

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK TEKNOLOJİSİNİN KALIPÇI USTALARI TARAFINDAN MERDİVEN
KALIBI UYGULAMASINDA KULLANILMASININ, USTALARIN UZAMSAL ALGILARINA,
UYGULAMA SÜRELERİNE VE UYGULAMA HATALARINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İlker Baki ALKAN

**MART 2025
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK TEKNOLOJİSİNİN KALIPÇI USTALARI TARAFINDAN
MERDİVEN KALIBI UYGULAMASINDA KULLANILMASININ, USTALARIN UZAMSAL
ALGILARINA, UYGULAMA SÜRELERİNE VE UYGULAMA HATALARINA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

İlker Baki ALKAN

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 / 03 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 21 / 03 / 2025

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin Kalıpcı Ustaları Tarafından Merdiven Kalıbı Uygulamasında Kullanılmasının, Ustaların Uzamsal Algılarına, Uygulama Sürelerine ve Uygulama Hatalarına Etkilerinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmalarım sırasında bana her zaman destek olan, bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren, bana olan inancı, güveni ve desteği ile en büyük motivasyon kaynağım olan, öneri ve hayalleri ile ufkumu açan, değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA’ya teşekkür ederim. Ayrıca yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime önemli katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Vedat TOĞAN’a, Doç. Dr. Ekrem BAHÇEKAPILI’ya, Prof. Dr. Esin ERGEN PEHLEVAN’a ve Doç. Dr. Serkan KIVRAK’a teşekkür ederim.

Doktora tez sürecim boyunca bana her zaman destek olan, sabırla yanımda duran, yoğun çalışma temposu nedeniyle zaman zaman ihmal etmek zorunda kaldığım sevgili eşim Tülay ALKAN’a ve canım çocuklarım Ayşe Hatun ALKAN’a ve Amine ALKAN’a minnettarım.

Doktora tez çalışmalarım boyunca hem çalışma saatleri konusunda hem de fiziki imkanlar sağlayarak bana destek olan, profesyonel çalışma hayatımdaki değerli müdürüm Erdem HOŞER’e de teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmalarımın saha çalışmalarını gerçekleştirebilmem için uygun alanın temini konusunda bana destek olan değerli amcam Şenol ALKAN’a en içten teşekkürlerimi sunarım. Deneme çalışmalarında bulunup geri bildirimler vererek ve malzeme hazırlık sürecinde ahşap ayıklama işine yardımcı olarak çalışmaya katkı sağlayan Emre TULUM’a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarım boyunca bana desteklerini esirgemeyen, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, her kararında arkamda olan babam Ahmet ALKAN’a ve annem Hatun ALKAN’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İlker Baki ALKAN

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin Kalıpçı Ustaları Tarafından Merdiven Kalıbı Uygulamasında Kullanılmasının, Ustaların Uzamsal Algılarına, Uygulama Sürelerine ve Uygulama Hatalarına Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri kendim yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/03/2025

İlker Baki ALKAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Taraması	4
1.2.1. Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin İnşaat Sektöründeki Genel Kullanım Alanları	4
1.2.2. Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin İnşaat Montaj Sürecine Adaptasyonu.....	11
1.3. Çalışmanın Amacı Kapsamı ve Araştırma Soruları	32
1.4. İnşaat Sektöründe Kullanılabilecek Dijital Ürünler	35
1.5. Artırılmış Gerçeklik Teknolojisi ve Gelişimi.....	38
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	40
2.1. Ön Çalışmalar.....	40
2.2. Yöntem	50
2.2.1. İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Merdiven Kalıbı Uygulama Projelerinin Oluşturulması	51
2.2.2. Artırılmış Gerçeklik Uygulamasının Geliştirilmesi	57
2.2.3. Kontrollü Deneylerin Yapılması	70
2.2.4. İstatistiksel Analizlerin Yapılması	82
3. BULGULAR.....	83
3.1. Uygulama Süreleri ve Analizleri	83
3.2. Uygulama Hata Miktarları ve Analizleri.....	86
3.3. Değerlendirme Anketi Sonuçları.....	91
4. TARTIŞMA	93

4.1. Uygulama Süreleri.....	93
4.2. Hata Miktarları	99
4.3. Anket Sonuçları.....	104
5. SONUÇLAR.....	108
6. ÖNERİLER.....	110
7. KAYNAKLAR	112
8. EKLER.....	120
8.1. Ek 1. Artırılmış Gerçeklik Grubu Deneyim Anketi	120
ÖZGEÇMİŞ.....	124



Doktora Tezi

ÖZET

ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK TEKNOLOJİSİNİN KALIPÇI USTALARI TARAFINDAN MERDİVEN KALIBI UYGULAMASINDA KULLANILMASININ, USTALARIN UZAMSAL ALGILARINA, UYGULAMA SÜRELERİNE VE UYGULAMA HATALARINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İlker Baki ALKAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA
2025, 124 Sayfa

İnşaat sektörü ekonominin lokomotifleri olarak isimlendirilen önemli bir sektördür. Ancak inşaat sektörü hem dijitalleşme konusunda hem de emek verimliliğini artırma konusunda diğer sektörlerin gerisinde kalmıştır. Son yılların gelişen teknolojisi olan artırılmış gerçeklik teknolojisi inşaat mühendisliğinin dijitalleşmesi ve emek verimliliğinin artması için bir fırsattır. Ancak literatürde teknolojinin inşaat sahasında montaj aşamasında kullanılması ile ilgili yeterince araştırma yapılmamıştır. Özellikle inşaat sektörünün ana iş kollarından olan beton kalıbı uygulamasına artırılmış gerçeklik teknolojisinin uyumu ile ilgili yeterli çalışma bulunmamaktadır. Tez çalışmasının amacı artırılmış gerçeklik teknolojisini ahşap kalıbı montajı uygulamasına uyarlayarak, kalıpcıların montaj süresini ve yaptıkları hata miktarını düşürmektir. Çalışma kapsamında Hololens 2 artırılmış gerçeklik gözlüğüne uyumlu yazılım geliştirilmiştir. Toplam yirmi sekiz katılımcı ile gerçekleştirilen saha çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular ve yapılan analizler sonucunda artırılmış gerçeklik teknolojisinin kalıp uygulama süresini kısalttığı ve hata miktarını azalttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Artırılmış Gerçeklik, Hololens, Emek Verimliliği, Unity, İnşaat Sektörü

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATING THE EFFECTS OF USING AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY ON THE SPATIAL PERCEPTION, INSTALLATION TIMES AND INSTALLATION ERRORS OF FORMWORK MASTERS IN STAIRCASE FORMWORK INSTALLATION

İlker Baki ALKAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Program
Supervisor: Assoc. Prof. Hasan Basri BAŞAĞA
2025, 124 Pages

The construction industry is a crucial sector often referred to as the locomotive of the economy. However, it has lagged other industries in terms of digitalization and improving labor productivity. Augmented reality technology, a rapidly evolving innovation in recent years, presents an opportunity for the digitalization of civil engineering and the enhancement of labor efficiency. However, there is a lack of sufficient research in the literature on the use of this technology during the assembly phase in construction sites. In particular, there are not enough studies on the adaptation of augmented reality technology to formwork applications, which is one of the core areas of the construction industry. The aim of this thesis is to adapt augmented reality technology to the assembly of wooden formwork, thereby reducing both the assembly time and the number of errors made by form workers. As part of the study, software compatible with the Hololens 2 augmented reality headset was developed. Field studies were conducted with a total of twenty-eight participants, and the findings and analyses demonstrated that augmented reality technology reduces the duration of formwork installation and minimizes errors.

Key Words: Augmented Reality, Hololens, Labor Productivity, Unity, Construction Industry

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Görselleştirme teknolojilerinin içerikleri (Osorto Carrasco & Chen, 2021).....	1
Şekil 2. Sektörlerin emek verimliliğindeki 20 yıllık değişim (Japan Federation of Construction Contractors, 2021)	3
Şekil 3. Sektörlerin dijitalleşme göstergeleri ile emek verimlilikleri (Barbosa vd., 2017).....	4
Şekil 4. Hedef dergilerde AG konusunda son 10 yılda yayımlanmış makale sayıları.....	5
Şekil 5. Konularına ve yıllarına göre yayımlanan makale sayıları karşılaştırması	7
Şekil 6. Literatür incelemesinin grafik özeti.....	13
Şekil 7. Anahtar kelime ilişki ağı.....	14
Şekil 8. Literatürde kullanılan görselleştirme araçlarının oransal dağılımları.....	16
Şekil 9. Literatürde kullanılan görselleştirme araçlarının yıllara göre dağılımı	17
Şekil 10. Literatür çalışmaları araştırma konuları.....	19
Şekil 11. Makalelerde kullanılan yazılım geliştirme araçları	20
Şekil 12. Makalelerin yayımlandığı dergiler	21
Şekil 13. Yıllara göre yayımlanan makale sayıları	22
Şekil 14. En yüksek yayın yapan 4 ülkenin yıllara göre makale sayısı dağılımları	23
Şekil 15. Foster'ın S eğrisinin inşaat sektörüne uyarlanması (Bock & Linner, 2015).....	36
Şekil 16. Üretim ve inşaat sektöründe kullanılan dijital ürünlerin gelişim evreleri	37
Şekil 17. Modellenen yapının görüntüleri	41
Şekil 18. BIM Holoview AG model görünüşleri	44
Şekil 19. Unity ile geliştirilmiş donatı modelinin Hololens 2 ekran görüntüsü	45
Şekil 20. MAG ön çalışma görselleri.....	49
Şekil 21. SG ön çalışma görselleri.....	50
Şekil 22. İş paketleri	51
Şekil 23. Kalıp türü seçimi anket sonuçları	52
Şekil 24. İlk tasarlanan merdivenin 3 boyutlu ve geleneksel pafta görüntüleri.....	53

Şekil 25.	İlk tasarım uygulama geliştirme ve saha analizi görselleri.....	54
Şekil 26.	3B betonarme çerçeve ve merdiven modeli.....	55
Şekil 27.	İki boyutlu plan çizimi.....	56
Şekil 28.	Uygulamanın ilk ana ekran görüntüsü.....	60
Şekil 29.	Buton etkileşimi için yazılan kod parçası.....	61
Şekil 30.	AG uygulaması eğitim ekranı Hololens 2 görüntüsü	62
Şekil 31.	Proje tanıtım ekranı Hololens görüntüsü	64
Şekil 32.	Montaj ekranı Hololens 2 görüntüsü	65
Şekil 33.	Deneme çalışması için hazırlanmış ahşaplar	67
Şekil 34.	Deneme çalışması görüntüleri	68
Şekil 35.	Kalıp hazırlığı ekranı ve kalıp uygulama buton revizyonları Unity görüntüsü	69
Şekil 36.	Katılımcı seçim şeması	71
Şekil 37.	Uygulama için temin edilen ahşap görüntüleri	75
Şekil 38.	İki boyutlu geleneksel pafta grubu kontrollü deneyleri.....	77
Şekil 39.	AG grubunun kontrollü deneyleri sırasında alınmış görseller.....	79
Şekil 40.	Hata kontrolü için belirlenen referans uzunluklar	80
Şekil 41.	Uygulama süreleri grafiği	85
Şekil 42.	Hata miktarları grafiği	89

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Katılımcı bilgileri	73
Tablo 2. Ankette yer alan bilgiler	81
Tablo 3. Uygulanmış olan istatistiksel analiz türleri	82
Tablo 4. Uygulama süreleri	84
Tablo 5. Aşırı değer analiz sonuçları	85
Tablo 6. Hata miktarları (Tüm ölçüler cm cinsinden verilmiştir.)	87
Tablo 7. AR uygulaması değerlendirme anketi	91
Ek Tablo 1. Katılımcı değerlendirme anket soruları	120

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2B	: İki boyutlu
3B	: Üç boyutlu
AG	: Artırılmış gerçeklik
BIM	: Building Information Modelling (Yapı Bilgi Modellemesi)
KG	: Karma gerçeklik
MAG	: Mobil artırılmış gerçeklik
SG	: Sanal gerçeklik



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

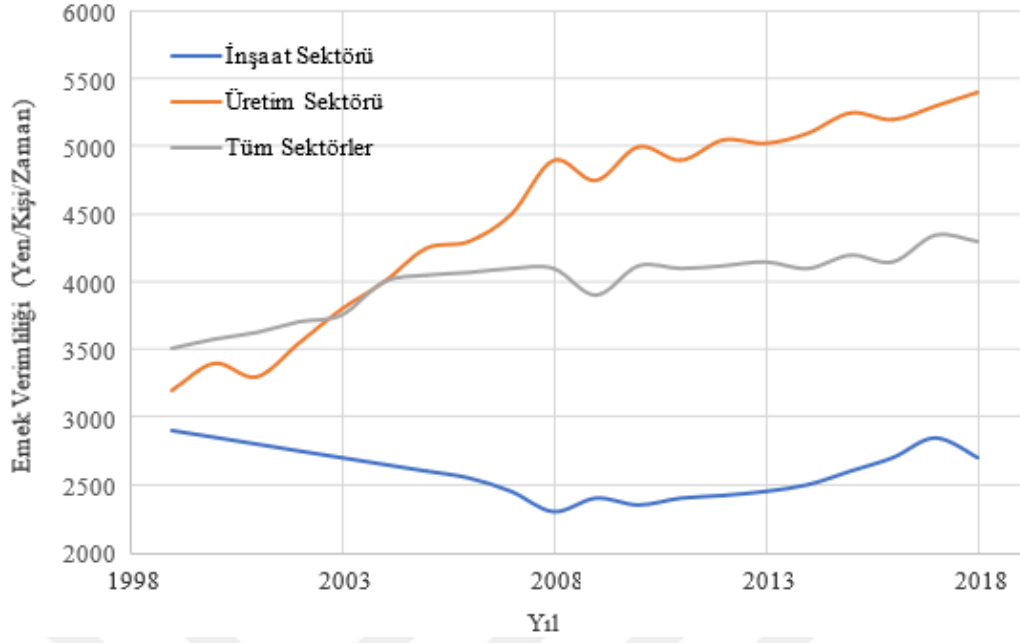
Artırılmış Gerçeklik (AG) Teknolojisi gerçek dünya ile dijital içerikleri bir araya getirerek kullanıcılarına sanal görüntü ile gerçek görüntüyü aynı anda görme olanağı sunan sürükleyici bir teknolojidir. Telefon ve tabletlerin geliştirilmesi ile, dijital içerikler son on yılda taşınabilir ekranlar aracılığı ile takip edilebiliyordu. AG teknolojisi bu ekranları hem giyilebilir hale getirmiş hem de dijital görüntülerin gerçek dünya ile etkileşim kurmasını sağlamıştır. Görselleştirme teknolojileri AG, sanal gerçeklik (SG) ve karma gerçeklik (KG) olmak üzere 3 ana başlıkta incelenmektedir. AG cisimlerin üzerine dijital cihazı yönelttiğinizde o cisimle ilgili bilgi veren ya da gerçekliğini artıran teknolojiyi ifade etmektedir. Google Glass ürünü ile gökyüzüne baktığınızda havanın kaç derece olduğunu görebilmeniz bu teknolojiye örnektir. KG dijital bir tasarımın gerçek ortamda görüntülenebildiği teknolojiyi ifade eder. Microsoft Hololens gözlükleri ve Apple Vision Pro gözlükleri bu teknolojinin kullanılabildiği ürünlerdir. SG teknolojisinde kullanıcı giyilebilir cihazı taktığında gerçek ortamdan tamamen koparak sanal ortam içeriklerini görebilir. Oculus Quest ürünü ile SG teknolojisi deneyimlenebilir (Osorto Carrasco & Chen, 2021). Şekil 1’de, görselleştirme teknolojilerinin ayırt edilebilmesi için sundukları içerikler görselleştirilerek karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Görselleştirme teknolojilerinin içerikleri (Osorto Carrasco & Chen, 2021)

Artırılmış gerçeklik teknolojisi, kullanıcılara gelişmiş görselleştirme imkânları sunmasına rağmen, inşaat sektöründe yaygın olarak uygulanmamaktadır. Oysa inşaat sektörü, karşılaştığı zorluklar ve mevcut verimlilik sorunları göz önüne alındığında, artırılmış gerçeklik teknolojisinin sunduğu olanaklara gereksinim duymaktadır. İnşaat sektörü, yıllık 10 trilyon dolar gelir üreten ve dünya genelindeki iş gücünün %7'sini istihdam eden küresel ekonominin hayati bir bileşenidir (Barbosa vd., 2017; Gerber vd., 2016). Sektör hem istihdam kapasitesi hem de 200'den fazla sektörle iş birliği içinde olması nedeniyle ekonominin lokomotif olarak tanımlanmaktadır. Çünkü bir ülkedeki inşaat yatırımlarının artışı, o ülkedeki birçok sektörün faaliyetlerinin canlanmasına yol açmaktadır (İnak & Evlimoğlu, 2017). Ancak bu büyük ekonomik hacmine ve geniş istihdam alanına rağmen sektör verimsizlik problemi ile karşı karşıyadır. Bunun nedeni, diğer sektörlerde teknolojik yenilikler ve yenilikçi yaklaşımlar iş süreçlerine entegre edilmesine rağmen inşaat sektöründe teknolojik araçlar yeterli düzeyde kullanılamamaktadır. Japonya İnşaat Sektörü Federasyonu (2021) inşaat ve üretim sektörleri ile bunlar dışında kalan diğer tüm sektörlerin 1998-2018 yılları arasındaki 20 yıllık iş gücü verimliliği değişimini incelemiştir. Bu değişim, bir işçinin birim zamanda projeye ya da sürece kattığı değer olarak “Yen” para birimi cinsinden hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda üretim sektörünün iş gücü verimliliğinin 20 yılda 3200 Yen’den 5400 Yen’e çıktığı, tüm sektörlerin ortalama işgücü verimliliğinin 3500 Yen’den 4300 Yen’e çıktığı, ancak inşaat sektörünün işgücü verimliliğinin 2900 Yen’den 2700 Yen’e gerilediği görülmüştür. Şekil 2’de sektörlerin 20 yıllık iş gücü verimliliği değişim grafiği inşaat sektörünün iş gücü verimliliği konusundaki sorunlarını açıkça ortaya koymaktadır.

Düşük emek verimliliği, yalnızca sektörün gelirini ve karlılığını azaltmakla kalmamakta aynı zamanda aşırı istihdam ile küresel ekonomiyi de olumsuz etkilemektedir. İnşaat sektöründeki bu aşırı istihdam, dünya ekonomisinin her yıl 1,6 trilyon ila 2,3 trilyon dolar arasında yeni değer kazanmasını engellemektedir. Sektördeki düşük emek verimliliği nedeniyle meydana gelen büyük değer kaybı en fazla 0,58 trilyon dolar ile Kuzey Amerika’da yaşanırken, Avrupa 0,46 trilyon dolarlık kayıpla onu takip etmektedir. (Japan Federation of Construction Contractors, 2021).



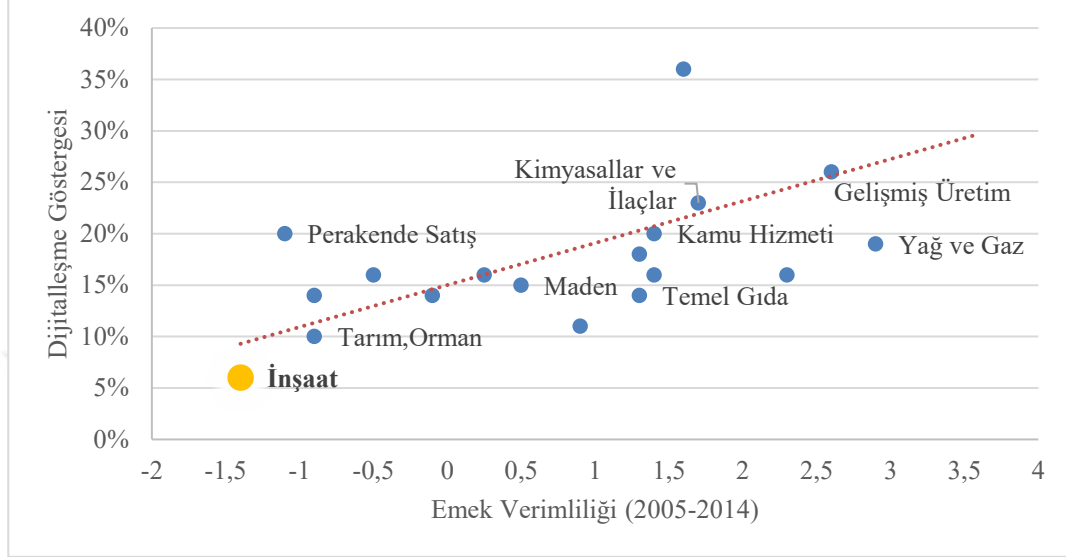
Şekil 2. Sektörlerin emek verimliliğindeki 20 yıllık değişim (Japan Federation of Construction Contractors, 2021)

İnşaat sektörünün emek verimliliğinin düşük olması, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin ekonomilerini de olumsuz etkilemektedir. Gelişmekte olan ülkelerin inşaat yatırımları ile ekonomik büyümeleri arasında tek yönlü güçlü bir ilişki vardır (Kaya vd., 2013). İnşaat sektöründeki emek verimliliğini artırmak, hem dünya ekonomisine olan olumsuz etkilerinin giderilmesini, hem de Türkiye ekonomisine olan olumsuz etkilerinin giderilmesini sağlayacaktır.

İnşaat sektörünün diğer sektörlerle kıyasla daha düşük emek verimliliğinin olma nedeni ile ilgili çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmiştir. McKinsey Enstitüsü (2017), çeşitli sektörlerin emek verimlilikleri ve sektörde kullanılan dijital araç yoğunluğunu gösteren dijitalleşme göstergelerini incelemiştir. Elde edilen bulgulara, sektörlerin dijitalleşme göstergeleri ile emek verimlilikleri arasında tek yönlü güçlü bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Ne yazık ki inşaat sektörü, emek verimliliği açısından en düşük performansı sergileyen sektör olduğu gibi, dijitalleşme göstergeleri bakımından da en düşük seviyededir.

Şekil 3’de tüm sektörlerin dijitalleşme göstergeleri ile emek verimlilikleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik sunulmuştur. Sektörlerde kullanılan dijital araçların yoğunluğu arttıkça emek verimliliği artıyorsa, inşaat sektörünün emek verimliliği problemi, sektörde kullanılan dijital araçların yoğunluğu artırılarak çözülebilir. Artırılmış gerçeklik teknolojisi, üstün görselleştirme imkanları ile inşaat sektöründen kullanılabilecek dijital araçlardan

biridir (Berger, 2016). Tez çalışmasının amacı artırılmış gerçeklik teknolojisini ahşap kalıbı montajı uygulamasına uyarlayarak, kalıpcıların montaj süresini ve yaptıkları hata miktarını düşürmektir.



Şekil 3. Sektörlerin dijitalleşme göstergeleri ile emek verimlilikleri (Barbosa vd., 2017)

İnşaat sektöründeki düşük emek verimliliği, iş gücünün etkin kullanımını ve proje süreçlerinin verimli yönetilmesini zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasının amacı, artırılmış gerçeklik teknolojisini ahşap kalıp montajına entegre ederek montaj süresini kısaltmak ve hata oranlarını düşürmektir. Geleneksel montaj süreçlerinde yaşanan zaman kayıpları ve yanlış uygulamalar, iş gücü verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Artırılmış gerçeklik destekli bir sistem, montaj sürecinde çalışanlara anlık görsel yönlendirmeler sunarak hem uygulama hızını artırabilir hem de hataları minimize edebilir. Böylece, inşaat sektöründe dijital araç kullanımını teşvik ederek iş süreçlerinin daha verimli ve sistematik hale gelmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

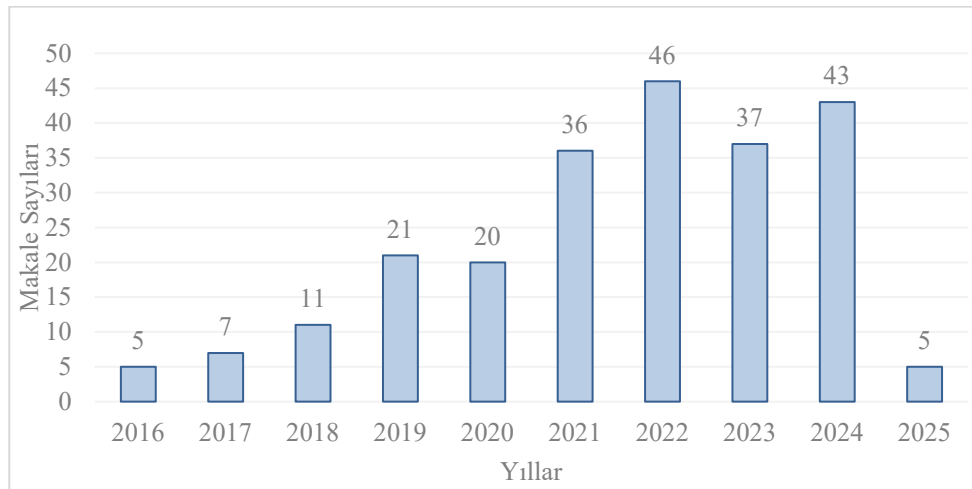
1.2. Literatür Taraması

1.2.1. Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin İnşaat Sektöründeki Genel Kullanım Alanları

AG'nin hızla gelişen bir çalışma alan olması, önde gelen teknoloji şirketlerinin bu alana yoğun ilgi göstermesi ve kullanıcılara üstün görselleştirme olanakları sunması, yakın

gelecekte daha sürükleyici ve işlevsel araçların ve uygulamaların geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır. Bu teknolojinin sağladığı gelişmiş görselleştirme imkânları, AG'nin inşaat sektörüne uyum sağlayabilecek ve sektörde verimliliği artırabilecek bir dijital çözüm olma potansiyelini güçlendirmektedir. Bu bağlamda, araştırmacılar AG teknolojisinin inşaat sektörüne entegrasyonuna yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmaları incelemek amacıyla, inşaat sektöründe dijitalleşme üzerine yoğunlaşan ve akademik camiada ilgi gören sekiz dergi analiz edilmiştir. Bu dergiler şunlardır: Automation in Construction, Advanced Engineering Informatics, Journal of Information Technologies in Construction, Journal of Computing in Civil Engineering, Buildings, Engineering, Construction and Architectural Management, Journal of Construction Engineering and Management ve Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Belirtilen dergilerde "Augmented Reality" anahtar kelimesi kullanılarak makale taraması gerçekleştirilmiştir. Bu taramanın amacı, geniş kapsamlı ve derinlemesine bir literatür incelemesi yapmak değil, inşaat sektöründe AG teknolojisinin kullanım alanlarını belirlemektir.

07.02.2025 tarihinde gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda toplam 317 makale tespit edilmiştir. Elde edilen makaleler, 2016 ve sonrasında yayımlanmış olmaları koşuluyla tarih filtresine tabi tutulmuş ve bu kapsamda 236 makale belirlenmiştir. Bu tarihten itibaren, özellikle Microsoft HoloLens başta olmak üzere çeşitli görselleştirme araçlarının piyasaya sürülmesiyle birlikte AG teknolojisi önemli bir dönüşüm sürecine girmiştir. Dolayısıyla, 2016 öncesinde yayımlanan makaleler, teknolojinin günümüzdeki durumunu yeterince yansıtamayacağı gerekçesiyle analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. 2016 ve sonrasında yayımlanan makalelerin yıllara göre dağılımı Şekil 4'de grafiksel olarak sunulmuştur.



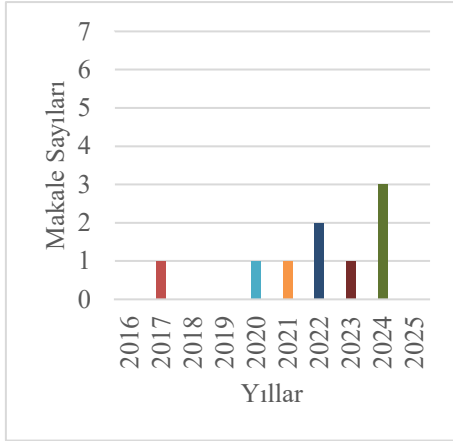
Şekil 4. Hedef dergilerde AG konusunda son 10 yılda yayımlanmış makale sayıları

Grafiğe göre, 2016 yılında bu konuya ilişkin yalnızca beş makalenin yayımlandığı, ancak 2019 yılına kadar makale sayısında sürekli bir artış yaşandığı belirlenmiştir. 2016-2019 yılları arasında, inşaat sektörünün dijital araçlarla entegrasyonunu sağlamaya yönelik çalışmalar yürüten araştırmacılar, AG teknolojisinin sunduğu gelişmiş olanakları keşfetmeye başlamış ve bu doğrultuda araştırmalarını yoğunlaştırmıştır. 2021 yılında, yayımlanan makale sayılarında bir önceki yıla kıyasla 2 kata yakın bir artış gerçekleşmiştir. 2022 yılında sert yükseliş devam etmiş ve takip eden yıllarda 2016 yılına kıyasla yaklaşık 8 kat fazla olan araştırma ilgisi devam etmiştir. 2025 yılında yayımlanmış olan 5 adet makale yılın tamamını değil, yalnızca 7 Şubat 2025 tarihine kadar olan süreci temsil etmektedir.

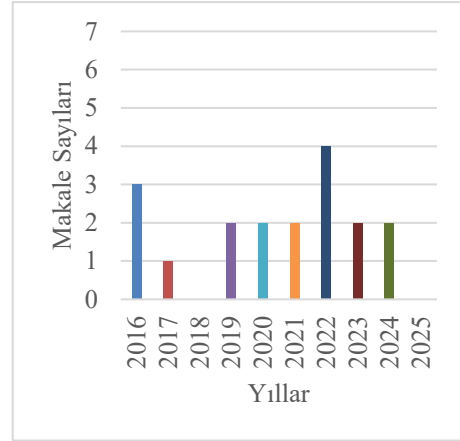
Hedef dergilerde son 10 yılda yayımlanan makale sayıları incelendiğinde, AG teknolojisini inşaat sektörüne uyarlamak için çalışan araştırmacıların sayısının giderek arttığı görülmektedir. Son yıllarda yayımlanan makale sayıları incelendiğinde, bu alana olan ilginin geçici olmadığı ve çalışmaların yoğun bir şekilde devam ettiği açıkça görülmektedir.

Araştırmacıların, sektöre uyum sağlamak için hangi konularda çalışmalar yaptığını belirlemek amacıyla makale içerikleri incelenmiştir. Makale içeriklerinin analiz edilmesinin amacı yayımlanan makaleleri sınıflandırmak, konularını belirlemek ve literatürün genel hatlarını tespit etmektir. Bu kapsamda, 236 adet makalenin özetleri incelenmiş ve bazı makalelerin tesis yönetimi, bakım, görüntü konumlandırması, cihaz hata oranlarının azaltılması gibi konuları içerdiği, doğrudan inşaat sektörü ile ilgili olmadığı veya kavramsal konular hakkında olduğu tespit edilerek bu makaleler kapsam dışı bırakılmıştır. Hedef dergiler inşaat sektörünün dijitalleşmesi üzerine yayınlar yapsalar da sektör dışı çalışmaları da sektöre faydalı olabileceği görüşü ile kabul etmişlerdir. Bu çalışmalar da özet incelemeleri sırasında tespit edilerek kapsam dışı bırakılmıştır. Özet incelemeleri ile gerçekleştirilen elemeler sonucunda 79 adet makalenin literatürün genel tespiti için temsil niteliğinde olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın tam metinleri incelenerek yıllarına ve konularına göre sınıflandırılmıştır. Yıllarına ve konularına göre yayımlanan makale sayıları Şekil 5’de sunulmuştur. Buna göre çalışmaların 5 farklı konu grubunda olduğu tespit edilmiştir. Bu konular;

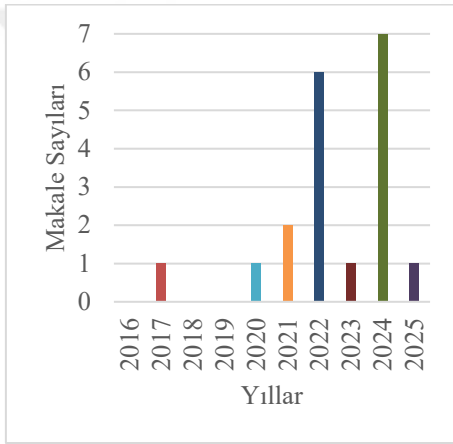
- Proje inceleme ve bilgi aktarımı
- Denetleme
- Eğitim
- İş Sağlığı ve Güvenliği
- Montaj ve Uygulama



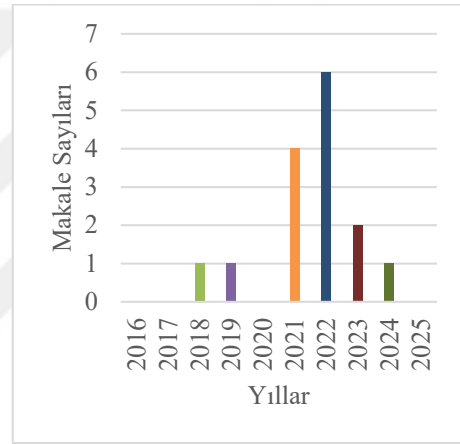
a) İş sağlığı ve güvenliği



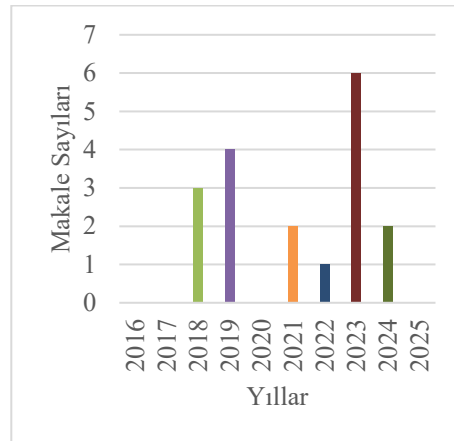
b) Eğitim



c) Denetleme



d) Proje ve bilgi aktarımı



e) Uygulama

Şekil 5. Konularına ve yıllarına göre yayımlanan makale sayıları karşılaştırması

Son 10 yılda AG teknolojisinin inşaat sektörüne uyarlanmasına yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, eğitim konusunda 18, denetleme konusunda 19, proje ve bilgi

aktarımı konusunda 15, iş sağlığı ve güvenliği konusunda ise 9 makale yayımlandığı tespit edilmiştir. Konulara göre yapılan değerlendirmede, araştırmacıların iş sağlığı ve güvenliği dışındaki alanlara benzer düzeyde ilgi gösterdiği belirlenmiştir. Diğer sektörlerdeki iş sağlığı ve güvenliği çalışmaları kapsam dışı bırakılmış olsa da AG'nin inşaat sektörü özelinde de iş sağlığı ve güvenliği alanında dikkate değer bir ilgi gördüğü söylenebilir. Makale sayıları açısından konular arasında farklılıklar bulunsa da hiçbir alan diğerine belirgin bir üstünlük sağlamamış, ayrıca tüm konular teknolojinin hem erken hem de son dönemlerinde araştırmacıların ilgisini çekmiştir.

