne sahip maddeler çözümden çıkarılmıştır.

Sonuçta elde edilen her faktörün, yalnızca bir bileşen üzerinde 0.50 veya daha yüksek bir yüke sahip olması gerekmektedir. Bir maddenin birden fazla faktör üzerinde anlamlı yüklemesi olduğunda çapraz yükleme problemi ortaya çıkar. Çok sayıda çapraz yükleme mevcutsa, bu durum kötü tanımlanmış faktörleri veya önceden belirlenmiş yapının hatalı

olduğunu gösterebilir (Costello & Osborne, 2019). Faktöriyel saflığı olmayan veya birden fazla faktör üzerinde çapraz yükleme yapan değişkenler, Williams vd. (2010)'in önerisine uygun olarak analizden çıkarılmıştır. Ayrıca, nihai faktör modelinin geçerliliğini sağlamak için her bileşenin en az üç maddeye sahip olması gerekmektedir (Costello & Osborne, 2019); bu kriteri karşılamayan bileşenler, üzerindeki maddeler çıkarılarak analizden çıkarılmış ve faktör analizi yeniden yapılmıştır.

Tablo 16, Türk inşaat projelerindeki değişkenlik nedenlerine ilişkin önerilen 38 madde için yapılan faktör analizinin nihai çözümünü sunmaktadır. Bu tablo, kalan 21 değişkenlik nedeninin dört bileşen arasında 0.50'nin üzerinde faktör yükleriyle dağıtıldığını göstermektedir.

Tablo 16. Faktör analizinin son çalıştırması için döndürülmüş bileşen matrisi

Faktör	Bileşen			
	1	2	3	4
Çalışmaya başlamak için gerekli izinlerin alınması				0.789
Planlanan faaliyetlerin sıralaması				0.789
Tamamlanmış işler için yapılması gereken denetimler (Kalite testleri vb.)				0.752
Malzemenin tedarik süresinin fazlalığı			0.646	
Malzemelerin depolanma problemleri (Çok fazla veya bozuk malzeme depolama)			0.748	
Malzeme boyutunda hata			0.873	
Malzeme tipinde hata			0.852	
İşçilerin/ekiplerin beceri/tecrübe/eğitim eksikliği	0.718			
Düşük üretkenlik	0.720			
Hastalık, yaralanma, ailevi veya kişisel sebeplerden dolayı geç kalma ve/veya işten erken ayrılma	0.702			
Moral ve/veya motivasyon eksikliği	0.698			
Ekip sayısının yetersizliği	0.659			
Ekipman için teknik eğitimin yetersizliği	0.628			
Aktiviteler için ekipman dengelenmesi problemi	0.640			
Detaylı sözleşme olmaması		0.700		
Tamamlanan işler için düzensiz finansman ve ödeme		0.703		
Değişime karşı kültürel direnç (Yeni teknolojilerin kullanılmaması vb.)		0.676		
Farklı yükleniciler arasındaki koordinasyon eksikliği		0.686		
Esnek ve gerçekçi olmayan iş programı		0.748		
İşin kapsamındaki değişiklikler		0.685		
Proje paydaşları (proje müdürü, şantiye şefi, ustabaşı, işçiler vb.) arasındaki kötü veya eksik iletişim		0.570		

Çıkarım Yöntemi: Temel Bileşen Analizi (PCA).

Dönüşüm Yöntemi: Kaiser Normalizasyonu ile Varimax.

Altı kez tekrarlanan EFA sonucunda, değişkenlik nedenlerine ilişkin 17 faktör elenmiş ve kalan 21 faktör dört bileşen altında düzenlenmiştir. Tablo 17, bu çalışmada önerilen 38 iş

akışı değişkenliği nedenine yönelik faktör analizinin farklı çalışmalarında, 17 faktörün çıkarılma sayısı ve nedenlerini özetlemektedir.

Tablo 17. Değişkenlik nedenleri faktör analizinden çıkarılan faktörlerin nedenleri

Çalıştırma Numarası	Çıkarılan Faktör Sayısı	Çıkarılan Faktörler	Çıkarılma Nedenleri
2	1	Kötü hava şartları (Aşırı sıcak, soğuk, rüzgar, yağmur vb.)	Ortaklık değeri 0.5'ten küçük
3	6	Önceki işlerin tamamlanmamış olması	Hiçbir bileşen yüklemesi 0.5'ten büyük değil
		İyi planlanmamış çalışma yöntemi	Hiçbir bileşen yüklemesi 0.5'ten büyük değil
		Enflasyon (Malzeme fiyatlarındaki artış)	Hiçbir bileşen yüklemesi 0.5'ten büyük değil
		Yeni personele işin devredilmesi ile ilgili verimsizlikler	Faktör birden fazla bileşen üzerine yüklenmiş
		Uygun ekipmanın bulunmaması	Hiçbir bileşen yüklemesi 0.5'ten büyük değil
		Tasarım veya çizimle ilgili sorulara geç cevaplar verilmesi	Faktör birden fazla bileşen üzerine yüklenmiş
4	2	Üzerinde çalıştığınız iş tamamlanmadan önce başka bir işe/göreve geçmek	Hiçbir bileşen yüklemesi 0.5'ten büyük değil
		Ekipman arızaları	Hiçbir bileşen yüklemesi 0.5'ten büyük değil
5	5	Önceki işlerin kalitesizliği nedeniyle yeniden yapılmanın gerekli olması	Bu iki faktör yalnızca bir bileşen içinde dahil edilmiş
		Önceki işlerin düşük kalitesi nedeniyle tadilatın gerekli olması	
		Tasarım ve/veya çizimlerdeki hatalar	Bu iki faktör yalnızca bir bileşen içinde dahil edilmiş
		Uygulama projelerinin yeterince detaylandırılmaması	
		Malzemenin şantiye sahası içerisinde ihtiyaç duyduğunuz yere taşınması	Bu faktör yalnızca bir bileşen içinde dahil edilmiş
6	3	İşin zorluğu	Bu faktör yalnızca bir bileşen içinde dahil edilmiş
		Aşırı kalabalık çalışma alanı/şantiye tıkanıklığı	Bu iki faktör yalnızca bir bileşen içinde dahil edilmiş
		Şantiye sahasına zor erişilmesi	

Elde edilen dört bileşenin, kalan 21 iş akışı değişkenliği nedeni için güvenilirliği Cronbach Alfa ($C\alpha$) hesaplanarak kontrol edilmiştir. Ayrıca, her bir bileşen için $C\alpha$ değeri, yalnızca o bileşene yüklenen faktörlere dayalı olarak hesaplanmıştır. Tablo 18'de gösterildiği gibi, birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü bileşenlerin $C\alpha$ değerleri sırasıyla 0.87, 0.86, 0.86 ve 0.69 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin tüm veri seti ve her bir bileşen için 0.60'tan büyük olması, yeterli iç tutarlılığı göstermektedir.

Araştırmanın en önemli adımı, elde edilen bileşenlerin yorumlanması ve adlandırılmasıdır. Bu çalışma, bileşene yüklenen faktörler arasındaki benzerlik örüntüleriyle ilgilenmektedir. Bu nedenle, her bir bileşene dahil edilen değişkenlerin ilişkileri ve içerikleri

anlaşılarak, olası adlar ve yorumlar önerilebilir. Tablo 18, Türk inşaat projelerindeki değişkenlik nedenlerine ilişkin veriler için faktör analizinin modelini temsil etmektedir. Bu veriler, dört bileşen ile özetlenmiştir ve bu bileşenler aşağıdaki şekilde adlandırılmıştır:

- Bileşen No.1: Kaynaklar (insan ve ekipman): 7 faktörü içermekte ve 7.699 özdeğerine sahiptir, toplam varyansın %18.697'sini açıklamaktadır.
- Bileşen No.2: Yönetim ve Planlama: 7 faktörü içermekte ve 2.061 özdeğerine sahiptir, toplam varyansın %18.292'sini açıklamaktadır.
- Bileşen No.3: Malzeme: 4 faktörü içermekte ve 1.564 özdeğerine sahiptir, toplam varyansın %14.409'unu açıklamaktadır.
- Bileşen No.4: Önkoşul: 3 faktörü içermekte ve 1.397 özdeğerine sahiptir, toplam varyansın %9.176'sını açıklamaktadır.

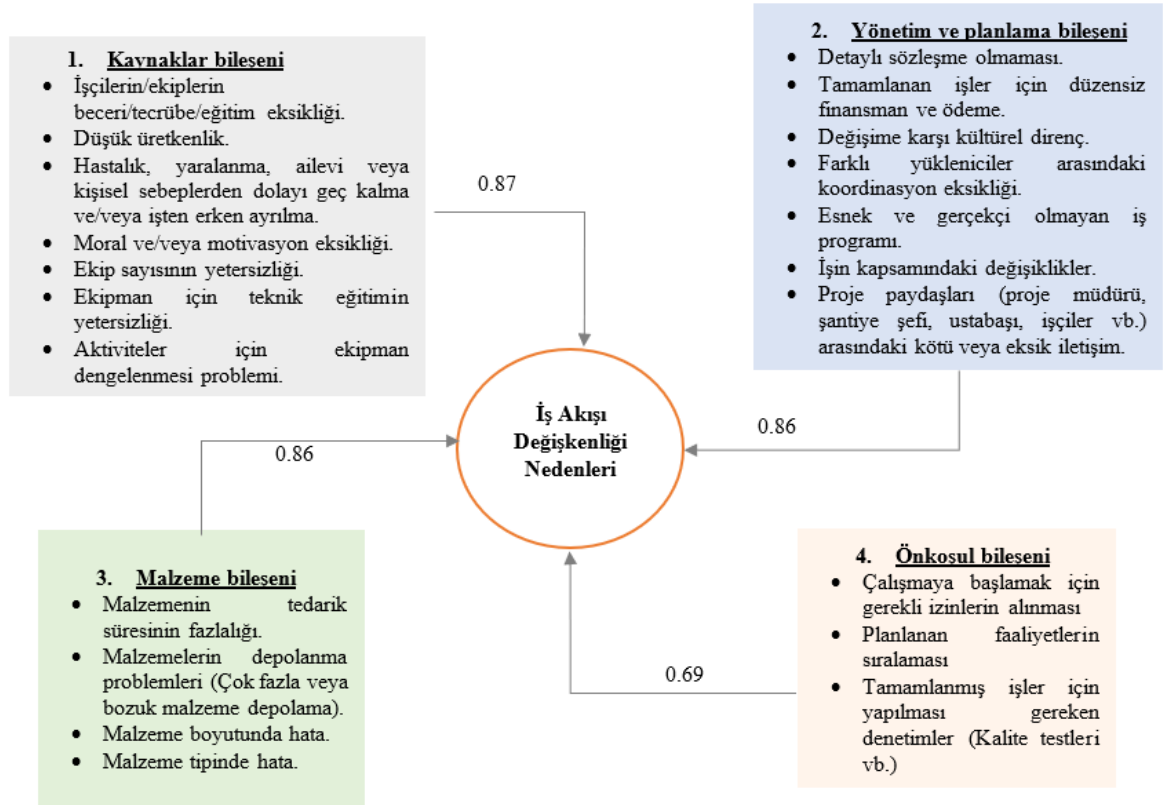
Tablo 18. Değişkenlik nedenlerine ilişkin faktör analizinin nihai sonuçları

Değişkenlik nedeni	Faktör yüklemesi	Özdeğer	Açıklanan varyans %	Cronbach's α
Bileşen No.1				
İşçilerin/ekiplerin beceri/tecrübe/eğitim eksikliği	0.718	7.699	18.697	0.87
Düşük üretkenlik	0.720			
Hastalık, yaralanma, ailevi veya kişisel sebeplerden dolayı geç kalma ve/veya işten erken ayrılma	0.702			
Moral ve/veya motivasyon eksikliği	0.698			
Ekip sayısının yetersizliği	0.659			
Ekipman için teknik eğitimin yetersizliği	0.628			
Aktiviteler için ekipman dengelenmesi problemi	0.640			
Bileşen No. 2				
Detaylı sözleşme olmaması	0.700	2.061	18.292	0.86
Tamamlanan işler için düzensiz finansman ve ödeme	0.703			
Değişime karşı kültürel direnç (Yeni teknolojilerin kullanılmaması vb.)	0.676			
Farklı yükleniciler arasındaki koordinasyon eksikliği	0.686			
Esnek ve gerçekçi olmayan iş programı	0.748			
İşin kapsamındaki değişiklikler	0.685			
Proje paydaşları (proje müdürü, şantiye şefi, ustabaşı, işçiler vb.) arasındaki kötü veya eksik iletişim	0.570			
Bileşen No. 3				
Malzemenin tedarik süresinin fazlalığı	0.646	1.564	14.409	0.86
Malzemelerin depolanma problemleri (Çok fazla veya bozuk malzeme depolama)	0.748			
Malzeme boyutunda hata	0.873			
Malzeme tipinde hata	0.852			

Tablo 18'in devamı

Bileşen No. 4				
Çalışmaya başlamak için gerekli izinlerin alınması	0.789	1.397	9.176	0.69
Planlanan faaliyetlerin sıralaması	0.789			
Tamamlanmış işler için yapılması gereken denetimler (Kalite testleri vb.)	0.752			

İş akışı değişkenliği nedenlerinin temel bileşenleri, Şekil 17'te gösterildiği gibi aşağıda tartışılmaktadır.



Şekil 17. İş akışı değişkenliği nedenlerinin bileşen diyagramı

- Kaynaklar bileşeni

Kaynaklar bileşeni, toplam varyansın %18.70'ini açıklayarak iş akışı değişkenliğine en büyük katkıda bulunan faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, beceriler, verimlilik, ekip büyüklüğü, motivasyon, eğitim ve ekipman tahsisi gibi kaynaklarla ilgili faktörlerin, inşaat iş akışlarında değişkenlik oluşturmadaki kritik rolünü vurgulamaktadır. Bu faktörlerin faktör yüklemeleri 0.63 ile 0.72 arasında değişmekte olup, güçlü bir ilişkiyi işaret etmektedir. Bulgular, kaynaklarla ilgili zorluklar ele alınmadan iş akışı değişkenliğinin etkili bir şekilde minimize edilemeyeceğini ortaya koymaktadır.

Kaynaklar ve süreçler arasındaki etkileşimler, tutarlı iş akışlarının sağlanması açısından kritiktir. İnşaat operasyonları, birbiriyle bağımlı birçok süreçten oluşur ve iş gücü ile ekipman gibi kaynakların akışı ve erişilebilirliği, proje performansını doğrudan etkiler (Horman & Thomas, 2005). Kaynakların erişilebilirliğindeki değişkenlik, kaynak yetersizliğine yol açarak faaliyetler arasındaki devri kesintiye uğratar ve üretim sürekliliğini etkiler. Bu nedenle, kaynakların verimli bir şekilde yönetilmesi, proje takvimlerinde darboğazlar ve gecikmelerin önlenmesi açısından hayati öneme sahiptir (Farrar vd., 2004).

İş gücü ile ilgili faktörler, örneğin yetersiz ekip büyüklüğü, beceri eksikliği, düşük moral ve devamsızlık, iş akışı değişkenliğini önemli ölçüde etkiler. Benzer şekilde, ekipman tahsisi sorunları ve yetersiz teknik eğitim gibi ekipmanla ilgili problemler de bu zorlukları artırmaktadır. Örneğin, kritik kaynakların eksikliği veya yanlış yönetimi, önceki araştırmalarda belirtildiği gibi gecikmelere yol açar (Laslo, 2010; Christodoulou, 2017). Kaynak erişilebilirliğindeki değişkenlik, ister çalışan hastalığı gibi stokastik olaylardan ister ekipman tahsisi gibi proje ile ilgili faktörlerden kaynaklansın, proje döngüsü boyunca belirsizlik yaratır (Zarghami vd., 2020).

Ayrıca, güvenilir kaynak tahsisi, tutarlı iş akışlarının sağlanması için temel bir gerekliliktir. Thomas vd. (2002), iş gücü ve ekipmanın doğru zamanda ve yerde, minimum değişkenlikle mevcut olmasının, üretim kapasitesinin güvenilirliğini korumak ve değişkenlik kaynaklı kesintilerin olasılığını azaltmak için kritik olduğunu vurgulamaktadır (Abbasian-Hosseini vd., 2018).

Kaynak erişilebilirliğinin stokastik doğası, planlama sürecini daha da karmaşık hale getirir. Kaynakların yalnızca "mevcut" veya "mevcut değil" şeklinde kategorize edildiği deterministik modellerin aksine, gerçek dünya senaryoları önemli belirsizlikler içerir. Etkili kaynak yönetimi, bu belirsizlikleri dikkate almalı ve proje güvenilirliğini artırmalıdır. Simülasyon gibi araçlar kullanılarak, inşaat planlamacıları farklı kaynak tahsisi ve süreç akışı kombinasyonlarını test ederek, değişkenliği minimize eden ve genel proje performansını artıran optimum yapılandırmaları belirleyebilir (Zarghami vd., 2020).

- Yönetim ve planlama bileşeni

Bu bileşen, toplam varyansın %18.3'ünü açıklayarak, inşaat projelerinde iş akışı değişkenliğinin kritik nedenlerinden biri olarak yönetim ve planlamanın önemini vurgulamaktadır. Bu grup, faktör yüklemeleri 0.57 ile 0.75 arasında değişen yedi nedeni içermektedir. Bu bileşen, ağırlıklı olarak sözleşme yönetimi, finansman sorunları, koordinasyon, iletişim, iş yükü planlaması ve kapsam değişiklikleri gibi konuları

içermektedir. Bu bulgu, değişkenliğin temel nedenlerini çözmek için yönetim ve planlama uygulamalarının iyileştirilmesine kapsamlı bir şekilde odaklanması gerektiğini önermektedir (Russell vd., 2012; Wambeke vd., 2011).

Kimpland (2009), ustabaşılar arasında zayıf planlama ve iletişim becerileri, değişime kültürel direnç ve ustabaşılar ile proje yöneticileri arasındaki yetersiz iletişimi, inşaat projelerindeki değişkenliğin temel içsel faktörleri olarak tanımlamıştır. İlgili taraflar, müşteriler ve yükleniciler dahil olmak üzere, arasında net dokümantasyon ve düzenli iletişim, yanlış anlamaları önlemek ve sorunsuz bir iş akışı sağlamak için esastır (Latilo vd., 2024; Sigalov vd., 2021). Kapsam değişiklikleri veya gecikmelerle ilgili zamanında güncellemeler, kesintileri azaltarak güvenilir iş akışlarını sürdürmeye yardımcı olur ve proje sürekliliğini artırır (Ijomah vd., 2024).

İnşaat sektöründeki uzmanlık işleri genellikle kendi bireysel görevlerini optimize etmeye öncelik verirken, genel proje iş akışını göz ardı edebilir ve bu durum sonraki faaliyetlerde kesintilere neden olabilir (Lindhard & Wandahl, 2014). Örneğin, bir ekibin görevlerini tamamlamadaki gecikmesi, bir sonraki ekibin zamanında harekete geçmesini engelleyerek daha fazla gecikmeye yol açabilir. Ayrıca, ekipler, proje esnekliği için ayrılan tamponları kendi verimsizliklerini gidermek için yanlış kullanabilir, bu da döngü sürelerini ve bekleme sürelerini artırır (Hopp & Spearman, 2001). İnşaat görevlerinin ardışık doğası ve ekipler arasındaki bağımlılıklar, bir ekibin üretim kapasitesindeki değişkenliğin sonraki görevlerde kesintilere neden olabileceği ve tüm projenin performansını etkileyebileceği anlamına gelir (Javanmardi vd., 2016).

İnşaat projeleri genellikle karmaşık sözleşme yapıları ve belirli faturalama prosedürlerini içerir, bu da gecikmiş ödemeler ve bozulmuş nakit akışı gibi sorunlar yaratabilir. Şeffaflık eksikliği, işverenler ve yükleniciler arasında güveni zayıflatarak gecikmiş veya yapılmayan ödemelerin tekrarlayan bir sorun haline gelmesine yol açar (Sigalov vd., 2021). Net tanımlanmış sözleşme koşulları, anlaşmazlıkları ve yanlış anlamaları önlemek için gereklidir (Latilo vd., 2024). Etkili sözleşme yönetimi, şartların doğru bir şekilde hazırlanması ve hukuki olarak uygulanması, inşaat sürecinde netliği sağlamada ve değişkenliği en aza indirmede kritik bir öneme sahiptir. Tüm taraflar arasında sürekli denetim ve koordinasyon, üzerinde anlaşılan şartlara uyumu sağlar ve iş akışı güvenilirliğini artırır (Ruth, 2022).

Proje yürütme aşamasında müşterilerin yaşadığı finansal zorluklar, yüklenicileri olumsuz etkileyerek gecikmiş maaş ödemeleri, malzeme temininde zorluklar ve ekipman

kiralama sorunları gibi problemlere yol açabilir (Khoshgoftar vd., 2010). Gecikmiş ödemeler, yüklenicileri alternatif finansman arayışına zorlar ve bu durum malzeme tedarikinde daha fazla gecikmelere yol açar. Ödeme zincirinde yer alan işçiler, denetçiler ve inşaat faaliyetlerine doğrudan katılan personelin performansını azaltır. Bu durum, zamanında ödemelerin kritik önemini vurgular (Francis vd., 2016). Düzenli ödemeler, yüklenicilerin kaynaklarını verimli bir şekilde tahsis etmelerini sağlayarak gecikmeleri azaltır ve ana sorumluluklarına odaklanmalarını mümkün kılar; bu da projenin sorunsuz bir şekilde yürütülmesini ve iş akışı güvenilirliğinin artırılmasını sağlar (Latilo vd., 2024).

Gerçekçi olmayan iş yükü planlaması, zaman baskılarına yol açarak gecikmelere, kesintilere ve alt yüklenicilerin programlarında çakışmalara neden olur (Assaad vd., 2020). Bu baskılar, çalışanlarda zihinsel stres ve yorgunluk oluşturur ve hata yapma olasılığını artırır (Love & Smith, 2018). Müşterilerden gelen gerçekçi olmayan program talepleri, iş akışı değişkenliğinin önemli bir dışsal faktörü olarak tanımlanmıştır (Russell vd., 2012; Wambeke vd., 2011). Ayrıca, üzerinde anlaşmaya varılan proje kapsamındaki değişiklikler, iş adımlarında ve faturalama düzenlemelerinde değişiklik yapılmasını gerektirerek iş akışlarını bozmakta ve proje sürecine ek karmaşıklık katmaktadır (Sigalov vd., 2021).

- Malzeme bileşeni

Malzeme bileşeni, inşaat projelerinin stratejik seviyesine katkıda bulunan dört kritik faktörü içerir ve faktör yüklemeleri 0.697 ile 0.792 arasında değişmektedir. Bu bileşen, toplam varyansın %9.80'ini açıklayarak, iş akışı değişkenliğini etkileyen üçüncü en önemli faktör olarak sıralanmıştır. Uygun malzemelerin seçilmesi, zamanında teslimatın sağlanması ve inşaat sahasında yeterli envanterin tutulması, iş akışının sürekliliğini engelleyen yeniden işleme, değişiklikler ve kesintileri önlemede kritik öneme sahiptir. Önceki çalışmalar da bu sorunların önemini sürekli olarak vurgulamıştır (Arbulu vd., 2005; Wambeke vd., 2011).

Müşteri kaynaklı değişiklikler, örneğin daha ucuz veya alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik talepler, iş akışına değişkenlik katabilir (Yap vd., 2018). Ayrıca, geç teslimatlar veya yanlış malzeme boyutları, bekleme süresi ve gecikmelere neden olarak planlanan görevleri kesintiye uğratar ve sonraki iş akışlarını engeller (Arbulu vd., 2005). Etkili malzeme planlaması ve zamanında teslimat, ekiplerin boşta kalma süresini en aza indirmek, sorunsuz bir iş akışı sağlamak ve kesintileri azaltmak için gereklidir (Hwang vd., 2019).

Malzeme yönetim süreçleri, genellikle satın alma fonksiyonları içinde izole edilmiş olarak kalır ve iş akışı planlamasıyla bağlantısızdır; bu durum, proje teslimat sorunlarını

daha da kötüleştirir. Yaygın değişkenlik nedenleri arasında yetersiz malzeme, yanlış malzeme veya şantiyede aşırı envanter bulunması yer alır. Bu sorunlar, program güvenilirliğini azaltır ve üretkenliği düşürür; malzeme ile ilgili varyasyonlardan kaynaklanan gecikmeler genellikle atık olarak sınıflandırılır (Arbulu vd., 2005; Wambeke, 2011).

Malzeme kategorisi altında, geç malzeme teslimatı görünür bir sorun olsa da boyut veya türdeki hatalar genellikle montaj aşamasına kadar fark edilmez ve bu durum iş akışı güvenilirliğini önemli ölçüde bozabilir. Malzeme ile ilgili sorunların düzeltilmesi zaman alıcıdır ve önemli gecikmelere ve üretkenlik kayıplarına yol açar. Güçlü malzeme kontrol stratejilerinin uygulanması, bu zorlukların üstesinden gelmek için hayati bir yaklaşımdır. Etkili malzeme yönetimi, inşaat projelerinde süreklilik ve üretkenliği sağlamada kritik bir rol oynar (Wang vd., 2019).

- Önkoşul bileşeni

İnşaat projelerindeki iş akışı değişkenliğine katkıda bulunan dördüncü bileşen, toplam varyansın %9.2'sini açıklayan önkoşul bileşenidir. Bu bileşen, gerekli izinler, denetimler ve faaliyetlerin sıralanması gibi faktörlerden oluşur ve faktör yüklemeleri 0.75 ile 0.79 arasında değişmektedir. Bu faktörler, iş akışı değişkenliğini yönetmek ve sorunsuz proje yürütümü sağlamak açısından önkoşulların önemli rolünü vurgulamaktadır.

Önkoşullar, iş akışı değişkenliğini tetikleyen ilk mekanizmaya, yani akışların yukarı akıştan aşağı akış faaliyetlerine gecikmeli aktarılmasına doğrudan bağlıdır (Bertelsen vd., 2007; Hamzeh, 2009; Koskela, 2000). İnşaat faaliyetleri, birbirine bağımlı bir ağ oluşturur ve yukarı akış (önceki) faaliyetlerin zamanında tamamlanması, aşağı akış (sonraki) faaliyetlerin performansını kritik şekilde etkiler (Arashpour vd., 2014; Garcia-Lopez & Fischer, 2024). Yukarı akış görevlerinin tamamlanmasındaki değişkenlik, genellikle aşağı akış süreçlerini kesintiye uğratar, gecikmelere, bekleme sürelerinin artmasına ve değişkenlikle ilgili atıkların oluşmasına yol açar (Hassan & El-Rayes, 2020; Salhab vd., 2022).

Önkoşul akışlarının yönetimi, değişkenliğin azaltılması için temel bir gerekliliktir. Bu, akışların aşağı akışa aktarılmadan önce kaynağını, durumunu ve hazır oluşunu anlamayı içerir (Garcia-Lopez, 2017). Araştırmalar, yukarı akış ve aşağı akış faaliyetleri arasındaki etkili bilgi akışı ile iş akışı değişkenliğinin azaltılması arasında olumlu bir ilişki olduğunu göstermektedir, özellikle uzun vadeli ve yüksek maliyetli projelerde (Blacud vd., 2009; Srour vd., 2013; Zhang vd., 2015).

Bu akışların yönetiminin önemi, Son Planlayıcı Sistemi (Last Planner System, LPS)'nin hazırlık sürecinde vurgulanmaktadır (Ballard & Howell, 1998). Bu süreç, faaliyetlerin hazır oluşunu engelleyen kısıtlamaları aktif olarak belirleyip ortadan kaldırarak planlama güvenilirliğini artırmayı amaçlar. "Hazır" olarak kabul edilen faaliyetler, çözülmemiş kısıtlamaları olmayan faaliyetlerdir ve saha yöneticilerinin "yapılabilecek" işlere bağlılık göstermesini sağlar, "yapılması gereken" işlere değil (Garcia-Lopez, 2017).

3.2. Uzman Görüşlerinin Simülasyon Modeline Entegrasyonu

3.2.1. İnşaat Projelerinde Kapasite Tamponlarının Stratejik Uygulaması

Kapasite tamponları, özellikle fazla mesai ve aşırı iş gücü kullanımı, inşaat projelerindeki kaynaklarla ilgili iş akışı değişkenliğini azaltmada kritik stratejiler olarak uzmanlar tarafından vurgulanmıştır. Ancak, bu stratejilerin uygulanması, istenmeyen verimsizlikleri veya artan maliyetleri önlemek için dikkatli bir şekilde ele alınmalıdır. Uzmanlar, işçilerin yorgunluğunu önlemek ve bu durumun üretkenliği önemli ölçüde azaltması ve hata oranlarını artırmasını engellemek için fazla mesainin günde en fazla iki saatle sınırlandırılmasının önemli olduğunu belirtmiştir. Bu öneri, Jarkas & Bitar (2012) tarafından yapılan araştırmalarla uyumludur; bu araştırmalar, uzun süreli fazla mesainin işçilerin çeviklik, dayanıklılık ve motor becerilerini olumsuz etkileyerek performansın düşmesine ve hata oranlarının artmasına neden olduğunu ortaya koymuştur.

Bu durum, genel olarak kapasiteyi artırmak veya fazla mesai uygulamak gibi tamponlama yoluyla ele alınabilir. Daha fazla çalışma saatinin, daha fazla iş yapılması için bir fırsat sunduğu doğru olsa da fazla mesai kullanımı dikkatli bir şekilde planlanmalıdır. Çünkü fazla mesai sırasında fiziksel ve zihinsel yorgunluk nedeniyle performans olumsuz etkilenmektedir (Alvanchi vd., 2012).

Benzer şekilde, aşırı iş gücü kullanımı (overmanning) da her ekip için üç ek işçi ile sınırlandırılması önerilmiştir. Bu sınırlandırma, sıkışıklık, zayıf iletişim ve denetim etkinliğinin azalması gibi riskleri göz önünde bulundurmaktadır. Fazla iş gücü nedeniyle oluşan aşırı kalabalık, fiziksel çatışmalar yaratarak ve kaynaklara erişimi geciktirerek iş akışını bozabilir (Hanna vd., 2005). Singh (2003), bu görüşü destekleyerek, aşırı iş gücünün sınırlı çalışma alanı ve daha az verimli işçilere olan artan bağımlılık nedeniyle iş verimliliğini düşürdüğünü belirtmiştir. Bu nedenle, aşırı iş gücü kullanımının ölçeğini

sınırlamak, görevleri hızlandırma avantajlarının, koordinasyon zorlukları ve kaynak yetersizlikleri ile gölgelenmemesini sağlar.

Kapasite tamponlarını etkili bir şekilde uygulamak için uzmanlar, bu tamponların proje koşullarıyla uyumlu olmasının önemini vurgulamaktadır; bu koşullar arasında mevcut çalışma alanı, nitelikli iş gücü erişimi ve projenin bütçe kısıtlamaları bulunmaktadır. Örneğin, aşırı iş gücü kullanımı, yalnızca iş sahasının ek işçileri sıkışıklığa neden olmadan barındıracak yeterli alanı sağlaması durumunda etkili olabilir. Bu, Golnaraghi vd. (2020)'nin, sınırlı alana sahip sahalarda aşırı iş gücünün verimlilik kayıplarına ve artan denetim taleplerine yol açtığını belirten bulgularıyla uyumludur. Ayrıca, kalite standartlarını korumak ve eğitimsiz iş gücüyle ilişkili verimsizlikleri önlemek için nitelikli işçilerin temin edilmesi hayati öneme sahiptir (Soe & Cho, 2014).

Bu stratejilerin uygulanmasında maliyet unsurları da kritik bir rol oynamaktadır. Fazla mesai, daha yüksek saatlik ücretler nedeniyle artan iş gücü maliyetlerini içerirken, aşırı iş gücü kullanımı işe alım veya eğitim masraflarını gerektirir. Al-Kofahi vd. (2022), fazla mesainin kısa vadeli aksaklıkları gidermede yardımcı olabileceğini ancak genellikle pahalı olduğunu, çünkü işçilerin standart ücretlerinin 1.5 katını aldığını belirtmektedir. Benzer şekilde, aşırı iş gücü kullanımı yorgunluk kaynaklı kayıplar açısından daha az maliyetli olmasına rağmen, kötü planlanmışsa verimsizliklere yol açarak genel proje maliyetlerini artırabilir.

Kapasite tamponlarının başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için etkili denetim ve koordinasyon şarttır. İş gücü sayılarının artması veya çalışma saatlerinin uzamasıyla birlikte, üretkenliği korumak ve hatalardan kaçınmak için denetim ihtiyacı kritik hale gelir. Hanna vd. (2005), aşırı iş gücü kullanımı sırasında yetersiz denetimin mühendislik sorularına yanıt verilmesinde ve malzeme eksikliklerinin giderilmesinde gecikmelere yol açabileceğini ve bu durumun iş akışlarını daha da bozabileceğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, dikkatli bir planlama ve ek denetim kaynakları, kapasite tamponlarının amaçlanan hedeflere ulaşmasını sağlamak ve proje sonuçlarını olumsuz etkilememek için gereklidir.

Sonuç olarak, kapasite tamponları, kaynaklarla ilgili iş akışı değişkenliğini azaltmak için pratik bir yaklaşım sunmaktadır, ancak bu tamponların uygulanması stratejik ve kapsama özgü olmalıdır. Fazla mesai ve aşırı iş gücü kullanımını yönetilebilir seviyelerle sınırlandırarak ve alan, beceriler, maliyetler ve denetim gibi faktörleri ele alarak, inşaat yöneticileri esneklik ihtiyacını iş akışının sürekliliğini ve verimliliğini sağlama hedefiyle etkili bir şekilde dengeleyebilir. Önceki araştırmalardan elde edilen kanıtlarla desteklenen

bu uzman görüşleri, tampon uygulamalarına yönelik nüanslı bir yaklaşımın önemini vurgulamakta ve bu stratejilerin proje performansını artırmasını sağlamaktadır.

3.2.2. İnşaat Projelerinde İş Akışı Değişkenliğinin Sınıflandırılması

İnşaat projelerinde iş akışı değişkenliği bağlamında, uzmanlar değişkenlik oranlarını üç farklı seviyede kategorize etmeyi önermiştir: düşük (%20-40), orta (%40-60) ve yüksek (%60-80). Bu seviyeler, inşaat iş akışlarında sıklıkla karşılaşılan gerçekçi değişkenlik aralıklarını temsil etmek üzere seçilmiş olup, iş akışı kesintilerini analiz etmek ve yönetmek için yapılandırılmış bir yaklaşım sunmaktadır. Bu kategorizasyonun amacı, kaynak tahsisi ve görev yürütümünün dinamik doğasını yakalayıp değişkenlik etkilerini azaltmak için hedefe yönelik stratejiler geliştirmektir.

Bu değişkenlik oranı seviyelerinin seçimi, inşaat sahalarındaki pratik gerçeklikleri yansıtmaktadır. Örneğin, düşük değişkenlik genellikle rutin görevlerle ilişkilendirilir; bu görevler, istikrarlı koşullar altında ve minimum kesintilerle gerçekleştirilir. Bu durum, Zhang & Wan (2021)'ün, kaynak gereksinimleri tahmin edilebilir ve iş akışları iyi tanımlanmış görevlerin daha düşük değişkenlik sergilediğini belirten bulgularıyla uyumludur. Öte yandan, orta düzeyde değişkenlik, malzeme teslimatındaki gecikmeler veya ekipman arızaları gibi ara sıra meydana gelen kesintileri temsil etmektedir. Bu tür senaryolar, bağımlı görevler ve çoklu kaynak talepleri içeren projelerde yaygındır. Wambeke vd. (2011), yukarı akış faaliyetlerindeki küçük kesintilerin bile aşağı akışta değişkenliğe neden olabileceğini vurgulayarak bu duruma dikkat çekmiştir.

%60-80 arasında değişen oranlarla yüksek değişkenlik, genellikle iş gücü eksiklikleri, büyük ekipman arızaları veya kapsamlı yeniden işleme gibi öngörülemeyen faktörlerden kaynaklanan önemli iş akışı kesintilerini yansıtmaktadır. Liu vd. (2011), yüksek değişkenliğin genellikle artan bekleme süreleri, dengesiz iş akışları ve azalan verimlilikle sonuçlandığını gözlemlemiştir. Uzmanlar, bu seviyedeki değişkenliğin daha az yaygın olmasına rağmen, özellikle karmaşık bağımlılıklar veya hava koşulları ya da müşteri taleplerindeki değişiklikler gibi dış etkenlerin olduğu senaryolarda ele alınmasının kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Bu üç seviyenin benimsenmesi, hedefe yönelik azaltma stratejilerinin geliştirilmesini de kolaylaştırmaktadır. Örneğin, tampon stratejileri (fazla mesai ve aşırı iş gücü kullanımı gibi) değişkenlik oranına göre uyarlanabilir. Düşük değişkenlik senaryolarında, iş akışının sürekliliğini sağlamak için minimal tamponlar yeterli olabilir. Orta düzeyde değişkenlik

senaryolarında ise sınırlı fazla mesai veya ekip büyüklüğünde küçük artışlar gibi orta ölçekli tamponlar, kaynakları aşırı yüklemekten kesintileri etkili bir şekilde yönetmek için gereklidir. Yüksek değişkenlik senaryolarında ise, önemli ölçüde fazla mesai veya geçici iş gücü genişlemesi gibi daha güçlü tamponlar, zincirleme gecikmeleri önlemek için hayati hale gelir. Bu yaklaşım, Tommelein (2020)'in, iş akışı güvenilirliğini artırmak için değişkenlik spesifik tamponlama stratejileri önerisiyle tutarlıdır.

Uzmanlar ayrıca, bu seviyelerdeki değişkenliği yönetirken esnekliğin korunmasının önemini vurgulamıştır. Önceden tanımlanmış değişkenlik oranı kategorileri yapılandırılmış bir çerçeve sağlasa da öngörülemez kesintileri etkili bir şekilde ele almak için proje koşullarına dayalı gerçek zamanlı ayarlamalar gereklidir. Bu durum, Koskela (2000)'nın, inşaatта değişkenliğe uyum sağlamak ve proje akışını sürdürmek için dinamik yönetim yaklaşımlarının önemini vurgulayan bulgularıyla uyumludur.

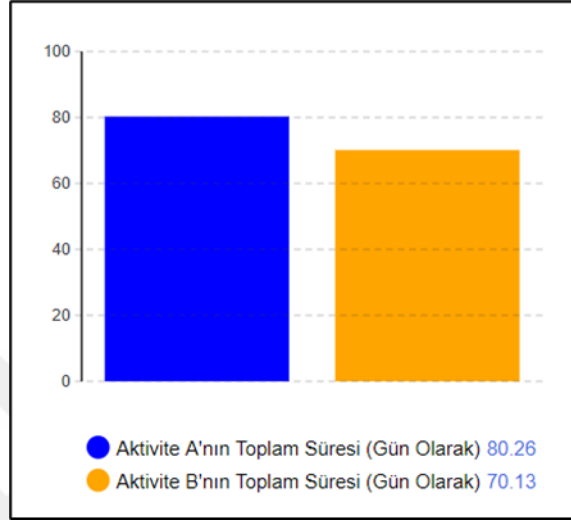
Sonuç olarak, düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç değişkenlik oranı seviyesinin seçimi, inşaat projelerinde iş akışı kesintilerini analiz etmek ve azaltmak için pratik ve ölçeklenebilir bir çerçeve sunmaktadır. Değişkenlik kategorilerini gerçek dünya koşullarıyla uyumlu hale getirerek ve bunları hedefe yönelik tampon stratejileriyle destekleyerek, bu yaklaşım inşaat yöneticilerinin iş akışı güvenilirliğini artırmasına ve değişkenliğin olumsuz etkilerini en aza indirmesine olanak tanır. Önceki araştırmalardan elde edilen kanıtlarla desteklenen uzman odaklı bu kategorizasyon, dinamik inşaat ortamlarında iş akışı değişkenliğini yönetmek için yapılandırılmış ancak esnek bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır.

3.3. Simülasyon Modeli Sonuçlarının Analizi

Her senaryonun sonuçlarını elde etmek için, A ve B aktiviteleri için belirlenen değişkenlik oranlarını ve seçilen kapasite tampon tipini simüle etmek amacıyla AnyLogic kullanılmıştır. Simülasyon modelinin başlangıç ayarları penceresinde yapılandırılan bu parametreler ile model çalıştırılmış ve üç temel çıktı üretilmiştir. Bu çıktılar, tüm senaryolar için tutarlı bir şekilde analiz edilmiş ve standart bir hesaplama yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir:

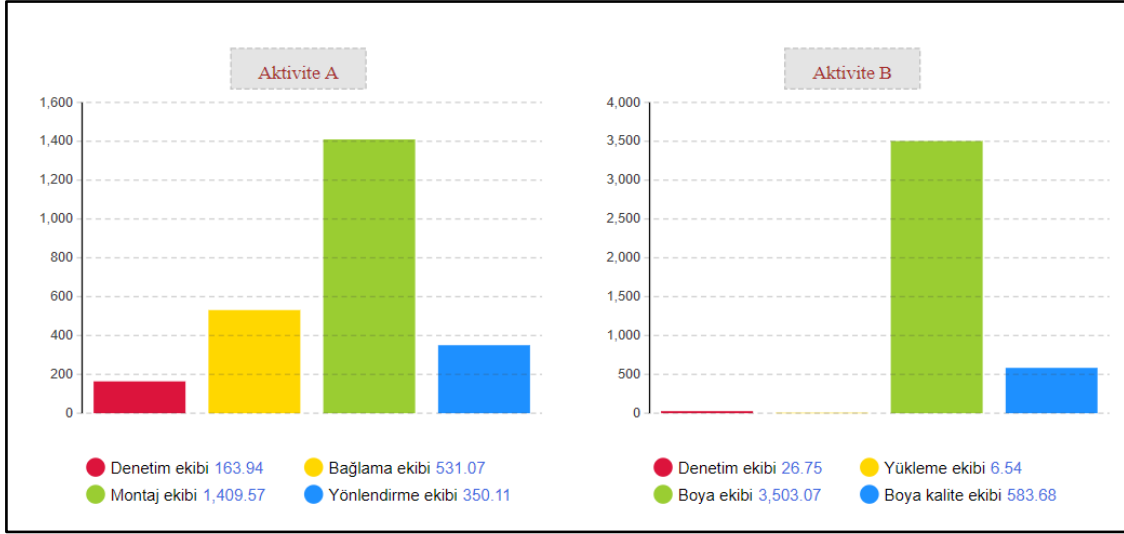
- Toplam süre: A ve B aktivitelerinin toplam süresi, gün cinsinden kaydedilmiş ve Şekil 18'de sunulmuştur. Bu süre, ilk kamyonun aktiviteye girdiği andan itibaren son birimin montajı ve ilgili tüm kaynakların serbest bırakılmasına kadar geçen zamanı

temsil etmektedir. Kaydedilen bu süreler, her bir senaryonun toplam maliyetini hesaplamak için Excel'de kullanılmıştır. Maliyet analizi; kamyon ve ekipman maliyetlerini, iş gücü maliyetlerini ve gerçekleşen sürelerin planlanan süreleri aştığı durumlarda ortaya çıkan gecikme maliyetlerini içermektedir.



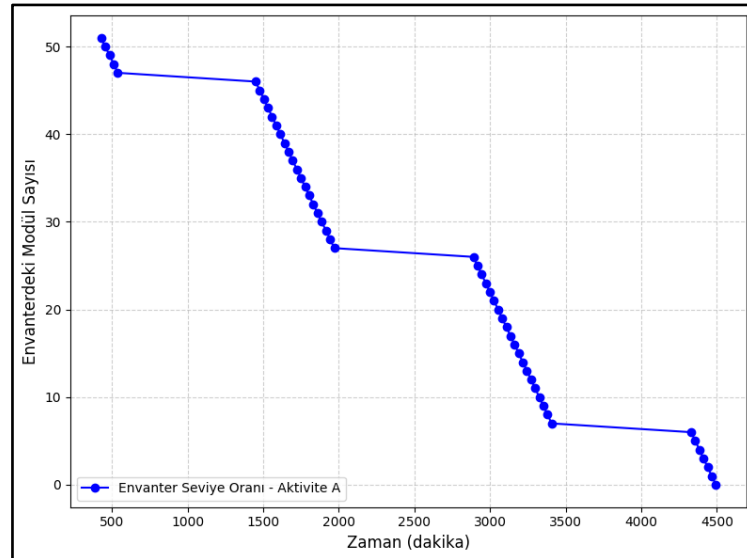
Şekil 18. A ve B aktivitelerinin toplam süresine ilişkin AnyLogic çıktısı (Gün)

- Toplam çalışma saatleri: AnyLogic, A ve B aktivitelerinde görev alan her ekipteki tüm işçilerin toplam çalışma saatlerini Şekil 19'de gösterildiği şekilde sağlamıştır. İşçilerin boşa geçen süreleri, toplam çalışma saatlerinin aktivite süresinden Excel kullanılarak çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Toplam bekleme israfını belirlemek için, Aktivite B'nin başlangıcındaki gecikme günleri hesaplanan boşa geçen süreye eklenmiştir.

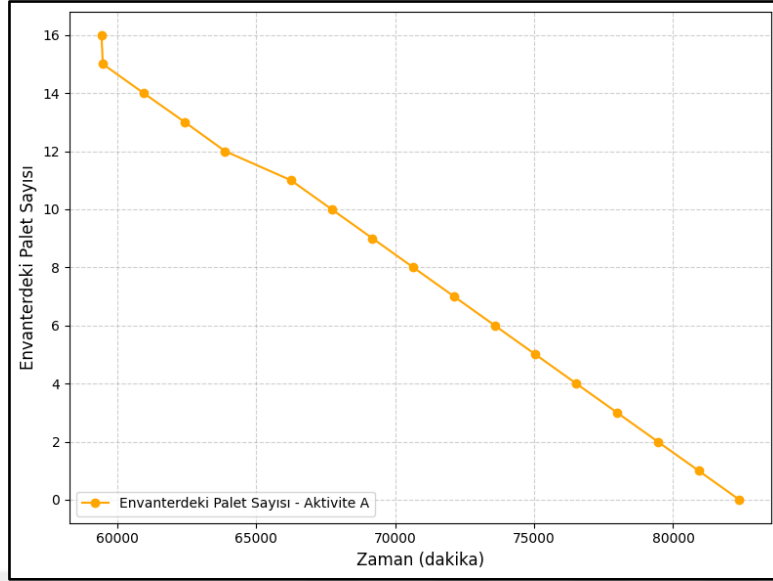


Şekil 19. A ve B aktivitelerinin her ekip için toplam çalışma saatlerine ilişkin Anylogic çıktısı

- Envanter seviyeleri: simülasyon modeli, A ve B aktiviteleri için envanter seviyesi verileri üretmiştir ve bu veriler Şekil 20 ve Şekil 21'te gösterilmektedir. Şekil 20, Zamanla Aktivite A'nın envanter seviyelerindeki değişiklikleri gösterirken, Şekil 21, aynı değişiklikleri Aktivite B için göstermektedir. Bu çıktılar, tek bir kamyonun envanteri boşaltması için gereken zamanı hesaplamak amacıyla kullanılmış ve bu da envanter israfını ölçmek için bir gösterge sağlamıştır.



Şekil 20. Aktivite A için envanter boşaltma süresine ilişkin AnyLogic çıktısı



Şekil 21. Aktivite B için envanter boşaltma süresine ilişkin AnyLogic çıktısı

Bu hesaplamalar, kapsamlı ve güvenilir bir analiz sağlamak amacıyla tüm senaryolar boyunca tutarlı bir şekilde uygulanmıştır. Sunulan şekiller, A ve B aktivitelerinde %0 değişkenlik içeren temel senaryoyu temsil etmekte olup, diğer senaryolarla karşılaştırma için bir referans noktası sunmaktadır.