Proje ve bilgi aktarımı alanında çalışmalar yapan araştırmacılar, Yapı Bilgi Modellemesi'nin (BIM) inşaat sektörünün dijitalleşmesi için önemli bir fırsat sunduğunu belirtmişlerdir. Ancak, bu teknolojinin inşaat sektörüne tam uyum sağlayamadığı ifade edilmektedir. M. Chu vd. (2018) AG teknolojilerini BIM'den bilgi çıkaran ve bu bilgileri işçilere sunarak işçilerin görev verimliliklerini olumlu yönde etkileyen bir uygulama geliştirmişlerdir. 20 katılımcı ile AG uygulaması denenmiş ve uygulamanın görev performansını olumlu yönde etkilediği raporlanmıştır. Ayrıca AG teknolojisinin proje ve bilgi aktarma avantajını kullanarak inşaat sektörüne uyumunu sağlamak üzerine çalışan bilim insanları, bir mimari projenin iki boyutlu (2B) geleneksel kâğıt pafta yerine AG teknolojisi kullanarak daha iyi anlaşılabilirliğini savunmuşlardır. Shouman vd. (2022) Mısır'da bulunan British Üniversitesi kütüphane binasının mimari projelerini AG ve 2B geleneksel pafta ile 33 katılımcıya incelettirmişlerdir. İncelemenin sonucunda katılımcılara bir anket yapılmış ve anket sonuçları istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda AG teknolojisinin projelerin daha iyi anlaşılmasına ve katılımcıların farklı tasarım alternatifleri sunabilmesine olanak sağladığı raporlanmıştır. Ayrıca, bu alanda çalışma yapan araştırmacılar duvar arkası ya da toprak altı tesisatların kâğıt pafta ile incelenmesi yerine, sahada sanal görüntü ile görüntülenebilmesinin avantajlarını araştırmışlardır. Tsai vd. (2022) bina içi mekanik tesisatların koordinatlarını otomatik belirleyen bir AG modeli geliştirmişler ve yeni tesisatların çakışma kontrollerini geliştirdikleri uygulama ile gerçekleştirmişlerdir.

Konu hakkında çalışma yapan araştırmacılar, AG teknolojisini proje ve bilgi aktarımı avantajının yanı sıra, bir inşaat uygulamasının kontrolü sırasında denetleyiciye faydalar sağlayacağını da tespit etmişlerdir. Chi vd. (2022), yapısal çelik donatı uygulamasının denetlenmesi sürecinde, kontrol mühendisinin 2B paftadan proje okuyarak denetleme yapması yerine alternatif bir sistem önermiştir. Lazer okuma sistemi ile uygulanan donatılar

taratılmış ve bir arayüz ile tespit edilen hatalar AG uygulamasına öğretilerek kontrol mühendisine gösterilmiştir. Bu alanda çalışma yapan araştırmacılar, uygulama denetiminin yansırı mevcut yapının denetlenmesi için de AG uygulamalarını kullanmışlardır. Tan, Xu, Chen, & Zhang (2024), bir yapının hasar durumunun daha hızlı ve daha verimli tespiti için bir AR uygulaması geliştirmişlerdir. Uygulama, yapısal çatlağı tespit edip koordine edebilmektedir. Uygulamanın veriyi aktardığı başka bir yazılım ise hasarın bilgisini BIM'e işleyebilmektedir. Yapının denetimi gibi, tesisat sistemlerinin denetlenmesinde de araştırmacılar tarafından AG teknolojisi kullanılmıştır. X. Wang vd. (2025), bina yangın güvenliği ekipmanlarının kontrolünü sağlayabilecek iki adet AG uygulaması geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri uygulamanın bir tanesi sadece görsel olarak denetimin nasıl yapılması gerektiğini bildirmiş, diğeri ise hem görsel hem de işitsel olarak bilgi aktarmıştır. 48 katılımcı üç gruba ayrılmış, bir grup geleneksel metotla denetim yapmış, diğeri iki grup ise AG uygulaması ile denetim yapmıştır. Bu denetleme sırasında AG teknolojisinin sağladığı performans artışı faydaları raporlanmıştır.

AG teknolojisini inşaat sektöründe eğitim aracı olarak uyarlamaya çalışan araştırmacılar, 2B kâğıt pafta ile öğrencilere uygulamayı öğretmek yerine AG modelini ders aracı olarak tercih etmişlerdir. Tan, Xu, Chen, Deng, vd. (2024), yapı çeliği dersini 2B pafta yerine AG modeli ile işleyebilecekleri bir uygulama geliştirmişlerdir. 60 öğrencinin katıldığı bir deneyde bir grup öğrenci geleneksel metot ile ders işlerken diğeri grup AG uygulaması kullanarak ders işlemiştir. Derslerin sonunda gerçekleştirilen ankette AG grubunun bilgisinin daha kalıcı olduğu ve proje okumayı daha iyi öğrendikleri tespit edilmiştir. Literatürde eğitim konusundaki araştırmacıların büyük çoğunluğu AG teknolojisini eğitim aracı olarak kullanılmasının avantajlarını raporlarken, Liu vd. (2024), öğrencilerin öğrenme stillerine göre AG araçlarının faydasını araştırmıştır. Yapılan testler sonucunda AG öğrenme aracı soyut öğrenme tarzına sahip öğrenciler için daha verimli olurken somut öğrenme tarzına sahip öğrenciler için daha az fayda sağlamıştır.

AG teknolojisini iş sağlığı ve güvenliği çalışma alanında inşaat sektörüne uyarlamaya çalışan araştırmacıların bir kısmı, teknolojiyi iş güvenliği denetlemelerinde kullanmışlardır. Ramos-Hurtado vd. (2022) teknolojinin konumlandırma ve arayüz oluşturma gibi özelliklerinden faydalananarak, sahada iş güvenliği denetimi yapan uzmanlara yardımcı bir araç geliştirmiştir. Uzmanların denetleme sırasında kontrol listelerini bu uygulama ile takip etmelerini sağlanmıştır. Bazı alanlara görsel uyarılar eklenerek, uzmanın bir sonraki denetlemesi için takip kolaylığı sağlanmıştır. Ayrıca araştırmacılar acil durum anının AG

teknolojisi ile simüle edilebilmesi avantajını kullanarak, acil durumlar hakkında güvenlik eğitimi içerikleri hazırlamışlardır. Paes vd. (2024) AG simülasyonları ile hazırlanmış yangın eğitimi ile video izleme metodu ile yürütülen yangın eğitiminin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Her iki eğitim türünün de bilgiyi edinme ve hatırlama yönünden eşit derecede etki yapmasına rağmen AG yangın eğitiminin içsel motivasyon kazanımı yönünden üstün olduğunu tespit etmişlerdir.

AG teknolojisini inşaat sektörüne uyarlamaya çalışan araştırmacılar, teknolojiyi bir işçinin imalat yaparken faydalanması için bir montaj aracı olarak da kullanmışlardır. Araştırmacılar çeşitli montaj kolları için uygulama geliştirmişler ve saha denemelerini gerçekleştirmişlerdir. Fazel & Adel (2024a) gibi bazı bilim insanları teknolojiyi basit ahşap birleşimlerinde kullanırken (Wu vd., 2023) donatı bağlama görevi için teknolojinin etkinliğini test etmiştir.

İnşaat sektörünün emek verimliliği probleminin çözümü için sektörün dijitalleşmesi ve dijital ürünlerin entegrasyonu gereklidir. Araştırmacıların bu amaç için 5 farklı konuda gerçekleştirmiş oldukları çalışmaların tamamı kıymetli ve sektörün verimliliğini artırmaya yöneliktir. Ancak AG teknolojisinin işçi montaj görevleri için kullanılması, inşaat sektörünün emek verimliliğinin artırılması için çok daha önemlidir. Çünkü işçi verimliliğinin artırılabilmesi için teknolojinin işçi ile buluşturulması ve işçilerin iş yapış şekillerinin değiştirilmesi gerekmektedir. Günümüzde teknolojik araçlar birçok görselleştirme imkânı sunarken inşaat sektöründeki işçiler hala geleneksel kâğıt pafta kullanarak proje süreçlerini takip etmektedirler. Bu durum uzamsal algısı yüksek olmayan işçilerin 2B projeyi anlayamaması ya da yanlış anlaması ile sonuçlanabilmektedir. Çoğu projede işçiler 2B kâğıt pafta proje okuyabilen bir çalışana bağlı kaldıkları için verimsiz çalışma ortamı oluşmaktadır. Hatalı proje okumaktan dolayı hatalı imalatı düzeltmek zaman kaybına sebep olarak verimsizliğe yol açmaktadır. Kâğıt projelerin inşaat sahasında yıpranması ve yırtılmasından kaynaklanan yanlış proje okuma dezavantajı da bulunmaktadır. Ayrıca 2B geleneksel kâğıt paftadan proje takip edildiğinde işçiler revizyonları takip edememekte, karıştırabilmekte, yenilenmemiş projeyi uygulayabilmekte ve entegrasyonun sağlanamamasından kaynaklanan verim kayıpları yaşanabilmektedir. Literatürün genel taramasını yaptığı bu çalışmanın çıktıları 7th International Project and Construction Management Conference'da bildiri olarak sunulmuştur (Alkan & Basaga, 2022).

1.2.2. Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin İnşaat Montaj Sürecine Adaptasyonu

Literatürde, AG teknolojinin inşaat sektörüne uyum sağlaması için en önemli çalışma alanlarından biri saha montaj uygulaması olarak öne çıkmaktadır. Bu tez çalışması, söz konusu konu etrafında odaklanarak gerçekleştirilecektir. Her ne kadar literatürden teknolojinin inşaat sektörüne uyumu konusunda genel bilgiler edinilmiş olsa da montaj fazına uyumu konusunda kapsamlı bir literatür taraması yapmak gerekmektedir. Bu kapsamda, hatasız sonuçlar elde etmek ve en doğru bulgulara ulaşmak için dünya genelinde kabul görmüş bir yöntem olan PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis) yöntemi tercih edilmiştir.

Makalelerin filtrelenmesi için veri tabanlarının seçimi, çalışmaya dahil edilecek makalelerin doğru seçimini sağlamak açısından temel bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, makalelerin filtrelenmesi için Web of Science ve Scopus veri tabanları kullanılmıştır. Bu iki veri tabanı, geniş bir yelpazede bilimsel makale içermekte olup, hakemli dergilerde yayımlanan makaleleri yayımladıkları için bilimsel kalite ve güvenilirlik açısından güçlü bir itibara sahiptir. Ayrıca, bu veri tabanları kullanıcılarına araştırma konusuyla ilgili anahtar kelimeler, kaynak bilgileri ve ham istatistiksel veriler sunarak bilimsel analizleri kolaylaştırmaktadır.

Doğru arama terimlerini seçmek, çalışmanın sonuçlarının yüksek kaliteli olmasını sağlamak için makale seçim sürecinde kritik bir öneme sahiptir. Arama için belirlenen anahtar kelimeler şunlardır:

- “Augmented Reality” ve kısaltması “AR”, bu teknolojinin yaygın olarak “Augmented Reality” olarak anılması nedeniyle anahtar kelimelere dahil edilmiştir. Kolaei vd. (2022), AG teknolojinin saha kullanımıyla ilgili çalışmaları “assembly” terimi altında sınıflandırdığı için bu kelime de anahtar kelimeler arasına eklenmiştir.
- “Construction” ve “Construction Industry”, inşaat sektörüne özel makaleleri filtrelemek amacıyla dahil edilmiştir.
- “Architectural” ve “AEC”, inşaat ve mimarlık sektörlerinde ortak konuları kapsayan ilgili çalışmaların gözden kaçırılmamasını sağlamak için eklenmiştir.
- “Construction 4.0”, dünya çapında bilim insanları tarafından yaygın olarak kullanıldığı için anahtar kelimelere eklenmiştir.
- “Worker”, “Workers”, “Task” ve “Tasks”, filtrelenen makalelerin saha uygulamaları ve işçi verimliliğinin artırılmasıyla ilgili olmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

Web of Science veritabanında gelişmiş filtreleme seçeneği için aşağıdaki kod yazılmıştır:

- TI = (“Augmented Reality” OR AR) AND ALL = (Construction OR “Construction Industry” OR “Construction 4.0” OR Architectural OR AEC) AND ALL = (Assembly OR Installation OR Onsite OR “On Site” OR Worker OR Workers OR Task OR Tasks).

Scopus veri tabanında gelişmiş filtreleme seçeneği için aşağıdaki kod yazılmıştır:

- TITLE(“Augmented Reality” OR AR) AND ALL(Construction OR “Construction Industry” OR “Construction 4.0” OR Architectural OR AEC) AND ALL(Assembly OR Installation OR Onsite OR “On Site” OR Worker OR Workers OR Task OR Tasks).

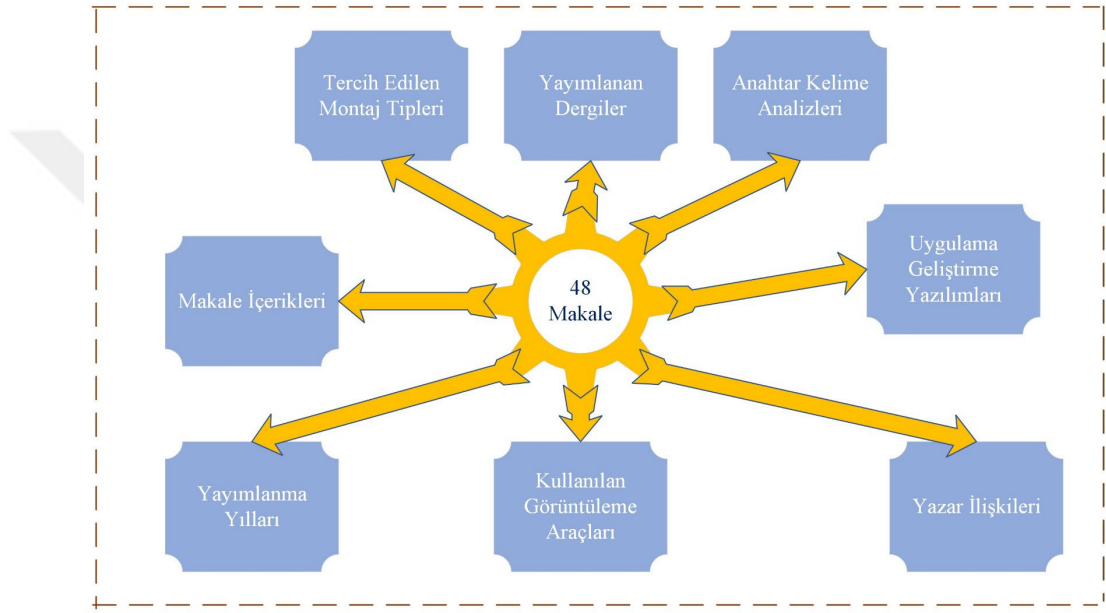
Son veri tabanı araması 9 Şubat 2025 tarihinde gerçekleştirilmiş olup gelişmiş arama sonucunda Web of Science veri tabanında 316, Scopus veri tabanında ise 2708 makale bulunmuştur. 2010 yılından itibaren yayımlanmış makalelere odaklanmak için bir filtre uygulanmış ve Web of Science veri tabanında 289, Scopus veri tabanında ise 2525 makale tespit edilmiştir.

Sadece makale türündeki belgelerin dahil edilmesini sağlamak amacıyla bir belge türü filtresi uygulanmıştır. Bu filtreleme sonrasında Web of Science veri tabanında 175, Scopus veritabanında ise 1217 makale belirlenmiştir. Web of Science’tan 175 ve Scopus’tan 1217 makalenin başlıkları ve özetleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda, inşaat montajında AG kullanımına ilişkin makaleler, detaylı tam metin analizi için seçilmiştir. Web of Science veritabanından 21, Scopus veri tabanından ise 27 makale bu değerlendirme süreciyle belirlenmiştir.

Makalelerin seçim sürecinde özellikle inşaat montaj sürecine doğrudan odaklanan makalelere öncelik verilmiştir. Ayrıca, inşaat sahasındaki işçilerle ilgili olan veya montaj görevlerine doğrudan ya da dolaylı olarak yardımcı olan çalışanları içeren çalışmalar analiz kapsamına alınmıştır. İşçilerin montaj süreçleri üzerindeki görselleştirme teknolojilerinin etkisini inceleyen makaleler değerlendirmeye dahil edilirken, AG yerine SG teknolojisini kullanan çalışmalar detaylı makale analizine dahil edilmemiştir.

Tam metni okunan 48 adet makalenin içeriklerindeki en önemli ayrıntılar not edilerek sınıflandırılmıştır. Makalelerde tercih edilen montaj tipleri sınıflandırılarak, önemli ama henüz üzerinde çalışma yapılmamış montaj tiplerinin görünürlüğü sağlanmıştır. Makalelerin yayımlandığı dergiler sınıflandırılarak bu çalışma alanına hangi dergilerin daha çok ilgi duydukları belirlenmiştir. Araştırmacıların çalışmalarında kullandıkları görüntüleme araçları, uygulama geliştirme yazılımları sınıflandırılarak tez çalışmasının yöntemi

konusunda ipuçları elde edilmiştir. Makalelerin yayımlanma yılları sınıflandırılarak bu alana olan araştırma ilgisinin durumu tespit edilmiştir. Makalelerin yazarlarının ilişkileri sınıflandırılarak hangi ülkenin bu çalışma alanında öncü olma yolunda ilerlediği tespit edilmiştir. Makale içerikleri özetlenerek literatürün teknoloji ve ilgi durumları ortaya koyulmuştur. Anahtar kelime ilişki ağı belirlenerek bu alanda çalışma yapan araştırmacıların çalışmalarını hangi konularla ilişkilendirdikleri tespit edilmiştir. Şekil 6'da tam metni incelenen makalelerden gerçekleştirilen analizin grafik özeti sunulmuştur.



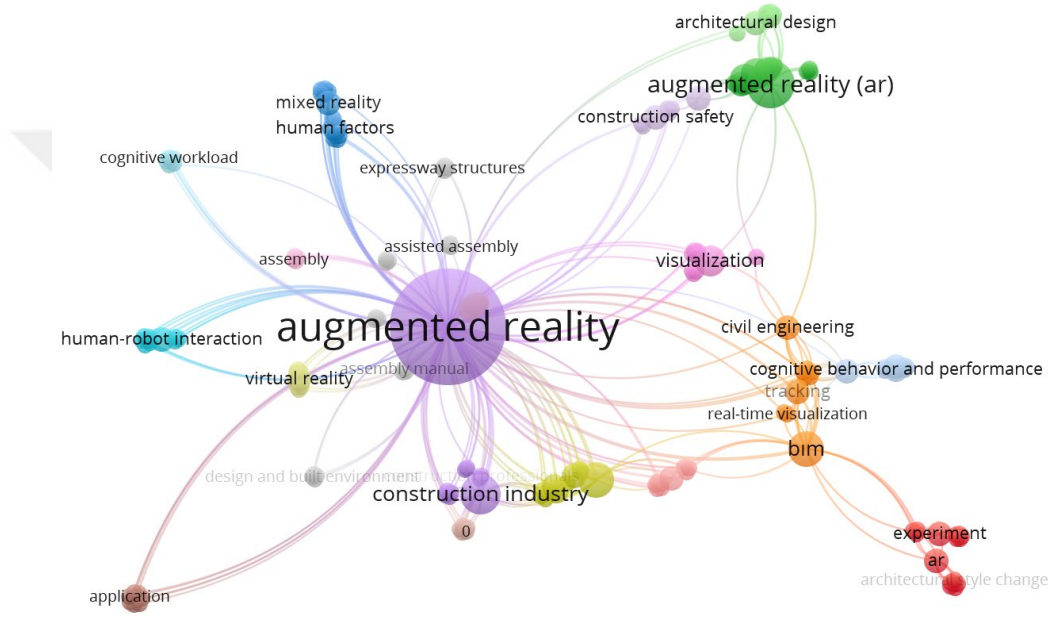
Şekil 6. Literatür incelemesinin grafik özeti

➤ Anahtar Kelime Analizleri

Bilimsel bir araştırma yaparken anahtar kelimelerin etkin bir şekilde seçilmesi çok önemlidir. Bilim insanları, araştırmalarına doğru anahtar kelimelerle başlarsa, daha hızlı bir zaman diliminde daha doğru sonuçlara ulaşabilirler. Tez çalışmasında hangi anahtar kelimelerin daha fazla kullanıldığını belirlemek için, anahtar kelime eşzamanlılık ağları oluşturulmuş ve literatürde en sık kullanılan anahtar kelime kümeleri tanımlanıp sunulmuştur. Bu analiz kapsamında, 10 Şubat 2025 tarihinde Web of Science veri tabanında aşağıdaki ileri düzey filtre uygulanmış ve herhangi bir tarih sınırlaması olmaksızın toplam 316 makale incelenmiştir.

- TI = (“augmented reality” OR AR) AND ALL = (construction OR “construction industry” OR “construction 4.0” OR architectural OR AEC) AND ALL = (assembly OR installation OR onsite OR “on site” OR worker OR workers OR task OR tasks)

Seçilen 316 makalenin belge türü "Makale" olarak filtrelendiğinde, 185 makale elde edilmiştir. Bu makalelerin işlenmemiş anahtar kelime verileri dışa aktarılıp, Vosviewer programına yüklenerek, makalelerin anahtar kelime ağı oluşturulmuştur. Elde edilen anahtar kelime ağı Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Anahtar kelime ilişki ağı

Anahtar kelime ilişki ağında, "BIM" kelimesini içeren birçok anahtar kelimenin, “artırılmış gerçeklik (augmented reality)” anahtar kelimesiyle ilişki kurduğu gözlemlenmektedir. Anahtar kelime ilişkileri tespit edilen makalelerde 8 adet bim, building information modeling, bim plus ar gibi BIM ile ilişkili kelimeler tespit edilmiştir. Bu alanda araştırma yapan araştırmacıların, AG teknolojisinin, BIM’i nasıl geliştirdiğini incelemeleri kesinlikle önemlidir. Ayrıca, “görselleştirme (visualization)” terimi, bu teknoloji için önemli bir anlam taşır ve makalelerde bu ve buna benzer anahtar kelimeler sıkça kullanılmaktadır. “Karmaşık gerçeklik (mixed reality)” ve “sanal gerçeklik (virtual reality)”, araştırmacıların derinlemesine incelemeleri gereken diğer önemli terimlerdir.

“HoloLens” ve “Hmd” terimi, Microsoft’un bir ürünü olduğu için AG ile yakın bir ilişkiye sahiptir. Bu nedenle, bu konuya odaklanan araştırmacıların, Microsoft’un ürünü olan

HoloLens'i ayrıntılı bir şekilde incelemeleri gerekmektedir. Bu anahtar kelimelere benzer olan 9 adet anahtar kelime kullanılmıştır. Ayrıca, bir diğer AG aracı olan "mobil artırılmış gerçeklik (mobile augmented reality)" ve türevlerindeki anahtar kelimeler 6 kez kullanılmıştır.

İnsan- robot etkileşimi "human-robot interaction, robotic assembly" gibi AG teknolojisini robot teknolojisi ile birleştirmeye yönelik anahtar kelimeler son dönem çalışmalarında oldukça ilgi görmüştür. Bu anahtar kelimeler 7 kez kullanılmıştır. Bu alanda çalışmalar yürütmek isteyen araştırmacıların robot etkileşimi konusunda mutlaka bilgi edinmesi gerekir.

Özetle, bilim insanları, AG teknolojisinin inşaat endüstrisinin montaj aşamasına uyumunu kolaylaştırmaya yönelik çalışmalar yaparken, BIM, görselleştirme, HoloLens, mobil artırılmış gerçeklik (MAG), SG, KG ve insan-robot etkileşimi gibi anahtar kavramları göz önünde bulundurmalıdır. Bu terimler, alandaki araştırmalarda önemli bir ilgi görmüştür.

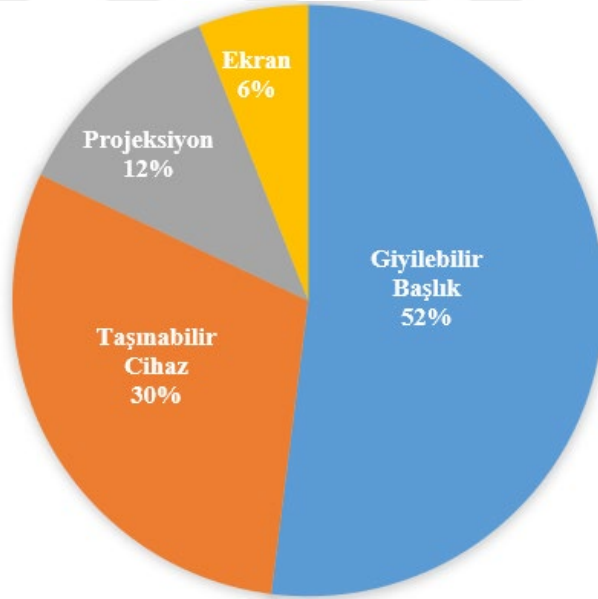
➤ Görüntüleme Araçları

Bilim insanları, AG teknolojisiyle ilgili araştırma yapmaya başladıklarında, çalışmalarının amacına göre uygun görselleştirme aracını seçmeleri gerekmektedir. Çünkü her görselleştirme aracı, farklı kullanım senaryolarına göre değişen avantajlar ve sınırlamalar içermektedir. Ayrıca, bilim insanlarının bir görselleştirme aracı seçerken yalnızca aracın çalışmanın hedeflerine ne kadar uygun olduğunu değil, aynı zamanda yakın gelecekte teknolojik gelişim potansiyelini de göz önünde bulundurması önemlidir. Seçilen araç, araştırmacıların dikkatini çekmezse, teknoloji geliştiricileri aracın iyileştirilmesine yatırım yapmayabilirler. Bu durumda, bilim insanlarının çalışmalarını ilerletmesi zorlaşabilir, çünkü teknoloji geliştiricileri, araştırmacılar tarafından ilgi görmeyen bir aracı iyileştirmeye yatırım yapmayabilir.

Detaylı bir şekilde incelenen makaleler, en çok tercih edilen görselleştirme aracının giyilebilir cihazlar (AG gözlükleri) olduğunu ortaya koymaktadır. Makalelerin detaylı analizine göre, giyilebilir cihazlar, yaklaşık olarak yapılan çalışmaların %52'sinde kullanılmıştır. Şekil 8'de gösterildiği gibi, taşınabilir telefon veya tablet görselleştirme araçları %30, projeksiyon %12 ve sabit ekran %6 oranında tercih edilmiştir. Ancak, bu bulgular tek başına hangi görselleştirme aracının daha fazla ilgi gördüğünü belirlemek için yeterli değildir. Çünkü bazı görselleştirme araçları belirli dönemlerde yoğun ilgi görmüş olsa da zamanla bu ilgi azalmış olabilir. Bu durumu değerlendirebilmek adına, yıllara göre

araştırmalardaki eğilimler incelenmiştir.

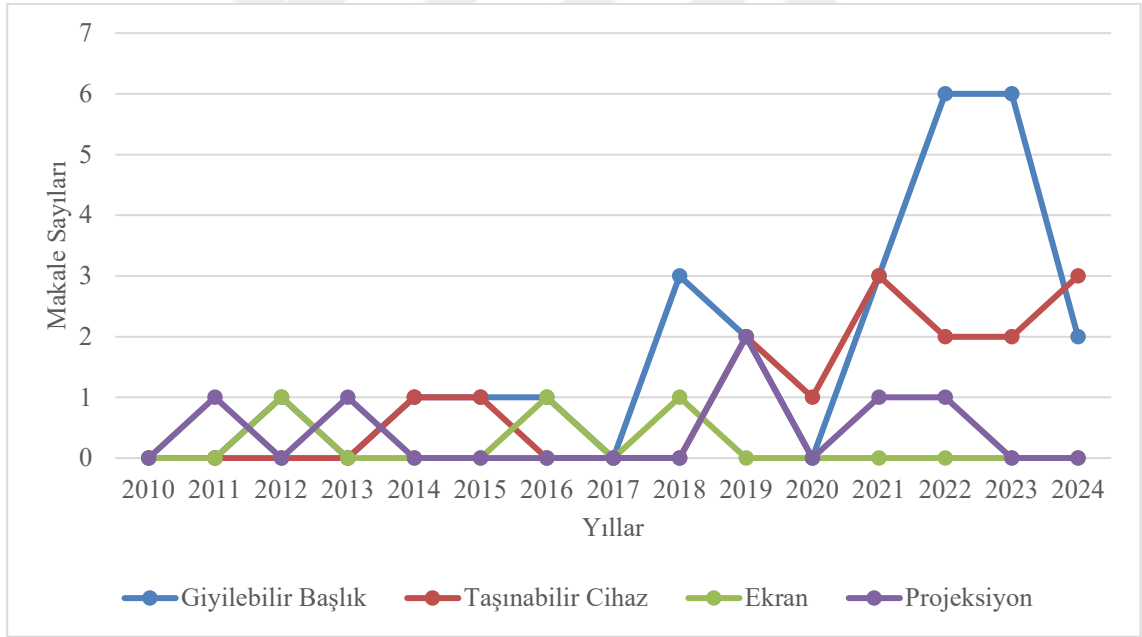
AG teknolojisinin inşaat sektöründe kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda, ekranların tercih edilen birincil görselleştirme aracı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, son altı yılda, bu alanda yapılan hiçbir çalışmada ekranlar kullanılmamıştır. Bu durum, ekranların inşaat aşamasında AG görselleştirmesi aracı olarak teknolojik gelişmeler karşısında geride kaldığını göstermektedir. İnşaat sektöründe, montaj aşamasında çalışanlar tarafından kullanılan görselleştirme aracının hafif ve taşınabilir olması gerekmektedir. Bu tür hafif ve yetenekli görselleştirme araçlarının geliştirilmesinin ardından ekran kullanımında bir düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca, teknolojik gelişmelerin, mobil ve projeksiyon tabanlı görselleştirme araçlarının kullanımını etkilemediği belirlenmiştir. Bu cihazlar, 2010'lar ve 2020'lerde de ilgi çekmeye devam etmektedir. Bu araçların inşaat sahalarındaki montaj aşamasında kullanılabilirliği ve hafif yapıları, ilgi görmeye devam etmelerinin başlıca nedenleri arasındadır.



Şekil 8. Literatürde kullanılan görselleştirme araçlarının oransal dağılımları

Giyilebilir başlıklar (AG gözlükleri), inşaat sektöründe montaj aşamasında ilk kez 2014 yılında kullanılmaya başlanmış olup, ilk yıllarda yoğun bir ilgi ile karşılanmamıştır. Ancak, son 10 yıl içinde, AG gözlükleri montaj aşamasında önemli bir popülerite kazanmıştır. Gözlüklere olan ilgi artmış ve bu alandaki en yaygın kullanılan görselleştirme aracı haline gelmiştir. 2022 yılında yapılan 9 çalışmadan 6'sında, 2023 yılında yapılan 8 çalışmanın 6'sında giyilebilir cihazlar görselleştirme aracı olarak kullanılmıştır. 2024

yılında AG gözlükleri ile yapılan çalışmalarda önemli bir düşüş gözlemlenmiş, yapılan 5 çalışmanın yalnızca ikisinde AG gözlükleri kullanılmıştır. Gözlüklerin kullanımında sadece oransal olarak bir düşüş yaşanmamış aynı zamanda rakamsal olarak da düşüş yaşanmış ve çalışma sayısı 6'dan 2'ye düşmüştür. Araştırmacıların giyilebilir teknolojiler ile araştırma yapmamasının başlıca sebebi, bu alanda en çok kullanılan marka olan Microsoft firmasının Hololens 2 ürününün üretimini durdurması ve yazılım desteğini birkaç yıl içinde durduracağını bildirmesi olabilir. Araştırmacılar sektörün geleceğinin giyilebilir cihaz olmadığı, ya da gelişiminin bir süre duracağı düşüncesine kapılmış olması muhtemeldir. Her ne kadar Apple firması Hololens 2'ye iddialı bir alternatif olarak Vision Pro ürününü çıkarmış olsa da, cihaz henüz 2024 yılında satışa çıktığı için bu cihazın araştırmacılarla buluşması ve bilimsel çalışmaların yayımlanması 2025 yılının ortalarını ya da sonlarını bulacaktır. Şekil 9'da literatürde kullanılan görselleştirme araçlarının yıllara göre dağılımı verilmektedir.



Şekil 9. Literatürde kullanılan görselleştirme araçlarının yıllara göre dağılımı

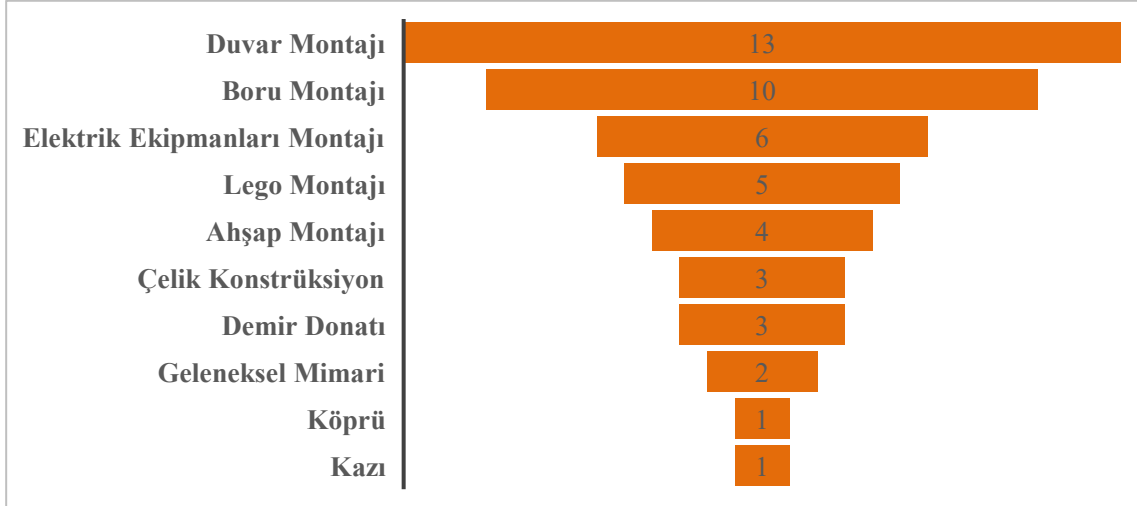
Görselleştirme araçlarının kullanım oranları ve yıllar içindeki ilgi düzeyleri incelendiğinde, ekranların popülaritesini kaybettiği, mobil ve projeksiyon tabanlı görselleştirme araçlarının ise ilgilerini koruduğu gözlemlenmektedir. AG gözlüklerinin ise nasıl bir yol haritası izleyeceğini önümüzdeki yıllar belirleyecektir.