Simülasyon modeli sonuçları, iş akışı değişkenliğini yönetmede ve proje performansını artırmada çeşitli kapasite tampon stratejilerinin etkinliğine dair kritik bilgiler sağlamaktadır. Çalışma, Çok Kriterli Karar Verme (Multi-Criteria Decision-Making, MCDM) yöntemiyle sistematik bir şekilde değerlendirerek, her senaryo için zaman ve maliyet kriterlerine dayalı olarak en uygun kapasite tamponunu belirlemektedir. Ayrıca, seçilen kapasite tamponlarının toplam proje performansı üzerindeki etkisi, süresinin, maliyetinin ve atıkların azaltılmasının yönetim hedefleriyle uyumunu değerlendirmek için analiz edilmektedir. Aşağıdaki bölümlerde, tamponların seçim süreci ve ardından bu tamponların değerlendirilmesi detaylandırılmaktadır.

3.3.1. En Uygun Kapasite Tamponunun Seçimi

Bu çalışmada en uygun kapasite tamponunun seçimi, son yıllarda inşaat yönetiminde çelişen kriterleri etkili bir şekilde değerlendirme ve dengeleme yeteneği nedeniyle önem kazanan, yerleşik bir yöntem olan MCDM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Erdogan vd., 2019; Tan vd., 2021; van der Meer vd., 2020). MCDM, uygulanabilir alternatiflerin belirlenmesi, değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi, bu kriterlere karşı

alternatiflerin puanlanması ve toplu puanlara dayalı olarak en uygun çözümün seçilmesi gibi dört temel adımdan oluşan yapılandırılmış bir süreçtir (Tan vd., 2021; van der Meer vd., 2020).

MCDM, çeşitli kriterler arasında birden çok alternatifi sistematik olarak karşılaştırarak karmaşık karar verme sorunlarını çözmek için sağlam bir çerçeve sunar (Erdogan vd., 2019). Tercih edilen çözüm, en yüksek ağırlıklı puana veya sıralamaya sahip alternatif olarak tanımlanır (van der Meer vd., 2020). Bu araştırmada, alternatifler kapasite tampon stratejilerini (fazla mesai ve aşırı iş gücü kullanımı) temsil ederken, değerlendirme kriterleri zaman ve maliyettir; bunlar, inşaat yönetiminde proje başarısı için en kritik faktörler olarak geniş çapta tanınmaktadır. Hem müşteriler hem de yükleniciler, proje verimliliğini ve sonuçlarını artırmak için bu faktörleri optimize etmeye çalışmaktadır (Bayraktar vd., 2011; Koo vd., 2015; Ng & Zhang, 2008). Genel olarak, maksimum faaliyet süresi belirlendiğinde, belirgin faydası nedeniyle en düşük maliyetli çözüm seçilmelidir (Assaad vd., 2020; Singh, 2003).

Bu çalışmada aşağıdaki yapılandırılmış yaklaşım geliştirilmiş ve uygulanmıştır:

1. Alternatiflerin tanımlanması: iş akışı değişkenliğini azaltmak için her senaryo için fazla mesai ve aşırı iş gücü kullanımı dahil tüm uygulanabilir kapasite tampon seçenekleri belirlenmiştir.
2. Kriterlerin belirlenmesi: her kapasite tamponuna ilişkin toplam süre ve toplam maliyet, proje zaman çizelgelerini koruma ve maliyet verimliliğini sağlama önemini yansıtan birincil değerlendirme kriterleri olarak kullanılmıştır.
3. Faaliyet sürelerinin incelenmesi: her alternatif için faaliyetlerin toplam süresi hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Bu sürelerin, iş akışı tutarlılığını koruyarak planlı sürelerin %95'lik aralığında kalması sağlanmıştır.
4. Süre ve maliyet değerlerinin normalize edilmesi: alternatifler, süre ve maliyet kriterleri için minimum değerlerin alternatif değere bölünmesi yoluyla normalize edilmiştir. Bu yöntem, alternatifler arasında netlik sağlamak ve senaryolar arasında karşılaştırılabilirliği artırmak için kullanılmıştır (Aytekin, 2021; Jahan & Edwards, 2015).
5. Ağırlıkların belirlenmesi: kriterlere ağırlık atanmış, maliyet 0.7, zaman ise 0.3 oranında ağırlıklandırılmıştır. Bu önceliklendirme, zaman değerlerinin kabul edilebilir aralıkların dışında bırakılmasını ve kapasite tamponlarının maliyet etkilerinin önemini yansıtmaktadır.

6. Ağırlıklı puanların hesaplanması: her alternatif için ağırlıklı puanlar, Basit Toplamsal Ağırlıklandırma (Simple Additive Weighting, SAW) yöntemi kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır:

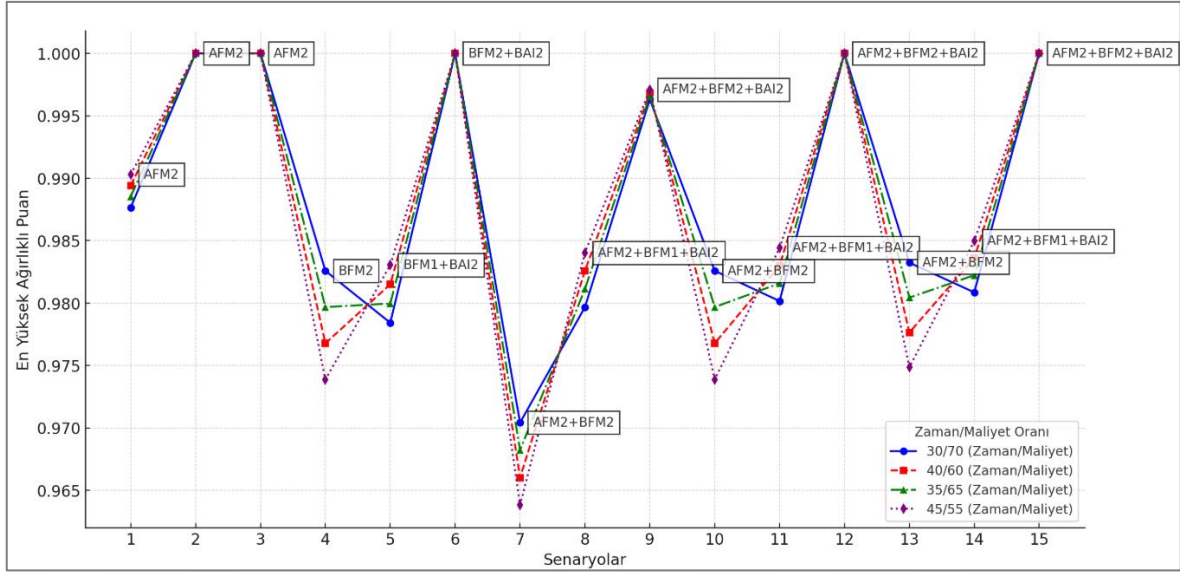
$$\text{Ağırlıklı Puan} = \text{Zaman ağırlığı} \times \text{Zaman (normalize edilmiş)} + \text{Maliyet ağırlığı} \times \text{Maliyet (normalize edilmiş)}.$$

Bu formül, zaman ve maliyet hususlarını bütüncül olarak değerlendirmek için birçok çalışmada uygulanmıştır (örn. Banihashemi vd., 2021; Marović & Hanak, 2017).

7. En uygun çözümün seçilmesi: her senaryo için en yüksek ağırlıklı puana sahip alternatif, en uygun kapasite tamponu olarak seçilmiştir. Bu hem maliyet verimliliğini hem de değişkenlik yönetimi hedeflerini etkili bir şekilde dengelemeyi sağlar.

Ağırlıklı puanların hesaplanması için ihtiyaç duyulan karar kriterlerine ait ağırlık değerleri duyarlılığının gözlemlenmesi amacıyla, dört farklı ağırlık dağılımı atanmıştır (zaman/maliyet için sırasıyla 30/70 40/60, 35/65 ve 45/55). Şekil 22’de gösterildiği gibi, her ağırlık yüzdesine ait en yüksek ağırlıklı puanlar farklılık gösterse de, nihai seçim değişmemiştir.

Bu sonuç, süre kontrol adımıyla doğrudan ilişkilidir. Bu aşamada, yalnızca toplam sürenin planlanan sürenin yaklaşık %95’i içinde kalmasını sağlayan tampon alternatifleri değerlendirilmeye alınmıştır. Bu kısıtlama, daha az verimli seçenekleri elemiş ve yalnızca proje takvimini koruyarak maliyetleri optimize edebilen tamponların değerlendirilmesini sağlamıştır. Farklı ağırlık dağılımlarına rağmen aynı tampon seçeneğinin en uygun seçim olarak kalması, bu tamponun maliyet ve zaman etkinliği açısından en uygun dengeyi sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, tampon seçim sürecinin zaman ve maliyet önceliklerinde küçük değişimlere karşı yüksek hassasiyet göstermediğini doğrulamaktadır. Bu durum, uygulamada güvenilir ve pratik bir strateji sunduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 22. Farklı zaman/maliyet ağırlıkları ile en yüksek puan ve seçilen kapasite tamponları

Her senaryo için Tablo 19'de sunulduğu gibi, her alternatifin toplam süre ve toplam maliyet değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler daha sonra normalize edilmiş ve her seçenek için ağırlıklı bir puan hesaplanmıştır. En yüksek ağırlıklı puana sahip alternatif, en uygun kapasite tamponu olarak seçilmiştir. MCDM yaklaşımını sistematik bir şekilde kullanarak, bu araştırma, her senaryo için en uygun kapasite tamponunu etkili bir şekilde belirlemiş ve planlanan faaliyet sürelerinin korunması ile maliyet etkilerinin en aza indirilmesi arasında bir denge sağlamıştır, bu da Tablo 20'de gösterilmiştir.

Tablo 19. En uygun kapasite tamponlarının değerlendirilmesi: senaryolar arasında normalize edilmiş metrikler ve ağırlıklı puanlar

Senaryo	A	B	Fazla mesai A	Aşırı İş gücü A	Fazla mesai B	Aşırı iş gücü B	Süre A	Süre B	Toplam süre (gün)	Toplam maliyet (10^6)	Zaman normalize edilmiş	Maliyet normalize edilmiş	Ağırlıklı puan (30/70)
1	20	0	1	0	0	0	83	71	153	5.724	0.954	1.000	0.986
			2	0	0	0	75	71	146	5.827	1.000	0.982	0.988
			0	1	0	0	81	71	152	7.260	0.961	0.788	0.840
2	40	0	1	0	0	0	89	71	160	6.096	0.950	0.993	0.980
			2	0	0	0	81	71	152	6.054	1.000	1.000	1.000
3	60	0	2	0	0	0	87	71	158	6.400	1.000	1.000	1.000
4	0	20	0	0	1	0	81	81	162	6.201	0.901	0.998	0.969
			0	0	2	0	81	74	155	6.188	0.942	1.000	0.983
			0	0	1	1	81	78	159	7.807	0.918	0.793	0.830
			0	0	0	2	81	65	146	8.070	1.000	0.767	0.837
			0	0	2	1	81	71	152	7.622	0.961	0.812	0.856
5	0	40	0	0	0	2	81	73	154	8.710	0.974	0.970	0.971
			0	0	1	2	81	69	150	8.719	1.000	0.969	0.978
			0	0	2	1	81	81	162	8.450	0.926	1.000	0.978
6	0	60	0	0	1	2	81	79	160	9.679	0.925	0.919	0.921
			0	0	2	2	81	67	148	8.897	1.000	1.000	1.000
7	20	20	1	0	1	0	83	81	164	6.690	0.854	0.989	0.948
			1	0	2	0	83	73	156	6.616	0.897	1.000	0.969
			2	0	1	0	75	81	156	6.740	0.897	0.982	0.956
			2	0	2	0	75	74	149	6.726	0.940	0.984	0.970
			2	0	1	1	75	78	153	8.346	0.915	0.793	0.829
			1	0	1	1	82	78	160	8.243	0.875	0.803	0.824
			1	0	0	2	82	65	147	8.506	0.952	0.778	0.830

Tablo 19'un Devamı

7	20	20	2	0	0	2	75	65	140	8.608	1.000	0.769	0.838
			1	0	2	1	82	71	153	8.058	0.915	0.821	0.849
			2	0	2	1	75	71	146	8.161	0.959	0.811	0.855
8	20	40	2	0	0	2	75	73	148	9.248	0.973	0.972	0.972
			2	0	1	2	75	69	144	9.257	1.000	0.971	0.980
			2	0	2	1	75	81	156	8.988	0.923	1.000	0.977
9	20	60	1	0	1	2	83	79	162	10.168	0.877	0.923	0.909
			1	0	2	2	83	67	150	9.386	0.947	1.000	0.984
			2	0	1	2	75	79	154	10.218	0.922	0.919	0.920
			2	0	2	2	75	67	142	9.436	1.000	0.995	0.996
			0	1	1	2	81	79	160	11.650	0.888	0.806	0.830
			0	1	2	2	81	67	148	10.868	0.959	0.864	0.892
10	40	20	1	0	1	0	89	81	170	7.008	0.859	0.992	0.952
			1	0	2	0	89	74	163	6.995	0.896	0.994	0.965
			1	0	1	1	89	78	167	8.614	0.874	0.807	0.827
			1	0	0	2	89	65	154	8.877	0.948	0.783	0.833
			1	0	2	1	89	71	160	8.429	0.913	0.825	0.851
			2	0	1	0	81	81	162	6.966	0.901	0.998	0.969
			2	0	2	0	81	74	155	6.953	0.942	1.000	0.983
			2	0	1	1	81	78	159	8.572	0.918	0.811	0.843
			2	0	0	2	81	65	146	8.835	1.000	0.787	0.851
			2	0	2	1	81	71	152	8.387	0.961	0.829	0.868
11	40	40	1	0	0	2	89	73	162	9.517	0.926	0.968	0.956
			1	0	1	2	89	69	158	9.526	0.949	0.967	0.962
			1	0	2	1	89	81	170	9.257	0.882	0.995	0.962
			2	0	0	2	81	73	154	9.475	0.974	0.973	0.973
			2	0	1	2	81	69	150	9.484	1.000	0.972	0.980

Tablo 19'un Devamı

11	40	40	2	0	2	1	81	81	162	9.215	0.926	1.000	0.978
12	40	60	1	0	1	2	89	79	168	10.486	0.881	0.921	0.909
			1	0	2	2	89	67	156	9.704	0.949	0.996	0.982
			2	0	1	2	81	79	160	10.444	0.925	0.925	0.925
			2	0	2	2	81	67	148	9.662	1.000	1.000	1.000
13	60	20	2	0	1	0	87	81	168	7.313	0.905	0.998	0.970
			2	0	2	0	87	74	161	7.300	0.944	1.000	0.983
			2	0	1	1	87	78	165	8.919	0.921	0.818	0.849
			2	0	0	2	87	65	152	9.182	1.000	0.795	0.857
			2	0	2	1	87	71	158	8.734	0.962	0.836	0.874
14	60	40	2	0	0	2	87	73	160	9.822	0.975	0.974	0.974
			2	0	1	2	87	69	156	9.830	1.000	0.973	0.981
			2	0	2	1	87	81	168	9.562	0.929	1.000	0.979
15	60	60	2	0	1	2	87	79	166	10.791	0.928	0.928	0.928
			2	0	2	2	87	67	154	10.009	1.000	1.000	1.000

Tablo 20. Senaryolar arasında en uygun kapasite tampon seçimleri

Senaryo	A	B	En uygun seçim	
			A	B
1	20	0	Fazlamesai2	Plan
2	40	0	Fazlamesai2	Plan
3	60	0	Fazlamesai2	Plan
4	0	20	Plan	Fazlamesai2
5	0	40	Plan	Fazlamesai1+Aşırıistihdam2
6	0	60	Plan	Fazlamesai2+ Aşırıistihdam2
7	20	20	Fazlamesai2	Fazlamesai2
8	20	40	Fazlamesai2	Fazlamesai1+ Aşırıistihdam2
9	20	60	Fazlamesai2	Fazlamesai2+ Aşırıistihdam2
10	40	20	Fazlamesai2	Fazlamesai2
11	40	40	Fazlamesai2	Fazlamesai1+ Aşırıistihdam2
12	40	60	Fazlamesai2	Fazlamesai2+ Aşırıistihdam2
13	60	20	Fazlamesai2	Fazlamesai2
14	60	40	Fazlamesai2	Fazlamesai1+ Aşırıistihdam2
15	60	60	Fazlamesai2	Fazlamesai2+ Aşırıistihdam2

Tablo 20'de gösterildiği gibi, "Fazla Mesai 2" kapasite tamponunun, Aktivite A için tüm senaryolarda en uygun kapasite tamponu olarak tutarlı bir şekilde seçilmesi hem Aktivite A'nın hem de Aktivite B'nin değişkenlik oranından bağımsız olarak, tamponun sağlamlığını vurgulamaktadır. Bu tutarlılık, Aktivite A'nın daha küçük alt faaliyetler ve uzman ekiplerin kullanımını içeren yapısal özelliklerini yansıtmaktadır. Bu özellikler, tek bir tür kapasite tamponunun değişkenliği etkili bir şekilde absorbe etmesini sağlar. Alt faaliyetlerin kısa süreleri, değişkenliğin etkisini daha da en aza indirerek, "Fazla Mesai 2" seçeneğinin değişkenlik seviyeleri artsa bile yeterli kalmasını sağlamaktadır. İşlerin daha küçük ve daha kısa görevlere bölünmesi, değişkenlik seviyelerinin bir aşamadan diğerine artışını aynı tamponlama stratejisi içerisinde yönetilebilir hale getirmektedir.

Buna karşılık, Aktivite B için kapasite tamponu seçimi, artan değişkenlik seviyelerine bağlı olarak değişmektedir. Daha yüksek değişkenlik oranlarında (%40 ve %60), fazla mesai ve aşırı iş gücü kombinasyonu gerekli hale gelmektedir. Bu değişim, Aktivite B'nin değişkenliğe karşı daha yüksek hassasiyetini ortaya koymaktadır. Bu hassasiyet, büyük olasılıkla, boyama alt faaliyetlerinin daha uzun sürelerinden ve artan oranlarda değişkenliğin birikimli etkilerinden kaynaklanmaktadır. Aktivite B için daha yoğun tamponlama stratejileri gereksinimi, proaktif kaynak yönetimine olan bağımlılığını ve Aktivite A'ya kıyasla artan değişkenlik hassasiyetini vurgulamaktadır. İnşaat faaliyetlerindeki yüksek değişkenlik seviyeleri, aktivite ortalama süresinin yaklaşık %60'ına ulaşabilir ve proje düzeyindeki gecikmelerin önemli katkı sağlayıcılarıdır; bu durum, Ballesteros-Pérez vd. (2020) tarafından desteklenmektedir. Ayrıca, Tommelein vd. (1999)'un belirttiği gibi,

yüksek değişkenlik koşullarında ara tamponlar genellikle büyüme eğilimindedir ve planlanan programa geri dönmek için tamponların bir kombinasyonunu gerektirir. Lindhard (2014), doğrusal sıralamalar ve ağ yapıları gibi iki üretim akış tasarımıda değişkenliğin etkisini değerlendirmek için simülasyon modellemesi kullanmıştır. Bulgular, değişkenliğin proje üzerindeki etkisinin, bireysel aktivitelerin süresiyle yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.

Bu sonuçlar, tamponların her bir aktivite için ayrı ayrı analiz edilmesinin önemini ortaya koymaktadır, çünkü tamponlama aktivite özelliklerine son derece duyarlıdır. Bu ilişki, Sacks vd. (2010) tarafından önerilen iş paketlerini düzenleme kavramını desteklemektedir. Çalışma sistemlerindeki değişkenliği yönetmek ve istikrarı artırmak için, proje yönetim ekibi ve ekip liderleri, bir paket içindeki yapı elemanlarının alt kümelerini belirleyerek bunları türlerine göre ayrı görevlere ayırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu süreç, daha iyi tampon seçimini kolaylaştırır ve süreç üzerinde geliştirilmiş bir kontrol sağlar. İş paketlerini yönetilebilir görevlere bölmeye yönelik bu sistematik yaklaşım, süreç kontrolünü ve tampon yönetimini iyileştirmektedir.

Sonuçlar, inşaat projelerinde etkin tampon seçimi için aktivite özelliklerine uyarlanmış dinamik bir yaklaşım uygulanmasının önemini vurgulamaktadır. Aynı doğrultuda, Zhang vd. (2017), tampon boyutlandırmayı iyileştirmek için aktivite süresi ile tampon boyutu arasındaki ilişkiyi bulanık mantık kullanarak vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Park & Peña-Mora (2004), tamponlamanın etkinliğini artırmak için aktiviteler aracılığıyla ayarlanan dinamik bir yaklaşımı önermektedir. Bataglin vd. (2021) gibi, proaktif, uyarlanabilir ve veri odaklı yöntemler, tampon boyutunun ve yerinin aktivite bazlı olarak ayarlanmasını mümkün kılarak tamponların faydasını maksimize etmektedir.

Ayrıca, Aktivite A'nın en uygun tamponunun Aktivite B'nin değişkenlik oranındaki değişimlerden bağımsız olması, Aktivite A'nın iş akışının büyük ölçüde bağımsız olduğunu ve aşağı akış bağımlılıklarından minimum düzeyde etkilendiğini göstermektedir. Kombine senaryolarda (ör. A20-B20 veya A60-B60), her bir aktivite için en uygun seçim, değişkenlik bağımsız olarak değerlendirildiğinde yapılan seçimleri yansıtmaktadır (ör. A20-B0 ve A0-B20). Bu durum, iki aktivitenin kaynak tahsisi açısından bağımsızlığını vurgulamaktadır; çünkü her biri ayrı ekipler ve ekipmanlarla çalışmaktadır. İki aktivite arasındaki tek bağlantı, başlangıç bağımlılığıdır (Aktivite B, Aktivite A'nın %50'si tamamlandıktan sonra başlar). Bu durum, bir aktivitenin değişkenlik oranının yalnızca başlangıç zamanını etkilediğini, ancak gerekli tamponunu veya süresini değiştirmedikçe açıklamaktadır. Ancak, görev

süresindeki değişkenliğin etkisi, sonraki görevlerde kendini göstermekte ve iş görevlerinin sayısı arttıkça öngörülemezlik artmaktadır (Wambeke vd., 2011).

Fazla mesai tamponları, özellikle "Fazla Mesai 2," çoğu senaryoda, özellikle de Aktivite A için, en maliyet etkin ve verimli çözüm olarak bulunmuştur. Fazla mesainin en uygun seçim olarak tekrar tekrar kullanılması, değişkenliği ele alırken proje zaman çizelgelerini kabul edilebilir sınırlar içinde tutma konusundaki pratik avantajını vurgulamaktadır. Fazla mesai, genellikle bir değişikliğin etkisinin tam olarak bilinmediği durumlarda hızlanma sağlamak için tercih edilir (Al-Kofahi vd., 2022; Ghodrati vd., 2022; Hanna vd., 2005). Bu sonuca paralel olarak, Thomas vd. (2002), fazla mesainin stratejik kullanımının, yüksek talepleri karşılamak ve değişkenliğe rağmen optimal performansı sağlamak için kritik olduğunu belirtmiştir. Çoğu senaryoda fazla mesainin aşırı istihdama tercih edilmesi, kapasite tamponlarının seçiminde maliyet etkinliğinin önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Aşırı istihdam, zaman çizelgelerini hızlandırırken daha yüksek maliyetlere neden olur ve bu da yalnızca fazla mesainin tek başına yönetemeyeceği kadar yüksek değişkenlik durumlarında daha az tercih edilmesine yol açar. Daha fazla çalışma saatleri, daha fazla iş üretme fırsatı anlamına gelse de fazla mesai sırasında fiziksel ve zihinsel yorgunluk nedeniyle performans olumsuz etkilenebilir (Alvanchi vd., 2012). Bu tür sorunları hafifletmek için, fazla mesainin uygun şekilde planlanması, örneğin en uygun fazla mesai zamanlaması, benimsenebilir.

Tamponlama için en iyi seçimin dikkatlice seçilmesinin yanı sıra, yönetsel araçlar değişkenliğin etkisini başarıyla azaltmak için kritik öneme sahiptir. Yöneticilerin, fazla mesai yapan işçilerin yorgunluk seviyelerini dikkatle gözlemleyerek, iş gücü verimliliği ve güvenlik davranışları üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmeleri gerekmektedir (Ghodrati vd., 2022). Aşırı istihdam, kalitenin düşmemesi için daha yoğun bir denetim gerektirir. Örneğin, piyasada yeterince yetenekli işçilerin bulunması ve iş alanında ek işçiler için yeterli alanın olması gerekebilir (Hanna vd., 2005).

3.3.2. En Uygun Kapasite Tamponunun Proje Performansı Üzerindeki Etkisi

En uygun kapasite tamponunun proje performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, bu tamponun zaman ve maliyet üzerindeki etkisini analiz etmek gereklidir. Bu iki faktör, inşaat projelerinde herhangi bir yaklaşımın verimliliğini ve etkinliğini değerlendirmek için kritik ölçütlerdir. İnşaat projelerinin farklı özellikleri arasında, maliyet ve zaman aşımı, proje kontrolünde sürekli olarak birincil endişe kaynağı olarak ortaya

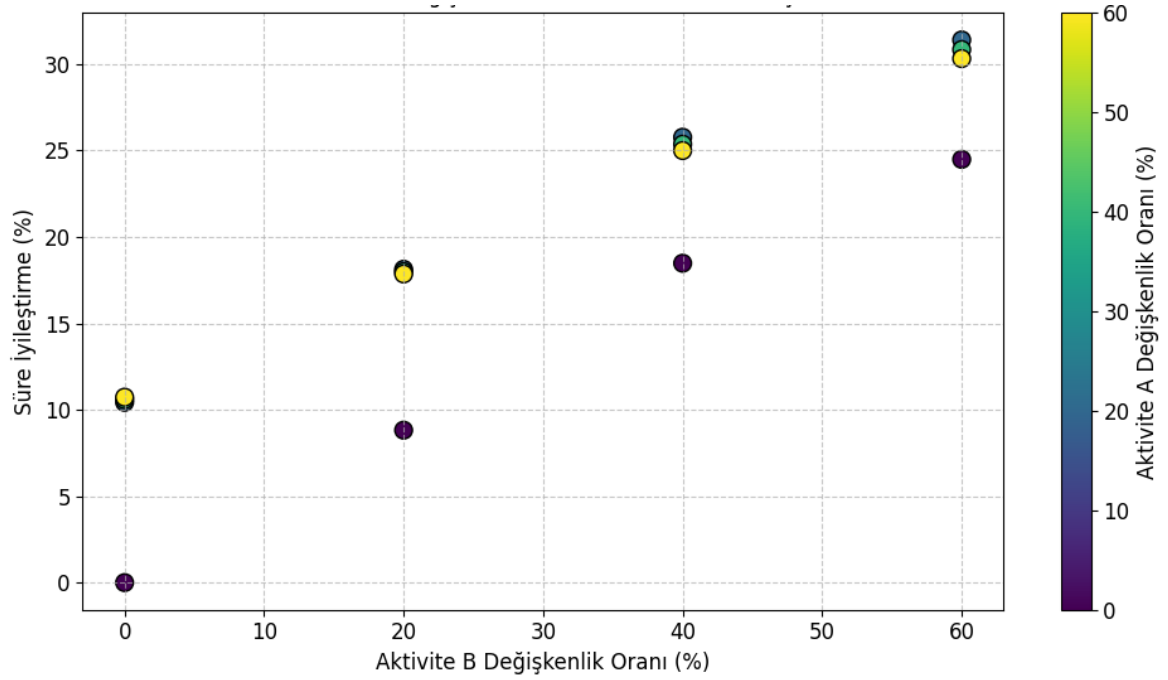
çıkarmakta ve başarılı bir proje teslimi için merkezi bir rol oynadığını yansıtmaktadır (Assaad vd., 2020).

Tablo 21, farklı senaryolar arasında proje süresi ve maliyetindeki yüzdesel iyileştirmelere ilişkin ayrıntılı bilgiler sunmaktadır. Ek olarak, Şekil 23 ve Şekil 24, değişkenlik seviyeleri ile elde edilen iyileştirmeler arasındaki ilişkileri göstermekte ve farklı koşullar altında tampon performansını görsel olarak temsil etmektedir.

Tablo 21. En uygun kapasite tamponlarının senaryolar arasında proje süresi ve maliyeti üzerindeki etkisi

Senaryo	Değişkenlik oranı (%)		Toplam süre			Toplam maliyet (10 ⁶)		
	Aktivite A	Aktivite B	Tamponsuz	En uygun tampon	İyileştirme (%)	Tamponsuz	En uygun Tampon	İyileştirme (%)
Plan	0	0	152	152	0.00	5.29	5.29	0.00
1	20	0	163	146	10.43	6.15	5.83	5.26
2	40	0	170	152	10.59	6.70	6.05	9.63
3	60	0	177	158	10.73	7.25	6.40	11.68
4	0	20	170	155	8.82	6.91	6.19	10.45
5	0	40	184	150	18.48	8.02	8.72	-8.72
6	0	60	196	148	24.49	9.04	8.90	1.61
7	20	20	182	149	18.13	7.77	6.73	13.45
8	20	40	194	144	25.77	8.80	9.26	-5.25
9	20	60	207	142	31.40	9.90	9.44	4.74
10	40	20	189	155	17.99	8.32	6.95	16.43
11	40	40	201	150	25.37	9.34	9.48	-1.50
12	40	60	214	148	30.84	10.45	9.66	7.57
13	60	20	196	161	17.86	8.87	7.30	17.69
14	60	40	208	156	25.00	9.89	9.83	0.63
15	60	60	221	154	30.32	11.00	10.01	9.02

Zaman iyileştirmesine ilişkin analiz, Şekil 23, uygun kapasite tamponlarının toplam proje süresini azaltmada önemli faydalarını vurgulamaktadır. "Fazla Mesai" tamponlarının uygulanmasıyla elde edilen yüzdesel iyileştirme %8.82 ile %10.73 arasında değişmekte olup düşük değişkenlik seviyelerine sahip senaryolarda gecikmeleri hafifletmedeki maliyet etkin rolünü yansıtmaktadır. Bu iyileştirmeler ılımlı olmakla birlikte, fazla mesainin istikrarlı senaryolarda bir tampon stratejisi olarak etkinliğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, Han & Park (2011)'in sonuçlarıyla uyumludur; fazla mesainin, ilave işçilerin işe alınmasıyla ilişkili koordinasyon sorunları veya gecikmeler olmadan üretim oranlarını artırma yeteneği nedeniyle sıklıkla tercih edildiğini belirtmişlerdir.



Şekil 23. Aktivite A ve B'deki değişkenlik oranlarına göre zaman iyileştirmesi

Ancak, ek bir tampon olarak "Overmanning" (Fazla İşgücü) uygulanması, zaman iyileştirmesini önemli ölçüde artırarak yüzde 30.32'ye kadar ulaşan değerler sağlamaktadır. Bu durum, özellikle yüksek değişkenlik seviyeleriyle karakterize edilen senaryolarda, fazla işgücünün proje takvimlerini hızlandırmadaki önemli etkisini vurgulamaktadır. Şekil 23'de gösterilen ve Aktivite A'nın değişkenlik oranını temsil eden renk geçişi, Aktivite A'daki daha yüksek değişkenlik oranlarının fazla işgücünün etkinliğini artırdığını daha da net bir şekilde göstermektedir. Bu sonuç, tampon stratejilerinin bireysel proje aktivitelerinin değişkenlik seviyelerine göre ayarlanmasının, optimal performansa ulaşmak için önemini vurgulamaktadır. Bu bulgular, Javanmardi vd. (2016) ve Thomas vd. (2003) tarafından yapılan çalışmalarla tutarlıdır ve ayarlanabilir ekip büyüklükleri ve çalışma saatleri yoluyla değişkenliğin azaltılmasının, üretim programlarını korumada, proje sürelerini kısaltmada ve verimliliği artırmada etkili bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

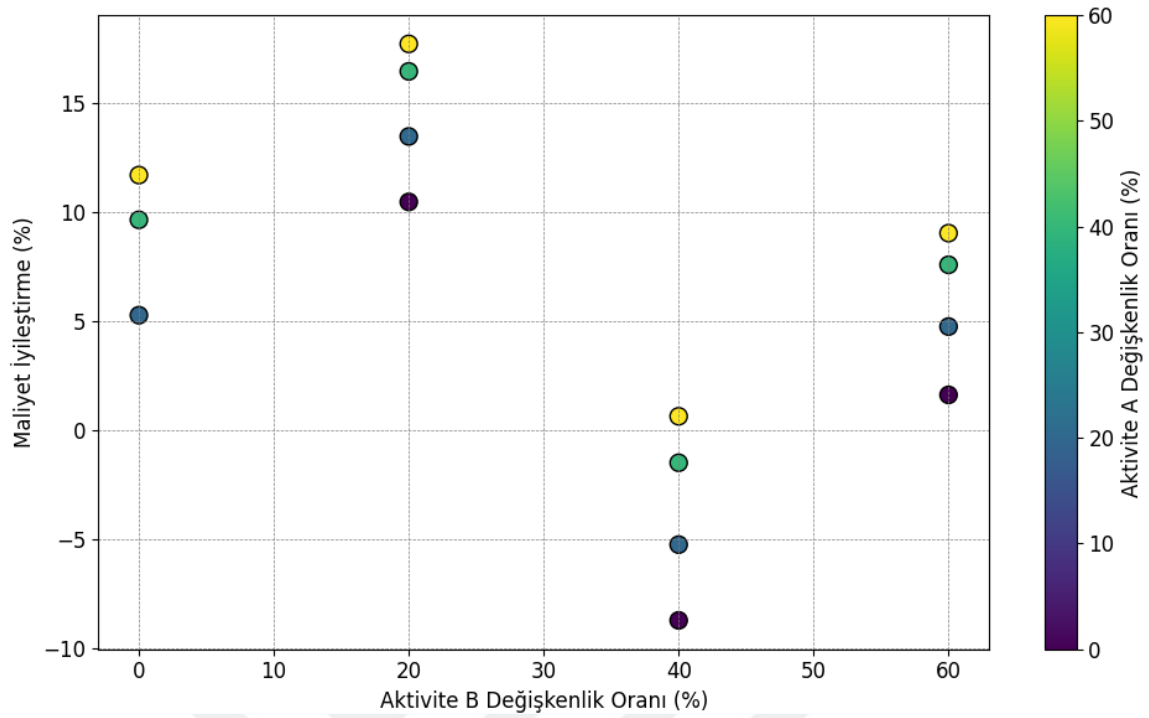
Ayrıca, analizler, değişkenlik seviyelerinin Aktivite A ve Aktivite B üzerindeki etkisinin farklı olduğunu ve en uygun kapasite tamponunun uygulanmasına bağlı olarak senaryolar arasında değişen iyileştirme yüzdeleriyle sonuçlandığını ortaya koymaktadır. Bu farklılık, program performansını etkileyen en kritik aktivitelerin belirlenmesi ve önceliklendirilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Kritik olmayan yollar, bu yollar boyunca

yer alan aktivitelerdeki değişkenlik nedeniyle kritik yollara dönüşebilir. Sonuç olarak, başlangıçta en yüksek değişkenliğe sahip aktivitelerde değişkenliğin azaltılması, Salhab vd. (2022) tarafından öne sürüldüğü gibi, her zaman proje süresinde istenen azalmayı sağlamaz.

Program performansını artırmak ve projelerin zamanında teslim edilme olasılığını yükseltmek için her bir aktivitenin analiz edilmesi ve optimize edilmesine odaklanılmalıdır. Hem kritik hem de potansiyel olarak kritik aktivitelerdeki değişkenlik seviyelerinin ele alınmasıyla, proje ekipleri kapasite tamponlarını daha etkili bir şekilde uygulayabilir ve bunların program performansı ve genel proje başarısı üzerindeki etkisini en üst düzeye çıkarabilir. Şantiye yöneticilerinin, süreçleri yeni ön koşullara göre optimize etmek için sıradaki değişikliklerin farkında olmaları gerekmektedir (Lindhard & Wandahl, 2014).

Maliyet iyileştirme sonuçları, üç seviyede kategorize edilmiş (<0%, 0-10% ve >10%) ve Şekil 24'de gösterildiği gibi değişen koşullar altında tampon stratejilerinin etkinliğine dair değerli bilgiler sunmaktadır. Tablo 21'e göre, 12 senaryoda maliyet iyileştirmesi sağlanırken, 3 senaryoda maliyetler artmıştır. Maliyetli senaryolar ağırlıklı olarak Aktivite B'deki orta seviyeli değişkenlik oranları (%40) ile Aktivite A'daki farklı değişkenlik oranlarının eşleştiği durumlarla ilişkilendirilmiştir. Ancak, bir istisna, Aktivite A'nın %60 ve Aktivite B'nin %40 değişkenliğe sahip olduğu bir senaryoda gözlemlenmiş ve bu durumda %0,63 gibi düşük bir maliyet iyileştirmesi elde edilmiştir.

Düşük değişkenlik seviyelerinde, "Fazla Mesai" stratejisinin maliyet performansı açısından son derece etkili olduğu gözlemlenilmiştir. Fazla mesaiye ilişkin ek maliyetler minimal olup, gecikmeleri önleme yeteneği nedeniyle bu strateji maliyet açısından verimli bir yaklaşım sunmaktadır. Buna karşın, yüksek değişkenlik seviyelerinde, ek bir tampon olarak "Fazla İşgücü" kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Daha yüksek maliyetleri olmasına rağmen, fazla işgücü önemli maliyet iyileştirmelerine yol açmıştır, çünkü ek kaynakların tahsis edilmesinin maliyeti, gecikmelerin neden olduğu maliyetlerden çok daha düşük olmuştur. Bu durum, fazla işgücünün, yüksek değişkenlik oranlarıyla karakterize edilen projelerin yönetiminde ne kadar etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 24. Aktivite A ve B'deki değişkenlik oranlarına göre maliyet iyileştirmesi

Bununla birlikte, orta seviyedeki değişkenlik düzeyleri önemli zorluklar ortaya koymuş ve aşırı istihdam maliyetlerinin genellikle gecikme maliyetlerini aşması nedeniyle negatif maliyet iyileştirmelerine yol açmıştır. Bu bulgular, tamponların doğası gereği maliyetler taşıdığını ve bu maliyetlerin tampon profillerine ve değişkenlik seviyesine bağlı olarak değişebileceğini vurgulayan Alves vd. (2006)'nın sonuçlarıyla örtüşmektedir. Ayrıca, çeşitli çalışmalar tamponların inşaat süresini azaltmada etkili olmasına rağmen, getirdikleri faydaların ek maliyetler nedeniyle azalabileceğini de vurgulamaktadır (Al-Kofahi vd., 2022; González & Alarcón, 2010; Hamzeh, 2009; Horman & Thomas, 2005; Salhab vd., 2022).

Şekil 24'de gösterildiği gibi, orta değişkenlik seviyelerine sahip senaryoların negatif maliyet iyileştirmeleri etrafında kümелendiği görülmekte, bu durum bu tür durumlarda titiz maliyet yönetiminin önemini vurgulamaktadır. Tampon stratejileri, kaynak tahsisinin optimize edilmesini ve zaman tasarrufu ile maliyet etkinliği arasında denge sağlamak amacıyla daha küçük ölçekli fazla mesai ile aşırı istihdamın kombinasyonlarını keşfetmeyi önceliklendirmelidir. Lee vd. (2006) tarafından önerildiği gibi dinamik kaynak tahsis stratejileri, orta değişkenlik seviyelerinde maliyet etkinliğini önemli ölçüde artırabilir. Planlayıcılar, planlama aşamasında proaktif stratejileri entegre etmeli ve tamponların projenin değişen ihtiyaçlarıyla uyumlu olmasını sağlamak için uygulama sırasında reaktif düzenlemeler yapmalıdır.

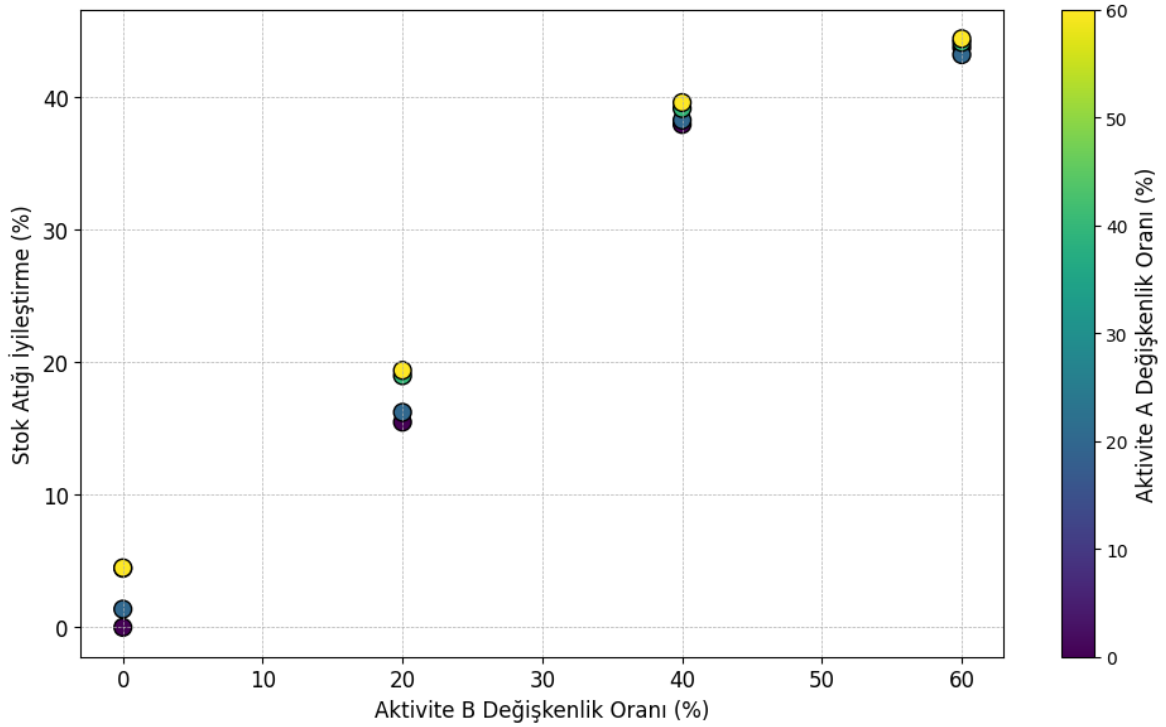
Kasıtlı ve esnek bir tamponlama yaklaşımı, aşırı maliyetlere yol açmadan değişkenliğin etkili bir şekilde azaltılmasını sağlar. Erken aşama planlama, kaynak tahsisinin değişkenlik yönetimi ile uyumlu hale getirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Ghodratı vd., 2022). Örneğin, Thomas vd. (2002, 2003) tarafından açıklandığı gibi, iş gücü tahsislerini ayarlamak ve inşaatta esnek kapasite stratejilerini yönetmek, orta değişkenlik seviyelerinde proje performansını iyileştirebilir. Horman (2000), iş gücü ve ekipman tahsislerinin değiştirilmesinin proje teslim sürelerini %45'e kadar kısaltılabileceğini ve projede %7'ye kadar tasarruf sağlayabileceğini göstermiştir. Bu bulgular, değişkenliği verimli bir şekilde yönetmek için esnek kapasite stratejilerinde ustalaşmanın önemini vurgulamaktadır.

Atık azaltma sonuçları, Tablo 22'de özetlendiği gibi, çeşitli senaryolarda stok ve bekleme atıklarının azaltmadaki yüzdesel iyileştirmeleri vurgulamaktadır. Stok atığı, stokların boşaltılması için gereken süre ile temsil edilmektedir; bu sürenin artması daha yüksek stok atığına yol açar. Buna karşılık, bekleme atığı, işçilerin toplam boş saatleri ve Aktivite B'nin başlamasını bekleme süresi olarak hesaplanır. Analizler, tüm senaryoların en uygun kapasite tamponlarının uygulanmasına bağlı olarak değişen yüzdelerle atık azaltmada iyileşmeler sergilediğini göstermektedir.

Tablo 22. En uygun kapasite tamponlarının senaryolar arasında stok ve bekleme atıkları iyileştirmesi üzerindeki etkisi

Senaryo	Değişkenlik oranı (%)		Stok atığı			Toplam bekleme atığı		
	Aktivite A	Aktivite B	Tamponsuz	En uygun tampon	İyileştirme (%)	Tamponsuz	En uygun tampon	İyileştirme (%)
Plan	0	0	450.26	450.26	0.00	504.37	504.37	0.00
1	20	0	453.53	447.34	1.37	660.90	479.95	27.38
2	40	0	470.63	449.68	4.45	780.64	499.37	36.03
3	60	0	472.84	451.67	4.48	876.16	590.17	32.64
4	0	20	558.54	472.20	15.46	565.76	508.52	10.12
5	0	40	633.98	393.74	37.89	608.52	518.79	14.75
6	0	60	705.70	397.35	43.69	649.55	506.22	22.07
7	20	20	558.39	467.92	16.20	723.22	477.11	34.03
8	20	40	634.10	391.77	38.22	764.58	487.69	36.21
9	20	60	706.11	401.46	43.15	806.81	475.41	41.08
10	40	20	579.49	469.65	18.96	842.98	496.54	41.10
11	40	40	644.58	392.61	39.09	884.43	507.30	42.64
12	40	60	723.03	404.42	44.07	924.98	494.82	46.50
13	60	20	584.89	471.64	19.36	938.36	587.90	37.35
14	60	40	653.40	395.06	39.54	979.52	597.60	38.99
15	60	60	717.93	399.51	44.35	1021.55	585.60	42.68

Şekil 25'te gösterildiği gibi, stok atığındaki iyileşme, özellikle Aktivite B için, artan değişkenlik oranlarıyla birlikte sürekli olarak artmaktadır. Bunun nedeni, daha yüksek değişkenlik seviyelerinde fazla istihdam ve fazla mesai tamponlarının bir kombinasyonunun uygulanmasıdır. Fazla istihdam, işin hızını artırarak stokların daha hızlı boşaltılmasını sağlar ve böylece stok atığını önemli ölçüde azaltır. Değişkenlik seviyeleri ile stok atığı iyileşmesi arasındaki güçlü korelasyon, yüksek değişkenlik senaryolarının bu güçlü tampon stratejilerinin uygulanmasından en fazla faydayı sağladığını göstermektedir.