➤ Araştırma Konuları

Tez çalışması kapsamında seçilen 48 makalenin incelenmesi, hangi montaj konularının daha fazla ilgi gördüğünü belirlemeye yardımcı olmaktadır. Literatür taraması sonucunda, AG teknolojisinin inşaat sektörünün montaj aşamasına uyarlanmasına yönelik çalışmaların belirli montaj alanlarında yoğunlaştığı görülmüştür. İncelenen 48 makalenin 13'ü duvar montajına, 10'u ise boru montajına odaklanmaktadır. Teknolojinin gerçek projelerde uygulanabilirliğini artırmak için öncelikli olarak bu iki alana odaklanması gerekmektedir. Ancak, teknolojinin dar bir kapsamda kalmasını önlemek adına, çalışmaların farklı montaj kategorilerine yayılması önemlidir. Bu kapsamda, her montaj türünde AG teknolojisinin avantajlarını ve dezavantajlarını ortaya koyacak kapsamlı araştırmalar yapılmalıdır.

Şekil 10, kapsamlı olarak incelenen makalelerin araştırma alanlarının grafiksel bir temsilini sunmaktadır. Teknolojinin gelişim aşamasında olması nedeniyle, araştırmacılar laboratuvar ortamında uygulanıp test edilebilecek montaj konularına yönelmişlerdir. Böylece şantiyeye aktif olarak dahil olmadan deneyler yapılabilmektedir. Grafikte de gösterildiği gibi, kazı işlemi dışında kalan tüm uygulama alanları laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilir ve test edilebilir durumdadır. Bu alanlar arasında, tekrarlayan yapısı ve değişkenlik göstermemesi nedeniyle duvar montajı, en çok tercih edilen alan olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, boru montajı da sıklıkla çalışılan bir uygulamadır. Bunun nedeni, boru montajının milimetre düzeyinde hassasiyet gerektirmesi ve işçilere önemli bir yük getirmesidir. Ayrıca, boruların duvarların arkasına gizli olarak yerleştirilmesi nedeniyle montajın görselleştirilmesi zorlaşmakta, bu da AG teknolojisinin bu tür zorluklara etkili çözümler sunma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Ayrıca, elektrik ekipmanı montajı, uygulanmasının kolaylığı ve AG teknolojisinin kullanımını gerektiren işlemlerin minimum seviyede çaba gerektirmesi nedeniyle altı makalede ele alınmıştır.



Şekil 10. Literatür çalışmaları araştırma konuları

➤ Yazılım Geliştirme Programları

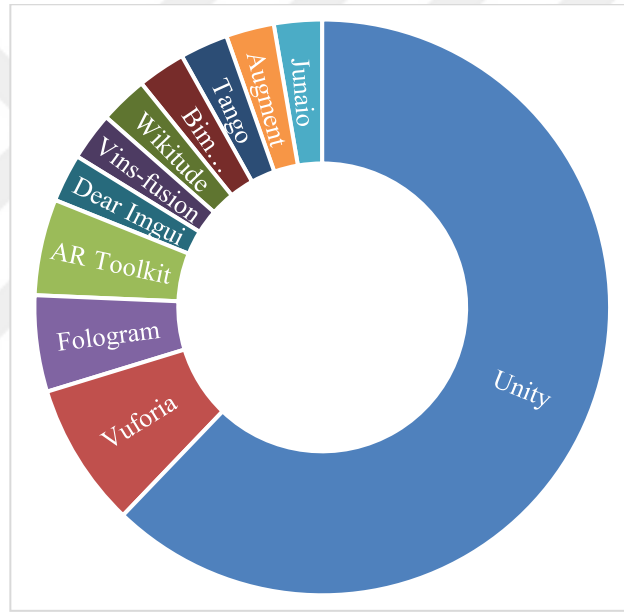
İnşaat sektörünün montaj aşamasında AG teknolojisinin uyarlanması sürecinde, araştırmaların en fazla zaman ve çaba gerektiren yönlerinden biri, ilgili montaj uygulamaları için AG yazılımlarının geliştirilmesidir. Bu uygulamalar belirli yazılım programları aracılığıyla oluşturulmaktadır. AG teknolojisinin inşaat sektöründe etkin bir şekilde kullanılabilmesi için kullanıcı dostu ve pratik uygulamaların geliştirilmesi gerekmektedir. Teknoloji ne kadar gelişmiş olursa olsun, uygulamalar işçilerin kullanımına uygun ve yeterince işlevsel olmadığında, beklenen verimlilik sağlanamaz.

Uygulama geliştirme sürecinde çok fazla yazılım alternatifi bulunmaktadır. Araştırmacıların uygulama geliştirme sürecinde tercih ettikleri yazılım, belirlenen hedefleri karşılayacak yeterlilikte değilse, istenen sonuçlara ulaşılamayabilir. Bu bölüm, bu alanda çalışacak araştırmacılara uygun yazılım seçiminde rehberlik etmeyi amaçlamaktadır. İncelenen 48 makale detaylı olarak analiz edilerek, farklı AG yazılımlarına olan ilgi düzeyi belirlenmiş ve sunulmuştur. Araştırmacılar, en popüler programdan başlayarak mevcut tüm programları inceleyebilir ve hedeflerine en uygun olanı seçebilirler.

Yapılan detaylı inceleme sonucunda, AG uygulamalarının geliştirilmesinde en çok Unity oyun motorunun tercih edildiği gözlemlenmiştir. Bu tercih, Unity'nin oyun geliştirme alanında geniş bir kullanıcı kitlesine sahip olması ve AG uygulamalarına geçişi kolaylaştırarak bu alandaki etkinliğini artırma hedefinden kaynaklanmaktadır. Unity tercih eden araştırmacılar, oyun üretimi için yıllar içinde geliştirilmiş geniş bir 3D varlık kütüphanesi ve yazılım araçlarından faydalanarak AG projelerini güçlendirebilirler. Ayrıca,

Unity'nin geniş bir belgelendirme ağına sahip olması, programı öğrenmek isteyen kullanıcılara bol miktarda kaynak sunmaktadır. Bir diğer önemli faktör ise Unity'nin kullanıcılarına ücretsiz paket seçenekleri sunmasıdır.

Şekil 11'de araştırmacılar tarafından AG uygulamalarının geliştirilmesi için kullanılan diğer yazılımlar sunulmaktadır. Ancak bu programlar, kullanıcılarına sundukları olanakların sınırlı olmasından dolayı Unity kadar yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu alternatif yazılımlar, belirli görevlerde hızlı sonuç almak için kullanılan paket programlar olup, işlevsellik açısından bazı kısıtlamalar barındırmaktadır. Araştırmacılar, eğer hızlı sonuç almak istiyor ve bu sınırlamalar çalışmalarına engel teşkil etmiyorsa, Unity dışındaki programları da tercih edebilirler.



Şekil 11. Makalelerde kullanılan yazılım geliştirme araçları

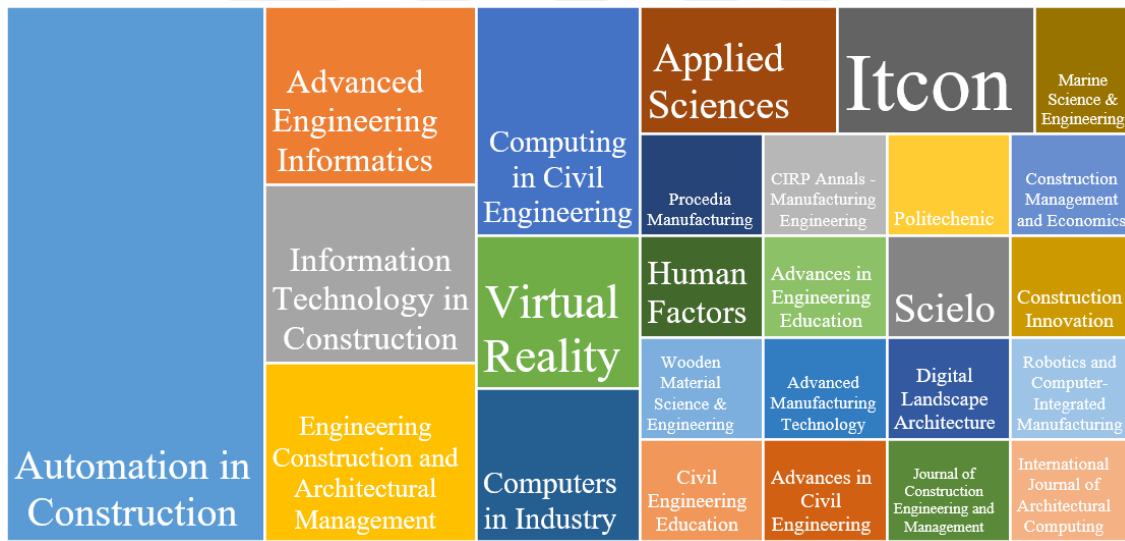
➤ Makalelerin Yayımlandıkları Dergiler

İnşaat sektörünün montaj aşamasında AG teknolojisinin kullanımıyla ilgili birçok makale çeşitli dergilerde yayımlanmıştır. Bu alandaki araştırmacıların önde gelen dergiler hakkında bilgi sahibi olması, onlara önemli bir rehberlik sağlayabilir. Bu bilgi, araştırmacıların alandaki gelişmeleri nereden takip edebileceklerini ve kendi çalışmalarını potansiyel olarak nerede yayımlayabileceklerini bilmelerine olanak tanır. Bu nedenle, detaylı incelemesi yapılan 48 makalenin hangi dergilerde yayımlandığına dair bilgiler bu bölümde sunulmaktadır.

Detaylı inceleme sonucunda, 48 makaleden 11'inin "Automation in Construction" dergisinde yayımlandığı gözlemlenmiştir. Ancak Automation in Construction, yalnızca AG teknolojisinin inşaat sektörüne uyarlanmasına odaklanmamakta, aynı zamanda dijitalleşme yoluyla sektörün verimliliğini artırmayı hedefleyen çeşitli diğer konuları da ele almaktadır. Yüksek kaliteli makalelerin varlığı ve bu makalelerin uzman akademisyenler tarafından titizlikle incelenmesi, bu derginin yoğun ilgi görmesinin başlıca nedenleri arasındadır.

Bunun yanı sıra, "Advanced Engineering Informatics", "Information Technology in Construction", "Engineering Construction and Architectural Management" ve "Computing in Civil Engineering" dergilerinde üçer makale yayımlanmıştır. Ayrıca, "Virtual Reality", "Computers in Industry", "Applied Sciences" ve "Itcon" dergilerinde ikişer makale bulunurken, diğer dergilerin her birinde birer makale yer almaktadır.

48 makalenin yayımlandığı dergilerin adları ve bu dergilere gösterilen ilgi oranları Şekil 12'de gösterilmektedir.



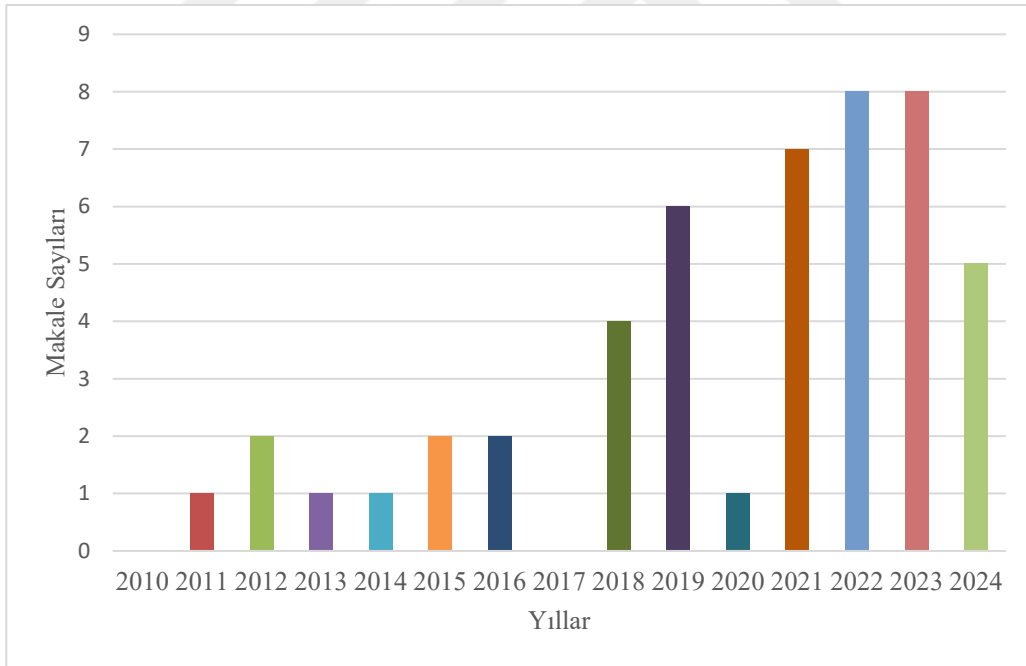
Şekil 12. Makalelerin yayımlandığı dergiler

➤ Yazar İlişkileri ve Yayımlanma Yılları

İnşaat sektörünün dijitalleşme konusundaki zorluklarını aşmak için AG teknolojisinin sunduğu potansiyel iyi bilinmektedir. Bu potansiyelin farkına varan araştırmacıların ve akademisyenlerin sayısı her yıl artmaktadır. Artan ilgi hem sektör hem de bu alanda çalışan araştırmacılar için yeni fırsatlar yaratacaktır. Şekil 13, yıllara göre yapılan araştırma çalışmalarının sayısını göstermektedir.

AG teknolojisini inşaat sektörünün montaj fazına uyarlamaya yönelik çalışmalar, 2017 yılına kadar her yıl iki veya daha az sayıda olmuştur. Ancak, gelişen teknoloji ve artan ilginin etkisiyle, 2018’de 4 makale yayımlanmış, 2019’da bu sayı 6’ya yükselmiştir. 2020 yılında ise yalnızca 1 makale yayımlanmıştır. Bunun başlıca nedeninin, küresel COVID-19 kısıtlamaları nedeniyle sınırlı araştırma olanakları olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, 2021 yılında bu alana olan ilginin yeniden artmasıyla birlikte 7 makale yayımlanmıştır. 2022 yılı ise 8 makale ile en yüksek araştırma faaliyetinin gerçekleştiği yıl olmuştur. Artan ilgi 2023 yılında da devam etmiş ve bu yıl da 8 makale yayımlanmıştır. 2024 yılında yayımlanan makale sayısı biraz azalsa da bu alana ilgi devam etmiş ve 5 makale yayımlanmıştır.

Hangi yıllarda çalışmalar yapıldığı kadar, hangi ülkelerin bu alanda araştırmalar yürüttüğü de büyük önem taşımaktadır. Çünkü bu teknoloji hâlâ erken aşamalıdır ve bu seviyede gerçekleştirilen her araştırma, ülkelerin bu teknolojiye öncü olmasını sağlayabilir ve gelecekteki gelişmeleri teşvik edici bir etken olabilir.



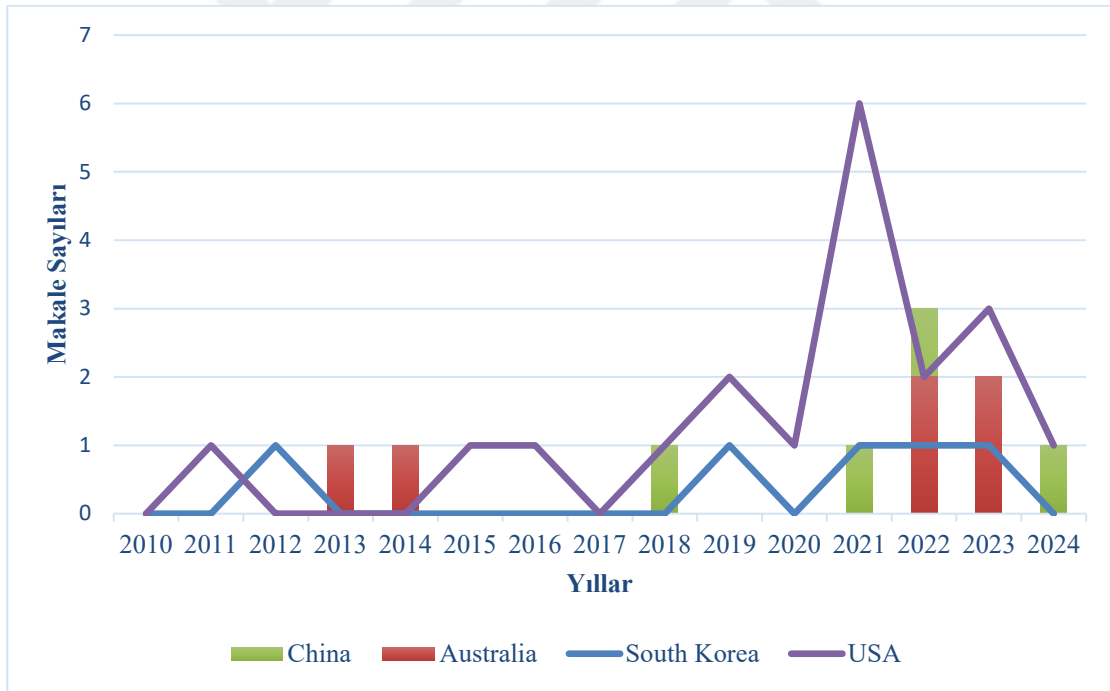
Şekil 13. Yıllara göre yayımlanan makale sayıları

Bir ülkenin belirli bir teknolojiye en fazla makale yayımlayan ülke olup olmadığını belirlemek için yalnızca temel veriler yeterli değildir. Aynı zamanda, bu çalışmaların ne zaman yapıldığı ve ülkelerin araştırmalarını sürdürüp sürdürmediği gibi faktörler de göz

önünde bulundurulmalıdır. Şekil 14, bu alandaki önde gelen ülkelerin farklı zamanlardaki araştırmalarını grafiksel olarak sunmaktadır.

Elde edilen verilere göre, ABD en fazla araştırma yapan ülke olup, 19 makale yayımlamıştır. Avustralya ve Çin 6 makale ile, Güney Kore 5 makale ile, Kanada ise 4 makale ile ABD'yi takip etmektedirler. Pek çok diğer ülke de farkındalık yaratmış ve makale yayımlamıştır. Ancak bu ülkelerdeki makale sayısı 2'yi geçmemektedir.

AG teknolojinin inşaat sektöründe benimsenmesi sürecinin keşif aşamasında, ABD, en yakın rakibine kıyasla üç kattan daha fazla makale yayımlayarak lider konumda olmuştur. Ancak, son iki yıldaki yayımlanan makale sayıları incelendiğinde, Avustralya, Çin ve Güney Kore'nin ABD'yi makale sayısı açısından yakalamakta olduğu görülmektedir. Toplam makale sayısı bakımından ABD, bu teknolojinin öncüsü olma konusunda daha avantajlı görünse de son dönemde yapılan araştırmalar, Güney Kore, Avustralya ve Çin'in bu teknolojiye önemli katkılarda bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 14. En yüksek yayın yapan 4 ülkenin yıllara göre makale sayısı dağılımları

➤ Makale İçerikleri

Seçilen 48 makale detaylı bir şekilde incelenmiş ve her makalenin içeriğinden temel bilgiler toplanmıştır. Bu bölümde makaleler içerdikleri konu gruplamasına göre özetlenecektir.

X. Wang vd. (2014), BIM teknolojisinin kamu, çevresel, ekonomik ve sosyal açılardan inşaat sektörü için birçok fayda sağladığını, ancak şantiyeye etkili bir şekilde aktarılamadığını savunmaktadır. Onlara göre, AG teknolojisi, BIM'in inşaat sahasına aktarılmasını sağlayan görünmez bir sihirli el gibi hareket etmektedir. Çalışmalarında, katılımcılara LNG tesisinde boru montajı görevlerini kâğıt planlar yerine bir AG modeli kullanarak gerçekleştirme fırsatı sunmuşlardır. Bu çalışma, AG teknolojisinin erken dönem keşiflerinden biri olması nedeniyle literatürde önemli bir yere sahiptir. Ancak, çalışmada katılımcılarla ilgili ayrıntılar, montaj görevinin spesifik bağlamı ve montaj sürecine ait sayısal sonuçlar eksik olduğundan, iyileştirilmesi gereken bazı noktalar bulunmaktadır. Kwiatek vd. (2019), inşaat sahasındaki işçilerin montaj sırasında yaptıkları hataları düzeltmek için önemli miktarda zaman harcadıklarını vurgulamıştır. Çalışmalarında, işçilerin hata oranlarını azaltmayı hedefleyerek boru montajı üzerine odaklanmışlardır. Boru montajı, endüstriyel tesislerde toplam kurulum maliyetinin %50'sini oluşturduğundan kritik bir görev olarak ele alınmıştır. Araştırmacılar, boru montajı görevini basitleştirmek için AG modelini kullanmışlardır. Ayrıca, monte edilen boruları taramak için tablete ek sensörler eklemişler ve elde edilen bilgilerin doğruluğu yazılım aracılığıyla doğrulanmıştır. Sonuç olarak, katılımcıların AG modelini kullanarak görevi daha hızlı tamamladıkları gözlemlenmiştir. Ancak, çalışmanın AG modelinin nasıl geliştirildiği, hangi programların ve yazılımların kullanıldığı konusunda daha fazla açıklama içermesi, çalışmanın tekrarlanabilirliği açısından faydalı olabilirdi. Moghaddam vd. (2021), AG modeli kullanılarak gerçekleştirilen basit bir boru montajı görevi üzerine bir çalışma yürütmüştür. Görev hem geleneksel yöntemlerle hem de giyilebilir AG gözlükleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki yöntemde de görev tamamlama süresi açısından benzer bir performans gözlemlenmiştir. Sonuçlar, AG kullanımının geleneksel talimatlara kıyasla hata sayısını azalttığını gösterse de literatürdeki diğer çalışmaların aksine, AG kullanan uygulayıcıların montajı geleneksel yöntemle göre daha uzun sürede tamamladıkları belirlenmiştir. Bu durum, belirli montaj görevlerinde AG uygulamalarının zaman avantajı sağlamayabileceğini göstermektedir.

Khan vd. (2023), çalışmalarında BIM teknolojisini AG teknolojisiyle birleştirmiştir. Çalışmalarında, bir üniversite binasının bakım görevleri için 38 öğrenciyle bir saha araştırması yapılmıştır. Öğrencilerin yarısı AG teknolojisini kullanarak bakım görevlerini yerine getirirken, diğer yarısı geleneksel yöntemi kullanmıştır. AG kullanan grubun, diğer gruba kıyasla görevlerini çok daha hızlı tamamladığı bulunmuştur. Ancak bakım görevleri,

bakım parçalarının yerini tespit etme, bakım alanını bulma ve montaj toleranslarını inceleme gibi hazırlık aşamalarını içerdiğinden, bu görevlerde montajın da dahil edilmesiyle çalışma daha ileri düzeylere taşınabilecektir. Lee & Akin (2011), projeksiyon tabanlı bir bakım yönetim sistemi kurmuş ve AG teknolojisinin bakım alanını tespit etmede kolaylık sağladığını bulmuştur. Çalışanlar, AG yardımıyla tesisin bakım yapılması gereken alanını tespit etmişlerdir. Bu çalışma, gerçek bir tesis yerine, gerçek tesis görüntülerinden oluşturulmuş bir sanal ortamda yapılmıştır. Çalışmaya, tesisin çalışan teknisyenleri katılmıştır. Um vd. (2023), düşük maliyetli inşaat organizasyonlarını dijitalleştirmek için düşük maliyetli dijital çözümler ihtiyacını vurgulamıştır. İnşaat sahası işçilerine, malzeme envanterinde değiştirilen borunun taranması ve varlığının tespit edilmesi yeteneği sağlamışlardır. Bu çalışmanın dikkat çekici bir yönü, AG envanter bilgisi desteğiyle işçilerin arızalı parçaların değiştirilmesi konusunda hızlı kararlar alabilmelerini sağlamasıdır. J. Wang vd. (2022), çalışmalarında şantiyedeki montaj işçileri ile tasarım ofisi personeli arasındaki iletişimi hızlandırmıştır. İşçi, bir AG gözlüğü kullanarak sahada sanal bir nesneyi görselleştirmiş, ölçmüş ve montajını yapmış, tasarım ofisi çalışanı ise bu görsel temsili bilgisayarında görüntüleyerek işçiye önerilerde bulunmuştur. Xiang vd. (2021), uygulama alanında bir projeksiyon tabanlı sistem kullanarak bir boru montajı görevi uygulamıştır. Projeksiyon cihazı, alandaki ekli işaretleyicilerle konumu belirlemiş ve görsel temsilleri belirlenen alana yansıtmıştır. Ölçümler, projeksiyon sürecinin görselleri santimetre hassasiyetinde doğru bir şekilde konumlandığını göstermiştir. Çalışmayı diğerlerinden ayıran özellik, görsellerin sadece düz yüzeylere değil, aynı zamanda düzensiz yüzeylere de doğru bir şekilde yansıtılabilmesidir. Choi & Park (2021), boru arızalarını tespit etmek ve onarım sürecinde müdahale etmek için kağıt yerine AG kullanılmasını önermektedir. Yapılan uygulamada, araştırmacılar büyük bir alanda doğru yerlerde boru modellerini görselleştirebilmişlerdir. AG navigasyonu, işçilerin montaj alanlarını tespit etmelerine olanak sağlamak için kodlarla birlikte kullanılmıştır. Geliştirilen sistemde işçilere, yalnızca kendi belirlenen çalışma alanlarındaki boru görsellerini filtreleme yeteneği de sağlanmıştır. Yapılan saha testleri ve anketlerle, AG tabanlı denetimin geleneksel çizim tabanlı denetimlere kıyasla zaman tasarrufu sağladığı belirlenmiştir. Bu çalışmayı diğerlerinden ayıran özellik, Google'ın AG görselleştirme aracı olan Tango'nun kullanılmasıdır. Marino vd. (2024), boru montajı için geliştirdikleri AG modelinde katılımcıların bilişsel yüklerini ölçmeyi hedeflemişlerdir. Eğer katılımcılar görevle ilgili henüz bilgi sahibi değillerse geleneksel yöntem uygulayıcılarına göre performanslarının oldukça arttığı tespit edilmiştir.

AG teknolojisinin inşaat sektörünün montaj aşamasındaki entegrasyonunu inceleyen çalışmalarda, duvar işçiliği önemli bir ilgi konusu haline gelmiştir. Kivrak & Arslan (2018), sahada tuğla duvar inşaatının adımlarını açıklayan bir model geliştirmiş ve AG teknolojisini, hatalı inşaatı engellemek ve işçilerin düzeltme yapma ihtiyacını azaltmak için bir alternatif olarak sunmuştur. Geliştirilen uygulamanın kontrollü deneylerle uygulanmamış olması çalışmanın geliştirmeye açık yanıdır. Shanbari vd. (2016), üç yıl boyunca bir üniversite binasının yenileme sürecini fotoğraflar ve videolarla kaydetmiş ve öğrencilere duvar inşaatı ve yalıtım uygulamalarının aşamalarını inceleme fırsatı sunmuştur. Uygulama, şantiyedeki inşaat görevlerinin öğrenilmesini kolaylaştırmıştır. Fazel & Izadi (2018), karmaşık yüzeylerin inşasında AG yararlanarak beş farklı modelle tuğla döşeme üzerine deneyler yapmıştır. Araştırmacılar, yapılan hataları belgeleyerek %91'inin yatay konumlandırma ile ilgili olduğunu bulmuşlardır. Yapılan çalışma yalnızca AG uygulamasını içermekte olup, elde edilen sonuçların geleneksel yöntemlerle karşılaştırılması yapılmamıştır. Bu durum, çalışmada potansiyel bir geliştirme alanı olarak öne çıkmaktadır. Rogeau & Rezaei Rad (2024), AG teknolojisini kullanarak insanların ve robotların birlikte çalıştıkları bir sistem geliştirmişlerdir. İnsanların esnekliği ve becerisi ile robotların güçleri birleştirilerek ahşap duvar montajı gerçekleştirilmiştir. Yogeewaran vd. (2023), hazır yapı parçalarının montajı için inşaat işçilerine akıllı telefonları vasıtası ile yardımcı olan bir sistem geliştirmişlerdir. İşçiler hem kullanacakları ekipmanları hem de iş emirlerini uygulamada görüntüleyebilmektedirler.

McMeel (2019), AG ve robot kullanarak önceden üretilmiş bir platformun montajını yapmıştır. Uygulama sırasında robot verisi, AG gözlüğüne yansıtılmıştır. Bu iki teknolojinin (AG ve robot) birleşik kullanımı, çalışmanın ayırt edici bir özelliğidir. Diğer bir duvar montajında AG teknolojisinin kullanımına odaklanan bir çalışma ise Qin & Bulbul (2023b) tarafından yapılmıştır. Çalışmada, AG gözlüklerine sensörler eklenmiş ve duvar montajı görevlerine katılan katılımcıların göz hareketleri analiz edilmiştir. Elde edilen göz hareketi verilerine dayanarak, ustaların model algılamaya ne kadar zaman ayırdığı ve gerçek uygulamaya ne kadar zaman harcadığı belirlenmiştir. Başka bir çalışmada Qin & Bulbul (2023a), katılımcıların zihinsel yüklerini tespit etmek için EEG sensörleri kullanmışlardır. Katılımcıların başlarına yerleştirilen sensörler aracılığıyla, duvar montajı görevlerine katılan işçilerin beyin hücrelerinin elektriksel aktivitelerini ölçmüşlerdir. Araştırmacılar, AG uygulamaları ile kâğıt tabanlı uygulamaları kullananlar arasındaki zihinsel yük farklarını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Analizleri sonucunda, AG modelini kullanan

katılımcıların, kâğıt tabanlı montaj yapan katılımcılara kıyasla daha düşük zihinsel aktivite seviyeleri sergilediğini bulmuşlardır. Bu gözlem, AG kullanırken model algılamının daha kolay olduğunu gösteren bir işaret olarak yorumlanmıştır. Qin vd. (2023), 18 inşaat mühendisliği öğrencisiyle bir çalışma yaparak katılımcıların zihinsel yüklerini NASA-TLX yöntemiyle ölçmüşlerdir. NASA-TLX yöntemi, katılımcıların duvar montajı görevlerini hem AG hem de geleneksel yöntemlerle tamamladıktan sonra zihinsel talep, fiziksel talep, zaman talebi, performans, çaba ve hayal kırıklığı gibi boyutlara 0 ile 100 arasında puanlar vermelerini içermektedir. Elde edilen bulgular, geleneksel yöntem ile AG uygulaması arasında zihinsel yük açısından önemli bir fark bulunmadığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlara dayanarak yapılan analizde, AG gözlüklerin, kâğıt tabanlı uygulamalara kıyasla kullanıcılarda ek bilişsel etki yaratmadığı ve kullanıcı dikkatini dağıtmadığı sonucuna varılmıştır. AG gözlüklerinin sınırlı görüş açısının dikkat dağıtıcı bir faktör olmadığı belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonucu, literatürdeki diğer makalelerde, AG gözlüklerinin sınırlı görüş açısının işçileri etkilediği yönündeki analizlerle çelişmektedir.

Ahn vd. (2019), projeksiyon tabanlı bir AG uygulaması geliştirerek ahşap duvar uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Projeksiyonun konumu, projeksiyon alanına yapıştırılan işaretçilerle ayarlanmıştır. Projeksiyon, konumunu ve çözünürlüğünü yansıma mesafesine göre ayarlamıştır. Benzer şekilde, Bartuska vd. (2022), başka bir ahşap duvar montaj projesi için projeksiyon tabanlı AG kullanmışlardır. Duvar üzerine dört farklı model için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri bulgular, işçilerin görevlerini daha verimli ve doğru bir şekilde tamamlayabildiklerini göstermiştir. Ancak, teknoloji pahalı ve ergonomik olmamakla eleştirilmiştir. Qin vd. (2021), AG kullanarak büyük, orta ve küçük ölçeklerde üç farklı ahşap duvar modeli oluşturmuş ve katılımcılarla montaj deneyleri yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, AG kullanan katılımcıların görevlerini, geleneksel yöntemlerle yapanlara kıyasla daha hızlı tamamladıkları tespit edilmiştir. Ayrıca, AG gözlüğü kullanan katılımcıların, kâğıt tabanlı yöntem kullanan katılımcılara kıyasla daha az ölçüm hatası yaptığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Cuperschmid vd. (2016), ahşap çerçeve duvar montajının aşamalarını gösteren bir AG modeli geliştirmiş ve katılımcılarla test etmiştir. Çalışma, işçilere rehberlik etmek için işitsel ipuçları içermektedir. Uygulama sonrasında katılımcılarla yapılan bir anketle geri bildirim toplanmıştır. Katılımcılar, AG teknolojisinin inşaat montajında kullanılma potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir.

AG, elektrikli ekipman montajında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Marklin vd. (2022), elektrik işçilerinin AG gözlüğü kullanarak montaj görevlerini yerine getirirken kas

hareketlerini ve göz yorgunluğu seviyelerini incelemişlerdir. Geleneksel yöntemleri kullanan işçilerle gözlük kullanan işçiler arasında kas aktiviteleri açısından bir fark bulamamışlardır. Ancak, gözlük kullanan işçilerin daha sık göz kırptıklarını, bu durumun göz yorgunluğunu artırabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışma, AG gözlüğü kullanımının işçilerin fiziksel durumları üzerindeki etkisini inceleyen diğer araştırmalardan farklıdır. Feng vd. (2022), işçilerin sanal elektrikli ekipmanlarla etkileşime girerek montaj görevlerini yerine getirdiği bir çalışma yapmışlardır. Masaya yerleştirilen sanal elektrikli ekipman, yaklaşan işçilere görev ve montaj yerinin bilgilerini veren sesli talimatlar yayınlamıştır. Bu uygulama, işçilerin verimliliğini artırmış ve görevleri daha iyi anlamalarını sağlamıştır. Literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla bu araştırma, sesli talimatların geniş çapta kullanımını vurgulamaktadır. Chalhoub & Ayer (2019), bir konferans salonunda bir tedarikçi ile işbirliği yaparak elektrikli ekipman montaj yerlerinin doğruluğuna odaklanan bir çalışma yapmışlardır. Modeller, şirketin tasarımcıları tarafından oluşturulmuş ve katılımcılar, şirketin farklı görevlerdeki çalışanlarından oluşmuştur. Katılımcılar, işçilerin konferans odasında elektrikli ekipmanı doğru bir şekilde monte edip edemeyeceklerini ve montajı tamamlamalarının ne kadar sürdüğünü test etmişlerdir. AG teknolojisinin doğruluk ve zaman açısından etkinliğini doğrulamışlardır. Diğer bir çalışmada, Chalhoub vd. (2021), deneyimli ve deneyimsiz gruplardan öğrencileri AG teknolojisini kullanarak elektrikli ekipman görevlerini yapmaları için görevlendirmişlerdir. Üç grubun tamamlanma sürelerinin benzer olduğunu ancak AG teknolojisinin deneyimsiz grup için hata oranlarını azaltmada daha etkili olduğunu bulmuşlardır. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışma, deneyim seviyeleri farklı gruplara odaklanmasıyla öne çıkmaktadır. Dallasega vd. (2023), bir çalışmada katılımcıların AG gözlüğü kullanarak elektrikli ekipman montaj işaretlemeleri yapmalarını sağlamışlardır. Çalışma, AG teknolojisinin zaman kazandırdığını ve işçi eğitimine olan ihtiyacı azalttığını bulmuşlardır. Ancak, araştırmacılar teknolojinin, işçilerin görüş alanlarını daraltarak mesleki güvenlik risklerini artırdığını da belirtmişlerdir. Fang vd. (2024), birden fazla kişinin birlikte çalışarak elektrik kablosu montajı yapabilecekleri bir AG modeli geliştirmişlerdir. Katılımcıların hem görsel hem de sesli talimatlar alarak daha verimli çalışmaları sağlanmıştır.