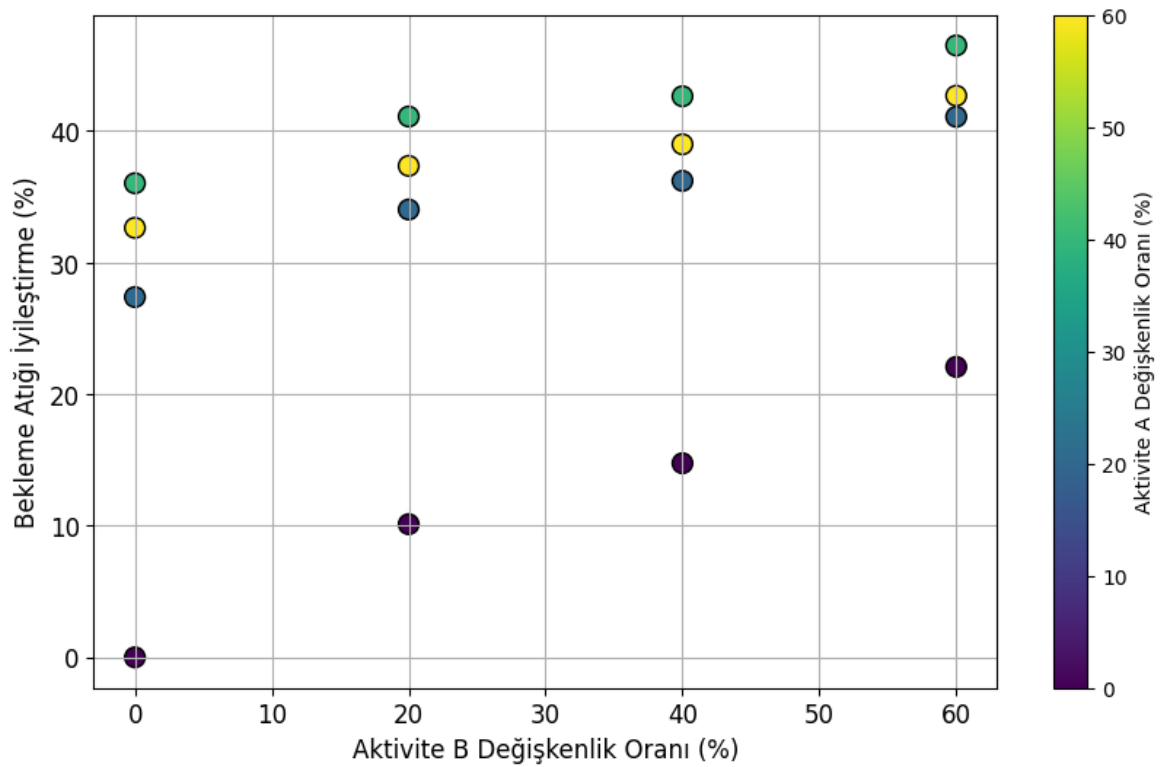
Şekil 25. Aktivite A ve B'deki değişkenlik oranlarına göre stok atığı iyileştirmesi

Örneğin, Aktivite A'da %0 değişkenlik ve Aktivite B'de artan değişkenlik oranlarına sahip senaryolar, %15.46 ile %43.69 arasında değişen oranlarla kademeli iyileşmeler göstermektedir. Hem Aktivite A hem de Aktivite B için değişkenlik oranlarının arttığı durumlarda (örneğin, %60), stok atığı iyileştirmesi maksimum %44.35 seviyesine ulaşmaktadır.

Daha düşük değişkenlik oranları için, örneğin Aktivite A'da %0 ve Aktivite B'de %20 değişkenlik oranı olduğunda, iyileşme yaklaşık %15.46'dır. Bu, stabil koşullarda stok atığı iyileştirmelerinin daha az belirgin olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, uyarlanmış tamponların yalnızca değişkenliğin etkilerini hafifletmekle kalmayıp aynı zamanda üretim

akışını hızlandırarak stok atığını önemli ölçüde azalttığını vurgulamaktadır. Sonuçlar, Aktivite B'deki daha yüksek değişkenlik oranlarına sahip senaryoların, aşırı istihdam ve fazla mesainin birleşik etkisi sayesinde daha büyük stok atığı azaltmaları sağladığını göstermektedir.

Şekil 26'teki eğilimler, en uygun kapasite tamponlarının uygulanmasıyla bekleme atığı iyileşmesinin, özellikle her iki aktivitenin de yüksek değişkenlik oranlarına sahip olduğu durumlarda arttığını ortaya koymaktadır. Bu iyileşme hem işçilerin boşta kalma sürelerinde hem de Aktivite B'nin başlaması için geçen bekleme süresinde azalmaları yansıtmaktadır.



Şekil 26. Aktivite A ve B'deki değişkenlik oranlarına göre bekleme atığı iyileştirmesi

Bekleme atığı iyileştirmesinin analizi, farklı değişkenlik seviyeleri arasında davranışıyla ilgili birkaç kritik gözlem ortaya koymaktadır. Özellikle, Aktivite A'nın değişkenlik gösterdiği ancak Aktivite B'nin değişkenlik seviyesinin %0 olduğu senaryolarda bekleme atığı için iyileştirme yüzdeleri, stok atığı için iyileştirme yüzdelerinden daha yüksektir. Bu durum, Aktivite A'da uygulanan fazla mesainin, programı hızlandırması ve Aktivite B'nin başlangıç süresindeki beklemeyi azaltmasıyla açıklanabilir. Bekleme atığındaki azalma, yukarı akıştaki değişkenliği yönetmek ve aşağı akıştaki gecikmeleri en

aza indirmek için fazla mesaiyi bir tampon stratejisi olarak kullanmanın etkinliğini vurgulamaktadır.

Ayrıca, Aktivite A'nın orta düzeyde değişkenlik seviyelerinde bekleme atığı iyileştirmesi, Aktivite A'nın yüksek değişkenlik seviyelerinde gözlemlenenden belirgin şekilde daha iyidir; bu durum, Aktivite B'nin değişkenlik seviyelerinden bağımsızdır. Bu durum, orta düzeyde değişkenlik seviyelerinde uygulanan fazla mesainin, yüksek değişkenlik koşullarında uygulanmasına kıyasla üstün bir performans sağladığını göstermektedir. Sonuçlar, orta düzeyde değişkenlik seviyelerinde tamponların kaynak tahsisini daha etkili bir şekilde dengeleyebildiğini ve gecikmeleri azaltabildiğini göstermektedir. Buna karşılık, yüksek değişkenlik seviyelerinde tamponların etkinliği, değişkenliğin bileşik etkisi nedeniyle azalmaktadır.

González & Alarcón'un (2010) belirttiği gibi, iş gücünün aşırı tahsisi kapasite tamponlarının etkinliğini azaltabilir ve bu durum proje verimliliğini düşürebilir. Bu aşırı tahsis, genellikle bazı iş aşamalarında yedek kaynakların atıl kalmasına neden olarak tampon kullanımının verimliliğini düşürür. Russell vd. (2015) doğruladığı üzere, yüksek değişkenlik seviyelerinde aşırı tampon tahsisi, atıklara ve işçilerin daha uzun süre beklemesine yol açar. Bu bulgular, tampon uygulamalarında bir denge sağlanmasının önemini vurgulamaktadır; zira aşırı cömert tamponlar, istemeden verimsizliklere ve artan bekleme sürelerine neden olabilir.

Sonuç olarak, fazla mesai ve aşırı işgücü tamponlarının uygulanması, üretim akışını hızlandırmada ve bekleme sürelerini en aza indirerek faaliyetler arasındaki geçişlerin daha sorunsuz gerçekleştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, bulgular, inşaat süreçlerini optimize etmek ve israfı etkili bir şekilde azaltmak için uyarlanabilir tampon yönetimine duyulan ihtiyacın altını çizmektedir. Orta düzey değişkenlik oranlarına sahip senaryolar için, stok ve bekleme atıklarını azaltmaya yönelik stratejik bir kombinasyon, kaynak tahsisini optimize edebilir ve genel proje performansını iyileştirebilir. Tamponların gerçek zamanlı değişkenlik oranlarına göre dinamik olarak ayarlanması, atık azaltımını ve proje verimliliğini daha da artırabilir.

Öte yandan, yüksek değişkenlik seviyelerinde, aşırı tampon tahsisinin işçilerin bekleme sürelerini artırma riskini taşıdığını kabul etmek önemlidir. Bu riski en aza indirmek ve proje değişkenliğinin farklı seviyelerinde tamponların etkili bir şekilde uygulanmasını sağlamak için dikkatli bir planlama ve dengeli bir kapasite tamponu yönetimi yaklaşımı kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmanın, atık minimizasyonu ile tampon yönetimi arasındaki ilişkiyi araştırmayı amaçlayan bulguları, optimize edilmiş tampon uygulamasının inşaat projelerindeki atıkların azaltılmasındaki önemli etkisini vurgulamaktadır. Tampon seçiminin, belirlenen değişkenlik nedenlerine dayandırılması ve proje planlamasının temel bir unsuru olarak dahil edilmesiyle, en uygun tampon seçimi, belirli değişkenlik oranlarına göre uyarlanabilir. Bu yaklaşım, atıkların en aza indirilmesi için güçlü bir strateji sağlar ve LC'nin temel prensipleriyle kusursuz bir şekilde uyum gösterir.

LC ve tampon yönetimi arasındaki sinerji açıkça görülmektedir: her ikisi de değeri maksimize ederken atıkları en aza indirmeye odaklanır. Optimum proje performansı elde etmek için bu iki kavramın uyum içinde çalışması gerekmektedir. Tamponların LC ile entegre bir şekilde uygulanması, yalnızca değişkenliğin olumsuz etkilerini hafifletmekle kalmaz, aynı zamanda inşaat süreçlerinin genel verimliliğini ve değerini artırır.

Ancak, yalın araçlarında olduğu gibi, tamponların olumlu sonuçlar sağlaması için doğru şekilde uygulanması gerekir. Yanlış veya stratejik olmayan tampon uygulamaları, atıkların artmasına ve verimliliğin azalmasına yol açabilir. Bu nedenle, tamponların bir Yalın araç olarak ele alınması kritik öneme sahiptir. İnşaat projelerinde değişkenlik tamamen ortadan kaldırılamayacağı için tamponlar, proje süreçlerinde temel bir bileşen olarak kabul edilmeli ve stratejik bir şekilde uygulanmalıdır. Tamponların önemini kabul etmek ve bunları yalın ilkeleriyle birlikte stratejik olarak uygulamak, değer maksimizasyonu ve atık azaltımı hedeflerine ulaşmak için hayati önem taşır.

Sonuç olarak, tampon yönetiminin LC ilkeleriyle entegrasyonu, değişkenliklerle başa çıkmak ve proje sonuçlarını iyileştirmek için güçlü bir çerçeve sunar. Değişkenlik analizi temelinde optimize edilmiş tampon uygulaması, proje performansını artırmanın pratik ve etkili bir yolunu temsil eder ve inşaat projelerinde hem değer hem de atık minimizasyonu hedeflerinin gerçekleştirilmesini sağlar.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın motivasyonu, özellikle tampon yönetimi alanında, inşaat yönetimi alanındaki mevcut araştırma literatüründe önemli bir boşluk olduğunun fark edilmesiyle ortaya çıkmıştır. Mevcut çalışmalar büyük ölçüde zaman ve envanter tamponlarının birbirinden bağımsız olarak uygulanmasına odaklanmış, ancak tampon türlerinin seçimi ile inşaat projelerindeki temel değişkenlik nedenleri arasındaki net bağlantıyı kuramamıştır. Bu bağlantının eksikliği, tamponların genellikle değişkenlik etkenleriyle uyumu yeterince dikkate alınmadan uygulanmasıyla sonuçlanan mevcut uygulamalardaki kritik bir sınırlamayı ortaya koymaktadır ve bu durum, optimal olmayan sonuçlara yol açmaktadır.

Ayrıca, yalın inşaat paradigmasında tamponların doğası gereği bir israf olarak görüldüğüne dair yaygın bir yanlış anlama bulunmaktadır. Yalın inşaat ilkeleri israfın azaltılmasını vurgulasa da bu bakış açısı tamponların değişkenliği emme ve iş akışı istikrarını sağlama konusundaki temel rolünü göz ardı etmektedir. Bu tür bir yanlış anlama, tamponların yetersiz kullanımı veya yanlış uygulanmasına yol açarak inşaat projelerindeki verimsizlikleri daha da artırmıştır.

Bu çalışma, Türk inşaat projelerinde tampon yönetimi ile atık minimizasyonu arasındaki ilişkiyi, iş akışı değişkenliği nedenlerini sistematik bir şekilde ele alarak incelemektedir. Araştırma, öncelikle iş akışı değişkenliğinin temel nedenlerini ayrıntılı bir şekilde analiz ederek, en yüksek sırada yer alan nedenlerin azaltılmasına yönelik uygulanabilir öneriler sunmaktadır. EFA sonuçlarına dayanarak, kapasite tamponlarının, Türk inşaat projelerinde değişkenliği yönetmek için en uygun strateji olduğu belirlenmiştir.

Daha sonra, yarı yapılandırılmış mülakatlar gerçekleştirilmiş ve uzman görüşleri alınarak bir simülasyon modelinin geliştirilmesine katkı sağlanmıştır. Bu mülakatlar, uygun kapasite tampon seçeneklerini tanımlamayı ve değişkenlik nedenlerinin inşaat projeleri üzerindeki potansiyel etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirebilecek değişkenlik seviyelerini belirlemeyi amaçlamıştır. DES tabanlı geliştirilen simülasyon modeli kullanılarak, farklı değişkenlik seviyelerine sahip çeşitli senaryolar analiz edilmiştir. MCDM yaklaşımı, her senaryo için en uygun kapasite tamponunu belirlemek amacıyla kullanılmış ve zaman ve maliyet gibi kritik proje performans ölçütleri arasında denge sağlanmıştır.

Son olarak, seçilen tamponların proje performansı üzerindeki etkisi incelenmiş; özellikle proje süresini kısaltmaya, maliyetleri düşürmeye ve önemli ölçüde atık atık azaltımı sağlamaya odaklanılmıştır.

Bu araştırmanın bulguları, inşaat projelerinde tampon yönetiminin atık minimizasyonu ve verimliliğin artırılmasındaki kritik rolünü vurgulamaktadır. Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar şunlardır:

1. İş akışı değişkenliği nedenleri: sıralama analizi ve Mann-Whitney U testi, saha yönetimi ve operasyon seviyeleri arasında algıların belirgin şekilde farklılık gösterdiği altı önemli iş akışı değişkenliği nedenini ortaya koymuştur. Bu nedenler şunlardır: faaliyet sıralaması, ticaret koordinasyonu, değişime direnç, ekipmanla ilgili teknik eğitim, malzeme lojistiği ve ekipman tahsisi. Ayrıca, enflasyon, yetersiz detaylandırılmış proje uygulama planları ve düzensiz finansman, iş akışı değişkenliğini artıran en kritik faktörler olarak öne çıkmıştır.

2. EFA sonuçları: EFA yoluyla iş akışı değişkenliği nedenlerinin dört ana bileşeni belirlenmiştir:

- Kaynaklar (insan ve ekipman): toplam varyansın %18,697'sini açıklamaktadır.
- Yönetim ve Planlama: toplam varyansın %18,292'sini açıklamaktadır.
- Malzeme: toplam varyansın %14,409'unu açıklamaktadır.
- Ön Koşullar: toplam varyansın %9,176'sını açıklamaktadır.

3. Yarı yapılandırılmış mülakatlar: uzmanlarla yapılan mülakatlar, iki kapasite tamponu seçeneğinin (fazla mesai ve fazla işgücü) ve düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç değişkenlik seviyesinin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Bu veriler, simülasyon modelinin temellerini oluşturmuştur.

4. En uygun kapasite tamponu seçimi (MCDM Analizi): MCDM analizi, tampon seçimlerinin faaliyet özellikleri ve değişkenlik seviyeleriyle uyumlu hale getirilmesinin önemini vurgulamıştır:

- Kısa süreli alt faaliyetlere sahip aktiviteler için fazla mesai, tüm değişkenlik seviyelerinde en uygun seçenek olarak öne çıkmıştır.
- Uzun süreli alt faaliyetlere sahip aktivitelerde, en uygun tampon değişkenlik seviyelerine göre farklılık göstermiştir. Orta ve yüksek değişkenlik seviyeleri, en iyi performansı sağlamak için fazla mesai ve fazla işgücünün bir kombinasyonunu gerektirmiştir.

5. Zaman ve maliyet performansı: kapasite tamponları, farklı değişkenlik seviyelerinde önemli zaman iyileştirmeleri sağlamıştır:

- Zaman iyileştirmeleri: tampon uygulaması, gecikmeleri etkili bir şekilde azaltmış ve iyileştirmeler değişkenlik seviyeleri ve faaliyet özelliklerine göre farklılık göstermiştir.
- Maliyet performansı: düşük ve yüksek değişkenlik seviyelerinde tampon uygulaması maliyet iyileştirmeleri sağlamıştır. Ancak, orta değişkenlik seviyeleri zorluklar oluşturmuş; fazla işgücü maliyetlerinin gecikme maliyetlerini aşması nedeniyle bazı senaryolarda olumsuz maliyet iyileştirmeleri ortaya çıkmıştır.

6. Atık azaltımı: kapasite tamponlarının uygulanması, tüm senaryolarda atıkların önemli ölçüde azaltılmasını sağlamıştır:

- Stok ve bekleme atıkları: tüm değişkenlik seviyelerinde önemli atık azaltımları gözlemlenmiş; orta değişkenlik seviyelerinde bekleme atıkları, yüksek seviyelere kıyasla daha belirgin iyileşme göstermiştir.
- Yüksek değişkenlik seviyeleri: aşırı tampon tahsisinin çalışanlar için artan bekleme sürelerine yol açma riski taşıdığı, bu nedenle tampon yönetiminin stratejik bir şekilde ele alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Bu tezin bulguları, inşaat proje yönetimi için özellikle atık minimizasyonunu optimize etme ve tampon yönetimi yoluyla iş akışı güvenilirliğini artırma konularında önemli pratik çıkarımlara sahiptir. Tampon stratejilerinin iş akışı değişkenliği nedenleriyle ilişkilendirilmesi ve bunların proje planlamasına entegre edilmesi sayesinde, bu araştırma inşaat profesyonellerine değişkenliği azaltmak, gecikmeleri önlemek ve atıkları kontrol altına almak için sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. DES'e dayanan ve uzman görüşleriyle desteklenen geliştirilen simülasyon modeli, çeşitli senaryolar ve değişkenlik seviyeleri arasında kapasite tampon stratejilerinin değerlendirilmesine olanak tanımakta ve belirli proje koşulları için özel çözümler sunmaktadır.

Ayrıca, önerilen çerçevenin sağlamlığı, operasyonel ve yönetsel seviyelerdeki değişkenlikleri ele alarak gerçek dünya inşaat ortamlarında uygulanabilirliğini garanti etmektedir. Çalışmanın tampon seçimini faaliyet özellikleriyle uyumlu hale getirme vurgusu, kaynak tahsisini iyileştirmek, bekleme ve stok atıklarını en aza indirmek ve proje performansını artırmak için pratik bir araç sunmaktadır. Bu bulguların operasyonel ve stratejik planlamaya entegre edilmesiyle, inşaat profesyonelleri proje sonuçlarının daha

doğru ve güvenilir tahminlerini elde ederek yalın inşaat prensipleri ve proje hedefleriyle daha iyi bir uyum sağlayabilir.

4.1. Tez Çalışmasının Katkıları

Bu çalışma, iş akışı değişkenliği ve tampon yönetimi arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamaya yönelik inşaat yönetimi alanına önemli katkılar sağlamaktadır. İnşaat projelerindeki değişkenliği stratejik tampon uygulamaları yoluyla azaltmak için sağlam bir çerçeve sunmakta ve değişkenlik nedenlerini özelleştirilmiş tampon çözümleriyle ilişkilendirmektedir. Araştırma, tampon stratejilerinin belirli değişkenlik nedenleriyle uyumlu hale getirilmesi ve proje planlamasına entegre edilmesinin önemini vurgulayarak tampon yönetimi konusundaki mevcut bilgi boşluklarını doldurmaktadır. Bu yaklaşım yalnızca atıkları azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda zaman, maliyet ve genel proje performansını iyileştirmekte ve LC hedeflerine ulaşmak için pratik bir yöntem sunmaktadır.

Çalışma, tamponların genellikle atık olarak görüldüğü geleneksel yalın inşaat perspektifine meydan okumaktadır. Aksine, tamponların, değer katmayan unsurlar olmalarına rağmen, bekleme süresi ve kaynak verimsizlikleri gibi diğer atık türlerini önleme veya hafifletmede kritik bir rol oynadığını göstermektedir. İş akışı değişkenliği ve tampon stratejileri arasındaki dinamik etkileşimi analiz ederek, araştırma, tamponların inşaat projelerinin doğasında bulunan belirsizliği yönetmede vazgeçilmez olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuçlar, tamponların tamamen ortadan kaldırılmasının performans iyileştirmesi sağlamayabileceğini; aksine, stratejik uygulamalarının proje istikrarını ve performansını önemli ölçüde artırabileceğini vurgulamaktadır.

Stratejik tampon uygulamalarının değişkenliği azaltırken yalın prensipleri koruyabildiğini göstererek, bu araştırma inşaat yöneticilerine proje verimliliğini artırmak için pratik bir yol sunmaktadır. Bulgular, tamponları yalın inşaat uygulamalarının temel bileşenleri olarak entegre eden uygulanabilir modelleri teorik tartışmalardan eyleme dönüştürülebilir hale getirmeyi teşvik etmektedir. Bu çalışma, tampon yönetim stratejilerinin planlama aşamasına entegre edilmesinin önemini vurgulayarak inşaat proje yöneticileri için somut içgörüler sağlamaktadır. Değişkenlik nedenlerini proaktif bir şekilde değerlendirerek ve aktiviteye özel tamponlar tasarlayarak yöneticiler, değişkenlik etkilerini en aza indirebilir ve genel proje performansını artırabilir. Bu hususların projenin yaşam döngüsünün erken

aşamalarına dahil edilmesi, daha sorunsuz iş akışları ve optimum sonuçlar sağlayarak proje hedefleriyle uyumlu hale gelmesini sağlamaktadır.

Bulgular, tampon stratejilerinin her bir aktivitenin benzersiz özelliklerine göre uyarlanmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Kısa süreli alt aktiviteler için fazla mesai uygulanması veya uzun süreli aktiviteler için fazla mesai ve fazla işgücünün birleştirilmesi gibi aktiviteye özel yaklaşımlar, zaman ve maliyet verimliliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Tek bir yaklaşımla tampon yönetimi yetersiz kalmaktadır; stratejiler, aktivitelerin belirli süreleri, bağımlılıkları ve değişkenlik düzeyleriyle uyumlu olmalıdır. En etkili tampon stratejilerini belirlemek için proje yöneticileri, değişkenlik düzeylerini sistematik olarak senaryo analizleri ile değerlendirmelidir. Düşük, orta ve yüksek değişkenlik senaryolarının simülasyonu, tampon etkilerinin değerlendirilmesini sağlayarak seçilen stratejilerin maliyet açısından verimli ve değişkenliği yönetmede etkili olmasını temin eder. Bu proaktif yaklaşım, gelişmiş proje sonuçlarına ulaşmak için sağlam bir temel sağlar.

Çalışma ayrıca tamponların uygulanmasında düzeltici önlemlerin önemini vurgulamaktadır. Örneğin, fazla işgücü kullanımı bazı senaryolarda artan maliyetlere yol açabilir ve bu durum, verimliliği optimize etmek için geliştirilmiş gözetim veya kaynak yeniden tahsisi gibi ayarlamaları gerektirebilir. Yöneticiler, performans metriklerini izlemeye ve tampon stratejilerini gerektiğinde istenen sonuçları elde etmek için uyarlamaya hazır olmalıdır.

Son olarak, dinamik ve değişen proje koşullarına hazırlıklı olmak kritik öneme sahiptir. İnşaat projeleri, zaman içinde değişkenlik düzeyleri ve etkilerinde doğal olarak değişiklikler içerir. Yöneticiler, tampon stratejilerini proje koşulları geliştikçe adapte etmek için esnek kalmalı ve yedek planlar geliştirmelidir. MCDM gibi karar verme çerçeveleri, zaman, maliyet ve atık azaltımı önceliklerini dengeleyerek, daha bilinçli ve veri odaklı kararların alınmasını sağlayabilirler.

4.2. Öneriler

Yukarıdaki sonuçlar doğrultusunda, inşaat projelerinde tampon yönetimini sağlamak için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Değişkenlik nedenlerini önceliklendirin: yöneticiler, aşırı tampon ihtiyacını azaltmak ve proje istikrarını artırmak için yüksek öncelikli değişkenlik nedenlerini hedeflemelidir.