Bilim insanları, teknolojinin inşaat sektörünün montaj aşamasındaki etkisini incelemek amacıyla lego montajı üzerine de araştırmalar yapmışlardır, çünkü montajı kolaydır ve laboratuvar ortamlarına uygundur. Hou vd. (2013), bir lego modelini AG ile tasarlamıştır. Araştırmacılar 50 katılımcıyla hem kâğıt tabanlı hem de AG tabanlı

yöntemlerle lego montajı yapmışlardır. Çalışmada, AG kullanarak görevleri tamamlayan katılımcıların daha az hata yaptıkları, daha az iş yükü hissettikleri ve görevlerini daha kısa sürede tamamladıkları raporlanmıştır. Deneyimsiz katılımcıların, deneyimli katılımcılara kıyasla AG'den daha fazla faydalandığı bildirilmiştir. Bhattacharya & Winer (2019), bir uzman ustabaşının masada montaj görevleri yapmasını gözlemlemiş ve otomatik iş talimatları oluşturmak için kameralar ve sensörler kullanmışlardır. Ardından, görevde bulunan işçi, uzman ustabaşının gösterdiği şekilde AG aracılığıyla iş talimatlarını görebilmiştir. Shirazi & Behzadan (2015), öğrencilerle AG teknolojisi kullanarak bir lego montajı yapmışlardır. Deney, AG teknolojisini kullanan öğrencilerin geleneksel yöntemle uygulama yapan öğrencilere kıyasla daha iyi performans sergilediğini göstermiştir. Gözlemler video formatında kaydedilmiş ve öğrencilerin iş birliği ve iletişimde ne kadar zaman harcadığı belgelenmiştir. Kâğıt tabanlı montaj yapan öğrenciler, iş birliği, iletişim ve fikir alışverişine daha fazla zaman harcamışlardır.

Syberfeldt vd. (2015), lego montajında AG teknolojisi üzerine bir deney yapmışlardır. Çalışmalarının odak noktası, montaj sırasında katılımcıların performansından çok, katılımcıların modelle ilgili memnuniyetiydi. Anket değerlendirmesi, katılımcıların AG modelini anlamada kolaylık yaşadıklarını göstermiştir. Ancak katılımcılar, gerçek uygulama konusunda kâğıt tabanlı projeyi tercih ettiklerini belirtmişlerdir. Bu bakış açısı, literatürdeki genel kullanım kolaylığı ile çelişmektedir. Benzer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada katılımcılar, AG için değil, SG için tasarlanmış olan Oculus VR başlıklarını kullanmışlardır. Oculus başlığı, AG alanında bir başlığın sunduğu kadar etkili bir deneyim sağlamamış olabilir. Katılımcıların olumsuz algısı, deneyde AG başlığının kullanılmamasıyla ilişkilendirilebilir. Yan (2022), LEGO yapısı inşa ederken gerçek görüntülerle sanal görüntüleri hizalayarak 1 mm'den daha az bir hata oranı elde etmiştir. Çalışmasında, sanal elleri gizleyip gerçek ellerin sanal nesneleri kavrayıp manipüle etmesine olanak tanıyan seçeneği başarıyla uygulamıştır. Ancak, bu çalışmanın gelişime açık yönü, katılımcıların performans verilerinin sunulmamış olmasıdır.

Çelik konstrüksiyon montajları, teknolojinin benimsenebileceği bir diğer alandır. Wen vd. (2021), öğrencilere çelik konstrüksiyon montaj projesini anlamada yardımcı olmak için bir AG modeli geliştirmiştir. Ayrıca, model gerçek dünyada da inşa edilerek projeyi gerçek bir şekilde temsil etmesi sağlanmıştır. AG yönteminin öğrenciler üzerindeki etkisini anlamak için iki öğrenci grubu çalışmaya dahil edilmiştir. Bazı öğrenciler geleneksel yöntemi kullanırken, diğerleri projeyi AG modeliyle incelemiştir. İnceleme sonrasında her

iki grup da istenilen montaj verilerini bir tabloya girmiştir. Bulgular, AG modelini inceleyen öğrencilerin istenen montaj verilerini sağlama konusunda daha başarılı olduklarını göstermiştir.

Tavares vd. (2019), daha önce insanlar tarafından yapılan kaynak robotu görevlerini atamak için AG görselleri kullanmışlardır. Çalışanlar, kaynağın yapılacağı alanları da görselleştirebiliyordu. Çalışmada, BIM modelinden elde edilen veriler doğrudan robota aktarılmış ve robot bu verilere dayanarak kaynak işlemi gerçekleştirmiştir. Ayrıca, kaynak bölgelerinin belirlenmesi için önceki yöntemlerde bir operatörün geleneksel ölçüm cihazlarıyla yapması gereken ölçümler, kaynak bölgesinin görüntüsünün projeksiyonuyla yapılmış ve böylece operatör hataları azaltılmıştır. Bu çalışma, robot teknolojisi ve AG teknolojisinin bir arada kullanıldığı nadir çalışmalardan biri olarak öne çıkmaktadır. Nee vd. (2012), CNC makinesinin verimliliğini ve güvenliğini artırmak için AG teknolojisini sisteme entegre etmişlerdir. AG teknolojisi, CNC makinelerini kullanan operatörlere ses, metin, görüntüler ve hatta videoları gerçek ortam üzerine yansıtarak destek sağlamıştır. ,

Araştırmacılar, demir çubuk montajı üzerine üç çalışma yapmışlardır. Wu vd. (2023), işçilerin görevlerini öğrenmelerini ve projeye ilişkin bilgilere AG kullanarak erişmelerini sağlayan bir AG uygulaması geliştirmişlerdir. Katılımcılar sırasıyla kâğıt ve HoloLens kullanarak montaj yapmışlardır ve deneysel sonuçlar, AG uygulamasının verimliliği artırdığını, ancak hata oranlarını azaltmadığını göstermiştir. AG modelini kullanan katılımcıların hata oranlarının azaltılmaması, literatürle çelişmektedir.

Tan, Xu, Li, vd. (2022), AG teknolojisinin öğrenci öğrenme seviyeleri üzerindeki etkisini incelemiş ve üç grup öğrenciye demir donatı uygulama projesi sunmuşlardır. Bir grup projeyi geleneksel çizimler ile incelemiş, diğer grup BIM 3D modeli ile incelemiş, üçüncü grup ise projeyi AG uygulaması üzerinden incelemiştir. İncelemeler sonrasında öğrencilere bir sınav verilmiştir. Sınavın sonuçları, AG modelini inceleyen katılımcıların daha başarılı olduğunu göstermiştir. Çalışmada AG modelinin katılımcıların algılama becerilerini geliştirdiği bildirilmiştir.

T. K. Wang vd. (2018) çalışmalarında, AG gözlüğü, üç boyutlu (3B) proje modelleri ve kâğıt tabanlı yöntemler kullanarak demir donatı uygulama projesini inceleyen katılımcıların göz hareketlerini izleyip değerlendirmiştir. Kâğıt tabanlı projeyi inceleyen katılımcıların proje bilgilerini işlemeleri, AG kullananlara kıyasla daha uzun sürmüştür. Çalışmanın literatürle çelişen sonucu, öğrenme için AG ve 3B görsel kullanan katılımcıların harcadığı zamanın aynı olduğunun bulunmasıdır.

C. H. Chu vd. (2020), Tayvan'da Dougong mimari tasarımının montajını içeren geleneksel bir tasarım montajı çalışması yapmışlardır. Aynı model, kâğıt tabanlı ve 3B görseller kullanılarak farklı katılımcılar tarafından montajlanmıştır. Araştırmacılar, AG ile yapılan montajın kâğıt tabanlı montajdan daha uzun sürdüğünü, ancak hata oranının azaldığını bulmuşlardır. AG katılımcılarının uygulama süresindeki artış, literatürdeki bulgularla çelişmektedir. Bu durum, Dougong modelinin karmaşıklığı ve AG modelinin anlaşılabilirliği ile ilişkili olabilir.

H. Kim vd. (2022), 12 peyzaj mimarlığı yüksek lisans öğrencisiyle yapılan bir çalışmada, büyük bir alanda geleneksel peyzaj mimarlığı tasarımını AG gözlüğü kullanarak uygulamışlardır. Çalışmada, AG ve CNC yöntemleri arasında maliyet karşılaştırması yapılmıştır. AG yönteminin, CNC yönteminden üçte bir daha ucuz olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, katılımcılarla yapılan bir anket, AG uygulamasının faydalı ve ilgi çekici olarak algılandığını ortaya koymuştur. Çalışmada, CNC ile yapılan işlemin ne kadar sürede tamamlanacağı varsayımına dayalı olarak CNC ile ilişkili maliyet hesaplanmıştır.

Araştırmacılar, ahşap montaj süreçleri için de AG teknolojisini kullanmışlardır. Deshpande & Kim (2018), kâğıt planlar yerine AG teknolojisini kullanarak mobilya montajı gerçekleştirmişlerdir. AG destekli montajı test etmek için 14 katılımcıyla deneyler yapmışlardır. Uygulama kullanımının katılımcıların mekânsal problem çözme becerilerini geliştirdiğini ve özellikle karmaşık montaj görevlerinde olumlu etkiler yarattığını gözlemlemişlerdir. Kyaw vd. (2023), yapıştırılmış lamine ahşap kirişlerin kesilme süreçleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Kesim sırasında ahşabın 2 mm hassasiyetle kesilmesi gerekmektedir. Kesim sürecinin doğruluğu AG gözlükleri kullanılarak test edilmiş ve yüksek verimlilik sağlanmıştır. Fazel & Adel (2024b) ahşap parçaların birleşiminde yapılan hataları azaltmak için bir AG modeli geliştirmişlerdir. Hololens 2 gözlüğü kullanarak daha hassas çivileme sağlamışlardır. Uygulama hem vidalama hem de çivileme için denenmiş ve geleneksel metoda göre hata oranını azalttığı tespit edilmiştir. Settimi vd. (2024), bir ahşap işleme marangozluk işlemi için AG uygulaması geliştirmişlerdir. Uygulama, ahşap kesim aletinin doğrultusunu kamera ile takip etmekte ve kullanıcıya yönlendirmeler yapmaktadır. Yapılan testlerde uygulamanın 3.9 mm hata payı olduğu tespit edilmiştir.

B. Kim vd. (2012), köprü inşaatı için AG teknolojisini kullanmışlardır. Uygulamada malzeme kullanımı entegrasyonu yaparak, köprünün inşaat sürecini bir vinçle görselleştirmişlerdir. Çalışmalar, AG teknolojisinin verimli ve güvenli çalışma koşulları sunduğunu rapor etmiştir. Bu çalışmada geliştirilebilecek bir alan, uygulamanın gerçek bir

uygulama sahasında test edilmemiş olmasıdır. Ancak, bu erken aşama bir çalışma olduğundan, böyle bir testin yapılamamış olması anlaşılabilir bir durumdur. Abdeen vd. (2022), kazı çalışmalarıyla ilgili bir AG mobil uygulaması oluşturmuşlardır. Çalışmaları, bir ekskavatörün 360° görüntüsünün fiziksel ortamlarda nasıl kullanılabileceğini incelemiştir. Sonuçlar, MAG uygulamasının verimliliği, güvenliği ve eğitim süreçlerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Çalışmaların gerçek bir ekskavatör yerine bir model üzerinde yapılmış olması, bu araştırmadaki bir geliştirme alanıdır.

AG teknolojisini inşaat sektörünün montaj fazına uyarlamak amacı ile yazılmış olan literatürdeki tüm makaleler detaylıca analiz edilmiştir. Yaptığımız tez çalışması, literatürdeki tüm bu çalışmaların yöntemleri göz önünde bulundurularak yürütülmüştür. Bunun yanı sıra literatürdeki eksik yön tespit edilerek çalışmanın kapsamı belirlenmiştir.

1.3. Çalışmanın Amacı Kapsamı ve Araştırma Soruları

Literatürün detaylı incelenmesi sonucunda, AG teknolojisinin inşaat sektörünün montaj aşamasına uyarlanmasına yönelik çalışmaların yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Teknolojinin sektöre tam anlamıyla entegre edilebilmesi için tüm montaj türleri üzerinde kapsamlı denemeler yapılması ve uyumluluğu engelleyen faktörlerin giderilmesi gerekmektedir. Ancak incelenen 48 makale, yalnızca 10 farklı montaj alanına odaklanmaktadır. Oysa bir inşaat projesinin tamamlanabilmesi için birçok farklı disiplinin montaj süreçlerinde yer aldığı düşünüldüğünde, bu sayı mevcut çalışmaların kapsam açısından yetersiz olduğunu göstermektedir.

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar, AG teknolojisinin gerçek inşaat projelerine uyum sağlayabilmesi açısından da yetersizdir. Mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu, yalnızca laboratuvar ortamında gerçekleştirilen basit görevleri içermektedir. Bunlar genellikle duvar birleşimleri, birkaç borunun montajı veya özelliklerinin incelenmesi, ya da temel elektrik ekipmanlarının birleştirilmesi gibi sınırlı kapsamlı uygulamalardır. Ayrıca, işçilere verilen görevlerin büyük bir kısmı, yarım saatten kısa sürede tamamlanabilecek kadar basit seviyededir. Her ne kadar bu çalışmalar, teknolojinin başlangıç aşamasında değerli bir temel oluştursalar da gerçek inşaat sahalarındaki zorlu koşullar ve karmaşık görevler göz önüne alındığında, mevcut araştırmaların teknolojinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği açısından yetersiz olduğu görülmektedir.

Literatürde, beton dökümü için önemli bir hazırlık çalışması olan, ahşap kalıp montajı çalışması işlemine AG teknolojisinin uyumu üzerine hiçbir çalışma gerçekleştirilmediği tespit edilmiştir. Oysa ahşap kalıp montajı inşaat sektörünün en temel montaj alanlarından biridir. Ayrıca bu montaj dalı tamamen geleneksel yöntemlerle yürütülen, dijitalleşememe konusunda inşaat sektörünü temsil eden iş kollarındandır. Ahşap kalıp montajında emek verimliliğini artıracak yenilikçi bir yöntemin inşaat sektörüne eşsiz bir katkısı olacaktır. Nguyen vd. (2019) kalıpcı ustalarının emek verimliliğini araştırmak ve eksiklikleri tespit etmek üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Vietnam’da yüksek katlı bir inşaatta, kalıpcıların çalışmaları sırasında kalıpcı ustalarının verimliliklerini gözlemlemişlerdir. Bu kapsamda 15 gün boyunca 480 adet gözlem gerçekleştirmişler ve işçilerin uygulama safhasında geçirdikleri zamanları sınıflandırmışlardır. Buna göre, işçilerin zamanlarının ortalama %33,48’ini malzeme arama ve bekleme, %34,98’ini proje okuma ve ölçü alma gibi işlere ayırdıklarını, uygulamaya ise sürelerinin yalnızca %31,54’ünü ayırdıklarını tespit etmişlerdir. Çalışmada, kalıpcıların geçirdikleri sürenin demir ve beton işçilerinden daha fazla olduğu belirtilmiştir. AG teknolojisi, kalıpcı ustalarının hem malzeme arama ve bekleme sürelerini, hem de proje okuma ve ölçü alma sürelerini azaltacaktır. Branting (2024) yüksek lisans tezinde ahşap kalıp uygulamasına AG teknolojisinin uyumu için temel seviyede bir çalışma yapmıştır. Bu alanda yapılan ilk çalışma olması nedeni ile çalışma kıymetlidir ancak literatürdeki boşluğu doldurmak için yeterli değildir. Araştırmacı tezinde, prefabrike duvar montaj konusunu seçmiştir ancak montaj ve uygulama zorluk bakımından bu uygulama kalıp uygulamalarını temsil etmemektedir. Yazılım geliştirmek için Fologram yazılımı tercih etmiş ve yalnızca kısıtlı görsellerle uygulamayı tamamlamıştır. Seçtiği programın yetersizliği nedeni ile uygulamaya modelin tamamını etkileşimleri ve sesli uyarıları ile ekleyememiştir. Görselleştirme aracı olarak maddi yetersizliklerden dolayı mobil cihaz kullanmış, AG gözlüklerinin üstün teknolojik fırsatlarından faydalanamamıştır. Yeterli katılımcı sayısına ulaşamamış ve katılımcı sayısını seçerken ön eleme gerçekleştirmemiştir. Hata oranı ve uygulama süresinin numerik sonuçları üzerinden sonuca varmak yerine anket ile sonuca varmayı tercih etmiştir. Literatürün detaylı incelenmesi sonucunda kalıpcı ustalarının iş gücü verimliliğini artırmak için literatürde önemli bir boşluk olduğu tespit edilmiştir. Artırılmış teknolojisinin inşaat sektörünün montaj fazına adaptasyonu ile ilgili detaylı literatür taraması çalışmasının çıktıları *Automation in Construction* dergisinde makale olarak yayımlanmıştır (Alkan & Basaga, 2023a).

Tezin amacı, AG teknolojisini ahşap kalıbı montajı uygulamasına uyarlayarak, kalıpçıların montaj süresini ve yaptıkları hata miktarını düşürmektir. Bu amaç doğrultusunda;

1. Birbirine denk olan, bir adet geleneksel 2B ve bir adet 3B merdiven kalıbı modelinin hazırlaması
2. AG merdiven kalıbı modelini ve kalıp uygulama simülasyonlarını AG gözlüğü ile görüntüleyebilecek şekilde AG model uygulamasının oluşturulması,
3. Kalıp uygulama kontrollü deneylerinin yapılması ve deney çıktılarının kaydedilmesi,
4. Elde edilen deney çıktılarından anlamlı yargılar elde edebilmek için istatistiksel analizlerin yapılması hedeflenmektedir.

Çalışmada prefabrik bir eleman ya da hazır kalıplar kullanılmamış, katılımcılardan işlenmemiş kalıp üzerinden döner merdiven kalıbı montajlamaları istenmiştir. Katılımcılar iki gruba ayrılmış olan 28 kalıpçı ustası ile gerçekleştirilmiş, her bir usta çalışmayı tek başına tamamlamıştır. 28 kalıpçı ustasından 14'ü geleneksel 2B pafta ile uygulamayı tamamlamış, diğer 14'ü AG uygulaması ile çalışmayı tamamlamıştır. Araştırma konusu olarak katılımcıların uygulama süreleri ve hata miktarları seçilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma, inşaat sektörünün önemli iş kollarından kalıp montajı işçiliğinin emek verimliliğini düşürmeye yönelik olduğu için önemlidir. Bu sayede inşaat sektörünün dijitalleşmesine katkı sağlanmış, AG teknolojisinin inşaat sektörünün saha çalışmalarına uyum sağlaması için önemli bir adım atılmış ve bu alanda yapılacak çalışmalara referans olunmuştur. Ayrıca Türkiye'de AG teknolojisini inşaat sektörüne uyarlamaya yönelik çok az çalışma yapılmıştır. Oysa inşaat sektörünün verimliliği, en çok gelişmekte olan ülkelerin ekonomisini etkilemektedir Kaya vd. (2013). Yapılan çalışmanın çıktıları Türkiye'de bu alanda çalışma yapabilecek araştırmacıların dikkatini ve ilgisini çekecek olması yönüyle önemlidir.

Tez önerisinin cevaplamak istediği temel araştırma soruları şunlardır

Araştırma Sorusu 1: Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel iki boyutlu uygulama proje paftası yerine AG modeli kullanmak, ustaların merdiven kalıbı uygulama süresini etkiler mi?

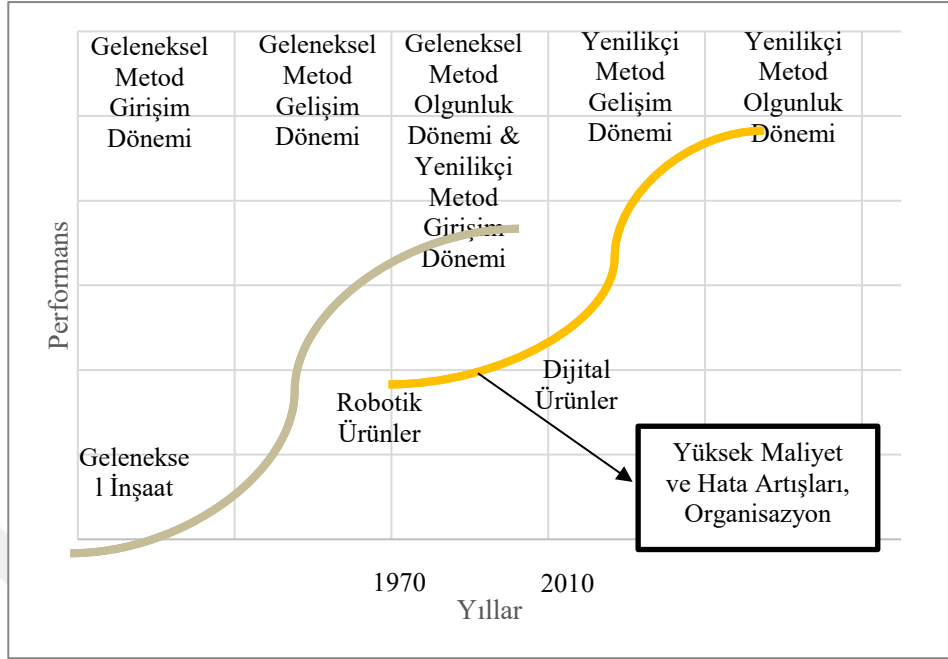
Araştırma Sorusu 2: Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel iki boyutlu uygulama proje paftası yerine AG modeli kullanmak, uygulama sırasında yapılan hata sayısını etkiler mi?

Teknolojinin ilk evresinde geliştirilen uygulamalarda, gerçek dünya cisimleri ile

etkileşim kurulabilen çok az uygulama geliştirilebilmiştir. Etkileşimin gerçekleştirilemediği uygulamalar AG olarak, gerçekleştirilebildiği uygulamalar ise KG olarak tanımlanmıştır. Son yıllarda hem görselleştirme araçlarının gelişmesi ile hem de yazılım araçlarının entegrasyonunun sağlanması ile geliştirilen uygulamalarda gerçek dünya ile sanal cisimlerin etkileşimi kolaylaşmıştır. Görselleştirme teknolojilerini inşaat sektörüne uyarlamak için çalışmalar yürüten araştırmacıların büyük çoğunluğu geliştirdikleri uygulamalar gerçek dünya ile etkileşim kursalar bile bu uygulamaları KG değil AG kapsamında değerlendirmişlerdir. Kolaei vd. (2022) AG tanımının kapsamını genişleterek, gerçek dünya cisimleri ile etkileşim kurabilmesi özelliğine vurgu yapmıştır. Ayrıca geliştirdikleri literatür tarama makalesinde kapsama dahil ettikleri çalışmalarda da AG tanımı kullanılmasına rağmen sanal cisimler gerçek dünya ile etkileşim kurabilmektedirler. Bu nedenle, yürüttüğümüz bu çalışmada, her ne kadar sanal cisimlerle etkileşim kurulsa da, KG tanımı değil AG tanımı kullanılmıştır.

1.4. İnşaat Sektöründe Kullanılabilecek Dijital Ürünler

İnşaat sektörünün emek verimliliğini artırmak için, dijital araçların yapım projelerinin çeşitli iş kollarında kullanılması gerekmektedir. Dijital ürünlerin sektörlerde kullanımı geliştiricilerin ve araştırmacıların yoğun çabaları ile mümkündür. Çünkü bir ürünün geliştirildiği ilk yıllarda maliyetleri yüksektir, hata yapma olasılıkları fazladır, teknolojik ve organizasyonel sıkıntıları bulunmaktadır. Dijital ürünler bu dönemde geleneksel metoda göre hem daha pahalı hem de sürece sağladıkları faydadan daha çok zarar vermektedirler. Bu nedenle, sektör uygulayıcıları ve yatırımcılar, dijital ürünün geliştirildiği ilk yıllarda daha çok sorun yaratan yenilikçi metodu satın almak için daha çok yatırım yapmak istemezler. Bock & Linner (2015) Foster'ın S eğrisi olarak bilenen dijital ürünlerin gelişim grafiğini inşaat sektöründeki dijital ürünlere uyarlamıştır (Şekil 15). Bu grafiğe göre sektörlere uygulanacak olan dijital ürünler Girişim, Gelişim ve Olgunluk dönemlerinden geçmektedir. Grafikte dijital ürün performansı geleneksel yöntem performansı ile de kıyaslanmıştır. Şu an sektörde bulunan geleneksel yöntem, daha eski dönemlerin yenilikçi yöntemi olduğu için bu metodun performansı da bir S grafiği şeklinde tanımlanmıştır. Bu grafiğe göre, geleneksel inşaat süreç yönetiminin olgunluk döneminde olduğu ve gelişimini tamamladığı görülmektedir. İçinde bulunduğumuz dönem yeni geliştirilen bir ürünün girişim dönemi iken, geleneksel metodun olgunluk dönemidir.

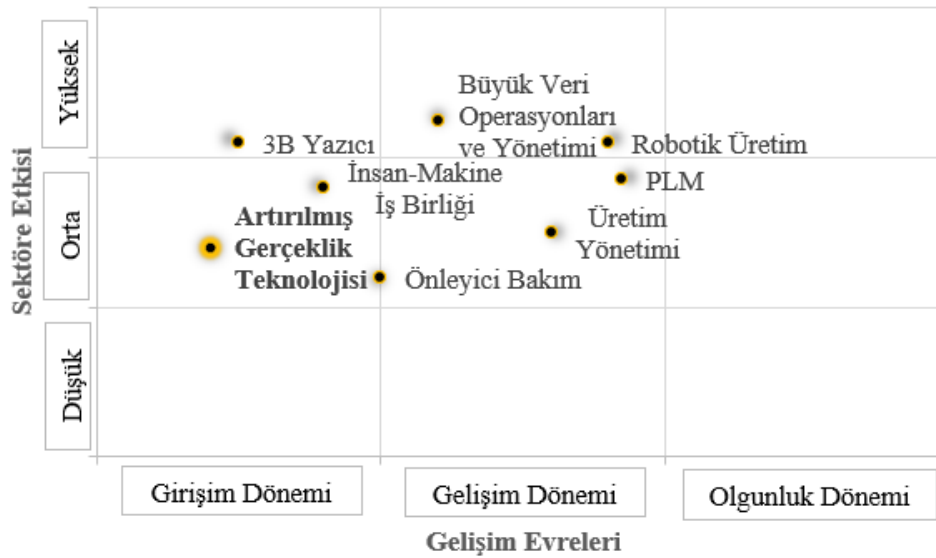


Şekil 15. Foster'ın S eğrisinin inşaat sektörüne uyarlanması (Bock & Linner, 2015)

Yeni geliştirilmiş olan bir dijital ürünün birçok olumsuzlukları bulunmaktadır: Yüksek maliyet, fazla hata, organizasyon sorunu ve bu faktörlerin sebep olduğu performans düşüklüğü. Bu nedenler yatırımcıların ve proje yöneticilerinin dijital teknolojiye yatırım yapmasının önündeki en önemli engellerdir. Dijital ürünün sektöre uyumunu sağlayan, performansını geleneksel metoda göre daha yüksek hale getiren dönem, gelişim dönemidir. Bu dönemde araştırmacılar dijital ürünün sektöre uyumunun önündeki engellerle ilgili problem tespiti, bu problemlerin nasıl çözüleceği ve ürünün performansının nasıl artırılacağı ile ilgili araştırmalar yaparlar. Geliştiriciler de ürünü hem daha ucuz hem de araştırmacıların çalışmalarını referans alarak daha kullanışlı hale getirirler. Dijital ürünün gelişim döneminde gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde, ürün geleneksel metoda göre daha az hatalı, daha ucuz ve daha az organizasyon sorunları içeren hale gelir. Artık bu dijital ürünün sektöre uyumu sağlanmış ve bu ürün proje yöneticileri ve yatırımcılar için tercih edilebilir bir ürün haline gelmiştir. Araştırmacılar ve geliştiriciler sektöre adaptasyonunu sağladıkları ürünün tüm problemlerini ve hatalarını çözüne kadar çalışmalarına devam ederler. Ürünle ilgili tüm problemler çözüldüğünde, dijital ürünün performans artışı durur ve o ürünün olgunluk dönemi başlar. O dijital ürün artık yenilikçi ürün olmaktan çıkar ve geleneksel ürün halini alır. Sektörün emek verimliliğini artırmak için girişim dönemindeki yeni bir ürünün gelişim dönemi çalışmalarını gerçekleştirmek gerekir. Ne yazık ki yeterli araştırma ve geliştirmeler

yapılmadığı için birçok yenilikçi ürün girişim döneminden gelişim dönemine geçememekte ve performans artış potansiyeli olmasına rağmen girişim döneminde unutulmaktadır.

İnşaat sektörünün emek verimliliğini artırmak için araştırmacıların girişim dönemindeki dijital ürünleri tespit ederek geliştirmesi ve inşaat sektörüne adaptasyonunu sağlaması gerekmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile son on yılda birçok dijital ürün kullanıma sunulmuştur. Bu ürünlerin hangilerinin inşaat sektörüne uyarlanabileceği ve geliştirilebileceği ile ilgili bir tespit yapılması, emek verimliliği probleminin çözülebilmesi için önemli bir adımdır. Berger (2016) aynı dijital ürünlerin kullanıldığı düşünülen üretim ve inşaat sektöründe kullanılan dijital ürünleri tespit ederek şematize etmiştir. Bu çalışmada, yalnızca söz konusu ürünlerin tespiti yapılmamış, aynı zamanda her bir ürünün gelişim evreleri de belirlenmiş ve bu durum Şekil 16’da verilen görsel ile sunulmuştur.



Şekil 16. Üretim ve inşaat sektöründe kullanılan dijital ürünlerin gelişim evreleri

Şekil 16’da verilen bilgiler incelendiğinde, sektörde uyumu tamamlanmış ve olgunluk aşamasına gelmiş herhangi bir dijital ürünün bulunmadığı görülmektedir. 3B yazıcılar, insan makine iş birliği ürünleri, önleyici bakım ürünleri ve AG teknolojisi ürünü inşaat sektöründe kullanılabilecek olan, girişim döneminde olan ürünler sınıfındadır. Bu ürünler arasında gelişim seviyesi en geride olan ürün AG teknolojisidir. AG teknolojisi, inşaat sektörüne henüz tam anlamıyla uyum sağlamamış olmakla birlikte, son dönemin en dikkat çekici teknolojilerinden biri olup, sektör için büyük bir fırsat sunmaktadır.

Çalışmamızın konusuyla da doğrudan ilişkili olan bu teknoloji, daha derinlemesine bir incelemeyi ve bilgilendirmeyi gerektirmektedir.

1.5. Artırılmış Gerçeklik Teknolojisi ve Gelişimi

Görselleştirme teknolojileri son yıllarda teknoloji devi firmaların ilgi odağındadır. Samsung, Meta, Google, Microsoft, Apple gibi teknoloji devi firmalar bu teknolojide öncü olabilmek için büyük yatırımlar yapmışlardır. Meta, görselleştirme teknolojileri alanındaki ana geliştirme faaliyetlerine vurgu yapmak amacıyla, daha önce çatı ismi olarak kullandığı Facebook'u değiştirmiştir. Görselleştirme teknoloji kullanıcıları sanal içeriklerden oluşan yeni bir dijital evren kurma girişiminde bulunmuş ve bu dijital evrene ileri evren anlamındaki metaverse ismini koymuşlardır. Meta firmasının çatı ismi Facebook iken, görselleştirme teknolojilerinin öncüsü olmak istediği için, Metaverse ismini çağrıştıracak Meta ismini çatı ismi olarak tercih etmiştir. Ayrıca, Meta firması bu teknolojiyi geliştirmek için 10.000 yüksek vasıflı personel çalıştıracağını ve 10 milyar dolar yatırım yapacağını duyurmuştur (Clegg & Oliván, 2021). Meta 2018 yılında teknolojiye geç dahil olan bir firma olsa da bu teknolojinin erken ve başarılı girişimcilerinden Oculus firmasını satın alarak hızlı bir giriş yapmıştır. Meta'nın geliştirdiği Meta Quest 2, uygun fiyatı ve etkileyici SG deneyimi sunması sayesinde kullanıcılar tarafından yoğun ilgiyle karşılanmıştır. Meta bu ürününde sadece SG deneyimi sunmuş, AG ve KG konularında ürüne yetkinlik eklememiştir. Kullanıcılar ürünü sağ ve sol ellerinde tuttıkları kumanda ile kullanmaktadırlar. Bu sayede cihaz kullanıcının el konumunu algılayabilmekte ve kullanıcının el ve kol hareketlerini sanal ortama taşıyabilmektedir. Meta firması yalnızca ürünü geliştirmekle kalmamış, Horizontal Workroom isminde bir dijital toplantı uygulamasını da kullanıcılarına sunmuştur. Bu uygulama ile kullanıcılar, aynı toplantı odasında sanal olarak buluşabilmekte ve toplantı yapabilmektedirler. Kullanıcılar birbirlerini sanal karakterleri (avatar) ile görüntüleyebilmektedirler. Cihaz belden aşağısını algılayamadığı için avatarların yalnızca belden yukarısı görüntülenebilmektedir. Horizontal workroom uygulaması aynı zamanda kullanıcıların bilgisayarlarını toplantıya taşımaya, bilgisayardaki bir görüntünün sanal odada projeksiyon cihazı ile duvara yansıtılabilmesine, hatta Meta Quest gözlüğü olmayan bir kişi ile mobil cihazının kamerası aracılığı ile görüntülü bağlantı yapılabilmesine olanak tanımaktadır. Meta firması 2023 yılında Quest 3 gözlüğünü satışa sunmuştur. Bu ürün yalnızca daha üstün grafik özellikleri ile donatılmakla

kalmamış, katılımcılarına AG deneyimi de yaşatmıştır. Limitli de olsa kumandasız, el ile kullanım seçenekleri sunarak geliştireceği versiyonlarda daha üstün AG deneyimi yaşatacağının sinyallerini vermiştir. Meta firması yapay zekâ teknolojisi ile yeni geliştireceği gözlüklerin entegrasyonunu hedeflemektedir. Yakın gelecekte son kullanıcı ile buluşturacakları gözlüklerin günlük kullanım gözlüğü boyutlarında olacağını ve arabayı nereye park ettiğini hatırlatmak gibi günlük işlerde yardımcı olacağını bildirmektedir (Pazur, 2024).

Microsoft firması da AG teknolojisinin öncüsü olmak için Hololens gibi etkili bir ürünü son kullanıcı ile buluşturmuştur. Gözlük dijital modelleri ön cephesindeki cama yansıttığı için gerçek dünya cisimleri ile etkileşimi sağlayabilmektedir. Kullanımı için bir kumanda ihtiyacı bulunmamaktadır çünkü el hareketlerini algılayabilmektedir. Kullanıcı havada gördüğü sanal butonlara parmağı ile dokunarak cihazı kullanabilmektedir. Cihazın ortam algılama ve haritalandırabilme özelliği sayesinde sanal bir topun gerçek duvardan sekmesi gibi kullanıcılar sanal modellerle gerçek cisimlerin etkileşimini deneyimleyebilmektedirler. Microsoft firması bu ürün için hedef kitlesini endüstriyel tesisler olarak belirlemiştir. Kendi uygulaması olan Teams toplantı aracını Hololens gözlüklerine entegre etmiştir. Bu sayede Hololens gözlüklerle bakım yapan personele bilgisayar üzerinden yazılı ve işaretli uyarılar gönderilebilmektedir. Cihaz, alanda çalışan teknisyenin, bilgisayar başındaki kişinin ekranında işaretlediği görselleri çalışma alanındaki gerçek cisimler üzerinde görmesine olanak tanımaktadır. Firma Hololens ürününün grafik özelliklerini geliştirerek Hololens 2 ürününü piyasaya sürmüştür. Hololens 2 ürününün sunmuş olduğu üstün özellikler askeri amaçla da kullanılabilir ve firma Amerikan Birleşik Devletleri Ordusu ile 10 yılda 120.000 başlık için 21,88 milyar dolarlık anlaşma gerçekleştirmiştir (Novet, 2021).

Apple firması görselleştirme teknolojilerine çok geç dahil olmuş olsa da, çıkardığı Vision Pro ürününün yetkinlikleri çok fazla olduğu için teknolojiye iddialı bir giriş yapmıştır. Ürün Hololens ürünü gibi cam bir ekrana görüntü yansıtmakta, el hareketlerini algılayabilmekte ve alan haritalaması yapabilmektedir. Vision Pro aynı cihazla hem SG hem de AG deneyimi sunmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında AG teknolojisinin inşaat sektörünün montaj fazına uyumu için yazılım geliştirilmiş ve kontrollü deneyler yapılmıştır. Kontrollü deneylerden elde edilen bulgular istatistiksel olarak analiz edilerek, teknolojinin inşaat sektörüne uyumu ile ilgili avantajlar ve geliştirilmeye açık olan yönler ortaya koyulmuştur. Tez çalışmasının yazılım ve uygulama aşamasına geçilmeden önce, farklı modeller üzerinde AG teknolojisinin yazılım bileşenleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve çalışma için en uygun süreç belirlenmiştir. Tezin içeriğinde, öncelikle bu incelemeler sonucunda elde edilen bulgular ve kazanılan deneyimler doğrultusunda gerçekleştirilen ön çalışmalar sunulacaktır.

2.1. Ön Çalışmalar

AG teknolojisinin inşaat sektörüne entegrasyonu açısından, geliştirilen yazılımın işlevselliğinin ve teknik yeterliliğinin yüksek olması büyük önem taşımaktadır. Uygulamanın, söz konusu teknolojinin gelişmiş yetkinliklerini yeterince yansıtamaması durumunda, AG teknolojisinin inşaat sektörüyle yüksek düzeyde uyumluluk göstermesi dahi çalışmanın başarısını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, tez kapsamında nitelikli bir AG uygulaması geliştirebilmek amacıyla, yazılımın uygulama aşamasına geçilmeden önce bir dizi ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu süreç sayesinde, hem teknolojinin uygulama alanları hakkında deneyim kazanılmış hem de AG yazılımı geliştirme konusunda teorik ve pratik bilgi edinilmiştir.

AG teknolojisinin etkin bir şekilde deneyimlenebilmesi için 3B modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu teknoloji, söz konusu 3B modelleri gerçek dünyaya entegre ederek detaylı bir inceleme imkânı sunmaktadır. Gerçekleştirilen ön çalışmalarda, AG teknolojisini inşaat sektörüne özgü değerlendirebilmek amacıyla, sektöre ilişkin 3B modellerin kullanılması tercih edilmiştir. Böylece, teknolojinin sağladığı avantajlar ve mevcut sınırlılıkları sektör özelinde daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebilmiştir.

İnşaat sektörüne özgü 3B modellerin elde edilebilmesi amacıyla, bir sanal bina modeli oluşturulmuştur. Söz konusu model, hâlihazırda faaliyette olan bir fabrikanın yönetim binasını temel almaktadır. İki katlı ve 3500 m² taban alanına sahip olan bu bina; ofisler, toplantı odaları ve dinlenme alanları gibi çeşitli mekânları içermektedir. Modelleme süreci,

Autodesk firmasına ait Revit yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Revit'in tercih edilme nedenleri arasında, farklı dosya formatlarında çıktı alabilme özelliği, tasarlanan modelin yalnızca Revit üzerinde değil, çeşitli simülasyon araçlarında da kullanılabilir olması ve Autodesk'in akademik ve eğitim amaçlı çalışmalarda yazılımlarını ücretsiz olarak sunması yer almaktadır. Ayrıca, Revit, BIM alanında en yaygın kullanılan yazılımlardan biri olup, ilerleyen çalışmalarda BIM entegrasyonunun sağlanmasına olanak tanıyacak bir altyapıya sahiptir. 3B olarak oluşturulan modelin görselleri Şekil 17'de sunulmaktadır.



Şekil 17. Modellenen yapının görüntüleri

Modelleme sürecinin tamamlanmasının ardından, oluşturulan modelin görüntülenebileceği yazılım araçları üzerine kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Literatürde tespit edilen paket programların işlevselliğini değerlendirmek ve çeşitli çıkarımlarda bulunmak amacıyla öncelikli olarak BIM Holoview yazılımı üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. BIM Holoview, Microsoft Hololens AG gözlüğü ile uyumlu

alışan ve Revit yazılımında oluşturulan modellerin Hololens cihazlarında görüntülenmesini sağlayan bir yazılım aracıdır. Bu yazılımı kullanabilmek için öncelikle firmanın resmi web sitesi üzerinden bir kullanıcı hesabı oluşturulması ve ardından ilgili eklentinin bilgisayara indirilerek kurulması gerekmektedir. Revit programına bir eklenti olarak entegre edilen BIM Holoview, Revit'te tasarlanan modellerin kendi bulut sistemine yüklenmesine olanak tanımakta ve bu modelleri internet bağlantısı aracılığıyla Hololens cihazına aktarmaktadır. BIM Holoview, Hololens 2 AG gözlüklerinde Microsoft Store üzerinden erişilebilen bir uygulamadır. Kullanıcı, sisteme kayıtlı hesap bilgileriyle giriş yaptığında, bilgisayardan buluta aktarılan modelleri Hololens gözlüğü aracılığıyla görüntüleyebilmektedir. BIM Holoview, abonelik tabanlı bir yazılım olup, kullanıcılara deneme sürecinde üç model görüntüleme hakkı sunmaktadır.

Hololens 2 cihazında BIM Holoview uygulaması açıldığında, masaüstü modu ve 1:1 modu olmak üzere iki farklı görüntüleme seçeneği sunduğu gözlemlenmiştir. Masaüstü modu tercih edildiğinde, yapının 10 kat küçültülerek görüntülenebildiği tespit edilmiştir. Modelin varsayılan görüntülenme konumu, kullanıcının görüş hizasının yaklaşık bir metre ilerisinde belirlenmektedir. Kullanıcı, modeli dilediği konuma taşıyabilmekte, ölçeklendirme yaparak büyütme veya küçültme işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Bu mod, maket yapı inceleme deneyimi sunmakta olup, kullanıcının modelin içine doğru hareket ettiğinde duvarların saydamlaşarak i mekân tasarımını görmesine olanak tanımaktadır.

1:1 modu tercih edildiğinde ise uygulama, modelin konumlandırılabilmesi için bir referans noktasına ihtiyaç duymaktadır. Kullanıcı, modeli yükleme aşamasında binanın hangi konumunda yer alacağını belirlemek için, Revit'teki BIM Holoview eklentisi üzerinden gerekli ayarları yapmaktadır. Uygulama, bu konumlandırma bilgilerini içeren bir karekod çıktısı sağlamaktadır. Kullanıcı, bu karekodları fiziksel olarak bir duvara veya zemine yapıştırarak, Hololens gözlüğüne referans sağlayabilir. Hololens 2 gözlüğü kullanılarak 1:1 modunda görüntüleme gerçekleştirildiğinde, sanal modelin konumu, fiziksel karekodun konumu ile çakışacak şekilde belirlenmektedir. Konumlandırmada hassasiyeti artırmak isteyen kullanıcılar, fiziksel karekodları kullanarak kesin bir yerleşim sağlayabilirken, daha hızlı bir deneyim hedefleyen kullanıcılar, sanal karekod konumunu gözlük takılıyken parmak hareketleriyle ayarlayarak süreci hızlandırabilirler.

Hololens 2 cihazında BIM Holoview yazılımı 1:1 modunda çalıştırıldığında, SG deneyimine yakın bir deneyim sunulmaktadır. Kullanıcı, binayı gerçek boyutlarında

görsüntüleyebilmekte ve fiziksel ortam uygun olduğu takdirde yürüyerek model içerisinde gezinebilmektedir. Ancak, Hololens gözlüklerinin dar görüş açısı nedeniyle, kullanıcı tam anlamıyla sanal ortamın içinde hissedememekte, ancak görüş alanında modelin içinde olduğu izlenimini edinmektedir. Buna ek olarak, uygulama kullanıcılarına model içinde hareket edebilmeleri için ışınlama ve sanal el kumandası gibi ek özellikler sunmaktadır.

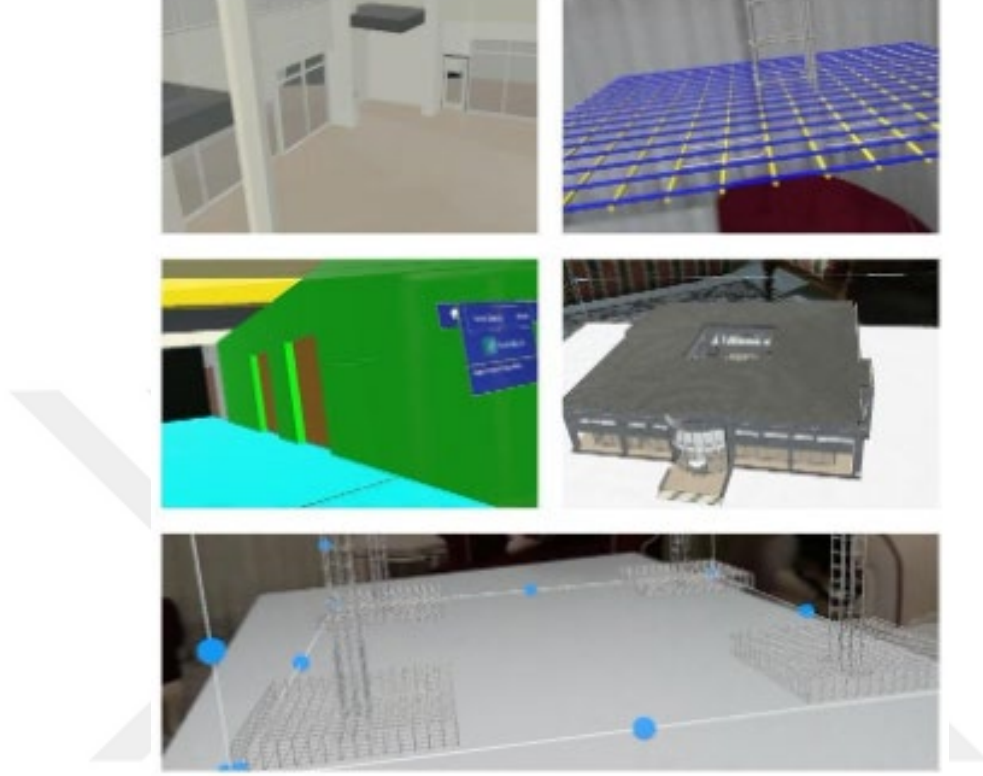
BIM Holoview, model inceleme sürecinde kullanıcıya çeşitli etkileşim seçenekleri sağlamaktadır. Kullanıcı, cetvel aracı yardımıyla istenilen noktalar arasında ölçümler gerçekleştirebilmekte, renklendirme özelliği ile sanal nesneleri belirli renklerle vurgulayabilmekte ve model üzerine notlar ekleyebilmektedir. Ancak, uygulamada yalnızca temel renklerin sunulduğu ve Revit modelinde kullanılan renklerin aktarım sırasında kaybolarak tüm sanal modelin gri tonlarında görüntülediği tespit edilmiştir.

BIM Holoview uygulaması aracılığıyla bina modeli incelenmiş olmasının yanı sıra, donatı modeli görüntüleme süreci de gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Revit programında dört temel, dört kolon ve dört kirişten oluşan basit bir betonarme karkas modeli oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde, yapı elemanlarının demir donatıları da detaylı olarak eklenmiş ve BIM Holoview eklentisine yüklenmiştir. Donatı görüntüleme işlemi yapacak kullanıcıların, eklentiye yükleme öncesinde donatı görüntü ayarlarını “katı model” olarak değiştirmeleri gerekmektedir. Söz konusu donatı modeli, BIM Holoview yazılımı kullanılarak hem masaüstü modunda hem de 1:1 modunda incelenmiştir. BIM Holoview aracılığıyla görüntülenen modellerin Hololens 2 ekran görüntüleri Şekil 18’de sunulmaktadır.

Literatürde en yaygın kullanılan oyun motorlarından biri olan Unity, AG yazılımı geliştirmek ve model görüntüleme süreçlerini deneyimlemek amacıyla kullanılmıştır. Unity, sanal ve AG uygulamalarının geliştirilmesine olanak tanıyan bir bilgisayar yazılımıdır. Yazılım, Unity Technologies firmasının resmî web sitesi üzerinden indirilebilmekte olup, ticari olmayan kullanımlar ve yıllık geliri 200.000 ABD dolarının altında olan işletmeler için ücretsiz kullanım seçenekleri sunmaktadır.

BIM Holoview yazılımının aksine, Unity doğrudan Revit ile bütünleşmiş çalışan, hızlı ve basit bir arayüze sahip değildir. Ancak Revit yazılımından fbx formatında dışa aktarılan dosyalar aracılığıyla, modeller Unity ortamına aktarılabilir. Bu bağlamda hem bina modeli hem de donatı modeli Revit yazılımından fbx formatında dışa aktarılmış ve Unity’de ayrı projeler olarak işlenmiştir. Unity üzerinden Hololens 2 AG gözlüğünde model görüntüleme işlemi gerçekleştirmek için Mixed Reality Toolkit (MRTK) eklentisinin

yüklenmesi gerekmektedir. MRTK, Unity'nin Asset Store platformu üzerinden erişilebilen ve AG geliştirmeleri için kullanılan bir eklenti paketidir.



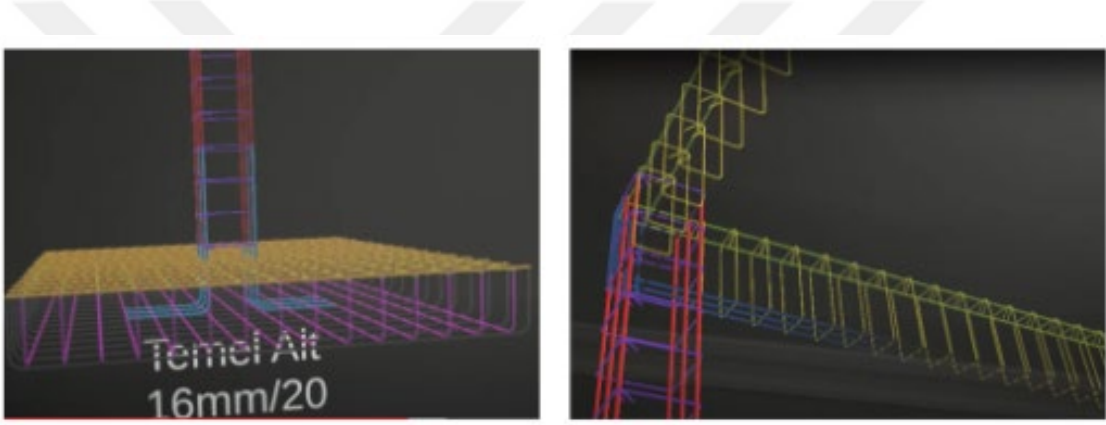
Şekil 18. BIM Holoview AG model görüşleri

Unity'nin BIM Holoview yazılımından temel farkı, kullanıcıya gelişmiş simülasyon seçenekleri sunmasıdır. Kullanıcı, modeli yalnızca statik olarak görüntülemekle kalmayıp, farklı etkileşim mekanizmaları ve simülasyonlar geliştirerek modelin işlevselliğini artırabilmektedir. Ses eklentileri, buton kontrollü yönlendirmeler, cisimlerin belirli komutlarla büyümesi veya kaybolması gibi çeşitli etkileşimler Unity üzerinden tasarlanabilmektedir. Ancak bu tür özelleştirmeleri gerçekleştirebilmek için C# programlama dili bilgisine sahip olunması gerekmektedir. Unity, nesnelere özgü etkileşimler eklemek için Visual Studio ile entegre bir çalışma yapısı sunmaktadır.

Unity ortamına aktarılan .fbx dosyalarında, modelin renk bilgileri kaybolmaktadır. Ancak Unity yazılımında gerçekleştirilen renk düzenlemeleri, Hololens 2 AG gözlüğüne başarılı bir şekilde aktarılabilir. Hololens 2 üzerinde çalıştırılacak uygulamanın başlangıçta kullanıcı ile nasıl etkileşime gireceğini Unity'deki kamera konumu belirlemektedir. Kamera konumu Unity ortamında istenildiği gibi değiştirilebilmekte ve

model içinde hareket edebilmek için kumanda desteği, ışınlanma mekaniği veya belirli bir güzergâh boyunca sürekli hareket sağlama gibi özellikler sisteme entegre edilebilmektedir.

Geliştirilen Unity uygulamasına gerekli fonksiyonlar kazandırıldıktan sonra, yazılım Visual Studio aracılığıyla kablolu veya kablosuz bağlantı yoluyla Hololens 2 cihazına aktarılabilir. Donatı modeli görüntüleme sürecinde gerçekleştirilen ilk denemede, donatı elemanlarının montaj sırasına uygun olarak 3 saniyelik periyotlarla sırasıyla görüntülenmesi sağlanmıştır. Unity üzerinden geliştirilen donatı görüntüleme sürecine ait Hololens ekran görüntüsü Şekil 19’da sunulmaktadır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, BIM Holoview ile Unity yazılımları arasında görüntü kalitesi açısından belirgin bir fark tespit edilmemiştir.



Şekil 19. Unity ile geliştirilmiş donatı modelinin Hololens 2 ekran görüntüsü

Deneyimler sonucunda, Unity ve BIM Holoview yazılımlarının belirli avantajlara ve dezavantajlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Paket programlar ile oyun motorlarının sunduğu üstün özelliklerin değerlendirildiği bu ön çalışmanın bulguları, International Civil Engineering & Architecture Conference’ta bildiri olarak sunulmuştur (Alkan & Basaga, 2023b).

AG modeli geliştirme sürecinde BIM Holoview yazılımının önemli kolaylıklar sağladığı belirlenmiştir. Autodesk Revit ortamında oluşturulan 3B model, BIM Holoview eklentisi aracılığıyla hızlı bir şekilde Hololens cihazında görüntülenmeye hazır hale getirilebilmektedir. Hololens cihazında modelin görüntülenmesi sırasında sunulan masaüstü boyutu ve 1:1 ölçekli boyut seçeneklerinin her ikisinin de kullanışlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu seçenekleri tercih edebilmek için Revit veya BIM Holoview yazılımında özel bir ölçek ayarı yapma gerekliliğinin bulunmaması, yazılımın kullanım kolaylığını artırmaktadır. 1:1

ölçekli mod, özellikle bina içi gezinti açısından kullanıcı dostu bir deneyim sunmaktadır. Ancak BIM Holoview yazılımı, renklendirme ve ölçülendirme açısından sınırlı yeteneklere sahiptir. Renklendirme işlemi yalnızca altı temel renk ile sınırlandırılmıştır. Oysa, uluslararası renk kodlarının kullanılması ve daha geniş bir renk yelpazesinin sunulması, profesyonel kullanıma daha uygun bir yapı sağlayabilirdi. Ölçülendirme işlemlerinde ise, köşe, kenar veya kesişim noktalarının hassas bir şekilde seçilememesi, programın önemli eksikliklerinden biri olarak tespit edilmiştir. Bu eksikliklerin giderilmesi, yazılımın mimari ve mühendislik alanlarında daha etkin kullanılmasını sağlayacaktır. BIM Holoview'ün en temel dezavantajı, sadece önceden tanımlanmış işlevlerle sınırlı olması ve modele ek özellikler kazandırmaya izin vermemesidir.

Unity oyun motoru kullanılarak AG modellemesi gerçekleştirirken, kullanıcıların Unity ve C# programlama dili hakkında temel bilgiye sahip olması gerekmektedir. Unity'nin en büyük avantajlarından biri, Hololens gibi AG gözlükleri, SG gözlükleri, tabletler ve akıllı telefonlar için artırılmış ve SG modelleri üretmeye olanak tanımasıdır. Ancak, Unity üzerinde AG modelleri geliştirilirken, Revit ile doğrudan bir entegrasyon sağlanamamakta ve modelin Unity'ye aktarımı fbx formatında dışa aktarma yoluyla gerçekleştirilmektedir.

Unity ortamında modellenen yapı, Hololens cihazında herhangi bir ek özellik olmaksızın görüntülenebileceği gibi, modele ek fonksiyonlar kazandırılması da mümkündür. Modelin işlevselliği, kullanıcının C# programlama bilgisi ve yazılım geliştirme becerileri ile doğrudan ilişkilidir. Özel animasyonlar, buton kontrollü yönlendirmeler, ses efektleri ve nesnelerin belirli senaryolar doğrultusunda hareket etmesi gibi fonksiyonlar, Unity yazılımı aracılığıyla modele entegre edilebilmektedir. Unity, ayrıca Vuforia eklentisi kullanılarak karekod ile konumlandırma yapılmasına da olanak tanımaktadır. Unity'nin sunduğu bir diğer önemli avantaj ise, kapsamlı bir dokümantasyon ağına sahip olması ve ücretsiz lisans seçeneği ile öğrenme sürecini kolaylaştırmasıdır.

Unity programı kullanılırken, 3D tasarım programlarından FBX formatındaki görseller sorunsuz bir şekilde Unity projelerine entegre edilebilmektedir. Unity, ses ekleme, sesli komutlar ve QR kodları aracılığıyla görsel çağırma gibi özellikler içeren AG uygulamalarının geliştirilmesine olanak tanır. Hem mobil cihazlar hem de başa takılan ekranlar (AG gözlükleri) için uygulama geliştirmeyi destekler ve neredeyse tüm işletim sistemleriyle uyumludur (C. H. Chu vd., 2020). Geniş kütüphanesi ve kapsamlı dokümantasyonu, öğrenme sürecinde de önemli avantajlar sağlamaktadır (Deshpande & Kim, 2018).

Unity ve BIM Holoview dışında da AG yazılımı geliştirilebilecek programlar bulunmaktadır. Yazılım geliştirecek araştırmacıların bu programlar hakkında da temel bilgiye sahip olması için bu programlara da kısaca değinilecektir. Vuforia ve AR Toolkit, AG uygulamalarında tercih edilen diğer yazılım araçlarıdır. Ancak bu iki program, Unity gibi bağımsız uygulama geliştirme araçları değildir. Bunun yerine, Unity içinde AG uygulamaları geliştirmek için özellikleri artıran eklentilerdir. Bu programlar bir projeye entegre edildiğinde, Unity'nin AG konusundaki yeteneklerini önemli ölçüde genişletmektedir. Kullanıcılar tarafından yaygın olarak tercih edilmesinin temel nedeni, gerçek bir nesne veya görsel algılandığında sanal nesneleri veya görüntüleri gerçek ortamın üzerine yerleştirme yeteneğidir (Chalhoub & Ayer, 2019; Khan vd., 2023). Örneğin, Vuforia ve AR Toolkit kullanılarak bir QR kod algılandığında, istenen bir binanın 3D görselleştirmesi ortamda görüntülenebilir veya bir kâğıt plan cihaza gösterildiğinde projenin 3D temsili kâğıt üzerine yerleştirilebilir. Bu iki program doğrudan Unity'ye alternatif olmasa da araştırmacılar tarafından bilinmesi gereken önemli araçlardır. Wikitude, Augment ve Junaio, sınırlı sayıda araştırmacı tarafından tercih edilen yazılımlardır. Benzer özellikler taşıdıkları için bu programlar birlikte ele alınacaktır. Bu programlar, mobil cihazlarla kullanım için uygundur. 3D görüntülerin mobil cihazlar aracılığıyla görüntülenmesine olanak tanır ve modellerle etkileşim kurmak veya yeni özellikler eklemek mümkün değildir. Fologram son dönemlerde tercih edilen bir başka popüler AG yazılımıdır. Özellikle inşaat ve mimarlık alanlarında fiziksel maketler ile dijital modellerin birleşmesini sağlayan bir yazılımdır. Kullanımı için Unity'e kıyasla daha az teknik bilgi gerektirir. Mimarlık ve inşaat programları için hızlı sonuç alma imkânı sunar. Microsoft Hololens ile sorunsuz olarak çalışabilir. Ancak Fologram uygulama geliştirme konusunda Unity kadar esnek ve başarılı bir program değildir. Kendi başına AR uygulaması geliştirmek için ideal bir program değildir. Karmaşık etkileşimler ve gelişmiş programlama yetenekleri sunamaz. Kendi başına simülasyon veya eğitim uygulamaları geliştiremez.

Tezin ana çalışmasına geçilmeden önce, literatürde son yıllarda yaygınlaşan mobil cihazlarla AG görüntüleme yöntemi de incelenmiştir. Ancak her mobil cihazın AG uygulamalarını çalıştırma kapasitesine sahip olmadığı tespit edilmiştir. Araştırmacıların, bir mobil cihaz satın almadan önce cihazın resmi internet sitesinden AG desteği olup olmadığını kontrol etmeleri gerekmektedir. Çalışmada, Samsung Galaxy Tab A8 SM-X modeli tercih edilmiştir. Bu tablet, asgari teknik özellikleri sağlayan ve AG uygulamalarını destekleyen bir cihazdır. Ancak, AG teknolojisi üzerine derinlemesine bir çalışma yapacak

araştırmacıların daha yüksek donanım özelliklerine sahip bir cihaz tercih etmeleri önerilmektedir.

MAG uygulamalarını geliştirmek için Unity kullanılmış ve Revit yazılımından dışa aktarılan .fbx formatındaki 3B model, Unity ortamına entegre edilmiştir. Unity oyun motoruna XR (Extended Reality) eklentisi yüklenmiş, ardından varsayılan Unity kamerası silinerek XR eklentisi ile yeni bir kamera konumlandırılmıştır. Gerekli ayarlamalar tamamlandıktan sonra, Visual Studio aracılığıyla uygulama kablolu bağlantı üzerinden mobil cihaza aktarılmıştır.

Yapılan bu değerlendirmeler sonucunda, BIM Holoview'ün hızlı ve kolay model görüntüleme yeteneği ile profesyonel kullanım açısından avantaj sunduğu, ancak gelişmiş etkileşim mekanizmalarına sahip olmadığı belirlenmiştir. Öte yandan, Unity yazılımının çok daha geniş özelleştirme seçenekleri sunması, ancak ileri seviye programlama bilgisi gerektirmesi nedeniyle kullanımının daha karmaşık olduğu tespit edilmiştir.

İdari Bina modeli kullanılarak MAG uygulaması geliştirilmiştir. Uygulama, mobil cihaz üzerinde çalıştırıldığında, bina modeli tablet kamerasının konumuna bağlı olarak otomatik olarak yerleştirilmektedir. Unity oyun motoruna Vuforia eklentisi entegre edilerek, fiziksel ortama yerleştirilmiş bir QR kodu veya önceden tanımlanmış bir görsel referans alınarak modelin konumlandırılması sağlanmıştır. Bu yöntemde, görsel bir tür anahtar (şifre) görevi görerek sistem tarafından algılanmakta ve model, ilgili görselin konumuna bağlı olarak yerleştirilmektedir. Ayrıca, referans olarak kullanılan görsel hareket ettirildiğinde, 3B model de senkronize bir şekilde hareket etmektedir. Bu tekniğin en dikkat çekici uygulamalarından biri, geleneksel 2B mimari paftaların anahtar olarak kullanılması ve bu sayede 3B bina modelinin ilgili paftanın üzerine yerleştirilerek incelenebilmesidir.

Gerçekleştirilen MAG ön çalışması kapsamında, yapının gerçek boyutunun 1:10 ölçeğinde küçültülmüş bir masaüstü modeli oluşturulmuş ve görüntülenmiştir. Mobil cihaz kullanılarak modelin tüm cepheleri detaylı bir şekilde incelenmiş, kullanıcı cihazı modele yaklaştırdığında görüntünün saydamlaşması sağlanarak iç mekân kesitlerinin de incelenmesine olanak tanınmıştır. MAG ön çalışmasına ait görseller Şekil 20'de sunulmuştur.



Şekil 20. MAG ön çalışma görselleri

Tez çalışmasına başlanmadan önce, en yaygın kullanılan görselleştirme araçlarından biri olan Meta Oculus Quest 2 gözlüğü ile bir görüntüleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, öncelikle İdari Bina modelinin Autodesk Revit ortamında sanal bir görüntü simülasyonu oluşturulmuştur. Uygulama geliştirme aşamasında Unity oyun motoru kullanılmıştır.

Kullanıcının kesintisiz bir kamera hareketi deneyimi yaşayabilmesi amacıyla Unity'nin Time Line Editörü entegre edilmiştir. Time Line Editörü, cisimlerin ve kameraların belirlenen süre boyunca hareket ettirilmesine ve seslendirme eklenmesine olanak sağlayan, ayrıca video animasyonları oluşturmak için kullanılan bir araçtır. SG ortamında sürükleyici ekran geçişleri ve mekânsal gezinme deneyiminin gözlemlenebilmesi amacıyla iklim değişikliği farkındalık eğitimi geliştirilmiştir.

Bu eğitim kapsamında, farklı sanal ortamlar tasarlanarak iklim değişikliğinin çeşitli yönleri ele alınmıştır:

- Uzay temalı bir sanal ortam oluşturularak, eğitime genel bir giriş yapılmıştır.
- Orman ekosistemi içeren bir sahne tasarlanarak, iklim değişikliğinin ormanlar ve vahşi yaşam üzerindeki etkileri açıklanmıştır.
- Çöl ortamı içeren bir sanal alan oluşturularak, iklim değişikliğinin doğurduğu tehlikeler ele alınmıştır.
- Mutfak ortamı tasarlanarak, bireylerin iklim değişikliği ile mücadele kapsamında

alabileceği önlemler aktarılmıştır.

Eğitim geliştirme sürecinde karşılaşılan zorluklar ve deneyimler, 8th International Project and Construction Management Conference’da bildiri olarak (Alkan & Basaga, 2024). İklim değişikliği farkındalık eğitimine ait ekran görüntüleri Şekil 21’de sunulmaktadır.



Şekil 21. SG ön çalışma görselleri

2.2. Yöntem

Tez çalışmasının amacı AG teknolojisi ile hazırlanan merdiven kalıbı modelini kalıp uygulaması sırasında kullanarak, uygulama süresini ve uygulama hata sayısını düşürmektir. Bu amaç doğrultusunda belirlenen 4 adet hedefin, hedeflerle ilişkili 4 adet iş paketi ile gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Tez için gerekli iş paketleri Şekil 22’de şematize edilmiştir. Bu bölümde iş paketlerinin yöntemleri konu başlıkları halinde açıklanmıştır.



Şekil 22. İş paketleri

2.2.1. İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Merdiven Kalıbı Uygulama Projelerinin Oluşturulması

Bu tez çalışmasında, AG destekli merdiven kalıbı uygulama modelinin ve geleneksel 2 boyutlu merdiven kalıbı uygulama projesinin inşaat sahasındaki uygulanabilirlik sonuçları karşılaştırılmıştır. Geleneksel 2 boyutlu merdiven kalıbı projesi Autodesk AutoCAD programında hazırlanırken, AG modeli için gerekli olan 3 boyutlu merdiven kalıbı modeli Autodesk Revit programında oluşturulmuştur.

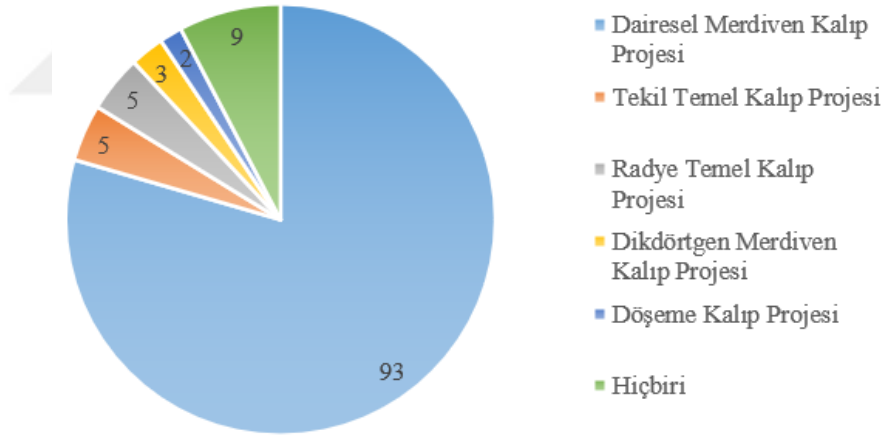
AG teknolojisinin sağladığı avantajların belirgin hale gelebilmesi için çalışmada kullanılan projelerin, geleneksel yöntemlerle algılanması güç olacak şekilde karmaşık tasarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde, geleneksel 2 boyutlu çizimler tüm ustalar tarafından kolaylıkla anlaşılabilir ve AG ile geleneksel yöntemler arasındaki farklar yeterince belirgin hale gelemeyebilir. Bu bağlamda, farklı yapı elemanlarının kalıp projelerinin anlaşılabilirlik düzeylerini değerlendirebilmek amacıyla kalıpcı ustalarının katılımıyla bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Anket verileri Google Forms platformu, sosyal medya kanalları ve birebir görüşmeler aracılığıyla toplanmıştır. Çalışmaya toplam 117 kalıpcı ustası katılım sağlamıştır. Katılımcıların mesleki deneyim süreleri şu şekildedir:

- %51'i (60 kişi) 25 yıl ve üzeri deneyime,

- %19'u (23 kişi) 15-25 yıl arası deneyime,
- %19'u (23 kişi) 5-15 yıl arası deneyime,
- %11'i (11 kişi) 0-5 yıl arası deneyime sahiptir.