- Tampon yönetimini planlama aşamasına entegre edin: inşaat proje yöneticileri, her bir aktiviteye özgü değişkenlik nedenlerini projenin yaşam döngüsünün erken aşamalarında değerlendirmelidir. Bu yaklaşım, seçilen tamponların aktivite özellikleri, değişkenlik düzeyleri ve genel proje hedefleriyle uyumlu olmasını sağlar.
- Aktiviteye özgü tampon stratejileri benimseyin: yöneticiler, "tek tip" bir yaklaşımı benimsemekten kaçınmalı ve bunun yerine tampon türlerini aktivitelerin süresi, bağımlılıkları ve değişkenlik hassasiyetine göre özelleştirmelidir.
- Senaryoya dayalı analizler yapın: proje yöneticileri, zaman, maliyet ve atık azaltımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için düşük, orta ve yüksek değişkenlik seviyelerini içeren çeşitli senaryoları simüle etmelidir. Bu, her senaryo için en uygun tamponun belirlenmesine yardımcı olacaktır.
- Olası senaryolar için yedek planlar geliştirin: proje yürütümü sırasında değişkenlik seviyeleri değiştikçe tamponları dinamik bir şekilde uyarlamak için esnek stratejiler oluşturun.
- Tampon stratejilerini izleyin ve ayarlayın: yöneticiler, uygulanan tamponların performansını sürekli olarak değerlendirmeli ve gerektiğinde düzeltici eylemleri hayata geçirmelidir.
- Kapsamlı atık azaltımına odaklanın: yöneticiler, tampon uygulaması, maliyet verimliliği ve atık azaltımı arasındaki etkileşimi dikkate alarak dengeli proje sonuçlarına ulaşmayı hedeflemelidir.
- Ekipleri tamponun önemi konusunda eğitin: proje yöneticileri ve saha yöneticileri, tamponların yalın inşaatta oynadığı rol hakkında eğitilmelidir. Bu, tamponların değişkenliği hafifletme ve diğer atık türlerini önleme konusundaki çift yönlü rolünü anlamayı içerir.
- Düzeltici önlemler konusunda farkındalık yaratın: paydaşlar, tamponların bazen istenen sonuçlara ulaşmak için proje yürütümü sırasında ince ayar gerektirebileceğinin farkında olmalıdır.

4.3. Çalışmanın Sınırları

Bu çalışmanın değerli katkılarına rağmen, bazı sınırlamalar kabul edilmelidir. İlk olarak, analiz sınırlı bir inşaat projesi örneklemine dayanmaktadır ve bu durum, iş akışı değişkenliğini etkileyen çeşitli faktörlerin tam anlamıyla yakalanmasını engelleyebilir.

Çalışma, metodoloji bölümünde detaylandırıldığı üzere, belirli veri tabanları ve anahtar kelimelere dayanmıştır ve bu durum incelenen literatürün kapsamını sınırlandırmıştır. Araştırma veri tabanlarının ve depolarının sayısının artması ve sürekli güncellenmesi, bilgi birikiminin genişlemesine neden olmakta ve bu durum hem bir sınırlama hem de gelecek araştırmalar için bir fırsat sunmaktadır. Gelecek çalışmalar, daha geniş ve çeşitli veri setlerini inceleyerek bulguların genelleştirilebilirliğini ve sağlamlığını artırmayı hedefleyebilir.

İkinci olarak, geliştirilen simülasyon modeli, değişkenlik nedenlerini ve tampon yönetim stratejilerini analiz etmek için DES'e dayalıdır. DES önemli içgörüler sağlasa da gerçek dünya inşaat süreçlerinde bulunan dinamik ve sistemik etkileşimleri tam anlamıyla yansıtamamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, tampon yönetimi ve değişkenlik nedenlerini dinamik bir şekilde analiz etmek için SD ve ABM gibi alternatif modelleme tekniklerini keşfedebilir. Bu yaklaşımlar, değişkenlik, tampon stratejileri ve proje sonuçları arasındaki etkileşimleri daha bütünsel bir şekilde anlamaya olanak tanıyabilir.

Üçüncü olarak, bu çalışma esas olarak değişkenlik nedenlerine göre uyarlanmış kapasite tamponlarına odaklanmıştır. Bu yaklaşım değerli içgörüler sağlasa da zaman ve envanter tamponları gibi diğer kritik tampon türlerini ele almamaktadır. Gelecek araştırmalar, kapasite, zaman ve envanter tamponlarının etkileşimini inceleyerek zorlayıcı proje senaryolarında maliyet aşımalarını ve gecikmeleri hafifletmek için daha kapsamlı bir yaklaşım benimseyebilir.

Gelecekteki araştırmalar, bu çalışmanın bulgularını daha da genişleterek farklı coğrafi bölgelerde ve inşaat piyasalarında uygulanabilirliğini incelemeyi hedeflemelidir. Çalışma, iş akışı değişkenliği ve tampon yönetimini farklı kültürel ve ekonomik bağlamlarda analiz ederek, bu stratejilerin daha geniş kapsamda geçerliliğini doğrulamayı ve iyileştirmeyi amaçlayabilir. Bu tür araştırmalar, tampon yönetimi uygulamalarını farklı inşaat ortamlarının özgün ihtiyaçlarına uygun hale getirmeye yardımcı olacaktır.

Gelecek araştırmalar için umut vaat eden bir diğer yön, tampon yönetimine makine öğrenimi ve olasılık modelleri gibi gelişmiş modelleme tekniklerinin entegrasyonudur. Bu

araçlar, daha doğru tahminler, gerçek zamanlı karar alma ve tampon stratejilerinin proje koşullarındaki değişimlere dinamik olarak uyarlanması için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu tür ileri teknolojilerin uygulanması, inşaat projelerinin değişkenlik ile başa çıkma ve verimliliği artırma yöntemlerinde devrim yaratabilir.

Entegre proje yönetim sistemlerinin geliştirilmesi, gelecekte keşfedilecek bir diğer kritik alandır. Bu sistemler, dinamik tampon ayarlamalarını, gerçek zamanlı risk yönetimini ve yalın inşaat ilkelerini bir araya getirerek dayanıklı ve verimli proje iş akışları oluşturmalıdır. Tamponlardaki gizli israfı ele alarak ve tamponların kullanımını optimize ederek, bu tür sistemler genel proje performansını ve uyum yeteneğini önemli ölçüde artırabilir.

Son olarak, gelecekteki araştırmalar, belirli yalın inşaat araçları ile tampon yönetimi arasındaki etkileşimi incelemelidir. Bu araçların tampon stratejileriyle nasıl uyum sağladığına dair daha derin bir anlayış, onların sinerjisini artırmaya yönelik değerli içgörüler sağlayabilir. Yalın araçların tampon yönetimi uygulamalarını nasıl tamamlayabileceğini keşfederek, araştırmacılar atık azaltma ve değişkenlik hafifletme hedefleriyle uyumlu daha etkili ve verimli inşaat yönetimi yaklaşımlarına katkıda bulunabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abbasi, S., Taghizade, K., & Noorzai, E. (2020). BIM-based combination of takt time and discrete event simulation for implementing just in time in construction scheduling under constraints. *Journal of construction engineering and management*, 146(12), 04020143.
- Abbasian-Hosseini, S. A., Liu, M., & Howell, G. (2018). Investigating the cost-benefit trade-off of additional planning using parade game simulation. *Journal of Management in Engineering*, 34(2), 04017066.
- Abdelmegid, M. A., González, V. A., Poshdar, M., O'Sullivan, M., Walker, C. G., & Ying, F. (2020). Barriers to adopting simulation modelling in construction industry. *Automation in construction*, 111, 103046.
- AbouRizk, S. (2010). Role of simulation in construction engineering and management. *Journal of construction engineering and management*, 136(10), 1140-1153.
- Abuelaish, R., & Toğan, V. (2024). Integrating of lean construction and buffer management-A systematic literature review. *Lean Construction Journal*, 85-107.
- Abusalem, O. (2020). Towards last planner system implementation in Gaza Strip, Palestine. *International Journal of Construction Management*, 20(5), 367-384.
- Acha, C. K. (2018). *Fundamentals of Statistics*. Uyo: Daves Publishers.
- Adeoye-Olatunde, O. A., & Olenik, N. L. (2021). Research and scholarly methods: Semi-structured interviews. *Journal of the american college of clinical pharmacy*, 4(10), 1358-1367.
- Aladag, H., Demirdögen, G., & Isık, Z. (2016). Building information modeling (BIM) use in Turkish construction industry. *Procedia engineering*, 161, 174-179.
- Al-Aomar, R. (2012). Analysis of lean construction practices at Abu Dhabi construction industry. *Lean Construction Journal*, 105–121.
- Alhaji Ali, Z., Ahmad Latiffi, A., Raji, A. U., Waziri, A. A., & Mohammed, U. (2017). Causes of low-skilled workers' performance in construction projects. *Traektoriâ nauki*, 3(6), 1-15.
- Al-Kofahi, Z. G., Mahdavian, A., & Oloufa, A. (2022). System dynamics modeling approach to quantify change orders impact on labor productivity 1: principles and model development comparative study. *International journal of construction management*, 22(7), 1355-1366.
- Alvanchi, A., Lee, S., & AbouRizk, S. (2012). Dynamics of working hours in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(1), 66-77.

- Alves, T. C. & Tommelein, I. D. (2004). Simulation of Buffering and Batching Practices in the Interface Detailing-Fabrication-Installation of HVAC Ductwork. *Proceedings of the 12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Helsingør, Denmark.
- Alves, T. C. L., & Tommelein, I. D. (2003). Buffering and batching practices in the HVAC industry. *Proceedings of the 11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 369-381.
- Alves, T. C. L., Tommelein, I. D., & Ballard, G. (2006). Simulation as a tool for production system design in construction. *Proceedings of the 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 341-353.
- Alves, T.C.L. (2005). *Buffering Practices in HVAC Supply Chains*. Civil and Environmental Engineering, University of California, Doctoral dissertation, Berkeley, U.S.A.
- Ansah, R. H., Sorooshian, S., & Mustafa, S. B. (2016). Lean construction: an effective approach for project management. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(3), 1607-1612.
- Antony, J., Krishan, N., Cullen, D., & Kumar, M. (2012). Lean Six Sigma for higher education institutions (HEIs) Challenges, barriers, success factors, tools/techniques. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 61(8), 940-948.
- Arain, M., Campbell, M. J., Cooper, C. L., & Lancaster, G. A. (2010). What is a pilot or feasibility study? A review of current practice and editorial policy. *BMC Medical Research Methodology*, 10(67), 1-7.
- Arashpour, M., & Arashpour, M. (2015). Analysis of workflow variability and its impacts on productivity and performance in construction of multistory buildings. *Journal of Management in Engineering*, 31(6), 04015006.
- Arashpour, M., Wakefield, R., Blismas, N., & Lee, E. W. M. (2014). Analysis of disruptions caused by construction field rework on productivity in residential projects. *Journal of construction engineering and management*, 140(2), 04013053.
- Aravindh, M. D., Nakkeeran, G., Krishnaraj, L., & Arivusudar, N. (2022). Evaluation and optimization of lean waste in construction industry. *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(5), 741-752.
- Arbulu, R. & Zabelle, T. (2006). Implementing Lean in Construction: How to Succeed. *Proceedings of the 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 553-565. Santiago, Chile.
- Arbulu, R., Koerckel, A. & Espana, F. (2005). Linking Production-Level Workflow With Materials Supply, *Proceedings of the 13th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 199-206. Sydney, Australia.

- Arditi, D., Gluch, P. and Holmdahl, M. (2013). Managerial competencies of female and male managers in the Swedish construction industry, *Construction Management and Economics*, 31 (9), 979-990.
- Assaad, R., El-Adaway, I. H., & Abotaleb, I. S. (2020). Predicting project performance in the construction industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(5), 04020030.
- Assaad, R., Elsayegh, A., Ali, G., Abdul Nabi, M., & El-Adaway, I. H. (2020). Back-to-back relationship under standard subcontract agreements: Comparative study. *Journal of legal affairs and dispute resolution in engineering and construction*, 12(3), 04520020.
- Assaf, S. A., & Al-Hejji, S. (2006). Causes of delay in large construction projects. *International journal of project management*, 24(4), 349-357.
- Attar, A. A., Gupta, A. K., & Desai, D. B. (2012). A study of various factors affecting labour productivity and methods to improve it. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 1(3), 11-14.
- Ayarkwa, J., Agyekum, K., & Acheampong, A. (2012a). Factors affecting the performance of contractors on building construction projects in Ghana. *Journal of Construction Project Management and Innovation*, 2(1), 294-313.
- Ayarkwa, J., Agyekum, K., & Acheampong, A. (2012b). Application of Monte Carlo Simulation in Risk Management: A Case Study of a Construction Project in Ghana. *Journal of Construction Engineering and Project Management*, 2(3), 1-8.
- Ayers, J. B. (2006). *Handbook of Supply Chain Management*. 2nd Edition. Boca Raton: Auerbach Publications.
- Aytekin, A. (2021). Comparative analysis of the normalization techniques in the context of MCDM problems. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 4(2), 1-25.
- Aziz, R. F., & Hafez, S. M. (2013). Applying lean thinking in construction and performance improvement. *Alexandria engineering journal*, 52(4), 679-695.
- Badger, W. W., Wiezel, A., Adams, D. M. and Bopp, P. (2012). Superintendent's leadership: A key factor in project success. *International Journal of Project Organisation and Management*, 4(5), 414-424.
- Bajjou, M. S., & Chafi, A. (2020). Identifying and managing critical waste factors for lean construction projects. *Engineering management journal*, 32(1), 2-13.
- Bajjou, M. S., & Chafi, A. (2021). Lean construction and simulation for performance improvement: a case study of reinforcement process. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 70(2), 459-487.

- Bajjou, M. S., Chafi, A., & En-Nadi, A. (2017). The potential effectiveness of lean construction tools in promoting safety on construction sites. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 33, 179-193.
- Ballard, G. (2008). The lean project delivery system: An update. *Lean construction journal*, 2008, 1-19.
- Ballard, G., & Howell, G. (1994). Implementing lean construction: Reducing inflow variation. *In second annual conference on lean construction at Catolica Universidad*. Chile, Santiago.
- Ballard, G., & Howell, G. (1998). Shielding production: Essential step in production control. *Journal of Construction Engineering and management*, 124(1), 11-17.
- Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Soetanto, R., González-Cruz, M. C., Larsen, G. D., & Cerezo-Narváez, A. (2020). Duration and cost variability of construction activities: An empirical study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1), 04019093.
- Bamana, F., Lehoux, N., & Cloutier, C. (2019). Simulation of a construction project: assessing impact of just-in-time and lean principles. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(5), 05019005.
- Banihashemi, S. A., Khalilzadeh, M., Antucheviciene, J., & Šaparauskas, J. (2021). Trading off time–cost–quality in construction project scheduling problems with fuzzy SWARA–TOPSIS approach. *Buildings*, 11(9), 387.
- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2009). *Discrete-Event System Simulation* (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- Barraza, G. A. (2011). Probabilistic estimation and allocation of project time contingency. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(4), 259-265.
- Barriga, E. M., Jeong, J. G., Hastak, M., & Syal, M. (2005). Material control system for the manufactured housing industry. *Journal of Management in Engineering*, 21(2), 91-98.
- Baškarada, S., & Koronios, A. (2018). A philosophical discussion of qualitative, quantitative, and mixed methods research in social science. *Qualitative Research Journal*, 18(1), 2-21.
- Bataglin, F. S., Viana, D. D., Coelho, R. V., Tommelein, I. D. & Formoso, C. T. (2021). Buffer Types and Methods of Deployment in Construction. *Proceedings of the 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 849-858. Lima, Peru.
- Bayraktar, M. E., Hastak, M., Gokhale, S., & Safi, B. (2011). Decision tool for selecting the optimal techniques for cost and schedule reduction in capital projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(9), 645-655.

- Bergin, T. (2018). *An Introduction to Data Analysis: Quantitative, Qualitative and Mixed Methods*. London: SAGE Publications Ltd.
- Bertelsen, S., Henrich, G., Koskela, L. & Rooke, J. (2007). Construction Physics. *Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 13-26. Michigan, USA.
- Bhatnagar, S., Jacob, G., Devkar, G., Rybkowski, Z. K., Arefazar, Y., & Obulam, R. (2022). A systematic review of lean simulation games in the construction industry. *Architectural Engineering and Design Management*, 19(6), 701-719.
- Bie, L., Cui, N., & Zhang, X. (2012). Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7343-7356.
- Blacud, N. A., Bogus, S. M., Diekmann, J. E., & Molenaar, K. R. (2009). Sensitivity of construction activities under design uncertainty. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(3), 199-206.
- Bokor, O., Florez, L., Osborne, A., & Gledson, B. J. (2019). Overview of construction simulation approaches to model construction processes. *Organization, technology & management in construction: an international journal*, 11(1), 1853-1861.
- Bolarinwa, O. A. (2019). Principles and methods of validity and reliability testing of questionnaires used in social and health science researches. *Nigerian Postgraduate Medical Journal*, 26(4), 195-201.
- Borrego, M., Douglas, E. P., & Amelink, C. T. (2009). Quantitative, qualitative, and mixed research methods in engineering education. *Journal of Engineering education*, 98(1), 53-66.
- Borshchev, A. (2014). Multi-method modelling: AnyLogic. *Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making*, 248-279.
- Borshchev, A. (2018). *The AnyLogic in three days: A quick course in simulation modeling (7th ed.)*. AnyLogic Company.
- Broder, H. L., McGrath, C., & Cisneros, G. J. (2007). Questionnaire development: Face validity and item impact testing of the Child Oral Health Impact Profile. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, 35(1), 8-19.
- Burduk, A., Łapczyńska, D., & Popiel, P. (2021). Simulation modeling in production effectiveness improvement—case study. *Management and Production Engineering Review*, 12.
- Chandrasekar, K. (2011). Workplace environment and its impact on organisational performance in public sector organisations. *International journal of enterprise computing and business systems*, 1(1), 1-19.
- Cheng, E. W., Li, H., Fang, D. P. and Xie, F. (2004). Construction safety management: An exploratory study from China. *Construction Innovation*, 4(4), 229-241.

- Christodoulou, S. E. (2017). Entropy-based heuristic for resource-constrained project scheduling. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(3), 04016068.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Conway, J. M., & Huffcutt, A. I. (2003). A review and evaluation of exploratory factor analysis practices in organizational research. *Organizational Research Methods*, 6(2), 147-168.
- Costello, A. B., & Osborne, J. (2019). Best practices in exploratory factor analysis: Four recommendations for getting the most from your analysis. *Practical assessment, research, and evaluation*, 10(1), 7.
- Creswell, J. W. (2003). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Creswell, J. W., Plano Clark, V. L., Gutmann, M. L., & Hanson, W. E. (2003). Advanced mixed methods research designs. In A. Tashakkori & C. Teddlie (Eds.), *Handbook of Mixed Methods in Social and Behavioral Research* (s. 209–240). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297-334.
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *psychometrika*, 16(3), 297-334.
- Culfik, M., Birgonul, M. T., & Dikmen, I. (2014). Analysis of delay causes in Turkish construction projects: A contractor perspective. *International Journal of Project Management*, 32(3), 524-535.
- da Rocha, C. G., Kemmer, S. L., & Meneses, L. (2016). Managing customization strategies to reduce workflow variations in house building projects. *Journal of construction engineering and management*, 142(8), 05016005.
- Dai, J., Goodrum, P. M., & Maloney, W. F. (2009). Construction craft workers' perceptions of the factors affecting their productivity. *Journal of construction engineering and management*, 135(3), 217-226.
- Daliri, S., Young, B. K. & Lædre, O. (2021). Last Planner® System on the Minnevik Bridge Project. *Proceedings of the 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 757-766. Lima, Peru.
- Danso, H. (2014). Poor workmanship and lack of plant/equipment problems in the construction industry in Kumasi, Ghana. *International journal of management research*, 2(3), 60-70.
- De Carvalho, A. C. V., Granja, A. D., & Da Silva, V. G. (2017). A systematic literature review on integrative lean and sustainability synergies over a building's lifecycle. *Sustainability*, 9(7), 1156.

- Dehghan, R., & Ruwnapura, J. Y. (2014). Model of trade-off between overlapping and rework of design activities. *Journal of construction engineering and management*, 140(2), 04013043.
- Demirkesen, S., & Ozorhon, B. (2017). Impact of integration management on construction project management performance. *International journal of project management*, 35(8), 1639-1654.
- DiCicco-Bloom, B., & Crabtree, B. F. (2006). The qualitative research interview. *Medical Education*, 40(4), 314-321.
- Diekmann, J. E., Krewedl, M., Balonick, J., Stewart, T., & Won, S. (2004). Application of lean manufacturing principles to construction. *Boulder, CO, Construction Industry Institute*, 191.
- Dikko, M. (2016). Establishing Construct Validity and Reliability: Pilot Testing of a Qualitative Interview for Research in Takaful (Islamic Insurance). *The Qualitative Report*, 21(3), 521-528.
- Dixit, S., Mandal, S. N., Sawhney, A., & Singh, S. (2017). Area of linkage between lean construction and sustainability in Indian construction industry. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(8).
- Dlouhy, J., Binninger, M. & Haghsheno, S. (2019). Buffer Management in Takt Planning – An Overview of Buffers in Takt Systems. *Proceedings of the 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 429-440. Dublin, Ireland.
- Eck, M. V. (2003). Advanced Planning and Scheduling: Is logistic everything? A research on the use (fullness) of advanced planning and scheduling systems. *Technique report*, Vrije University, Amsterdam, Holland.
- El Khatib, M., Zitar, R. A., Alnaqbi, A., Alnaqbi, A., Alsuwaidi, H., Al Marri, M., & Ankit, A. (2023). Implementing IOT in effective project management. *International Journal for Computers & Their Applications*, 30(2).
- El Mounla, K., Beladjine, D., Beddiar, K., & Mazari, B. (2023). Lean-BIM approach for improving the performance of a construction project in the design phase. *Buildings*, 13(3), 654.
- El-adaway, I. H. (2012). Insurance pricing for windstorm-susceptible developments: Bootstrapping approach. *Journal of Management in Engineering*, 28(2), 96-103.
- Erdmann, T. P., Boessenkool, H., Hogewoning, L., & Does, R. J. (2012). Quality quandaries: Reducing work in process at an emergency assistance center. *Quality Engineering*, 25(1), 78-84.
- Erdogan, S. A., Šaparauskas, J., & Turskis, Z. (2019). A multi-criteria decision-making model to choose the best option for sustainable construction management. *Sustainability*, 11(8), 2239.

- Faber, J., & Fonseca, L. M. (2014). How sample size influences research outcomes. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 19(4), 27-29.
- Farag, M. A. M. (2014). A bridge between increasing reliability and reducing variability in construction work flow: A fuzzy-based sizing buffer model. *Journal of Advanced Management Science*, 2(4), 287-294.
- Farag, M., Gehbauer, F. & Bhatla, A. (2010). An Integration of a Buffering Assessment Model Based on Fuzzy Logic With LPS™ for Improving Highway Construction. *Proceedings of the 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 264-273. Haifa, Palestine.
- Farrar, J. M., AbouRizk, S. M., & Mao, X. (2004). Generic implementation of lean concepts in simulation models. *Lean Construction Journal*, 1(1), 1-23.
- Field, A. (2005). *Factor analysis using SPSS*. London: SAGE Publications Ltd.
- Field, A. (2009). *Discovering statistics using SPSS, 3rd Edition*. London: SAGE Publications Ltd.
- Fireman, M. C., Saurin, T. A., Formoso, C. T., Koskela, L., & Tommelein, I. D. (2023). Slack in production planning and control: a study in the construction industry. *Construction Management and Economics*, 41(3), 256-276.
- Formoso, C., Bølviken, T., Rooke, J. & Koskela, L. (2015). A Conceptual Framework for the Prescriptive Causal Analysis of Construction Waste. *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 454-461. Perth, Australia.
- Francis, A., & Thomas, A. (2020). Exploring the relationship between lean construction and environmental sustainability: A review of existing literature to decipher broader dimensions. *Journal of cleaner production*, 252, 119913.
- Francis, M., Ramachandra, T., & Rotimi, J. O. B. (2016). Strategies to minimise the effects of delayed payments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Management, Procurement and Law*, 169(5), 199-207.
- Funso, A., Sammy, L., & Gerryshom, M. (2016). Application of motivation in Nigeria construction industry: Factor analysis approach. *International Journal of Economics and Finance*, 8(5), 271-276.
- Galindo, A. (2000). *Probabilistic project control based on contingency management*. Civil Engineering, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Doctoral dissertation, Nuevo Leon, Mexico.
- Galletta, A. (2012). *Mastering the Semi-Structured Interview and Beyond: From Research Design to Analysis and Publication*. New York: New York University Press.
- Gangai, K. N. (2014). Absenteeism at workplace: What are the factors influencing to it?. *International Journal of Organizational Behaviour & Management Perspectives*, 3, 1258-1265.