Katılımcılara, hangi tür kalıp projelerini anlamakta daha fazla zorlandıkları sorulmuştur. Ankette yer alan seçenekler radye temel, tekil temel, dikdörtgen merdiven, dairesel merdiven, kolon, döşeme kalıp projeleri ve hiçbirinin zor olmadığı şeklinde belirlenmiştir. Şekil 23'te gösterildiği üzere, katılımcıların %79,48'i (93 kişi) dairesel merdiven kalıp projelerinin en zor anlaşılan proje olduğunu belirtmiştir. %7,7'si (9 kişi) ise hiçbir projeyi okumakta zorlanmadıklarını ifade etmiştir. Tekil temel ve radye temel projeleri, katılımcıların %4,27'si (5 kişi) tarafından en zor anlaşılan proje olarak seçilirken, %2,56'sı (3 kişi) dikdörtgen merdiven kalıp projelerini, %1,71'i (2 kişi) ise döşeme kalıp projelerini en zor okunan projeler arasında göstermiştir.

Bu anket çalışmasının sonuçları, kalıp ustalarının en çok zorlandığı proje türünün dairesel merdiven kalıp projeleri olduğunu ortaya koymaktadır.

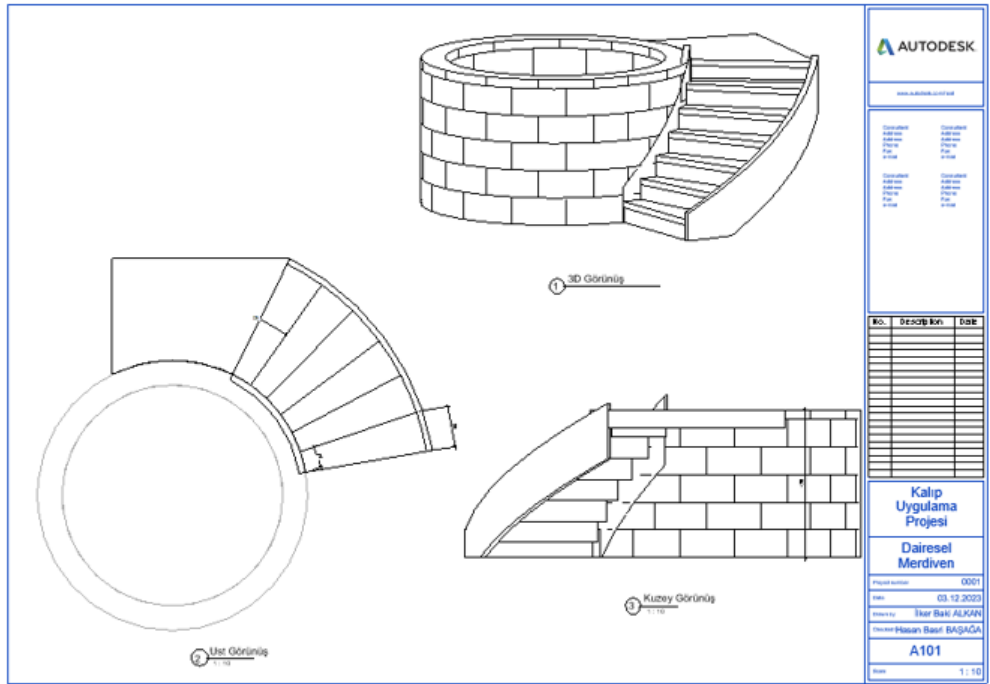


Şekil 23. Kalıp türü seçimi anket sonuçları

Anket sonuçları doğrultusunda, tez çalışmasında dairesel merdiven kalıp projesinin uygulanmasına karar verilmiştir. Hazırlanan projede, merdivenin dairesel formunun proje okuyucusu tarafından daha kolay algılanabilmesi amacıyla, ilk tasarım aşamasında merdiven, daire şeklindeki bir perdenin etrafında modellenmiştir. Bu tasarımda, perde kalıbı yalnızca proje okuma sürecini kolaylaştırmak için oluşturulmuş olup yapısal bir işlev taşımamaktadır. Tasarım sürecinde, merdivenin etrafında döndüğü perdenin yarıçapı 1 metre olarak belirlenmiş olup; merdiven basamak ölçüleri ise aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Basamak genişliği: 110 cm
- Basamak yüksekliği: 17,14 cm
- Basamak derinliği: Geniş bölgede 33 cm, dar bölgede 17 cm

Merdiven, 7 basamaktan sonra bir sahanlık ile devam edecek şekilde tasarlanmıştır. Sahanlık, kalıpcı ustalarının yüksekte çalışmaya gereksinim duymaması için 120 cm yükseklikte konumlandırılmıştır. Sahanlığın dik kenar ölçüleri 145 cm x 94 cm olarak belirlenmiştir. Tasarlanan modelin hem 3B görünüşü hem de teknik pafta görünüşü Şekil 24’te sunulmuştur.

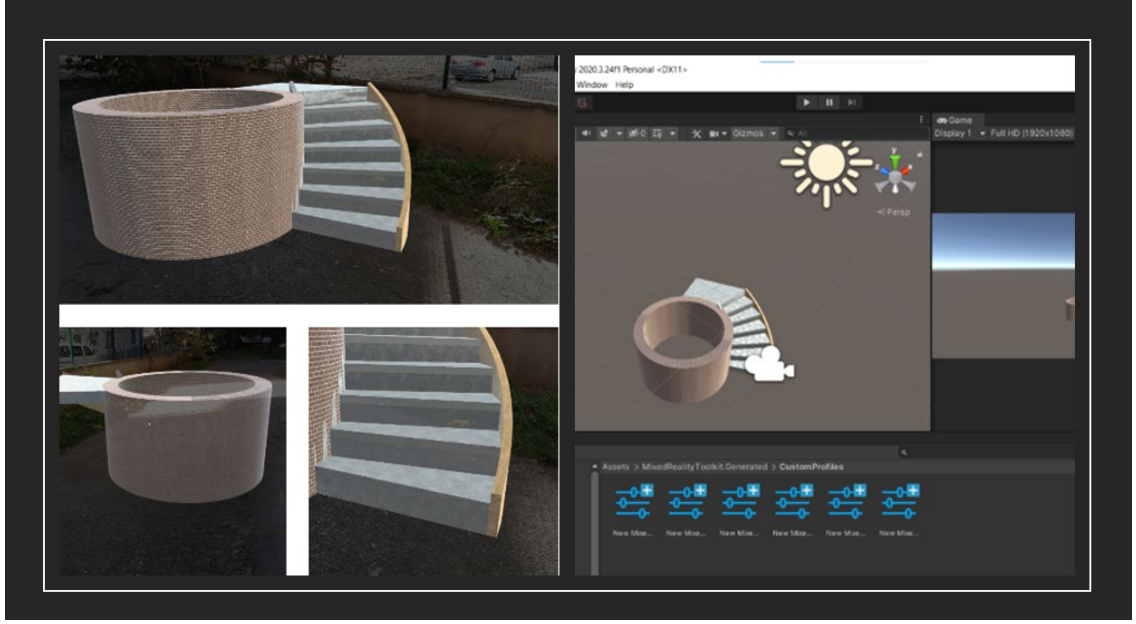


Şekil 24. İlk tasarlanan merdivenin 3 boyutlu ve geleneksel pafta görüntüleri

Tasarlanan merdivenin AG uygulama denemeleri Unity programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, proje Revit programından fbx formatında dışa aktarılmıştır. Oyun motorundaki modelin renk ve desen ayarları için programda 3 adet malzeme oluşturulmuştur. Oluşturulan malzemeler, tuğla duvar, beton ve ahşap olarak isimlendirilmiştir. Bu malzemeler için örnek doku ve örnek yüzey resmi Revit’in malzeme kütüphanesinden seçilmiştir. Bu sayede merdiven beton, merdiven yanındaki ahşap ve dairesel perde duvar görünümeleri modele kazandırılmıştır.

Hololens 2’de uygulama olarak oluşturulmuş olan modelin açık alanda görüntüleme

durumu test edilmiştir. Modelin ilk denemelerde dış saha ile hemzemin olabilmesi için kamera yüksekliği, merdiven alt konumdan ortalama insan göz mesafesi olan 170 cm yükseğe konumlandırılmıştır. Uygulama dış alanda çalıştırılmış ve model incelenmiştir. İncelemeler sırasında herhangi bir görüntü, desen ya da detay kaybı olmadığı ancak netliğin bilgisayar ekranına göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Konumda kayma ya da modelde donma olmamıştır. Modelin uygulama geliştirme safhasındaki ve saha analizi sırasında alınan görüntüleri Şekil 25’te sunulmuştur.

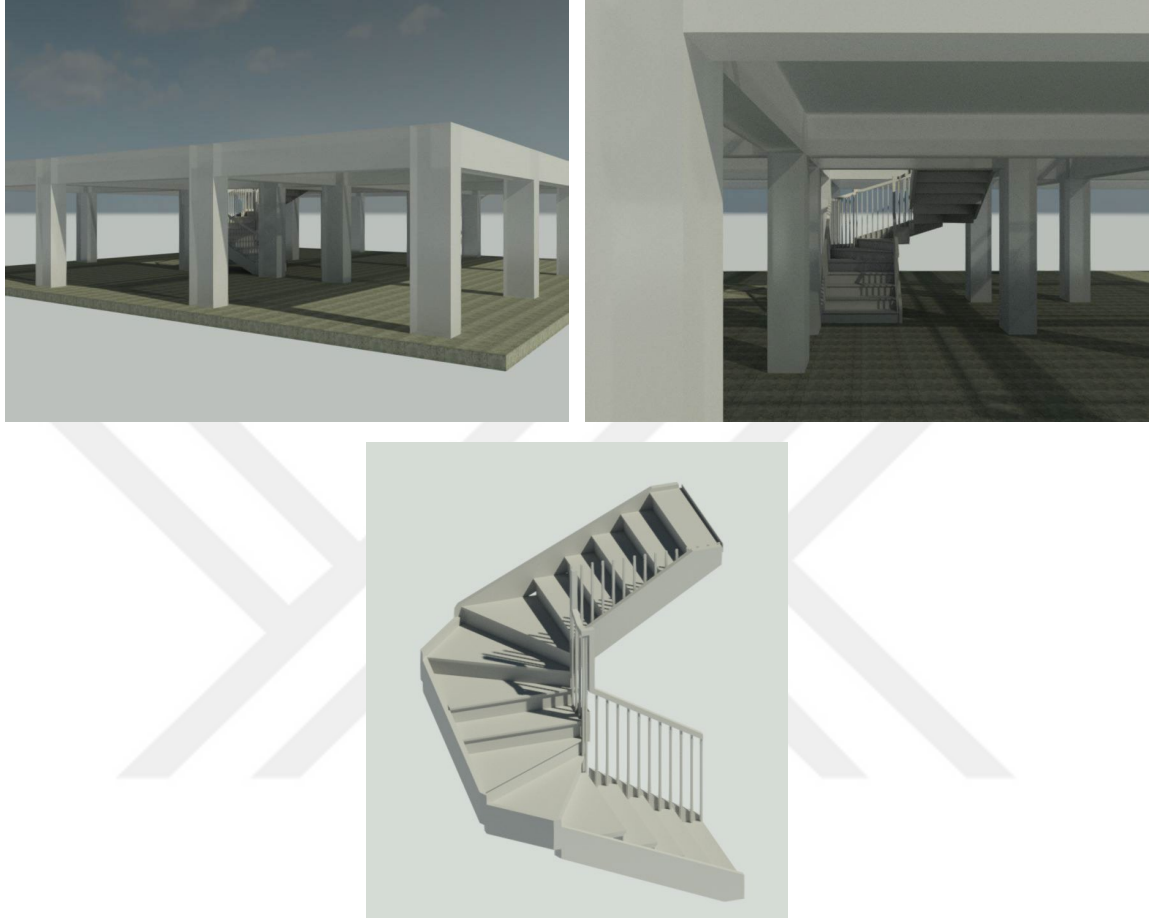


Şekil 25. İlk tasarım uygulama geliştirme ve saha analizi görselleri

Model tasarım sürecinin tamamlanmasının ardından, kalıpçıların montaj sürecine ilişkin uzman görüşlerine başvurulmuştur. Uzmanlar, ilk tasarlanan modelin inşaat sahalarında yaygın olarak karşılaşılan bir proje niteliği taşımadığı yönünde geri bildirimde bulunmuşlardır. Bunun nedeni olarak da tasarlanan merdivenin kullanım amacının belirgin olması gerektiği ifade edilmiştir. Bu geri bildirimler ışığında, mevcut 2B ve 3B projelerin, kullanım amacı belirli olan yeni bir model ile değiştirilmesine karar verilmiştir. Ayrıca, AG uygulamasının geliştirilmesine, yenilenen proje üzerinden yeniden başlanması uygun görülmüştür.

Yeni model tasarım sürecinde, günlük yaşamda sıkça karşılaşılabilecek bir yapı oluşturmak amacıyla öncelikle tek katlı bir betonarme çerçeve ve merdiven boşluğu tasarlanmıştır. Daha sonra, bu merdiven boşluğuna bir döner merdiven eklenerek nihai

model oluşturulmuştur. Tasarlanan tek katlı çerçevenin ve döner merdivenin görünüşleri Şekil 26’da sunulmaktadır.

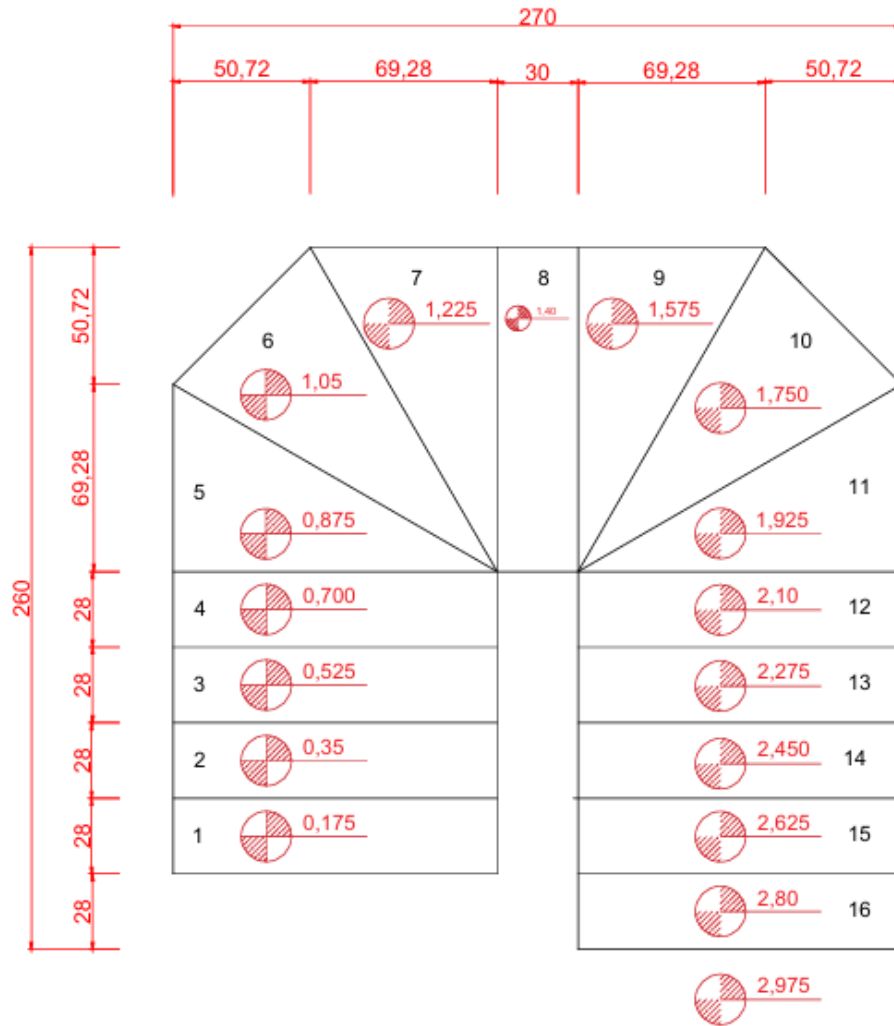


Şekil 26. 3B betonarme çerçeve ve merdiven modeli

Oluşturulan betonarme çerçevenin kat yüksekliği 298 cm, merdiven açıklığı ise 260 cm x 270 cm olarak belirlenmiştir. Bu çerçeveye uygun olarak 16 basamaktan oluşan bir merdiven tasarlanmıştır. Merdivenin minimum basamak genişliği 120 cm olup, tüm basamakların yükseklikleri 17,5 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde, yalnızca 7 basamağın döner merdiven olarak, kalan 9 basamağın ise düz merdiven olarak oluşturulmasına karar verilmiştir. Bunun nedeni, dikdörtgen merdiven boşluklarında ara sahanlık bulunmadığında düz basamak kullanımının yaygın olmasıdır.

Tüm merdiven basamaklarının inşaat sahasında tek bir işçi tarafından uygulanmasının laboratuvar koşullarında mümkün olmadığı değerlendirilmiştir. Özellikle, çalışma yüksekliğinin artması ek iş güvenliği riskleri doğuracağından, deney sürecinin sağlıklı bir şekilde yürütülmesini etkileyebileceği öngörülmüştür. Yüksekte çalışma gerekliliği, deney

sonucuna ek belirsizlikler getirebileceği gibi, işçilerin yüksekte çalışma deneyimlerine bağlı olarak uygulama süresinde farklılıklar oluşmasına da neden olabilir. Daha güvenli ve kesin sonuçlar elde edebilmek amacıyla, deneyin yalnızca merdivenin 5. ile 11. basamakları arasında gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Bu tasarım doğrultusunda, merdivenin 3B modeli Autodesk Revit programında, 2B çizimi ise Autodesk AutoCAD programında oluşturulmuştur. Merdivene ait 2B çizimler Şekil 27’de sunulmaktadır.



Şekil 27. İki boyutlu plan çizimi

AG uygulamasına geçmeden önce proje uzman görüşüne sunulmuştur. Eğer projede yenileme ihtiyacı olursa bu aşamada yapılmalıdır. Çünkü ikinci iş paketinde projelerin uygun olmadığı tespit edilirse, AG modelinin de yeniden oluşturulması gerekecek ve iş gücü kaybına sebep olacaktır. Uzmanlar merdiven kalıbında seçilen basamakların döner merdiven formatı için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

2.2.2. Artırılmış Gerçeklik Uygulamasının Geliştirilmesi

AG uygulamasının oluşturulmasından önce, hangi görüntüleme aracının kullanılacağına karar verilmesi gerekmektedir. Çünkü yazılım programlarında geliştirilen AR uygulamaları, cihaza özgü eklentiler ile çalışmakta olup, belirlenen platforma uygun olarak geliştirilmelidir. Uygulama geliştirildikten sonra cihaz seçiminde değişiklik yapılması durumunda, yazılımın yeniden oluşturulması gerekmektedir. Bunun nedeni, mevcut uygulamanın yalnızca eklenti değişikliği ile farklı bir cihaza uyumlu hale getirilmesinin ya mümkün olmaması ya da çeşitli yazılım hatalarına yol açabilmesidir.

Çalışmanın başlangıç aşamasında gerçekleştirilen literatür taraması, AG teknolojisinin inşaat sektöründeki uyarlamalarına yönelik çalışmaların %52'sinde giyilebilir AR başlıklarının tercih edildiğini ortaya koymuştur. Bu başlıkların bir kısmı, telefon ekranını AR gözlüğü gibi kullanan giyilebilir kılıflardan oluşmaktadır. Ancak bu cihazlar, giyilebilir AR başlıkları arasında en düşük teknolojik seviyeye sahip ürünler olup, alan haritalama özellikleri açısından düşük hassasiyete sahiptir. Ayrıca, sanal ve gerçek nesneler arasındaki etkileşimi başarılı bir şekilde sağlayamadıkları belirlenmiştir. Bu nedenle, literatürdeki çalışmaların büyük bir bölümünde Microsoft Hololens 2 AG gözlüğünün tercih edildiği tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan ön araştırmalar sonucunda da Hololens 2'nin üstün teknik özellikleri dikkate alınarak, AG modeli görüntüleme aracı olarak bu cihazın kullanılması uygun bulunmuştur. Bu doğrultuda, tez çalışmasının AG uygulamasının Hololens 2 ile geliştirilmesine karar verilmiş ve ön çalışmalar bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Hololens 2 ürününün tercih edilme nedenleri aşağıda listelenmiştir;

- ❖ Microsoft Hololens 2, teknoloji devi Microsoft tarafından geliştirilmiş bir AG gözlüğüdür. Görüntüleme teknolojilerindeki ilerlemeler göz önüne alındığında, Microsoft'un AR alanında yatırım yapmaya devam edeceği öngörülmektedir. 2024 yılı itibarıyla Microsoft, Hololens 2'nin üretimini durdurmuş olsa da bu karar resmi kanallar aracılığıyla duyurulmamış ve firmanın AG sektöründen çekildiğine dair herhangi bir bildirim yapılmamıştır. Şirketin, Amerika Birleşik Devletleri Ordusu ile gerçekleştirdiği 120.000 adet Hololens 2 başlığı üretimi ve geliştirme sürecini kapsayan 10 yıllık anlaşma, Microsoft'un bu alanda geliştirme faaliyetlerine devam edeceğinin en önemli göstergelerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Hololens 2 üretiminin durdurulma sebepleri arasında, ürünün endüstriyel tesisler hedef kitlesine yönelik olması nedeniyle geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşamaması, teknolojik olarak rakiplerinden üstün olması

nedeniyle maliyetlerinin yüksek kalması ve bu yüksek maliyete yeterli müşteri bulamaması gibi faktörler yer alabilir. Ayrıca, ürünün teknik özelliklerinin rakip firmalar tarafından analiz edilerek benzer teknolojilerin geliştirilmesi ve daha uygun fiyatlarla pazara sunulması ihtimali de üretimin durdurulma nedenleri arasında gösterilebilir. Ancak, Microsoft'un geliştirilmiş ve daha ekonomik bir AR ürünü piyasaya süreceğine dair henüz resmi bir açıklama yapılmamıştır. Tüm bu değerlendirmeler doğrultusunda, Hololens 2 mevcut teknolojik donanımı ve yetkinlikleri açısından, çalışma döneminde piyasada bulunan AG gözlükleri arasında en gelişmiş ve teknolojik olarak en yeterli cihaz olarak belirlenmiştir.

- ❖ Ürünün 566 gram ağırlığında olması, ön camının isteğe bağlı olarak kaldırılabilmesi ve başa sabitlenebilir bir yapıya sahip olması, inşaat sahası gibi zorlu çalışma koşullarında kullanım kolaylığı sağlaması açısından önemli bir avantajdır.
- ❖ Ürünün el hareketlerini algılayabilmesi çalışmalar sırasında kolaylık sağlamaktadır.
- ❖ Ürünün kullanımı için ilave bir kumandaya ihtiyaç duyulmaması ürünün inşaat uygulamalarında daha rahat kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır.
- ❖ Ürünün kullanıcılarına uzak noktadaki sanal cisimleri parmak hareketleri ile tutup hareket ettirebilme imkânı sunması, uygulama sahası içindeki sanal hareket kabiliyetini artırmaktadır.

Apple tarafından satışa sunulan Vision Pro AG gözlüğü, teknolojik yeterlilik açısından Microsoft Hololens 2 ile benzer seviyede olmasına rağmen, bu çalışmada görüntüleme cihazı olarak tercih edilmemiştir. Vision Pro'nun tercih edilmemesinin ilk nedeni, çalışma kapsamında ön hazırlık sürecinde ürünün henüz piyasaya sürülmemiş olmasıdır. Bunun yanı sıra, Vision Pro üzerinde geliştirme yapabilmek için macOS işletim sistemine sahip bir bilgisayara ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, çalışma grubumuzda bu işletim sistemine sahip bir cihaz bulunmadığından, ek donanım alımı gerekecek ve bu durum çalışmanın maliyetini artıracaktı. Ayrıca, Vision Pro üzerinde yazılım geliştirme yapabilmek için ek olarak abonelik ücreti ödenmesi gerekmektedir. Tüm bu ek maliyet unsurlarına rağmen, Vision Pro'nun çalışmaya Hololens 2'ye kıyasla ek bir avantaj sunmaması nedeniyle, bu araştırmada Apple Vision Pro tercih edilmemiştir.

Literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda, AG modeline ilave özellik kazandırmak için oyun motorları kullanılmıştır. Du vd. (2017) Unity oyun motorunu kullanarak, kullanıcıların SG gözlükleriyle model içinde avaturları ile dolaşmasını ve

etkileşim kurmasını sağlamışlardır. Xu vd. (2018) daire satışı için tasarladıkları örnek SG daire modeline Unity oyun motoru ile gezinti yapabilme özelliği eklemiştir. Mellenthin Filardo vd. (2021) bir kolon donatı modelinin 4B uygulama simülasyonunu Autodesk Stingray oyun motorunu kullanarak SG gözlüğü ile görüntülemiştir. Ramos-Hurtado vd. (2022) iş güvenliği uygulamalarını denetledikleri AG modeline, Unity oyun motoru aracılığıyla kontrol listeleri eklemiştir. Wolf vd. (2022) Unity oyun motorunu kullanarak, SG ortamında iş güvenliği kusurlarını tespit etmeyi hedefleyen bir oyun tasarlamışlardır. Literatürde oyun motorlarının sıkça tercih edilme nedeni, bu yazılım araçlarının kullanıcılarına daha geniş çaplı simülasyon özgürlüğü sunmasıdır. Unity'nin ücretsiz kullanım imkânı sunması, belgelendirme ağının geniş olması ve kullanıcılarına üstün simülasyon imkanları sunması nedeni ile bu çalışmada da Unity oyun motoru yazılım geliştirme aracı olarak tercih edilmiştir.

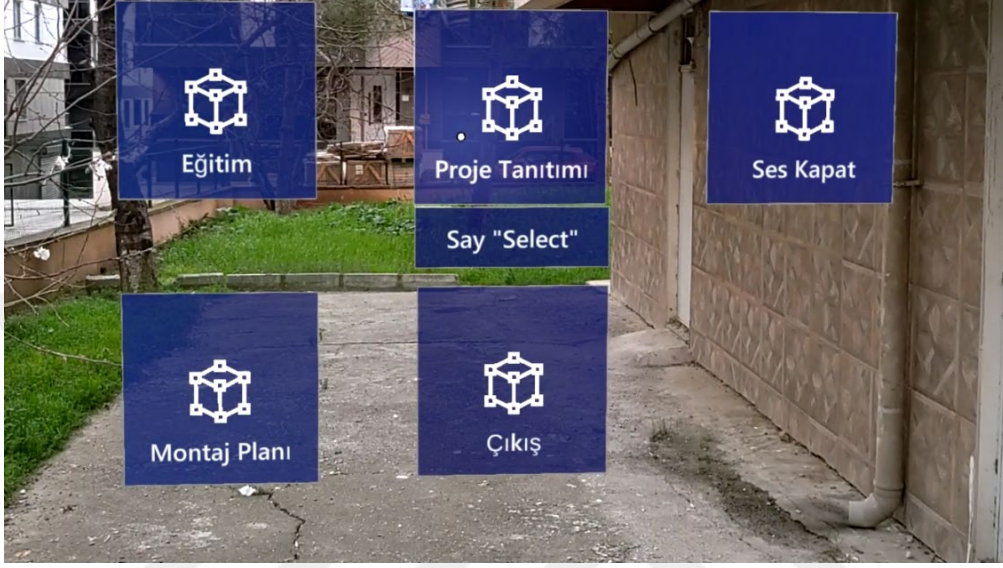
Revit yazılımında oluşturulan 3B model, FBX formatında dışa aktarılmış ve Unity oyun motorunda geliştirilen projeye bir nesne olarak entegre edilmiştir. Uygulama geliştirme sürecinde, Microsoft Hololens 2 ile uyumlu bir çalışma ortamı sağlamak amacıyla Unity 2020.3.24.f1 sürümü tercih edilmiştir. Revit modelinden Unity ortamına aktarılan bölüm, çalışmanın kapsamı doğrultusunda yalnızca döner merdiven özelliğine sahip olan yedi basamakla (5., 6., 7., 8., 9., 10. ve 11. basamaklar) sınırlandırılmıştır. Geriye kalan basamaklar, uygulama sırasında kullanıcıların dikkatini dağıtmamak ve bilişsel yükü azaltmak amacıyla Unity oyun motoruna dahil edilmemiştir.

Uygulamanın geliştirilme sürecinde, yalnızca katılımcının modeli 3B olarak görmesi yeterli bulunmamış, kullanıcı deneyimini iyileştirmek ve kullanım kolaylığı sağlamak amacıyla çeşitli ek özellikler entegre edilmiştir. Uygulama başlatıldığında, kullanıcıyı bir ana ekran sayfası karşılamaktadır. Bu ekranda, gerçek dünya nesneleri üzerinde sanal butonlar görüntülenmekte ve butonlara parmak hareketleriyle etkileşim sağlanabilmektedir. Kullanıcılar, sanal butonlara dokunarak uygulama içinde yönlendirme yapabilmektedir. Uygulama açıldığında, kullanıcıya sesli bir uyarı verilmekte ve her bir butonun işlevi açıklanmaktadır. Ancak, uygulamanın tekrarlı kullanımında, kullanıcıların her seferinde bu sesi dinlemek istemeyeceği öngörülerek, ana ekrana "ses aç/kapat" özelliğine sahip bir buton eklenmiştir. Bunun yanı sıra, kullanıcıların farklı modüllere erişimini sağlamak amacıyla çeşitli butonlar tasarlanmıştır:

- Eğitim butonu, eğitim ekranına yönlendirme yapmaktadır.
- Proje tanıtım butonu, projenin içeriğini açıklayan ekranı açmaktadır.

- Montaj planı butonu, montaj aşamasında kullanılacak ekrana erişim sağlamaktadır.
- Çıkış butonu, uygulamadan güvenli bir şekilde çıkış yapılmasına olanak tanımaktadır.

Geliştirilen uygulamanın Hololens 2 üzerindeki ilk ana ekran arayüzüne ait görüntü Şekil 28’de sunulmuştur.



Şekil 28. Uygulamanın ilk ana ekran görüntüsü

Uygulamaya ana ekran eklenerek kullanıcı deneyiminin iyileştirilmesi ve kullanım kolaylığının artırılması hedeflenmiştir. Farklı modüllere erişimi sağlamak amacıyla, Unity oyun motoru kullanılarak her bölüm için ayrı bir ekran tasarlanmıştır. Ekranlar arası geçiş işlemi, C# programlama dili ile geliştirilen yazılım desteği sayesinde butonlara entegre edilmiştir. Kullanıcı bir butona bastığında, ilgili komut çalıştırılarak ilgili ekrana yönlendirme gerçekleştirilmiştir. Buton etkileşimlerinin sağlanabilmesi için Şekil 29’da verilen özel bir yazılım modülü oluşturulmuş ve her butona, ait olduğu bölüme yönlendirme yapacak şekilde ayrı ayrı işlev ataması yapılmıştır.

AG, görece yeni ve sürükleyici bir teknoloji olup, çalışmaya katılan bireylerin tamamı bu teknolojiyi ilk kez deneyimlemiştir. İlk kez karşılaşılan bu tür bir yenilik, kullanıcıların dikkatlerini dağıtarak, odaklanmaları gereken görev yerine teknolojinin görsel ve interaktif unsurlarına yönelmelerine neden olabilmektedir. Ayrıca, katılımcıların AG cihazlarını ve arayüzlerini daha önce kullanmamış olmaları, sistemin etkin bir şekilde kullanılmasını zorlaştırabilmektedir. Bu nedenlerle hem teknolojik adaptasyon sürecini kolaylaştırmak hem de kullanıcıların el hareketleriyle cihazı nasıl kontrol edebileceklerini öğretmek amacıyla

uygulamaya bir eğitim ekranı entegre edilmiştir. Eğitim modülünün temel amacı, katılımcıların merdiven kalıbı uygulamasına geçmeden önce AG nesnelerinin fiziksel ortamda nasıl konumlandığını, gerçek dünya ile nasıl etkileşime geçtiğini ve kullanıcı hareketlerine nasıl yanıt verdiğini deneyimlemelerini sağlamaktır.