- Garcia-Lopez, N. P. (2017). *An activity and flow-based construction model for managing on-site work*. Doctoral dissertation, Stanford University.
- Garcia-Lopez, N. P., & Fischer, M. (2016). A construction workflow model for analyzing the impact of in-project variability. In *Construction Research Congress 2016*, 1998-2007.
- Garcia-Lopez, N. P., & Fischer, M. (2024). Managing On-Site Production Using an Activity and Flow-Based Construction Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 150(1), 04023144.
- Garrido Martins, C., Bogus, S. M., & Valentin, V. (2023). Perceptions of construction risks due to fast-track activity overlapping. *Eng*, 4(4), 2879-2895.
- Gerami Seresht, N., & Fayek, A. R. (2018). Dynamic modeling of multifactor construction productivity for equipment-intensive activities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(9), 04018091.
- Ghoddousi, P., Ansari, R., & Makui, A. (2017). A risk-oriented buffer allocation model based on critical chain project management. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 1536-1548.
- Ghodrat, N., Yiu, T. W., Wilkinson, S., Poshdar, M., Talebi, S., Elghaish, F., & Sepasgozar, S. M. (2022). Unintended Consequences of Productivity Improvement Strategies on Safety Behaviour of Construction Labourers; A Step toward the Integration of Safety and Productivity. *Buildings*, 12(3), 317.
- Gibbons, J. D., & Chakraborti, S. (2020). *Nonparametric Statistical Inference* (6th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Golnaraghi, S., Moselhi, O., Alkass, S., & Zangenehmadar, Z. (2020). Modelling construction labour productivity using evolutionary polynomial regression. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 31(2), 207-226.
- González, L., González, V., & Miller, G. (2011a). Investigating the relationship between labor productivity and work-in-process buffers: A Case study. *Proceedings of the 19th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*.
- González, V., & Alarcón, L. F. (2010). *Uncertainty management in repetitive projects using work-in-process buffers*. Germany: Editorial Lambert Academic Publishing.
- González, V., Alarcón, L. F. & Gazmuri, P. (2006). Design of Work in Process Buffers in Repetitive Building Projects: A Case Study, *Proceedings of the 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 165-176. Santiago, Chile.
- González, V., Alarcón, L. F., & Molenaar, K. (2009). Multiobjective design of Work-In-Process buffer for scheduling repetitive building projects. *Automation in Construction*, 18(2), 95-108.

- González, V., Alarcón, L. F., Maturana, S., & Bustamante, J. A. (2011b). Site management of work-in-process buffers to enhance project performance using the reliable commitment model: Case study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(9), 707-715.
- González, V., Rischmoller, L., & Alarcón, L. F. (2004). Design of buffers in repetitive projects: using production management theory and IT tools, *In 4th International Postgraduate Research Conference, University of Salford, Manchester, April*, 1-12. UK.
- Gundes, S. (2011). Exploring the dynamics of the Turkish construction industry using input–output analysis. *Construction Management and Economics*, 29(1), 59-68.
- Gündüz, M., Nielsen, Y., & Özdemir, M. (2013). Quantification of delay factors using the relative importance index method for construction projects in Turkey. *Journal of management in engineering*, 29(2), 133-139.
- Gunduz, M., Nielsen, Y., & Ozdemir, M. (2015). Fuzzy assessment model to estimate the probability of delay in Turkish construction projects. *Journal of Management in Engineering*, 31(4), 04014055.
- Günhan, S., & Arditi, D. (2007). Budgeting owner's construction contingency. *Journal of construction engineering and management*, 133(7), 492-497.
- Guo, S. J. (2002). Identification and resolution of work space conflicts in building construction. *Journal of construction engineering and management*, 128(4), 287-295.
- Gupta, A., Gonzalez, V., & Miller, G. (2012). Understanding the relationship between productivity and buffers in construction: A simulation-based case. *Proceedings of the 20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, California, USA.
- Gurmu, A. T., & Aibinu, A. A. (2017). Construction equipment management practices for improving labor productivity in multistory building construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(10), 04017081.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis* (8th ed.). Boston, MA: Cengage Learning.
- Hamzeh, F. R. (2009). *Improving construction workflow-The role of production planning and control*. University of California, Doctoral dissertation, Berkeley.
- Hamzeh, F., Al Hattab, M., Rizk, L., El Samad, G., & Emdanat, S. (2019). Developing new metrics to evaluate the performance of capacity planning towards sustainable construction. *Journal of cleaner production*, 225, 868-882.
- Han, S., Love, P., & Peña-Mora, F. (2013). A system dynamics model for assessing the impacts of design errors in construction projects. *Mathematical and Computer Modelling*, 57(9-10), 2044-2053.

- Han, S.; Park, M. (2011). Interactive parade game: impact of managerial reactions to workflow variability, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 16, 104-117.
- Handayani, B., N. S. Wisnujati, Budiono, D. Darmawan & Y. Kurniawan. (2021). Environmental Management and Law Enforcement, *Studi Ilmu Sosial Indonesia*, 1(1), 65-76.
- Hanna, A. S., Chang, C. K., Lackney, J. A., & Sullivan, K. T. (2005). Overmanning impact on construction labor productivity. In *Construction Research Congress 2005: Broadening Perspectives*, 1-10.
- Hassan, A., & El-Rayes, K. (2020). Quantifying the interruption impact of activity delays in non-serial repetitive construction projects. *Construction Management and Economics*, 38(6), 515-533.
- Henson, R. K., & Roberts, J. K. (2006). Use of exploratory factor analysis in published research: Common errors and some comment on improved practice. *Educational and Psychological Measurement*, 66(3), 393-416.
- Henson, R. K., Capraro, R. M., & Capraro, M. M. (2004). Reporting practices and use of exploratory factor analysis in educational research journals: Errors and explanations. *Research in the Schools*, 11(2), 61-72.
- Holloway, I., & Wheeler, S. (2010). *Qualitative Research in Nursing and Healthcare* (3rd ed.). Chichester: Wiley-Blackwell.
- Holt, D. (2002). *Statistics Explained: A Guide for Social Science Students*. Maidenhead: Open University Press.
- Holt, D. T. (2014a). Attitudes and the Likert scale: Techniques for measuring attitudes in social sciences research. In *Research Methods for the Social Sciences* (s. 22-25). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Holt, G. D. (2014b). Asking questions, analysing answers: Relative Importance Indices revisited. *Construction Innovation*, 14(1), 2-16.
- Hooper, D. (2012). Exploratory factor analysis. In M. P. Spector, D. Ifenthaler, D. Sampson, & P. Isaias (Eds.), *The Routledge Companion to Research in Education* (s. 167-178). London: Routledge.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory Physics*. Long Grove, IL: Waveland Press.
- Hopp, W. J., and M. L. Spearman. (2001). *Factory physics: Foundations of manufacturing management*. Chicago: McGraw-Hill.
- Hopp, W. J., Pati, N., & Jones, P. C. (2004). Optimal inventory control in a production flow system with failures. *International Journal of Production Research*, 27(8), 1367-1384.

- Horman, M. J. (2000). *Process dynamics: buffer management in building project operations*. University of Melbourne, Doctoral dissertation.
- Horman, M. J., & Thomas, H. R. (2005). Role of inventory buffers in construction labor performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(7), 834-843.
- Howard, M. C. (2016). A review of exploratory factor analysis decisions and overview of current practices: What we are doing and how can we improve?. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 32(1), 51-62.
- Howell, G., Laufer, A., & Ballard, G. (1993). Interaction between subcycles: One key to improved methods. *Journal of construction engineering and management*, 119(4), 714-728.
- Hu, X., Cui, N., & Demeulemeester, E. (2015). Effective expediting to improve project due date and cost performance through buffer management. *International Journal of Production Research*, 53(5), 1460-1471.
- Hu, X., Cui, N., Demeulemeester, E., & Bie, L. (2016). Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk. *European Journal of Operational Research*, 249(2), 717-727.
- Huang, Y., Seck, M. D., & Verbraeck, A. (2011, December). From data to simulation models: component-based model generation with a data-driven approach. In *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, 3719-3729. IEEE.
- Hwang, B. G., Zhao, X., & Yang, K. W. (2019). Effect of BIM on rework in construction projects in Singapore: Status quo, magnitude, impact, and strategies. *Journal of construction engineering and management*, 145(2), 04018125.
- Igwe, C., Hammad, A., & Nasiri, F. (2022). Influence of lean construction wastes on the transformation-flow-value process of construction. *International Journal of Construction Management*, 22(13), 2598-2604.
- Ijomah, T. I., Idemudia, C., Eyo-Udo, N. L., & Anjorin, K. F. (2024). Innovative digital marketing strategies for SMEs: Driving competitive advantage and sustainable growth. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(7), 2173-2188.
- Jahan, A., & Edwards, K. L. (2015). A state-of-the-art survey on the influence of normalization techniques in ranking: Improving the materials selection process in engineering design. *Materials & Design*, 65, 335-342.
- Jamieson, S. (2004). Likert scales: How to (ab) use them?. *Medical education*, 38(12), 1217-1218.
- Jan, S. H., and Ho, S. P. (2006), Construction project buffer management in scheduling planning and control. *Proceedings of the 23rd International Symposium on Robotics and Automation in Construction*, 858-863. Tokyo, Japan.

- Jarkas, A. M., & Bitar, C. G. (2012). Factors affecting construction labor productivity in Kuwait. *Journal of construction engineering and management*, 138(7), 811-820.
- Jarkas, A. M., & Radosavljevic, M. (2013). Motivational factors impacting the productivity of construction master craftsmen in Kuwait. *Journal of Management in Engineering*, 29(4), 446-454.
- Jaśkowski, P., Biruk, S., & Krzemiński, M. (2021). Proactive scheduling of repetitive construction processes to reduce crews idle times and delays. *Archives of Civil Engineering*, 67(4).
- Javanmardi, A., Abbasian-Hosseini, S. A., Liu, M., & Hsiang, S. M. (2016). Analysis of workflow variability's impacts on trade and project performance. *Procedia Engineering*, 145, 281-287.
- Jayawardena, N. I. S. H. A. D. I., Ramachandra, T. H. A. N. U. J. A., & Rotimi, J. A. M. E. S. (2014). Causes and effects of variations on construction projects. *Proc. Int. Struct. Eng. Constr*, 1(1), 483-488.
- Johns, R. (2010). Likert items and scales. *Survey Question Bank: Methods Fact Sheet*, 1, 1-11
- Josephson, P. E., Larsson, B., & Li, H. (2002). Illustrative benchmarking rework and rework costs in Swedish construction industry. *Journal of management in engineering*, 18(2), 76-83.
- Kallio, H., Pietilä, A. M., Johnson, M., & Kangasniemi, M. (2016). Systematic methodological review: developing a framework for a qualitative semi-structured interview guide. *Journal of advanced nursing*, 72(12), 2954-2965.
- Kasim, N., Abidin, N. Z., Zainal, R., Sarpin, N., Abd Rahim, M. H. I., & Saikah, M. (2017). Best practices of Building Information Modelling (BIM) implementation in design phase for construction project. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271 (1).
- Kazaz, A., Ulubeyli, S., & Tuncbilekli, N. A. (2012). Causes of delays in construction projects in Turkey. *Journal of civil Engineering and Management*, 18(3), 426-435.
- Khan, S. and Tzortzopoulos, P., (2015). Improving Design Workflow with the Last Planner System: Two Action Research Studies. *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 568-577. Perth, Australia.
- Khanzadi, M., Nasirzadeh, F., Mir, M., & Nojedehe, P. (2018). Prediction and improvement of labor productivity using hybrid system dynamics and agent-based modeling approach. *Construction Innovation*, 18(1), 2-19.
- Khoshgoftar, M., Bakar, A. H. A., & Osman, O. (2010). Causes of delays in Iranian construction projects. *International Journal of Construction Management*, 10(2), 53-69.

- Kikolski, M. (2017). Study of production scenarios with the use of simulation models. *Procedia Engineering*, 182, 321-328.
- Kim, J., Lee, H., Park, M., & Ryu, H. (2006). Assignment buffer control for construction projects. *Proceedings of the 23rd ISARC, Japan Robot Association*, 872-877. Tokyo.
- Kimpland, S. L. (2009). *2009 Contractor productivity survey results*, FMI Corp., Raleigh, NC.
- Kline, R. B. (2016). *Principles and Practice of Structural Equation Modeling* (4th ed.). New York: Guilford Press.
- Kocakulah, M. C., Kelley, A. G., Mitchell, K. M., & Ruggieri, M. P. (2016). Absenteeism problems and costs: causes, effects and cures. *The International Business & Economics Research Journal*, 15(3), 89.
- Koo, C., Hong, T., & Kim, S. (2015). An integrated multi-objective optimization model for solving the construction time-cost trade-off problem. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(3), 323-333.
- Koro-Ljungberg, M., & Douglas, E. P. (2008). The role of qualitative research in engineering education research. *Journal of Engineering Education*, 97(4), 365-372.
- Koskela, L. (1992). *Application of the New Production Philosophy to Construction*. Stanford, CA: Stanford University.
- Koskela, L. (1999). Management of Production in Construction: A Theoretical View. *Proceedings of the 7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 241-252. California, USA.
- Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction*. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Koskela, L., Ballard, G., & Tommelein, I. (2002). The foundations of lean construction. In R. Best & G. de Valence (Eds.), *Design and Construction: Building in Value* (s. 211–226). Abingdon, VA, USA, and New York: Routledge.
- Koulinas, G. K., Xanthopoulos, A. S., Tsilipiras, T. T., & Koulouriotis, D. E. (2020). Schedule delay risk analysis in construction projects with a simulation-based expert system. *Buildings*, 10 (8), 134.
- Krishnaswamy, K. N., Sivakumar, A. I., & Mathirajan, M. (2006). *Management Research Methodology: Integration of Principles, Methods and Techniques*. New Delhi: Pearson Education.
- KV, P., V, V., & Bhat, N. (2019). Analysis of causes of delay in Indian construction projects and mitigation measures. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 24(1), 58-78.
- Larose, D. T., & Larose, C. D. (2015). *Data Mining and Predictive Analytics* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

- Laslo, Z. (2010). Project portfolio management: An integrated method for resource planning and scheduling to minimize planning/scheduling-dependent expenses. *International journal of project management*, 28(6), 609-618.
- Latilo, A., Uzougbo, N. S., MC, U., & Oduro, P. (2024). Role and effectiveness of advance payment guarantees in construction contracts. *World Journal of Advanced Science and Technology*, 6(01), 088-102.
- Laufer, A., Woodward, H., & Howell, G. A. (1999). Managing the decision-making process during project planning. *Journal of Management in Engineering*, 15(2), 79-84.
- Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Lee, S., Peña-Mora, F., & Park, M. (2006). Reliability and stability buffering approach: Focusing on the issues of errors and changes in concurrent design and construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 132(5), 452-464.
- Leedy, P. D., & Ormrod, J. E. (2001). *Practical Research: Planning and Design* (7th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Lindhard, S. (2014). Understanding the effect of variation in a production system. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(11), 04014051.
- Lindhard, S. M., Hamzeh, F., Gonzalez, V. A., Wandahl, S., & Ussing, L. F. (2019). Impact of activity sequencing on reducing variability. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(3), 04019001.
- Lindhard, S., & Wandahl, S. (2014). Scheduling of large, complex, and constrained construction projects—an exploration of LPS application. *International Journal of Project Organisation and Management*, 6(3), 237-253.
- Lindlof, T. R., & Taylor, B. C. (2017). *Qualitative communication research methods*. Sage publications.
- Ling, F. Y. Y. (2004). How project managers can better control the performance of design-build projects. *International Journal of Project Management*, 22(6), 477-488.
- Liu, D. Y., Chen, J. G., & Peng, W. (2012). A new buffer setting method based on activity attributes in construction engineering. *Applied Mechanics and Materials*, 174, 3274-3281.
- Liu, M. & Ballard, G. (2009). Factors Affecting Work Flow Reliability - A Case Study, *Proceedings of the 17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 177-186. Taipei, Taiwan.
- Liu, M., Ballard, G., & Ibbs, W. (2011). Work flow variation and labor productivity: Case study. *Journal of management in engineering*, 27(4), 236-242.
- Loganathan, S., Forsythe, P., & Kalidindi, S. N. (2018). Work practices of onsite construction crews and their influence on productivity. *Construction economics and building*, 18(3), 18-39.

- Love, P. E., & Smith, J. (2003). Benchmarking, benchaction, and benchlearning: Rework mitigation in projects. *Journal of Management in Engineering*, 19(4), 147-159.
- Love, P., & Smith, J. (2018). Unpacking the ambiguity of rework in construction: Making sense of the literature. *Civil engineering and environmental systems*, 35(1-4), 180-203.
- Mahamid, I., Bruland, A., & Dmaidi, N. (2012). Causes of delay in road construction projects. *Journal of management in engineering*, 28(3), 300-310.
- Marhani, M. A., Jaapar, A., Bari, N. A. A., & Zawawi, M. (2013). Sustainability through lean construction approach: A literature review. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 101, 90-99.
- Marović, I., & Hanak, T. (2017, October). Selection of adequate site location during early stages of construction project management: A multi-criteria decision analysis approach. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251(1), 012044. IOP Publishing.
- Mathers, N., Fox, N., & Hunn, A. (2007). *Surveys and Questionnaires*. The NIHR RDS for the East Midlands/Yorkshire & the Humber.
- Mohammadi, M., & Spross, J. (2023, October). Modeling uncertainty of activity duration in probabilistic time estimation of tunneling projects. In *ISRM Congress (pp. ISRM-15CONGRESS)*.
- Montalbán-Domingo, L., Casas-Rico, J., Alarcón, L. F. and Pellicer, E. (2024). Influence of the experience of the project manager and the foreman on project management's success in the context of LPS implementation. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1), 102324.
- Moonseo, P., & Feniosky, P. M. (2004). Reliability buffering for construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 130(5), 626-637.
- Mossman, A. (2005). Last Planner overview: collaborative program coordination. *Lean Construction Institute*, 24-67.
- Musarat, M. A., Alaloul, W. S., & Liew, M. S. (2021). Impact of inflation rate on construction projects budget: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 407-414.
- Musarat, M. A., Alaloul, W. S., Liew, M. S., Maqsoom, A. and Qureshi, A. H. (2020a). Investigating the impact of inflation on building materials prices in construction industry. *Journal of Building Engineering*, 32, 101485.
- Musarat, M. A., Alaloul, W. S., Qureshi, A. H. and Altaf, M. (2020b). Inflation rate and construction materials prices: Relationship investigation. *2020 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)*, 387-390, IEEE.

- Ng, S. T., & Zhang, Y. (2008). Optimizing construction time and cost using ant colony optimization approach. *Journal of construction engineering and management*, 134(9), 721-728.
- Öcal, M. E., Oral, E. L., Erdis, E., & Vural, G. (2007). Industry financial ratios—application of factor analysis in Turkish construction industry. *Building and environment*, 42(1), 385-392.
- Olds, B. M., Moskal, B. M., & Miller, R. L. (2005). Assessment in engineering education: Evolution, approaches and future collaborations. *Journal of Engineering Education*, 94(1), 13-25.
- Paige, K. N. (2002). How low can you go? Using simulation to determine appropriate inventory levels. *Institute of Industrial Engineering Lean Manufacturing Solutions*.
- Palaniappan, S., Walsh, K. D., Sawhney, A., & Bashford, H. H. (2007). Special purpose simulation template for workflow analysis in construction. *In 2007 Winter Simulation Conference*, 2090-2098.
- Pantouvakis, J. P., & Manoliadis, O. G. (2006). A practical approach to resource-constrained project scheduling. *Operational research*, 6, 299-309.
- Park, M., & Peña-Mora, F. (2004). Reliability buffering for construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 130(5), 626-637.
- Péter, J. (2022). The concept of reliability in social science research: Methodological approaches and considerations. *Social Science Methodology Journal*, 15(3), 245-259.
- Peters, E., Subar, K., & Martin, H. (2019). Late payment and nonpayment within the construction industry: Causes, effects, and solutions. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 11(3), 04519013.
- Pett, M. A., Lackey, N. R., & Sullivan, J. J. (2003). *Making sense of factor analysis: The use of factor analysis for instrument development in health care research*. SAGE Publications.
- Pierce, R. (2008). *Research methods in politics: A practical guide*. Sage Publications.
- Poshdar, M. (2015). *An Advanced Framework to Manage Uncertainty and Buffers in Construction*. University of Auckland, Doctoral dissertation, New Zealand.
- Poshdar, M., Gonzalez, V. & B, K. (2018a). Buffer Management in Construction - a New Zealand Study. *Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 818-828. Chennai, India.
- Poshdar, M., González, V. A., Raftery, G. M., Orozco, F., & Cabrera-Guerrero, G. G. (2018b). A multi-objective probabilistic-based method to determine optimum allocation of time buffer in construction schedules. *Automation in Construction*, 92, 46-58.

- Prasad, K. V., Vasugi, V., Venkatesan, R. and Bhat, N. (2019). Analysis of causes of delay in Indian construction projects and mitigation measures. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 24(1), 58-78.
- Queirós, A., Faria, D., & Almeida, F. (2017). Strengths and limitations of qualitative and quantitative research methods. *European journal of education studies*.
- Rabionet, S. E. (2011). How I learned to design and conduct semi-structured interviews: an ongoing and continuous journey. *Qualitative report*, 16(2), 563-566.
- Radjawane, L. E., & Darmawan, D. (2022). Construction Project Worker Satisfaction Reviewing from the Role of the Work Environment and Leadership. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, 1(3), 36-40.
- Rahman, H. A., Wang, C., & Lim, I. Y. W. (2012). Waste processing framework for non-value-adding activities using lean construction. *Journal of Frontiers in Construction engineering*, 1(1), 8-13.
- Ranadewa, K., Sandanayake, Y. & Siriwardena³, M. (2018). Enabling Lean Among Small and Medium Enterprise (SME) Contractors in Sri Lanka. *Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 392-401. Chennai, India.
- Rashid, K., Louis, J., & Swanson, C. (2020). Optimizing labor allocation in modular construction factory using discrete event simulation and genetic algorithm. In *2020 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2569-2576. IEEE.
- Rashidian, S., Drogemuller, R., Omrani, S. and Banakar, F. (2024). A review of the interrelationships and characteristics of Building Information Modeling, Integrated Project Delivery and Lean Construction maturity models. *Smart and Sustainable Built Environment*, 13 (3), 584-608.
- Reio, T. G., & Shuck, B. (2015). Exploratory factor analysis: Implications for theory, research, and practice. *Advances in Developing Human Resources*, 17(1), 12-25.
- Risner, R. (2010). Auditing construction contingency. *Association of healthcare internal auditors*, 37-38.
- Rohani, M., Fan, M., & Yu, C. (2014). Advanced visualization and simulation techniques for modern construction management. *Indoor and Built Environment*, 23(5), 665-674.
- Rubin, H. J., & Rubin, I. S. (2011). *Qualitative interviewing: The art of hearing data*. sage.
- Ruslin, R., Mashuri, S., Rasak, M. S. A., Alhabsyi, F., & Syam, H. (2022). Semi-structured Interview: A methodological reflection on the development of a qualitative research instrument in educational studies. *IOSR Journal of Research & Method in Education (IOSR-JRME)*, 12(1), 22-29.