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.SceneManagement;
public class Menu : MonoBehaviour
{
    public void Montaj()
    {
        SceneManager.LoadScene(1);
    }
    public void Anamenu()
    {
        SceneManager.LoadScene(0);
    }
    public void Egitim()
    {
        SceneManager.LoadScene(2);
    }
    public void Tanitim()
    {
        SceneManager.LoadScene(3);
    }
    public void Hazirlik()
    {
        SceneManager.LoadScene(4);
    }
    public void ExitGame()
    {
        Application.Quit();
    }
}
```

Şekil 29. Buton etkileşimi için yazılan kod parçası

Katılımcılar eğitim butonuna tıkladığında, ana ekran arayüzü gizlenmiş ve zemin üzerinde çeşitli hareketli ve hareketsiz nesneler belirerek interaktif bir ortam oluşturulmuştur. Bu nesneler; farklı hayvan türleri, variller ve kutular gibi yaklaşık 35 cm boyutunda objelerden oluşmaktadır. Hayvan figürlerine yerinde sayarak koşma simülasyonları eklenmiş, böylece katılımcıların AG teknolojisiyle daha etkileyici ve gerçekçi bir ilk deneyim yaşamaları sağlanmıştır. Uygulama kapsamında, nesnelerle etkileşim kurulduğunda yok olma özelliği kazandırılmıştır. Bu etkileşim doğrudan nesneye

fiziksel olarak dokunarak değil, Hololens'in uzaktan algılama teknolojisi kullanılarak parmak hareketleriyle sağlanmıştır. Böylece kullanıcıların her nesnenin yanına gitmesine gerek kalmadan, uzaktan etkileşim kurabilmesi mümkün hâle getirilmiş ve AG teknolojisinin etkin kullanımı desteklenmiştir. Tüm nesneler yok olduğunda, eğitim ekranına eklenen "reset" butonu aracılığıyla nesneler yeniden görüntülenebilir hâle getirilmiş ve eğitim süreci istenildiği kadar tekrarlanabilir şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, eğitim ekranına "Ana Menü" butonu eklenerek, kullanıcıların istedikleri zaman ana ekrana dönebilmeleri mümkün hâle getirilmiştir. Eğitim bölümü ve diğer tüm modüllerde, kullanıcılar sesli yönlendirmeler aracılığıyla bilgilendirilmiş ve uygulama süreci desteklenmiştir. Hololens 2 ile görüntülenen eğitim ekranının arayüzü Şekil 30'da sunulmaktadır.



a) Eğitim açılış görüntüsü



b) Model kaybetme etkileşimi

Şekil 30. AG uygulaması eğitim ekranı Hololens 2 görüntüsü

Eğitim bölümünün tamamlanmasının ardından, kullanıcıların kalıp uygulamasına geçmeden önce projeyi hem 2B hem de 3B formatlarda incelemeleri sağlanmıştır. AG teknolojisi, 2B çizimlerin fiziksel ortamda duvara asılmış bir pafta veya zemine serilmiş bir plan gibi görselleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, katılımcıların gerçekleştirecekleri uygulamayı daha iyi kavrayabilmeleri amacıyla proje tanıtım aşamasında öncelikle geleneksel kâğıt pafta gösterimi yapılmıştır. Sesli yönlendirmeler aracılığıyla katılımcılara, bu paftanın yalnızca genel bir bakış sağlamak amacıyla sunulduğu, uygulamanın bu pafta temel alınarak gerçekleştirilmeyeceği ve sürecin adım adım yönlendirmelerle ilerleyeceği bildirilmiştir.

İki boyutlu pafta incelemesi tamamlandıktan sonra, kullanıcılar "İleri" butonu aracılığıyla 3B model görüntüsüne geçiş yapmıştır. Bu aşamada, katılımcılar uygulama kapsamında ele alınan yedi basamaklı döner merdiveni, montajı gerçekleştirilecek kalıplarla

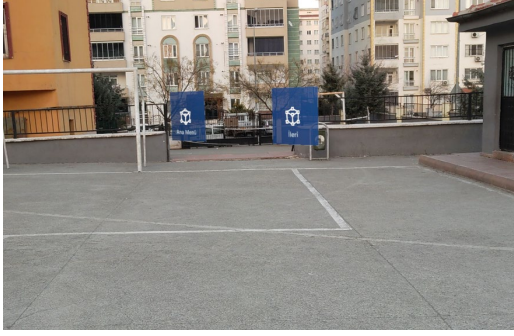
birlikte detaylı bir şekilde inceleyebilmiştir. Uygulamanın bu bölümüne; "Butonu Kapat", "Betonu Aç", "Kalıbı Kapat" ve "Kalıbı Aç" olmak üzere çeşitli etkileşim butonları eklenmiştir. Kullanıcılar, bu butonlar aracılığıyla kalıpların tamamını kapatarak yalnızca merdiveni görüntüleyebilir ve beton dökümü öncesinde nasıl bir kalıp montajı yapılması gerektiğine ilişkin fikir edinebilirler. Aynı şekilde, "Betonu Kapat" butonu kullanılarak merdiven betonu gizlenebilir ve yalnızca uygulanacak kalıp modeli görüntülenebilir.

Proje tanıtım aşamasında sunulan 3B model, sürecin başlangıcında katılımcılara genel bir ön bilgi sağlamak amacıyla bütünsel olarak gösterilmiştir. Bu aşamada uygulama yapmaya yönelik bir işlem gerçekleştirilmediğinden, model aşamalı bir görselleştirme yerine tamamlanmış hâliyle sunulmuştur. Ayrıca, proje tanıtım sürecinin amacı genel bir ön izlenim oluşturmak olduğundan, model üzerinde ölçü bilgileri eklenmemiştir. Katılımcılar, proje tanıtım bölümünde hem 2B hem de 3B incelemeleri tamamladıktan sonra, "Ana Menü" butonu aracılığıyla ana ekrana geri dönebilmiştir.

Şekil 31’de proje tanıtım bölümüne ait Hololens 2 gözlüğünden alınmış kesitler sunulmaktadır. Şekilde tanıtım bölümü buton görüntülerine, 2B pafta inceleme ekran görüntüsüne, 3B modele inceleme görüntüsüne, betonsuz 3B model inceleme görüntüsüne ve kalıpsız 3B model inceleme görüntüsüne yer verilmiştir.

AG uygulamasının kullanımına yönelik egzersizleri tamamlamış ve proje hakkında gerekli ön bilgiyi edinmiş olan katılımcının, uygulamayı kullanarak montaj işlemini gerçekleştirebilmesi amacıyla uygulamada bir montaj bölümü oluşturulmuştur. Ana Menü üzerinden montaj bölümü butonuna basıldığında, katılımcı karşısında, uygulama kapsamında montajını gerçekleştireceği merdivenin kalıp montajı tamamlanmış ve beton dökülmüş hâlini görüntüleyebilmektedir. Kullanıcı, "Betonu Aç/Kapat" özelliğini kullanarak betonu gizleyebilir ve yalnızca kalıp modelini inceleyebilir.

Montaj süreci boyunca katılımcıya, adım adım sesli yönlendirmeler sağlanarak uygulamanın nasıl gerçekleştirileceği açıklanmaktadır. Katılımcı yeterli incelemeyi tamamladıktan sonra "Başla" butonuna basarak montaj işlemine geçmektedir. Bu aşamada, tüm kalıplar kaybolur ve toplam 15 adımdan oluşan bir montaj planı devreye girer. Katılımcı, "1. Adım" butonuna bastığında, zeminde yalnızca ilk kalıp görüntülenmektedir. Sesli yönlendirmeler aracılığıyla, katılımcının fiziksel ahşap kalıbı sanal ahşap kalıpla hizalayarak doğru yerleşimi sağlaması gerektiği ifade edilmektedir. Katılımcı bu işlemi başarıyla tamamladıktan sonra "2. Adım" butonuna basarak ikinci sanal kalıbı görüntüleyebilir ve montaj işlemine devam edebilir.



a) Menü Görüntüsü



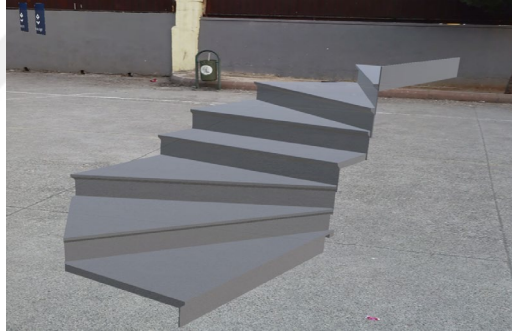
b) İki Boyutlu Pafta Görüntüsü



c) 3B model görüntüsü



d) Beton kapalı model görüntüsü



e) Kalıp kapalı model görüntüsü

Şekil 31. Proje tanıtım ekranı Hololens görüntüsü

Uygulama, her bir sanal kalıbın farklı bir buton üzerinden görüntüleneceği şekilde toplam 15 adım olacak şekilde tasarlanmıştır. İlk sekiz adımda sırasıyla merdiven basamaklarının yan kalıpları gösterilmektedir. Son yedi adımda ise, yedi basamağın merdiven rıhtlarının montaj süreci görselleştirilmektedir. Şekil 32’de, montaj bölümü adımlarının Hololens 2 ekran görüntüsü sunulmaktadır.



a) Montaj bölümü başlangıç



b) Montaj bölümü betonsuz görünüm



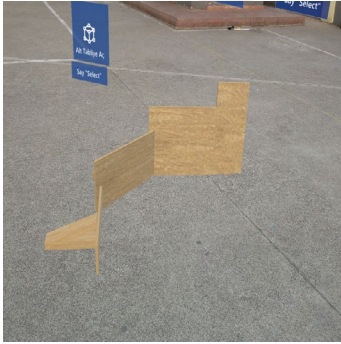
c) 1. adım



d) 2. adım



e) 3. adım



f) 4. adım



g) 5. adım



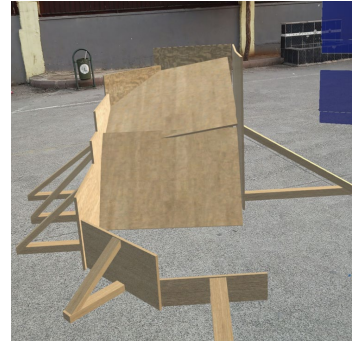
h) 6. adım



i) 7. adım



j) 8. adım



k) Alt döşeme aktifleştirme

Şekil 32. Montaj ekranı Hololens 2 görüntüsü



l) 9. adım



m) 10. adım



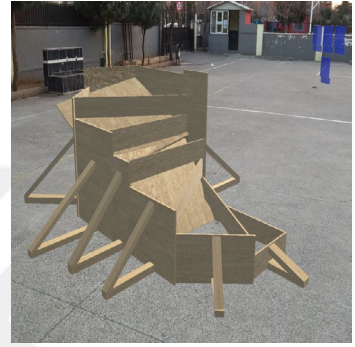
n) 11. adım



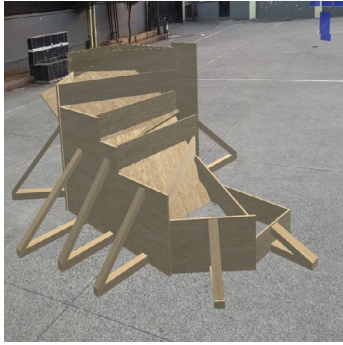
o) 12. adım



p) 13. adım



r) 14. adım



s) 15. adım



t) Bitmiş kalıp cephe

Şekil 32'nin devamı

Kontrollü deneyler aşamasına geçilmeden önce, AG uygulamasının işlevselliğinin değerlendirilmesi, olası eksikliklerin tespit edilmesi ve gerekli revizyonların yapılması amacıyla bir ön deneme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, deneme çalışmasına başlamadan önce, uygulamada kullanılacak 15 kalıbın tamamının ön montajı tamamlanarak hazır hâle getirilmiştir.

Deneme çalışması, tek bir katılımcının bireysel olarak merdiven kalıbı montajını gerçekleştireceği şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, kullanılan kalıp malzemelerinin mümkün olduğunca hafif olması gözetilmiş ve malzeme seçimi bu doğrultuda yapılmıştır. Çalışma kapsamında, katılımcının malzeme hazırlama veya kesme işlemleriyle

uğraşmaksızın, kısa sürede hatasız ve doğru montajı tamamlaması hedeflenmiştir.

Deneme çalışmasına başlamadan önce, AG modeli aracılığıyla hazırlanmış ve uygulamaya hazır hâle getirilmiş merdiven kalıbı elemanları Şekil 33'te sunulmaktadır.



Şekil 33. Deneme çalışması için hazırlanmış ahşaplar

Deneme çalışması, daha önce hiç Hololens 2 gözlüğü kullanmamış bir katılımcı ile gerçekleştirilmiştir. Uygulama sürecinde katılımcının modeli başarıyla tamamladığı gözlemlenmiştir. Ancak, deneme sırasında gerçek kalıplar ile sanal kalıplar arasında belirli bölgelerde ölçü farklılıkları olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılıkların, AG uygulamasındaki kalınlık ve uzunluk toleranslarından kaynaklandığı belirlenmiş olup, deneme çalışmasının ardından gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Bunun yanı sıra, deneme sürecinde birleşim noktalarındaki ahşap elemanların zaman zaman yerinden çıkabildiği gözlemlenmiştir. Bu durum hem deneme katılımcısından hem de uzmanlardan alınan geri bildirimler doğrultusunda değerlendirilmiş ve montaj işlemlerinde çivi ya da vida kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Uygulamanın gerçek kalıp montaj sürecini daha doğru bir şekilde temsil edebilmesi için çivileme yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Deneme çalışmaları sırasında tespit edilen bir diğer eksiklik, katılımcının menüye erişim sağlamak için her seferinde başlangıç noktasına dönmek zorunda kalmasının zaman kaybına yol açmasıdır. Bu sorunun giderilmesi amacıyla, menü butonlarının sabit bir noktada bulunması yerine, kullanıcının mevcut konumuna göre dinamik olarak belirterek erişilebilir hâle gelmesi sağlanmıştır. Şekil 34'te, merdiven kalıbı montajına ilişkin demo uygulaması sırasında çekilen bir fotoğraf sunulmaktadır.



Şekil 34. Deneme çalışması görüntüleri

Deneme çalışmasının ardından, hazır malzemelerin sanal nesneler üzerine yerleştirilmesi sürecinin oldukça basit olduğu ve bu işlemin 28 dakika gibi kısa bir sürede tamamlanabildiği tespit edilmiştir. Ancak hem deneyi gerçekleştiren katılımcı hem de uzmanlar gerçek inşaat sahasındaki imalat süreçlerine daha fazla benzerlik kazandırmak amacıyla, uygulamaya malzeme hazırlık aşamasının da eklenmesi gerekliliğini ifade etmişlerdir. Uygulamanın bu hali ile çalışmanın temel amaçlarından biri olan AG teknolojisinin inşaat sektörüne entegrasyonunu sağlamak açısından yeterince ayırt edici olmadığını belirtmişlerdir. Geri bildirimler doğrultusunda, çalışmanın kapsamına ham ahşap malzemeden kalıp hazırlama süreci de dahil edilmiştir. Kontrollü deneyler aşamasında, her katılımcının montajlayacağı kalıpları işlenmemiş ahşap malzemeden, ölçülere uygun şekilde kendisinin hazırlaması kararlaştırılmıştır. Ancak, deneme çalışması sırasında kullanılan AG uygulamasının, malzeme hazırlama sürecini destekleme konusunda yetersiz olduğu belirlenmiştir. Bunun temel sebebi, uygulamanın yalnızca hazır kalıpların montajına yönelik olarak tasarlanmış olmasıdır.

Malzeme hazırlık sürecinin kontrollü deneyler kapsamına dahil edilmesiyle birlikte, AG uygulamasına malzeme hazırlığı ekranı entegre edilmiştir. Bu doğrultuda, ana menüye malzeme hazırlık ekranına geçişi sağlayan bir buton eklenmiştir. Kullanıcı, bu ekranı açtığında ilk olarak 1. Kalıp Hazırlığı butonunu görüntülemektedir. Bu butona basıldığında, kullanıcı hazırlaması gereken ilk kalıbın sanal modelini ve bu modelin üzerinde yer alan en-boy ölçülerini içeren bir plaka bilgisi görüntüleyebilmektedir. 1. Kalıp Hazırlığı butonuna basıldıktan sonra, bu buton kaybolarak 2. Kalıp Hazırlığı butonu aktif hâle gelmektedir. Kullanıcı, sırasıyla tüm butonlara basarak hazırlanması gereken tüm kalıpların sanal modellerini inceleyebilmekte ve ölçüleri not edebilmektedir.



a) Yeni ana menü görüntüsü



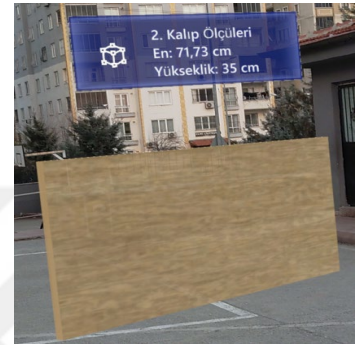
b) Geri butonu eklentisi



c) Kalıp hazırlığı menü



d) 1. Kalıp hazırlığı



e) 2. Kalıp hazırlığı



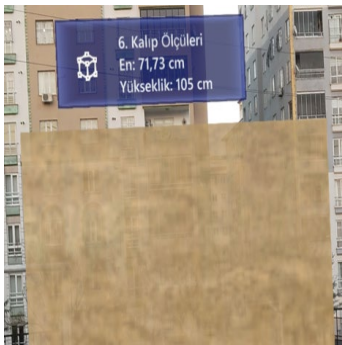
f) 3. Kalıp hazırlığı



g) 4. Kalıp hazırlığı



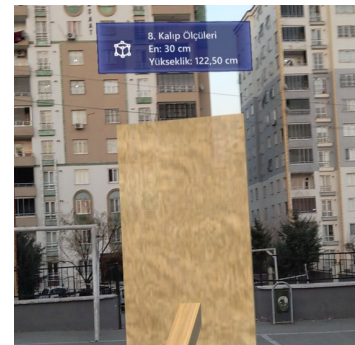
h) 5. Kalıp hazırlığı



i) 6. Kalıp hazırlığı

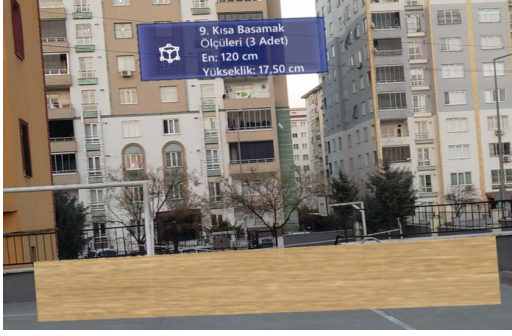


j) 7. Kalıp hazırlığı

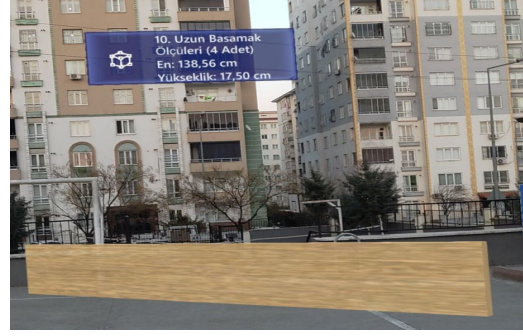


k) 8. Kalıp hazırlığı

Şekil 35. Kalıp hazırlığı ekranı ve kalıp uygulama buton revizyonları Unity görüntüsü



1.) Kısa rıht hazırlığı



m.) Uzun rıht hazırlığı

Şekil 35'in devamı

Deneme çalışmaları sonrasında alınan geri bildirimler doğrultusunda, kullanıcı deneyimini iyileştirmek amacıyla kalıp uygulaması ekranına ayrıca geri butonları da eklenmiştir. Şekil 35'te, uygulamada geliştirilen ilave akranların görüntüleri sunulmuştur.

Deneme çalışması sırasında kullanılan AG uygulamasında merdivenin döşeme kalıbı bulunmamaktaydı. Aynı şekilde prefabrik ahşap montajı olarak kurgulanan kontrollü deney çalışmalarında da merdiven döşemesi montajı bulunmuyordu. Ancak deneme çalışmasından sonra, inşaat uygulamalarına benzer bir çalışma yapmak amacıyla hem AG modeline hem de saha çalışmaları kapsamına merdiven döşemesi de eklenmiştir.

2.2.3. Kontrollü Deneylerin Yapılması

Kontrollü deneyler 28 kalıpcı ustasından oluşan katılımcı grubu ile gerçekleştirilmiştir. Bir istatistiksel çalışmada deneysel testin gerçekleştirileceği katılımcı sayısı, tüm evreni temsil edecek şekilde ancak fazla iş yüküne de yol açmayacak şekilde optimum sayıda belirlenmelidir. Çünkü gereğinden fazla sayıda katılımcı belirlemek ekonomik yönden israfa yol açabileceği gibi, gereğinden az sayıda katılımcı seçmek çalışmanın amacına ulaşmaması tehlikesine yol açmaktadır. (Özçelik, 1981) Tez çalışmasındaki örneklem sayısı Bayes Başarı Koşu Teroemi'ne göre belirlenmiştir. Bu teoreme göre örneklem sayısı aşağıdaki formüle göre belirlenir: (Durivage, 2016)

$$n = \ln(1-C)/\ln(R) \quad (1)$$

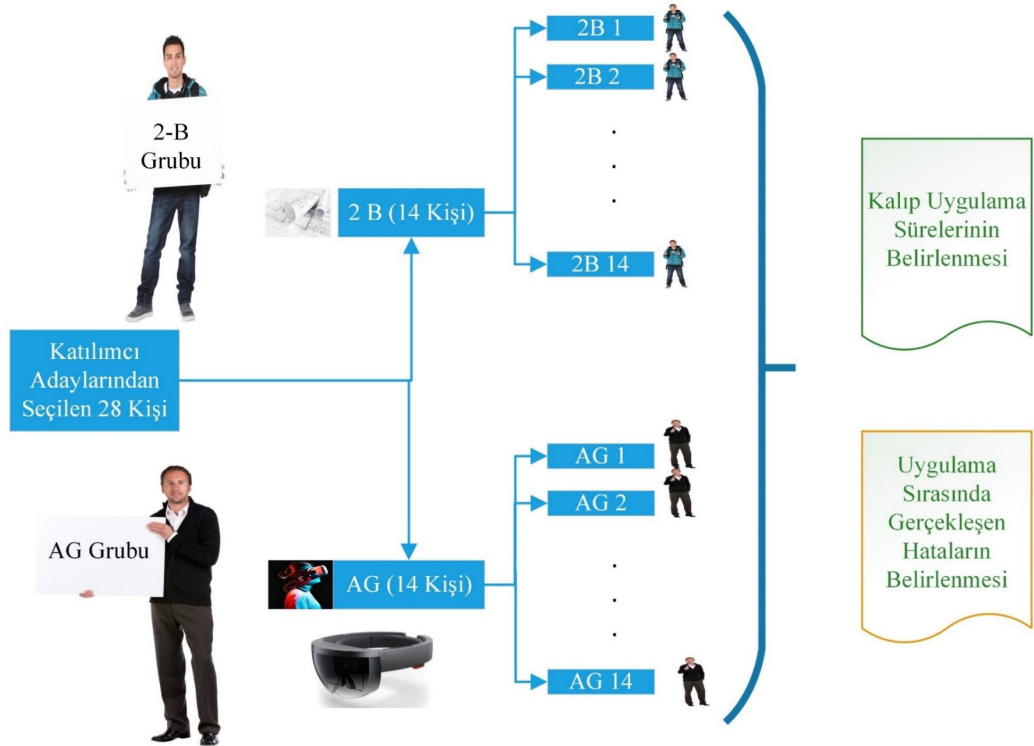
Denkleminde bulunan n seçilecek katılımcı sayısını, C istatistiksel çalışmanın standart sapma içinde kalan güven oranını ve R çalışmanın risk seviyesine göre belirlenen güven

oranını göstermektedir. İstatistiksel çalışmada verilerin %95 güvenilirlik oranı üzerinden anlamlı olup olmadığı değerlendirilecektir. Katılımcı sayısının hesaplanabilmesi için güvenilirlik oranının yanı sıra güven oranını da tespit etmek gerekir. Katılımcıların belli kriterler gözetilerek seçildiği örneklem çeşidine amaçlı örneklem ismi verilir ve bu örneklemelerde güven oranı rastgele seçim yapılan tesadüfi örneklemelere göre daha yüksektir (Sencer, 1989). Çalışma gerçekleştirilirken çalışmanın tüm riskleri belirlenmiş ve önlemler alınmıştır. Uygulamanın başarılı olmaması riskine karşı deneme çalışması yapılmış ve uzman görüşleri alınmıştır. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak güven oranı Durivage (2016)'nin düşük riskli projeler için önerdiği şekilde %90 olarak belirlenmiştir.

Belirlenen istatistiksel çalışma güven oranı ve çalışma risk seviyesi güven oranı dikkate alındığında Bayes Başarı Koşu Teoremi formülüne göre minimum katılımcı sayısı 28 olmalıdır. 28 katılımcı, 14'er kişilik 2 denk gruba ayrılmıştır:

- 1. Grup (2B pafta grubu), kalıp hazırlıklarını ve saha uygulamalarını klasik 2 boyutlu pafta ile gerçekleştirmişlerdir.
- 2. Grup (AG grubu), kalıp hazırlıklarını ve saha uygulamalarını AG modeli ile gerçekleştirmişlerdir.

Şekil 36'da 2B ve AG gruplarının dağılımının detayları sunulmuştur.



Şekil 36. Katılımcı seçim şeması

Çalışmanın güvenilir sonuçlar verebilmesi için, 2B pafta grubundaki katılımcılar ile AG grubu katılımcılarının yetenek ve deneyim düzeylerinin eşit olması gerekmektedir. Aksi hâlde, daha yetenekli ve daha deneyimli katılımcılardan oluşan grup, üstün performans sergileyerek deney sonuçlarının doğruluğunu olumsuz yönde etkileyebilir. Kwiatek vd. (2019), AG modeli kullanılarak gerçekleştirilen basit boru birleştirme deneyinde, katılımcıların yetenek seviyelerini belirleyebilmek amacıyla 2B ve 3B düşünme yeteneğini ölçen bir test uygulamış ve test sonuçlarına göre katılımcıları sınıflandırmıştır. Bu çalışmada da benzer bir yöntem izlenerek, katılımcılar uzamsal görselleştirme yeteneklerini ölçen bir teste tabi tutulmuştur. Uygulanacak en uygun testi belirlemek amacıyla çeşitli deneme testleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, katılımcıların belirlenmesi sürecinde, Dokumacı Sütçü & Oral (2019) tarafından geliştirilen uzamsal görselleştirme testi uygulanmıştır. Bu test, 14 adet 2B ve 15 adet 3B olmak üzere toplam 29 sorudan oluşmaktadır. Ancak, teste katılan kalıp ustalarının hiçbirinin bu sorulardan birini dahi anlayarak doğru şekilde yanıtlayamadığı tespit edilmiştir. Bu durum, testin katılımcılar için ayırt edici bir ölçüt oluşturmadığını göstermiştir. Bu doğrultuda, Guay (1976) tarafından geliştirilen ve toplamda 30 sorudan oluşan bir başka test uygulanmıştır. Testin katılımcılar için ayırt edici olabilmesi adına, içerisinden en kolay 10 soru seçilmiş; ancak katılımcılar bu 10 sorunun hiçbirini yanıtlayamamıştır. Bunun üzerine, Editör Yayınevi Komisyonu (2024) tarafından öğrencilerin kuşbakışı üstten görünüm yetkinliklerini ölçmek amacıyla geliştirilen 12 soruluk bir test uygulanmıştır. Katılımcıların bu teste verdikleri doğru yanıt oranı, önceki testlere kıyasla daha yüksek bulunmuş ve çalışmada uzamsal yeteneklerin değerlendirilmesi için bu testin kullanılmasına karar verilmiştir.

Grupların denk hâle getirilmesi amacıyla, bir grupta bulunan her bir katılımcıya, diğer grupta uzamsal görselleştirme test sonucuna denk bir usta atanmıştır. Bu süreçte, 14'er kişiden oluşan eşit yetenek seviyelerine sahip iki grup oluşturulana kadar test uygulamalarına devam edilmiştir. Ancak, denkleştirme sürecinde 2B grubundaki iki katılımcı, AG grubundaki denklerine kıyasla daha yüksek test başarıları gösterenlerden seçilmiştir. Bu farkın korunmasının amacı, AG grubundaki katılımcıların tamamen denk olmamaları durumunda dahi üstün performans sergileyip sergilemeyeceklerini gözlemlemektir.

Tablo 1. Katılımcı bilgileri

Katılımcı	Deneyim (yıl)	Sınav Sonucu	Uygulama Tarihi
AG-1	20 Yıl Üstü	5/12	14.12.2024
2B-1	20 Yıl Üstü	5/12	14.12.2024
AG-2	20 Yıl Üstü	2/12	17.12.2024
2B-2	20 Yıl Üstü	2/12	04.01.2025
AG-3	20 Yıl Üstü	3/12	18.12.2024
2B-3	20 Yıl Üstü	3/12	07.12.2024
AG-4	20 Yıl Üstü	3/12	21.12.2024
2B-4	20 Yıl Üstü	3/12	01.01.2025
AG-5	20 Yıl Üstü	5/12	22.12.2024
2B-5	20 Yıl Üstü	6/12	21.12.2024
AG-6	20 Yıl Üstü	6/12	29.12.2024
2B-6	20 Yıl Üstü	6/12	22.12.2024
AG-7	20 Yıl Üstü	4/12	28.12.2024
2B-7	20 Yıl Üstü	4/12	31.12.2024
AG-8	20 Yıl Üstü	1/12	30.12.2024
2B-8	20 Yıl Üstü	1/12	17.12.2024
AG-9	20 Yıl Üstü	7/12	31.12.2024
2B-9	20 Yıl Üstü	7/12	08.12.2024
AG-10	20 Yıl Üstü	2/12	01.01.2025
2B-10	20 Yıl Üstü	2/12	18.12.2024
AG-11	0-10 Yıl	12/12	07.12.2024
2B-11	20 Yıl Üstü	12/12	28.12.2024
AG-12	20 Yıl Üstü	9/12	04.01.2025
2B-12	20 Yıl Üstü	9/12	15.12.2024
AG-13	0-10 Yıl	4/12	08.12.2024
2B-13	20 Yıl Üstü	4/12	30.12.2024
AG-14	0-10 Yıl	5/12	15.12.2024
2B-14	20 Yıl Üstü	7/12	29.12.2024

Deneyim açısından da grupların denkleştirilmesine özen gösterilmiştir. Katılımcıların 20 Yıl üstü deneyime sahip olmalarına özen gösterilmiştir. Ancak AG grubuna, 0-10 yıl arası deneyime sahip üç katılımcı dahil edilirken, 2B pafta grubuna bu katılımcıların denkleri yerine daha deneyimli bireyler eklenmiştir. Bunun temel sebebi, 0-10 yıl deneyime sahip katılımcıların AG teknolojisini kullanarak uygulama gerçekleştirme sürecine nasıl yaklaştıklarını analiz etme gerekliliğidir. Eğer 2B pafta grubuna, AG grubundaki deneyime sahip katılımcılarla denk olacak şekilde 0-10 yıl deneyimli bireyler eklenmiş olsaydı, bu katılımcılar proje okuma konusunda yetersiz kalacak, dolayısıyla uygulama süreleri

uzayacak ve hata oranları artacaktı. Bunun yerine, 2B pafta grubuna bilinçli bir şekilde pozitif ayrımcılık uygulanmış ve bu duruma rağmen AG teknolojisinin daha başarılı sonuçlar verdiği ortaya konulmak istenmiştir. Deneye katılan katılımcıların sınav sonuçları ve deneyim yıllarına ilişkin veriler Tablo 1’de sunulmaktadır.

Katılımcıların belirlenmesinin ardından, kontrollü deneylerin başlatılabilmesi için gerekli saha koşullarının ve malzeme temininin sağlanmasına yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Deneylerin uygulanacağı alanın uygun hale getirilmesi amacıyla düz ve beton bir zemin organize edilmiştir. Beton zemin kullanımı, kalıpların montaj sürecini kolaylaştırarak uygulama sürecinin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımıştır.

Çalışmaların yürütülmesi için büyük miktarda işlenmemiş kalıp malzemesine ihtiyaç duyulmuştur. Her bir deney için 12 m² kalıp malzemesi gerekli olup, toplamda 28 katılımcı için 336 m² kalıp ihtiyacı doğmuştur. Bu malzemenin temin edilmesi amacıyla, Türkiye’nin önde gelen endüstriyel tesislerinden biri ile iş birliği sağlanmıştır. İlgili firma, 2024 yılı yatırım planları kapsamında ahşap soğutma kulesini yenilemeyi planlamış olup, iş ortağı olan inşaat firması aracılığıyla sökülen ahşap malzemeleri çalışmamızda kullanılmak üzere tahsis etmiştir.

Tesisin sağladığı ahşap miktarı çalışma için ihtiyaç duyulan miktarın üzerinde olduğundan, bu malzemenin yalnızca bir kısmı saha alanına nakledilmiştir. Soğutma kulesinin söküm işlemi, malzemenin ön ayıklama işlemi yapılmaksızın gerçekleştirilmiş ve doğrudan çalışma alanına sevk edilmiştir. Ahşap malzemeler, bilimsel çalışma için ayrılan bölgede çalışma grubu tarafından ayıklanarak ham kalıp formuna getirilmiştir. Soğutma kulesinin söküm öncesi görünümü, ayıklanmamış ahşap malzemelerin görüntüsü, ayıklama süreci ve nihai olarak kalıp uygulamasında kullanılan işlenmiş ahşap malzemelerin görüntüsü Şekil 37’de sunulmaktadır.

Kontrollü deney çalışmalarının organizasyonu, her gün iki katılımcının yer alacağı şekilde planlanmıştır. Deneylere katılan her iki katılımcıdan biri AG grubuna, diğeri ise 2B pafta grubuna dahil edilmiştir. Çalışmaların güvenilirliğini ve tarafsızlığını sağlamak amacıyla, aynı gün içinde uygulama yapacak katılımcılar eş zamanlı olarak çalışma sahasına getirilmiş ve uygulamalar aynı anda başlatılmıştır. Ancak katılımcıların birbirlerinin uygulamalarını görmelerini engellemek adına, çalışma sahasında birbirinden uzak iki ayrı bölgede uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Deney öncesinde, katılımcılar birbirlerinin çalışma alanlarına gitmemeleri ve diğer

katılımcının gerçekleştirdiği imalatları incelememeleri konusunda bilgilendirilmiş ve bu kurallara uymaları yönünde uyarılmışlardır. Deney süresince, katılımcıların yalnızca kendilerine ayrılan alan içinde çalışmaları sağlanmış ve bu durum sürekli olarak gözlem altında tutulmuştur.



Şekil 37. Uygulama için temin edilen ahşap görüntüleri

Katılımcılar ile günlük ücret karşılığında bir tam gün çalışmaları yönünde anlaşma sağlanmıştır. Deneyin tarafsızlığını korumak adına, kendilerine bilimsel çalışmanın amaçları hakkında ayrıntılı bilgi verilmemiştir. Katılımcılar, yalnızca ilgili montaj işlemlerini tamamlamaları gerektiği konusunda bilgilendirilmiş; uygulama sürelerinin ve hata oranlarının ölçüleceği belirtilmemiştir. Gün sonunda yalnızca montajladıkları kalıpların fotoğraflarının çekileceği ifade edilmiş, ancak mümkün olduğunca az hata yapmaları ve çalışmayı en kısa sürede tamamlamaları gerektiği yönünde uyarıda bulunulmuştur.

Kontrollü deney uygulamaları başlamadan önce katılımcılara teslim edilmiş olan malzeme listesi aşağıdaki gibidir:

- Ham kalıp malzemeleri
- Keser ve çivi
- Ahşap kesici testere
- Şerit metre
- 1 adet klasik 2B merdiven kalıbı proje paftası (Yalnız 2B pafta Grubu için)
- 1 adet AG modeli yüklü Microsoft Hololens 2 AG gözlüğü (Yalnız AG Grubu için)