- Russell, M. M., Howell, G., Hsiang, S. M. & Liu, M. (2012). Causes of Time Buffer in Construction Project Task Durations, *Proceedings of the 20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, California, USA
- Russell, M. M., Hsiang, S. M., Liu, M., & Wambeke, B. (2014). Causes of time buffer and duration variation in construction project tasks: Comparison of perception to reality. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(6), 04014016.
- Russell, M. M., Liu, M., Howell, G., & Hsiang, S. M. (2015). Case studies of the allocation and reduction of time buffer through use of the last planner system. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(2), 04014068.
- Ruth, N. (2022). *Contract management practices and success of road construction projects in Uganda*. Doctoral dissertation, Kampala International University, College of Humanities and Social Sciences.
- Sacks, R., & Harel, M. (2006). An economic game theory model of subcontractor resource allocation behaviour. *Construction management and economics*, 24(8), 869-881.
- Sacks, R., Radosavljevic, M., & Barak, R. (2010). Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction. *Automation in construction*, 19(5), 641-655.
- Sakamoto, M. Horman, M. J. and Thomas, H. R. (2002), A study of the relationship between buffers and performance in construction. *Proceedings of the 10th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, Gramado, Brazil.
- Salazar, L. A., Ballard, G., Arroyo, P., & Alarcón, L. F. (2022). Development of a commitment management system for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(12), 05022012.
- Salhab, D., Møller, D. E., Lindhard, S. M., Hamzeh, F., Randrup, M., & Pilgaard, A. (2022). Accounting for variability: identifying critical activities as a supplement to the critical path. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(5), 04022019.
- Santos, J. R. A. (1999). Cronbach's alpha: A tool for assessing the reliability of scales. *The journal of Extension*, 37(2), 15.
- Sargent, R. G. (2010, December). Verification and validation of simulation models. In *Proceedings of the 2010 winter simulation conference* (pp. 166-183). IEEE.
- Sargent, R. G. (2015, December). An introductory tutorial on verification and validation of simulation models. In *2015 winter simulation conference (WSC)* (pp. 1729-1740). IEEE.
- Saurin, T. A. (2017). Removing Waste While Preserving Slack: The Lean and Complexity Perspectives. *Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 209-216. Heraklion, Greece.

- Schober, P., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768.
- Shaour, E. N. (2022), The impact of adopting lean construction in Egypt: Level of knowledge, application, and benefits, *Ain Shams Engineering Journal*, 13 (2), 101551.
- She, B., Chen, B., & Hall, N. G. (2021). Buffer sizing in critical chain project management by network decomposition. *Omega*, 102, 102382.
- Shehab, L., Al Hattab, M., Khalife, S., El Samad, G., Abbas, Y., & Hamzeh, F. (2023). Last Planner System Framework to Assess Planning Reliability in Architectural Design. *Buildings*, 13(11), 2684.
- Shen, L. J. & Chua, D. K. (2005). Impact of Variability on Construction Schedules. *Proceedings of the 13th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 375-383. Sydney, Australia.
- Sigalov, K., Ye, X., König, M., Hagedorn, P., Blum, F., Severin, B., ... & Groß, D. (2021). Automated payment and contract management in the construction industry by integrating building information modeling and blockchain-based smart contracts. *Applied sciences*, 11(16), 7653.
- Singh, A. (2003). Accelerated work-schedule design considering efficiency losses for overtime and overmanning. *Engineering. Construction and Architectural Management*, 10(5), 312-321.
- Singh, A. S., & Masuku, M. B. (2014). Sampling techniques & determination of sample size in applied statistics research: An overview. *International Journal of Economics, Commerce and Management*, 2(11), 1-22.
- Small, E. P., & Baqer, M. (2016). Examination of job-site layout approaches and their impact on construction job-site productivity. *Procedia engineering*, 164, 383-388.
- Soe, N. C., & Cho, A. M. (2014). Current Practices on Labor Management in Building Construction Projects. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 3(10).
- Soemardi, B. W. and Pribadi, K. S. (2018, October). Developing construction industry human resources in Indonesia: Empowering the informal construction sector foreman for the industry. *Theme Paper: 2018 Asia Construct Conference*, Kuching, Malaysia.
- Srinivasan, P., Kumar, K., & Nagaraj, A. (2017). *Research Methodology: A Practical and Scientific Approach*. New Century Publications.
- Srour, I. M., Abdul-Malak, M. A. U., Yassine, A. A., & Ramadan, M. (2013). A methodology for scheduling overlapped design activities based on dependency information. *Automation in Construction*, 29, 1-11.

- Stapor, K. (2020). *Introduction to Statistics: Descriptive and Inferential Statistics*. Statistics for Data Science.
- Su, Y., Lucko, G., & Isaac, S. (2024). Cruciality: Role of Network Topology in Schedule Resilience to Delay Propagation. In *Construction Research Congress 2024*, 228-237.
- Suhr, D. D. (2006). Exploratory or confirmatory factor analysis?. *Proceedings of the Thirty-first Annual SAS® Users Group International Conference*, Cary, NC: SAS Institute Inc. Available at: <https://support.sas.com/resources/papers/proceedings/proceedings/sugi31/200-31.pdf>
- Sümer, L., & Arditi, D. (2022). Turkish building construction contracts vs. FIDIC contracts. *Contract*, (30).
- Sundar, R., Balaji, A. N., & Kumar, R. S. (2014). A review on lean manufacturing implementation techniques. *Procedia engineering*, 97, 1875-1885.
- Sutanapong, C., & Louangrath, P. (2015a). Sample size estimation for online surveys: Calculation and adjustment procedures. *Proceedings of the International Conference on Business and Industrial Research*, 185-190.
- Sutanapong, C., & Louangrath, P. (2015b). *Introductory Statistics for Non-Statistics Majors*. Educational Publishing.
- Tafazzoli, M., Mousavi, E., & Kermanshachi, S. (2020). Opportunities and challenges of green-lean: An integrated system for sustainable construction. *Sustainability*, 12(11), 4460.
- Taguchi, N. (2018). Description and explanation of pragmatic development: Quantitative, qualitative, and mixed methods research. *System*, 75, 23-32.
- Taherdoost, H. (2016). Sampling methods in research methodology; how to choose a sampling technique for research. *International Journal of Academic Research in Management (IJARM)*, 5(2), 18-27.
- Taherdoost, H., Sahibuddin, S., & Jalaliyoon, N. (2014). Exploratory Factor Analysis; Concepts and Theory. In *Advances in Applied and Pure Mathematics*, 375-382. WSEAS Press.
- Taiwo, R., Hussein, M., & Zayed, T. (2022). An integrated approach of simulation and regression analysis for assessing productivity in modular integrated construction projects. *Buildings*, 12(11), 2018.
- Takim, R. (2009). The management of stakeholders' needs and expectations in the development of construction project in Malaysia. *Modern Applied Science*, 3(5), 167-175.
- Tan, T., Mills, G., Papadonikolaki, E., & Liu, Z. (2021). Combining multi-criteria decision making (MCDM) methods with building information modelling (BIM): A review. *Automation in Construction*, 121, 103451.

- Thomas, H. R. (2000). *Principles of Construction Labor Productivity Measurement and Processing*. Rep. No. 2K14. University Park, PA: Pennsylvania Transportation Institute.
- Thomas, H. R., Horman, M. J., De Souza, U. E. L., & Zavşski, I. (2002). Reducing variability to improve performance as a lean construction principle. *Journal of Construction Engineering and management*, 128(2), 144-154.
- Thomas, H. R., Horman, M. J., Minchin Jr, R. E., & Chen, D. (2003). Improving labor flow reliability for better productivity as lean construction principle. *Journal of construction engineering and management*, 129(3), 251-261.
- Thomas, H. R., Riley, D. R., & Messner, J. I. (2005). Fundamental principles of site material management. *Journal of construction engineering and management*, 131(7), 808-815.
- Thomas, H. R., Riley, D. R., & Sinha, S. K. (2006). Fundamental principles for avoiding congested work areas—A case study. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 11(4), 197-205.
- Thompson, B. (2009). *Exploratory and Confirmatory Factor Analysis: Understanding Concepts and Applications*. Washington, DC: American Psychological Association.
- Tommelein, I. D. & Weissenberger, M. (1999). More Just-in-Time: Location of Buffers in Structural Steel Supply and Construction Processes. *Proceedings of the 7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 109-120
- Tommelein, I. D. (2003). Acknowledging variability and uncertainty in product and process development. *4D CAD and Visualization in Construction*, 165-193.
- Tommelein, I. D. (2020). Takting the Parade of Trades: Use of Capacity Buffers to Gain Work Flow Reliability. *Proceedings of the 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 421-432. California, USA.
- Tommelein, I. D., Riley, D. R., & Howell, G. A. (1999). Parade game: Impact of work flow variability on trade performance. *Journal of construction engineering and management*, 125(5), 304-310.
- Tukel, O. I., Rom, W. O., & Eksioglu, S. D. (2006). An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling. *European journal of operational research*, 172(2), 401-416.
- Udawatta, N., Zuo, J., Chiveralls, K. and Zillante, G. (2015). Improving waste management in construction projects: An Australian study. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 73-83.
- Ugurlu, D., Harris, N., & Demirkesen, S. (2021). A framework for implementing lean in the Turkish construction industry. *Journal of Construction Engineering*, 4(3), 117-133.

- Ulewicz, R., & Ulewicz, M. (2020). Problems in the Implementation of the Lean Concept in the Construction Industries. *Proceedings of CEE 2019: Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering*. 495-500.
- Umar, A. A., Rizeiqi, R. K. A., & Badr, A. (2020). Major causes assessment of construction delays. *J. Eng. Proj. Prod. Manag*, 10(3).
- Uwakweh, B. O. (2005). Effect of foreman on construction apprentice. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(12), 1320-1327.
- Van der Eijk, C., & Rose, J. (2015). Risky business: factor analysis of survey data—assessing the probability of incorrect dimensionalisation. *PloS one*, 10(3), e0118900.
- van der Meer, J., Hartmann, A., van der Horst, A., & Dewulf, G. (2020). Multi-criteria decision analysis and quality of design decisions in infrastructure tenders: a contractor's perspective. *Construction management and economics*, 38(2), 172-188.
- Wambeke, B. W. (2011). *Identifying, prioritizing, and reducing variation of construction related tasks*. North Carolina State University.
- Wambeke, B. W., Hsiang, S. M., & Liu, M. (2011). Causes of variation in construction project task starting times and duration. *Journal of construction engineering and management*, 137(9), 663-677.
- Wandahl, S., Neve, H. H. & Lerche, J. (2021). What a Waste of Time. *Proceedings of the 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 157-166. Lima, Peru.
- Wang, C., Yap, J. B. H., Wood, L. C., & Abdul-Rahman, H. (2019). Knowledge modelling for contract disputes and change control. *Production planning & control*, 30(8), 650-664.
- Watkins, M., Mukherjee, A., Onder, N., & Mattila, K. (2009). Using agent-based modeling to study construction labor productivity as an emergent property of individual and crew interactions. *Journal of construction engineering and management*, 135(7), 657-667.
- Widaman, K. F. (2012). *Exploratory factor analysis and confirmatory factor analysis in psychological research*. In *Handbook of Psychology*, Second Edition (pp. 216-244).
- Williams, B., Onsman, A., & Brown, T. (2010). Exploratory factor analysis: A five-step guide for novices. *Australasian Journal of Paramedicine*, 8(3).
- Williams, C. (2007). Research methods. *Journal of Business & Economic Research*, 5(3), 65-72.
- Wireman, T. (2005). *Developing performance indicators for managing maintenance*, Industrial Press, New York.
- Womack, J.P., Jones, D.T., (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. Free Press, New York.

- Wu, I. C., Borrmann, A., Beißert, U., König, M., & Rank, E. (2010). Bridge construction schedule generation with pattern-based construction methods and constraint-based simulation. *Advanced Engineering Informatics*, 24(4), 379-388.
- Xue, X. F. and Chen, J. G. (2013), Improving the project performance based on continuous workflow and reliable planning, *Applied Mechanics and Materials*, 357, 2228-2232.
- Yap, J. B. H., Abdul-Rahman, H., Wang, C., & Skitmore, M. (2018). Exploring the underlying factors inducing design changes during building production. *Production Planning & Control*, 29(7), 586-601.
- Yildizel, S. A., Dogan, E., Kaplan, G. and Ergut, A. (2016). Major constructional dispute causes in Turkey. *Archives of Civil Engineering*, 62(4), 193-204.
- Yuan, H. (2013). Critical management measures contributing to construction waste management: Evidence from construction projects in China. *Project Management Journal*, 44(4), 101-112.
- Zankoul, E. F. (2015). *Simulation, 5D visualization and optimization of on-shore wind farm construction*. Doctoral dissertation.
- Zarghami, S. A., Gunawan, I., Corral de Zubielqui, G., & Baroudi, B. (2020). Incorporation of resource reliability into critical chain project management buffer sizing. *International Journal of Production Research*, 58(20), 6130-6144.
- Zhang, J., & Wan, D. (2019). Integrated buffer monitoring and control based on grey neural network. *Journal of the Operational Research Society*, 70(3), 516-529.
- Zhang, J., & Wan, D. (2021). Determination of early warning time window for bottleneck resource buffer. *Annals of Operations Research*, 300, 289-305.
- Zhang, J., Song, X., & Díaz, E. (2017). Critical chain project buffer sizing based on resource constraints. *International Journal of Production Research*, 55(3), 671-683.
- Zhang, J., Song, X., Chen, H., & Shi, R. (2015). Optimisation of critical chain sequencing based on activities' information flow interactions. *International Journal of Production Research*, 53(20), 6231-6241.
- Zhao, Y., Cui, N., & Tian, W. (2020). A two-stage approach for the critical chain project rescheduling. *Annals of Operations Research*, 285, 67-95.

6. EKLER

Ek 1-A. İngilizce Anket

Questionnaire



Karadeniz Teknik Üniversitesi
Faculty of Engineering
Construction Management

Subject: questionnaire survey about: “**Assessment of Waste Reduction in Lean Construction of Building Projects through Buffer Management Using a Computer Simulation Approach**” for submitting a thesis in partial fulfillment of the requirements for the doctorate (PhD) degree in Construction Management.

Research aim: to develop a clear understanding about the relationship between waste minimization and buffer management in Turkish building projects

Target group: Project executives and managers who are working in the field of supervision and construction (*Project managers, laborers, and foremen*). The questionnaire consists of two main sections. *Filling in the questionnaire does not require a prior knowledge about buffering*, but what is required is the answer and evaluation of certain points with precision and objectivity according to your point of view and expertise in the field of construction. The validity of the questionnaire results is completely depending on your answer accuracy. Thank you in advance for your valuable time and contribution to this research work.

Kind Regards,
Rajaa AbuElaish,
Phd. Candidate in Construction Management, Ktü
(2023)

Part 1: general information

Please tick (✓) the appropriate option in the following questions:

Work city									
Current field -present job	Project manager	Site manager	Technical office	Field engineer	Control engineer	Foremen		Worker	
Specialization	Engineer					Workers			
	Architect		Civil	Mechanical	Electrical	Concrete	Steel	Finishing	Other
Nature of the workplace	Consultant		Government sector	Owner	Contractor	Subcontractor			
Years of experience in construction field	Less than 5 years		From 5 to less than 10 years	10 years and more					

Part 2: Causes of variability (difference in what was planned and what actually happened) in Turkish building projects

How would you rate the effect level of the following cause on project variability? Please tick (✓) in front of the number that reflects your point of view.

Factor	Very low	Low	neutral	High	Very high
Prerequisite work					
Inspections for previously completed work					
Poor contract management					
Obtaining required permits for the work to begin					
Completion of previous work (work to be done before yours is not done yet)					
Sequencing of planned activities					
Rework being required owing to the quality of previous work					
Poor quality of previous work (though not to a level that requires rework)					
Detailed design and work method					
Errors in design and/or drawings					
Work complexity					
Work method is not well planned					
Insufficient project implementation details					
Manpower (labor)					
Lack of worker/crew skills/experience to perform the task					
Poor productivity					
People arriving late and/or leaving early because of illness, injury, family or personal reason					
Low morale and/or lack of motivation					
Getting moved worker to another job/task before completing his job					

How would you rate the effect level of the following cause on project variability? Please tick (✓) in front of the number that reflects your point of view.

Factor	Very low	Low	neutral	High	Very high
Crew size is inadequate					
Inefficiencies associated with new personnel turnover					
Equipment and tools					
Unavailability of appropriate equipment					
Lack of equipment related technical training					
Equipment breakdowns					
Equipment allocation problem					
Materials and components					
Material needs to be moved to where you need it					
Excess time of the material procurement					
Problems in material inventories (Accumulation or damaged material)					
Error in material size					
Error in material type					
Inflation (Escalation of material prices)					
Worksite layout					
Overcrowded work area/job site congestion					
Difficult access to work area					
Management/supervision/information flow					
Irregular financing and payment for completed works					
Change in scope of work					
Not flexible or unrealistic work schedule					
Poor or miscommunication between project stakeholders (project manager, foreman, workers, etc.)					
Slow responses to questions related to the design or drawings					
Coordination between different trades					
Poor contract management					
Cultural resistance to change					
External conditions					
Weather impacts (excessive heat, cold, wind, rain)					

Ek 1-B. Türkçe Anket

Anket



Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği ABD

Konu: “Bina Projelerinin Yalın İnşaatında Tampon Yönetimiyle İsraf Azaltımının Bilgisayar Simülasyonu Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi” Konulu Anket Çalışması – İnşaat Yönetimi Doktora (PhD) Derecesi Gerekliliklerinin Bir Kısımının Tamamlanması için Tez Sunumu.

Araştırmanın amacı: Türk inşaat projelerinde atık minimizasyonu ve tampon(buffer) yönetimi arasındaki ilişki hakkında net bir anlayış geliştirmek

Hedef Grup: Kontrollük ve inşaat alanında çalışan proje yöneticileri ve yürütücüleri (ustabaşı ve işçi) anketin uygulanacağı gruptur. Anket iki ana bölümden oluşmaktadır. **Anketi doldurmak için tamponlama hakkında önceden bilgi sahibi olmanız gerekmekte;** ancak inşaat alanındaki uzmanlığınıza ve bakış açınıza göre soruları sizlere göre doğru ve tarafsız olarak cevaplamanız ve değerlendirmeniz gerekmektedir. Anket sonuçlarının geçerliliği tamamen cevaplarınızın doğruluğuna bağlıdır. Değerli vaktinizi ayırdığınız ve bu araştırma çalışmasına katkılarınız için şimdiden teşekkür ederiz.

Saygılarımla,

Rajaa Abu Elaish,

Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapım Yönetimi Bilim Dalı Doktora Öğrencisi

(2023)

1. Aşama: Genel Bilgiler

Lütfen aşağıdaki sorularda uygun seçeneği (✓) işaretleyiniz:

Çalıştığınız şehir								
Mevcut iş	OProje müdürü	OŞantiye şefi	OTeknik ofisi	OSaha mühendisi	OKontrol mühendisi	OFormen /Ustabaşı		Oİşçi
Uzmanlık alanı	Mühendis					İşçi		
	OMimar	Oİnşaat Müh.	OMakine Müh.	OElektrik Müh.	OBetonarme İşleri	OÇelik İşleri	Oİnce İşler	ODiğer
Çalışılan firma alanı	OMüşavir Firma (Danışmanlık)	OKamu	OMal sahibi	OYüklenici	OAlt yüklenici			
İnşaat alanındaki tecrübe	O5 yıldan az	O5 ile 10 yıl arası	O10 yıldan fazla					

2. Aşama: Türk inşaat projelerinde değişkenliğin nedenleri (Aktivitelerin planlanan ve gerçekleşen süreçleri arasındaki zaman, maliyet ve uygulanan yöntem vb. farklılıklar)

Aşağıda verilen nedenlerin, proje değişkenliği üzerindeki etki derecesini nasıl değerlendirirsiniz?

Lütfen bakış açınızı yansıtan seçeneğe (✓) işareti koyunuz.

Faktör/Etken	Çok Az	Az	Orta	Yüksek	Çok Yüksek
Ön koşullu/Birbirine bağlı işler					
Inspections for previously completed work (for example: quality test)					
Obtaining required permits for the work to begin					
Completion of previous work					
Sequencing of planned activities					
Rework being required owing to the quality of previous work					
Poor quality of previous work (though not to a level that requires rework)					
Detaylı tasarım ve çalışma yöntemi					
Tasarım ve/veya çizimlerdeki hatalar					
İşin zorluğu					
İyi planlanmamış çalışma yöntemi					
Uygulama projelerinin yeterince detaylandırılmaması					
İnsan gücü (İşçi)					
İşçilerin/ekiplerin beceri/tecrübe/eğitim eksikliği					
Düşük üretkenlik					
Hastalık, yaralanma, ailevi veya kişisel sebeplerden dolayı geç kalma ve/veya işten erken ayrılma					
Moral ve/veya motivasyon eksikliği					
Üzerinde çalıştığınız iş tamamlanmadan önce başka bir işe/göreve geçmek					

Aşağıda verilen nedenlerin, proje değişkenliği üzerindeki etki derecesini nasıl değerlendirirsiniz?
Lütfen bakış açınızı yansıtan seçeneğe (✓) işareti koyunuz.

Faktör/Etken	Çok Az	Az	Orta	Yüksek	Çok Yüksek
Ekip sayısının yetersizliği					
Yeni personele işin devredilmesi ile ilgili verimsizlikler					
Ekipman ve araçlar					
Uygun ekipmanın bulunmaması					
Ekipman arızaları					
Ekipman için teknik eğitimin yetersizliği					
Aktiviteler için ekipman dengelenmesi problemi					
Malzemeler ve bileşenler					
Malzemenin şantiye sahası içerisinde ihtiyaç duyduğunuz yere taşınması					
Malzemenin tedarik süresinin fazlalığı					
Malzemelerin depolanma problemleri (Çok fazla veya bozuk malzeme depolama)					
Malzeme boyutunda hata					
Malzeme tipinde hata					
Enflasyon (Malzeme fiyatlarındaki artış)					
Şantiye sahası					
Aşırı kalabalık çalışma alanı/şantiye tıkanıklığı					
Şantiye sahasına zor erişilmesi					
Yönetim/denetim/bilgi akışı					
Detaylı sözleşme olmaması					
Tamamlanan işler için düzensiz finansman ve ödeme					
Tasarım veya çizimle ilgili sorulara geç cevaplar verilmesi					
Değişime karşı kültürel direnç (Yeni teknolojilerin kullanılmaması vb.)					
Farklı yükleniciler arasındaki koordinasyon eksikliği					
Esnek ve gerçekçi olmayan iş programı					
İşin kapsamındaki değişiklikler					
Proje paydaşları (proje müdürü, şantiye şefi, ustabaşı, işçiler vb.) arasındaki kötü veya eksik iletişim					
Dış ortam koşulları					
Kötü hava şartları (Aşırı sıcak, soğuk, rüzgar, yağmur vb.)					

ÖZGEÇMİŞ

Rajaa Abuelaish, 2015 yılında Gazze İslam Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Mezuniyetinin ardından aynı üniversitede İnşaat Yönetimi alanında yüksek lisans eğitimine başladı. Bu süreçte, Gazze İslam Üniversitesi'nde öğretim asistanı olarak görev aldı ve lisans öğrencilerine temel mühendislik derslerinde destek sağladı. Daha sonra, Filistin Kamu İşleri ve İskan Bakanlığı'nda altyapı projelerinin planlanması, yönetimi ve uygulama süreçlerinde aktif bir rol oynadı.

Abuelaish'in akademik çalışmaları, inşaat yönetiminde verimliliği artırmayı hedefleyen Yalın İnşaat (Lean Construction) yaklaşımına odaklanmıştır. Yüksek lisans eğitimi sırasında yalın inşaat ve yönetim süreçleri üzerine araştırmalar yürütmüş ve bu alanda çeşitli uluslararası dergi ve konferanslarda makaleleri yayımlanmıştır. Doktora çalışmasında ise yalın inşaat yaklaşımına Tampon Yönetimi (Buffer Management) kavramını entegre ederek bu alandaki yenilikçi araştırmalara katkıda bulunmayı amaçlamıştır. Araştırmaları, tampon yönetiminin atıkların azaltılmasında ve proje performansının artırılmasında etkili bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Abuelaish, yukarıda değinilen akademik uzmanlıklarının yanı sıra, ileri düzeyde İngilizce bilgisine sahip olup inşaat projelerinde kullanılan AutoCAD, SPSS, AnyLogic gibi mühendislik ve simülasyon yazılımlarını aktif olarak kullanmaktadır.

Gelecekte, inşaat sektöründe yalın inşaat ve tampon yönetimi üzerine yaptığı çalışmalarla uluslararası düzeyde daha fazla katkıda bulunarak sektörün verimliliğini artırmayı ve akademik literatüre yenilikçi çözümler kazandırmayı amaçlamaktayım.