Geleneksel pafta grubuna yalnızca yerleşim planı verilmiş, kesit detayları sunulmamıştır. Bunun temel nedeni, çalışmada kullanılan merdivenin dairesel formda olması ve iki boyutlu kesit çizimlerinin, montaj sürecine katkı sağlamaktan ziyade katılımcılarda kavramsal karmaşıklık yaratma ihtimalinin yüksek olmasıdır. Katılımcılara inşaat uygulamalarının zorlayıcı şartlarını oluşturma için keser ve çivi ile birleşim gerçekleştirilmiş ve literatürdeki çalışmalara kıyasla inşaat çalışma sahasını daha iyi temsil etmesi açısından çalışma literatüre özgün katkı sağlamıştır.

Kontrollü deney sürecinde, her iki gruba ait katılımcılar tam zamanlı bir gözlemci tarafından sürekli olarak izlenmiştir. Deney başlangıcında hem 2B geleneksel pafta grubunun hem de AG grubunun çalışma başlangıç saatleri, uygulama tamamlanma saatleri, mola başlangıç ve bitiş saatleri kayıt altına alınmıştır. Katılımcıların uygulama süreleri hesaplanırken mola süreleri toplam süreden çıkarılmıştır. Her katılımcıya bir kez mola yapma hakkı tanınmış olup, bu süre 15-20 dakika arasında sınırlandırılmıştır. Planlananın dışında kısa molalar veren katılımcıların mola süreleri de not edilmiş ve toplam uygulama sürelerinden düşülmüştür. İki boyutlu geleneksel pafta grubunun uygulama süresi, kendilerine proje teslim edildiği andan itibaren başlatılmıştır. Katılımcılara, proje okuma sürecinde 3B algılamaya yönelik herhangi bir yönlendirme yapılmayacağı ve anladıkları şekilde montajı gerçekleştirmeleri gerektiği bildirilmiştir. Katılımcının uygulamayı tamamladığını beyan ettiği an, bitiş süresi olarak kaydedilmiştir. Ancak, uygulamada eksik imalat tespit edilmesi durumunda (örneğin, döşeme ahşabının eksik bırakılması, rıht çakılmaması, merdiven yan kalıplarının tamamlanmaması gibi), katılımcıya uygulamanın henüz tamamlanmadığı bildirilmiş ve eksik imalat tamamlanana kadar çalışma devam ettirilmiştir.



a) 2B-1



b) 2B-2



c) 2B-3



d) 2B-4



e) 2B-5



f) 2B-6



g) 2B-7



h) 2B-8



i) 2B-9



j) 2B-10



k) 2B-11



l) 2B-12



m) 2B-13



n) 2B-14

Şekil 38. İki boyutlu geleneksel pafta grubu kontrollü deneyleri

Tüm katılımcılara çeşitli boyutlarda ham kalıp malzemesi sağlanmış ve uygulama sürecinde herhangi bir kısıtlama olmaksızın, diledikleri şekilde kalıp keserek ya da mevcut uygun boyutlu kalıpları kullanarak işlemlerini gerçekleştirebilecekleri bilgisi verilmiştir. İki boyutlu geleneksel pafta grubunun kontrollü deney sürecinde alınan fotoğraflar Şekil 38’de sunulmuştur.

AG grubuna, deneyin ilk dakikalarında gözlükle ilgili birkaç dakikalık bilgi verilmiş ve geleneksel paftaya ihtiyaç duymadan AG gözlüğü ile uygulama yapabileceği söylenmiştir. Ardından AG uygulaması çalıştırılarak eğitim ekranında katılımcıların gözlük kullanımını öğrenmeleri sağlanmıştır. Her bir katılımcının yaklaşık 10 dk eğitim alması sağlanmıştır ve bu süre uygulama ile ilgili olmayıp teknoloji kullanımı ile ilgili olduğu için AG grubunun uygulama süresine eklenmemiştir. Katılımcılar eğitim ekranında uygulama kullanımını öğrendikten sonra, proje tanıtım ekranına girerek projenin 2B ve 3B modellerini incelemişlerdir. Katılımcıların proje tanıtım sayfasına geçtikleri dakika uygulama başlangıç zamanı olarak not edilmiştir. Katılımcılar uygulama ile ilgili ön bilgi edindikten sonra kalıp hazırlığı sayfasına girmişlerdir. Katılımcılar bu sayfada, hazırlayacakları 15 adet kalıbın ölçülerini ve sanal görüntülerini gözlemlemişlerdir. Katılımcılar sürekli gözlükle çalışmak yerine bu ölçüleri not almayı tercih etmişlerdir ve not almaları için onlara kâğıt kalem temin edilmiştir. Kalıp hazırlıkları tamamlandıktan sonra AG gözlüğünü tekrar takmışlar ve montaj ekranına giriş yapmışlardır. Montaj ekranında uygulamanın gerçekleştirilmesi için tüm kalıpların hangi konumda olması gerektiğini adım adım gözlemlemişlerdir. Katılımcı 1. adım butonuna tıkladığında 1. kalıbın sanal görüntüsünü, fiziki kalıbın olması gerektiği yerde görmüştür. Fiziki kalıbı sanal kalıp görüntüsü ile karşılaştıracak şekilde konumlandırdıktan sonra ikinci adıma geçmiş ve ikinci sanal kalıp görüntüsünü görmüştür. Tüm fiziki kalıpları sanal kalıpla karşılaştıracak şekilde montajladıktan sonra alt döşeme montajı için gözlüğü çıkarmışlardır. Katılımcılar her ne kadar alt döşemenin sanal görüntüsünü AG gözlüğünde görüntüleyebilseler de montaj kolaylığı açısından gözlüğü çıkararak montaj yapmayı tercih etmişlerdir. Katılımcılar alt döşeme montajından önce, ayrı ayrı konumlandıkları yan kalıpların yerlerini sabitlemek ve sağlamlıklarını artırmak için bu kalıpları birbirlerine montajlamışlardır. Katılımcıların alt döşeme montajı ve tüm sabitleme işlemlerini bitirmesinin ardından uygulamayı bitirdim dediği an uygulama bitiş süresi olarak not edilmiştir. Eğer katılımcı alt döşemede boşluk bıraktıysa, ya da yan kalıp kapamasında eksik imalat yaptıysa bu konuda uyarılmış ve çalışma eksik tamamlanana kadar devam ettirilmiştir. AG grubu katılımcılarının görüntüleri Şekil 39’da sunulmuştur.



a) AG-1



b) AG-2



c) AG-3



d) AG-4



e) AG-5



f) AG-6



g) AG-7



h) AG-8



i) SG-9



j) AG-10



k) AG-11



l) AG-12



m) AG-13



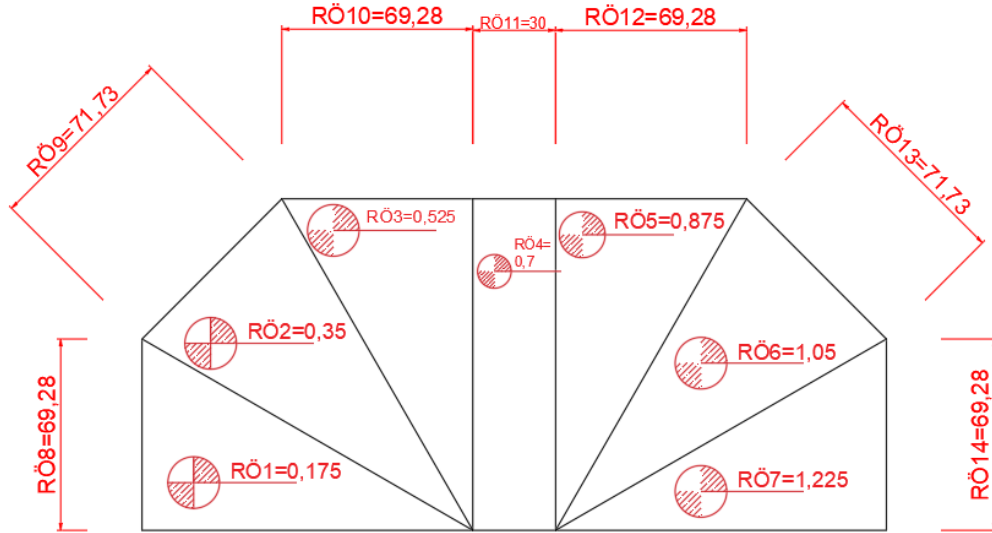
n) AG-14

Şekil 39. AG grubunun kontrollü deneyleri sırasında alınmış görseller

Uygulama sırasında kullanıcı yönünü değiştirirse veya fiziksel olarak uzaklaşsa bile sanal kalıpların konumunda bir değişiklik olmamış, sanal nesneler gerçek dünyadaki belirlenen koordinatlarında sabit kalmıştır. Bu durum, cihazın mekânsal haritalama ve sabitleme yeteneklerinin başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

İmalatlar tamamlandıktan sonra hata ölçümleri yapılmış ve ilgili fotoğraflamalar yapıldıktan sonra, katılımcıların kalıpları sökmeleri ve alanı temizlemeleri istenmiştir. Bu çalışma, kontrollü deneyle ilgili olmayıp bir sonraki deney gününün hazırlığı olduğu için söküm süreleri kayıt altına alınmamıştır. Kalıplar sökülürken, kalıpçıların tüm kalıpları söktüğü ile ilgili gözlemci tarafından kontrol gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemin amacı bir sonraki günün kalıpçılarının hazır kalıpları montajlayarak uygulama sürelerini kısaltmalarını önlemek içindir. Bir sonraki günün kalıpçılarının aynı ölçüdeki kalıpları kolayca bulup montajlamasını önlemek için, söküm sırasında kalıpların boy sıralarına göre istiflenmesi de engellenmiştir.

Tüm katılımcılar imalatları tamamladıktan sonra, gözlemci tarafından katılımcıların imalat ölçüleri kontrol edilmiştir. Hata kontrolü için projeden 14 adet referans ölçü belirlenmiştir. Her bir katılımcının referans noktalarındaki imalat ölçüsünün projeden farkı not edilerek toplam hata ölçüsü çıkarılmıştır. Şekil 40’da 2B referans uzunluklar gösterilmiştir.



Şekil 40. Hata kontrolü için belirlenen referans uzunluklar

Uygulama sürecinin tamamlanmasının ardından, katılımcıların deneyimlerini değerlendirmek amacıyla Likert ölçeğine dayalı Tcha-Tokey vd. (2016)’nin hazırlamış olduğu ve geçerliliği ile güvenilirliğini kontrol etmiş olduğu anket uygulanmıştır. Anket

uzman görüşleri ile Türkçe'ye çevrilmiş, SG teknolojisine özel ve AG teknolojisi ile ilgisiz sorularda dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Anket, katılımcıların AG deneyimlerini dokuz farklı boyutta değerlendirmelerini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Ölçekte "Kesinlikle Katılmıyorum" ifadesi 1 puan, "Tamamen Katılıyorum" ifadesi ise 10 puan olarak derecelendirilmiştir. Ankette yer alan bölümler soru sayıları ve içerikleri Tablo 2'de verilmektedir. Anketin gerekli dönüşümler gerçekleştirilerek kullanılmış hali çalışmanın ekler kısmında Ek 1'de sunulmuştur.

Tablo 2. Ankette yer alan bilgiler

Bölüm Adı	Soru Sayısı	İçeriği
Varlık Hissi	12	AG deneyiminin ses ve görüntü kalitesi incelenmiş; sanal görüntülerin netliği, farklı açılardan görünebilirliği ile AG başlığının ses ve görüntü performansı değerlendirilmiştir.
Katılım	3	AG deneyiminin ne derece gerçekçi ve sürükleyici olduğu sorgulanmıştır.
Daldırma	7	Katılımcıların fiziksel dünyadan ve gerçeklikten ne ölçüde koptukları ve sanal ortama ne derecede entegre oldukları değerlendirilmiştir.
Akış	11	Katılımcıların uygulama sırasında öz denetimlerini ne ölçüde koruyabildikleri ve hareketlerini ne derecede kontrol edebildikleri analiz edilmiştir.
Kullanılabilirlik	3	Katılımcıların uygulama sırasında karşılaştıkları zorluk seviyeleri değerlendirilmiştir.
Duygu	15	Katılımcıların uygulama sürecinde olumlu ya da olumsuz duygular yaşayıp yaşamadıkları sorgulanmıştır.
Deneyim Sonuçları	9	Katılımcıların deneyim sürecinde fiziksel rahatsızlık hissedip hissetmediklerinin değerlendirilmesini içermektedir.
Teknolojiyi Benimseme	9	Katılımcıların AG uygulamasını kullanmaya yönelik isteklilikleri, günlük yaşamlarına entegre etme eğilimleri ve teknolojiyi benimseme düzeyleri analiz edilmiştir.
Değerlendirme	12	Katılımcıların uygulama hakkındaki genel görüşlerinin belirlenmesine yönelik sorular içermektedir.

2.2.4. İstatistiksel Analizlerin Yapılması

Kontrollü deney sonuçlarının istatistiksel analizleri SPSS programında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerin standart sapma, ortalama değer, mod ve medyan değerleri göz önünde bulundurularak ön değerlendirme yapılmıştır. Aşırı değer analizi yapılarak, güvenilir olmayan değer kontrolü yapılmıştır. Kontrollü deneyler sonucunda çıkan veri tablolarından anlamlı sonuçlar elde edebilmek için, elde edilen değerlere istatistiksel analizler yapılmıştır. Her iki araştırma sorusu için de kullanılacak olan veri ve istatistiksel yöntem Tablo 3'te belirtilmiştir.

Tablo 3. Uygulanmış olan istatistiksel analiz türleri

Araştırma Sorusu	Kullanılacak Veri	Kullanılacak istatistiksel metod
Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel 2 boyutlu uygulama proje paftası yerine AG modeli kullanmak, ustaların merdiven kalıbı uygulama süresini etkiler mi?	Tüm Katılımcıların Uygulama Süreleri	Bağımsız Örneklemli T Testi
Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel 2 boyutlu uygulama proje paftası yerine AG modeli kullanmak, uygulama sırasında yapılan hata sayısını etkiler mi?	Tüm Katılımcıların Uygulama Hata Ölçüleri	Bağımsız Örneklemli T Testi

İstatistiksel ölçümlerde, iki adet örneklem arasında belirli bir değişkene bağlı olarak sonuçların değişiminin anlamlı olup olmadığı Bağımsız Örneklemli T Testi ile kontrol edilir. Kalıp hazırlığı ile ilgili kontrollü deneyler sonucunda 28 adet kalıp hazırlığı süresi elde edilmiştir. Elde edilen bu verilerden hangilerinin 2B grubuna ait olduğu, hangilerinin AG grubuna ait olduğu işaretlenmiştir. Bağımsız Örneklemli T Testi, gruplar arasındaki süre değişikliğinin bir anlamının olup olmadığını belirlemek için uygun ve yeterli bir testtir. Aynı test katılımcıların hata miktarlarının anlamlı olup olmadığı için de yinelenmiştir. İstatistiksel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler yorumlanmış araştırma sorularına cevap olacak nitelikte sonuçlar elde edilmiştir.

3. BULGULAR

Bu çalışmada, AG teknolojisinin ahşap kalıp montajına uyumunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen kontrollü deneylerde, uygulama süreleri, katılımcıların hata miktarları ve katılımcı değerlendirme anketlerinin sonuçları analiz edilmiştir. Bu bölümde, söz konusu üç bulgu, ayrı başlıklar altında detaylandırılarak verilecek ve elde edilen veriler istatistiksel analiz sonuçları ile sunulacaktır.

3.1. Uygulama Süreleri ve Analizleri

AG grubu ve 2B grubu katılımcılarının uygulama süreleri, deneyin kontrolünü sağlayan gözlemci tarafından tam zamanlı olarak izlenmiş ve dakika cinsinden kaydedilmiştir. Deney sürecinde her çalışma günü içerisinde bir AG grubu katılımcısı ve bir 2B grubu katılımcısı, uygulamayı gerçekleştirmiştir. Veri analizi ve değerlendirme sürecinin kolaylaştırılması amacıyla, uygulama süreleri tarih sırasına göre değil, eşleşen katılımcılar ardışık satırlarda olacak şekilde düzenlenmiştir. Katılımcıların uygulama sürelerine ilişkin veriler Tablo 4'te sunulmuştur.

Uygulama süreleri raporlanırken, AG grubunun hem malzeme hazırlık hem de malzeme montaj süreleri ayrı ayrı belirtilmiş, ancak 2B grubu için yalnızca toplam uygulama süreleri kaydedilmiştir. AG grubu katılımcıları, AG gözlüğünün sağladığı yönlendirmeler doğrultusunda malzeme hazırlık aşamasını tamamlamadan montaj aşamasına geçmemiştir. Bu durum, AG grubu katılımcılarının hazırlık ve montaj sürelerinin ayrı ayrı izlenmesine olanak sağlamıştır. Öte yandan, 2B grubu katılımcıları malzeme hazırlığını ve montaj işlemini eşzamanlı olarak gerçekleştirdiğinden, yalnızca toplam uygulama süresi kaydedilebilmiştir.

2B ve AG Grubu katılımcılarının uygulama sürelerine ilişkin aşırı değer analizi yapılmış ve her iki grup için verilerin uyumlu olduğu tespit edilmiştir. 2B Grubu'nda uygulama sürelerinin genel olarak geniş bir aralıkta değiştiği, ortalama sürenin 256 dakika civarında olduğu ve verilerin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. AG Grubu'nda ise süreler daha dar bir aralıkta yer almakta olup, ortalama süre 168 dakika civarındadır ve katılımcılar arasında benzer bir uyum gözlemlenmiştir. AG Grubu'nda malzeme hazırlık ve montaj süreleri ayrı ayrı incelenmiş olup, malzeme hazırlık süresi daha uzun, montaj süresi

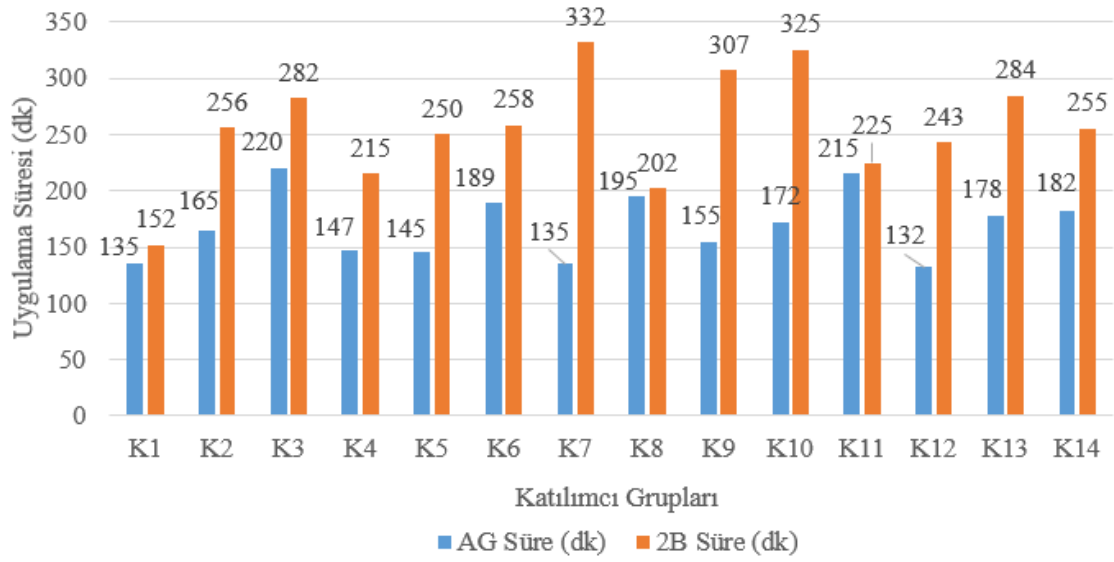
ise daha kısa olmuştur. Her iki grup için yapılan aşırı değer analizlerinde uç değerlere rastlanmamış ve tüm veriler uyumlu bulunmuştur. AG grubundaki katılımcılar, 2B Grubu'ndan daha kısa sürede uygulamayı tamamlamıştır. Aşırı değer analizine ilişkin sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Her bir katılımcının uygulamayı bitirme süreleri ise Şekil 40'ta gösterilmiştir.

Tablo 4. Uygulama süreleri

Katılımcı	Malzeme Hazırlık Süresi (dk)	Malzeme Montaj Süresi (dk)	Toplam Süre (dk)
AG-1	78	57	135
2B-1	-		152
AG-2	95	70	165
2B-2	-		256
AG-3	130	90	220
2B-3	-		282
AG-4	83	64	147
2B-4	-		215
AG-5	93	52	145
2B-5	-		250
AG-6	110	79	189
2B-6	-		258
AG-7	93	42	135
2B-7	-		332
AG-8	135	60	195
2B-8	-		202
AG-9	90	65	155
2B-9	-		307
AG-10	111	61	172
2B-10	-		325
AG-11	140	75	215
2B-11	-		225
AG-12	70	62	132
2B-12	-		243
AG-13	98	80	178
2B-13	-		284
AG-14	101	81	182
2B-14	-		255

Tablo 5. Aşırı değer analiz sonuçları

Grup	Min. (dk)	Maks. (dk)	Ortalama (dk)	Medyan (dk)	Standart Sapma (k)
2B	152,00	332,00	256,40	255,50	48,98
Malzeme Hazırlık	70,00	140,00	101,93	96,50	21,11
AG Montaj	42,00	90,00	67,00	64,50	12,96
Toplam Uygulama	132,00	220,00	168,93	168,50	29,10



Şekil 41. Uygulama süreleri grafiği

AG ve 2B grubu katılımcılarının uygulama süreleri arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için Bağımsız Örneklem T-Testi uygulanmıştır. Bu test, iki bağımsız grubun ortalamalarını karşılaştırarak aralarındaki farkın rastlantısal olup olmadığını değerlendiren bir yöntemdir. Analiz sonucunda, gruplar arasındaki süre farklılıklarının istatistiksel anlamlılığı incelenmiştir.

- ✓ Sıfır Hipotezi (H_0): İki grup arasında uygulama süresi açısından anlamlı bir fark yoktur.
- ✓ Alternatif Hipotez (H_1): İki grup arasında uygulama süresi açısından anlamlı bir fark vardır.

Bağımsız Örneklem T-Testi sonucunda elde edilen p değeri 0.001'den küçük bulunmuştur. $p < 0.05$ olduğu için sıfır hipotezi (H_0) reddedilmiş ve AG grubu ile 2B grubu arasında uygulama süresi açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu sonucuna

ulaşılmıştır. Analiz, %95 güven aralığı ile gerçekleştirilmiş olup, sonuçların yüksek güvenilirlik taşıdığı değerlendirilmektedir. $p < 0.001$ değeri, gözlenen farkın tesadüfi olma olasılığının son derece düşük olduğunu göstermekte ve AG kullanımının uygulama süresi üzerinde etkili bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

AG grubunun sonuçları, katılımcıların deneyim düzeyleri açısından da analiz edilmiştir. Katılımcıların 6'sının 20 yıl ve daha az, 8'inin ise 20 yıldan fazla deneyime sahip olduğu belirlenmiştir. Deneyimin, AG teknolojisi ile merdiven kalıbı montajında uygulama süresi üzerinde tek başına etkili bir faktör olup olmadığını değerlendirmek amacıyla orta seviyede deneyimli ve çok deneyimli katılımcıların uygulama süreleri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Bağımsız Örneklem T-Testi uygulanmış ve analiz sonucunda p değeri 0.454 olarak bulunmuştur. %95 güven aralığına göre, deneyimin AG uygulamalarında tek başına belirleyici bir faktör olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

AG grubu, sınav sonuçlarına göre de analiz edilmiştir. Uzamsal görselleştirme sınavında, 7 katılımcının 5 veya daha fazla soruya doğru yanıt verdiği, diğer 7 katılımcının ise 5'ten daha az doğru cevap verdiği belirlenmiştir. Uzamsal görselleştirme becerisinin AG uygulama süresi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, bu iki grubun uygulama süreleri karşılaştırılmış ve Bağımsız Örneklem T-Testi uygulanmıştır. Analiz sonucunda p değeri 0.304 olarak bulunmuş, %95 güven aralığına göre uzamsal görselleştirme sınav sonucunun AG ile merdiven kalıbı montaj süresi üzerinde tek başına belirleyici bir faktör olmadığı tespit edilmiştir.

İki boyutlu geleneksel pafta grubu, sınav sonuçlarına göre uygulama süresi açısından analiz edilmiştir. Uzamsal görselleştirme sınavında 5 veya daha fazla doğru cevap veren 7 katılımcı ile 5'ten daha az doğru cevap veren 7 katılımcının uygulama süreleri karşılaştırılmış ve Bağımsız Örneklem T-Testi uygulanmıştır. Analiz sonucunda p değeri 0.139 olarak bulunmuş olup, %95 güven aralığına göre uzamsal görselleştirme sınav sonucunun, 2B geleneksel yöntemle gerçekleştirilen merdiven kalıbı montaj süresi üzerinde tek başına belirleyici bir faktör olmadığı tespit edilmiştir.

3.2. Uygulama Hata Miktarları ve Analizleri

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kontrollü deneyler sonucunda, katılımcıların uygulamalarında belirlenen 14 referans noktası ölçülerek hata miktarları analiz edilmiştir. Elde edilen veriler Tablo 6'da sunulmuş olup, istatistiksel analizler toplam hata miktarı

üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, tabloda toplam hata miktarını gösteren bir sütuna da yer verilmiştir.

Tablo 6. Hata miktarları (Tüm ölçüler cm cinsinden verilmiştir.)

Grup	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	Toplam
AG-1	0,50	2,28	1,00	4,73	0,50	0,28	0,00	2,00	2,50	0,28	5,00	0,73	3,50	0,28	23,58
2B-1	2,50	0,72	6,50	2,23	10,00	1,70	16,00	8,00	16,50	4,28	13,00	1,73	23,50	2,22	108,88
AG-2	0,50	5,28	1,00	10,73	0,50	0,28	0,00	1,00	0,50	0,28	1,00	1,73	0,50	1,28	24,58
2B-2	0,50	4,22	4,00	2,23	4,00	1,72	3,00	2,00	4,50	8,28	1,50	5,73	1,50	19,72	62,90
AG-3	0,50	3,28	0,00	4,73	0,00	3,28	0,50	1,00	0,50	7,28	0,50	3,23	1,00	0,28	26,08
2B-3	29,28	2,00	34,73	3,00	44,28	4,00	47,00	3,00	30,72	2,00	21,73	4,00	17,28	5,00	248,02
AG-4	0,00	5,28	1,00	0,73	0,30	4,22	0,00	1,00	1,00	3,28	0,00	2,73	1,50	1,28	22,32
2B-4	4,00	12,78	9,00	3,73	8,50	9,28	9,00	0,00	11,50	4,28	16,50	15,23	7,50	6,28	117,58
AG-5	0,00	4,28	0,50	3,73	0,50	3,78	0,50	3,50	0,70	0,28	0,20	6,23	1,20	6,28	31,68
2B-5	0,50	10,28	7,00	10,73	8,50	4,28	13,00	18,00	6,50	5,28	4,00	3,73	5,00	20,28	117,08
AG-6	2,50	3,28	0,50	10,23	0,00	4,78	1,00	0,00	1,00	0,28	0,00	4,73	0,00	0,78	29,08
2B-6	34,50	7,28	34,00	2,23	35,80	2,58	35,50	0,00	36,50	2,78	30,00	0,73	25,00	0,00	246,90

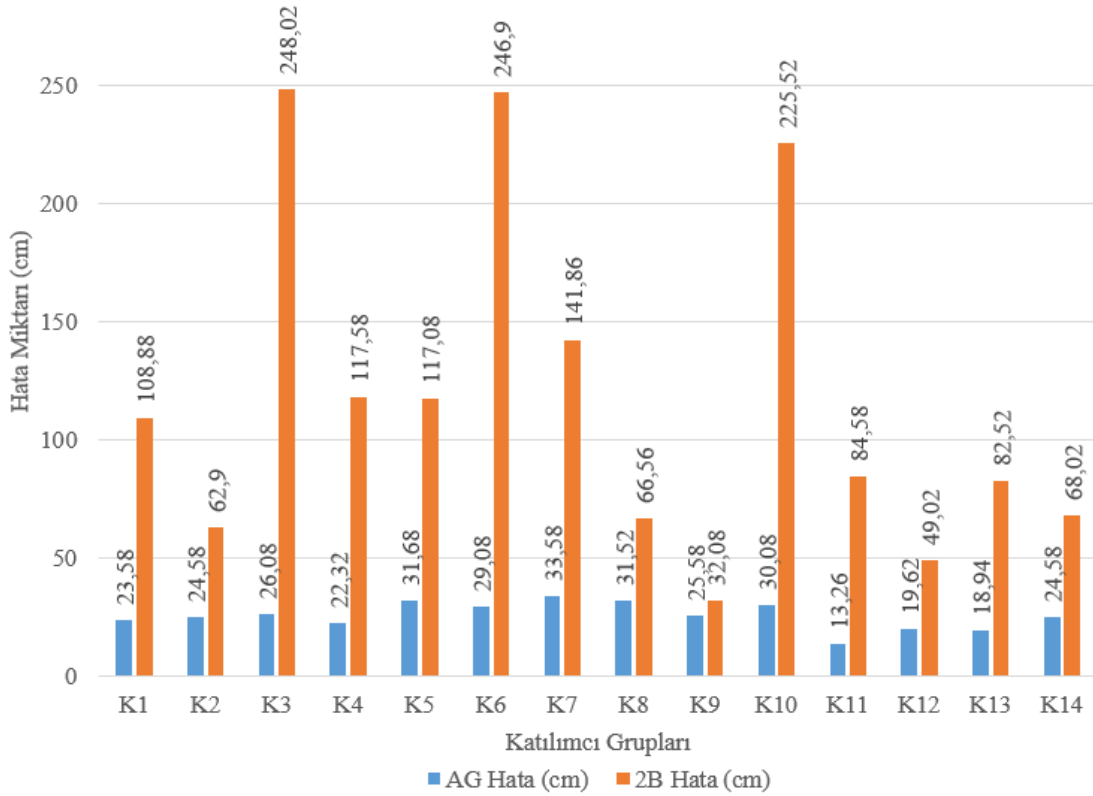
Tablo 6'nın devamı

AG-7	0,00	4,28	3,00	5,73	0,50	4,28	2,00	2,50	0,50	5,28	1,00	2,23	2,00	0,28	33,58
2B-7	3,50	3,28	3,50	4,23	1,00	5,28	8,50	0,50	14,50	29,58	29,50	6,27	32,00	0,22	141,86
AG-8	2,00	5,28	1,00	6,73	0,50	4,28	0,00	2,00	0,50	1,78	1,00	4,73	0,00	1,72	31,52
2B-8	0,50	3,28	2,50	0,73	2,00	18,28	1,00	1,50	10,00	1,28	2,00	7,27	0,50	15,72	66,56
AG-9	1,00	3,78	0,50	4,23	0,00	2,78	0,00	2,50	1,00	4,28	2,00	1,73	0,50	1,28	25,58
2B-9	3,28	1,50	6,73	0,50	1,28	0,00	0,50	1,00	4,28	1,50	1,73	3,00	1,28	5,50	32,08
AG-10	3,00	1,28	3,00	1,23	0,00	3,78	0,50	0,50	0,50	0,78	5,00	4,73	0,50	5,28	30,08
2B-10	28,00	4,78	30,00	7,73	30,00	11,28	25,00	2,00	24,50	4,28	23,00	7,73	19,00	8,22	225,52
AG-11	0,00	0,00	0,77	0,50	0,20	2,50	1,00	0,00	1,28	1,50	0,73	2,50	2,28	0,00	13,26
2B-11	5,50	5,28	6,00	3,73	4,50	7,28	8,00	10,00	2,50	11,28	4,00	1,73	6,50	8,28	84,58
AG-12	1,50	4,28	2,00	0,77	0,00	3,78	0,50	0,00	1,50	0,78	0,50	0,73	0,50	2,78	19,62
2B-12	0,50	6,72	0,00	6,73	2,50	1,28	1,00	1,00	5,50	5,28	2,00	7,73	5,50	3,28	49,02
AG-13	0,72	2,50	1,73	0,00	2,22	1,50	1,00	1,00	0,72	0,50	1,27	2,00	1,28	2,50	18,94
2B-13	1,00	6,28	6,00	1,73	3,50	17,78	6,50	1,00	4,50	0,72	6,50	19,73	3,00	4,28	82,52
AG-14	0,50	2,28	0,00	1,73	0,50	4,28	1,00	0,00	2,50	3,28	0,00	5,73	1,50	1,28	24,58
2B-14	0,00	12,72	5,00	1,73	5,00	4,28	6,50	1,00	4,50	3,28	3,00	10,73	5,00	5,28	68,02

2B ve AG gruplarına ait hata miktarları için aşırı değer analizi yapılmıştır. 2B Grubu için en küçük hata miktarı 32,08 cm, en büyük hata miktarı ise 248,02 cm olarak belirlenmiştir. Ortalama hata miktarı 117,97 cm, medyan değeri 96,73 cm ve standart sapması 72,55 cm olarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda uç değer tespit edilmemiş, hata miktarlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

AG Grubunda ise en küçük hata miktarı 13,26 cm, en büyük hata miktarı 33,58 cm olarak bulunmuştur. Ortalama hata miktarı 25,32 cm, medyan değeri 25,08 cm ve standart sapması 5,42 cm olarak hesaplanmıştır. Bu grupta da aşırı değer tespit edilmemiştir.

Tüm AG Grubu katılımcılarının, kendilerine denk olan 2B Grubu katılımcılarından daha az hata yaptığı belirlenmiştir. Sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için hata miktarları görselleştirilerek Şekil 41’de sunulmuştur.



Şekil 42. Hata miktarları grafiği

AG grubu katılımcıları ile 2B grubu katılımcılarının hata miktarları arasında anlamlı bir fark olup olmadığını tespit edebilmek için Bağımsız Örneklemli T-Testi uygulanmıştır. Bu çalışmada AG grubu ile 2B grubu hata miktarları açısından karşılaştırılmıştır.

✓ Sıfır Hipotezi (H_0): İki grup arasında hata miktarları açısından anlamlı bir fark yoktur.

✓ Alternatif Hipotez (H_1): İki grup arasında hata miktarları açısından anlamlı bir fark vardır.

Yapılan T-Testi sonucunda, p değeri 0.001'den küçük bulunmuştur. Bu sonuç, p değerinin 0.05'ten küçük olması nedeniyle sıfır hipotezinin (H_0) reddedildiğini göstermektedir. Bu, AG grubu ile İki Boyutlu (2B) grup arasındaki uygulama süreleri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğunu ortaya koymaktadır. Hesaplamalar %95 güven aralığı kullanılarak yapılmıştır. $P < 0.001$ değeri, gözlenen farkın tesadüfen oluşma olasılığının çok düşük olduğunu ve dolayısıyla AG gözlük kullanımının hata miktarını etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.

AG grubu, kendi içinde de değerlendirilmiştir. Deneyim yılları göz önünde bulundurulduğunda, 6 katılımcının 20 yıl ve daha az deneyime sahip olduğu, 8 katılımcının ise 20 yıldan fazla deneyime sahip olduğu tespit edilmiştir. Deneyimin, AG teknolojisi ile merdiven kalıbı montajında tek başına etkili bir faktör olup olmadığını belirlemek amacıyla, orta seviyede deneyimli ve çok deneyimli katılımcıların hata miktarları karşılaştırılmıştır. Bu gruplar arasındaki farkı tespit edebilmek için Bağımsız Örneklemli T-Testi uygulanmış ve p değeri 0.04 bulunmuştur. %95 güven oranıyla yapılan bu analiz, deneyimin AG uygulamaları üzerinde tek başına ayırt edici bir faktör olduğunu göstermektedir. İlginç bir şekilde, AG teknolojisinde daha az deneyime sahip olan grup, daha deneyimli gruptan daha başarılı olmuştur.

AG grubu ayrıca sınav sonuçlarına göre de değerlendirilmiştir. AG grubundan 7 katılımcı, uzamsal görselleştirme sınavında 5 veya daha fazla doğru yanıt verirken, diğer 7 katılımcı 5'ten daha az doğru yanıt vermiştir. Bu iki grubun hata miktarları arasında anlamlı bir fark olup olmadığını belirlemek için Bağımsız Örneklem T-Testi yapılmıştır. Test sonucunda, p değeri 0.186 bulunmuş olup, %95 doğruluk oranıyla yapılan analiz, uzamsal görselleştirme sınavının hata miktarı üzerinde tek başına belirleyici bir faktör olmadığını göstermektedir.

İki boyutlu geleneksel pafta grubu da yalnızca sınav sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. 5 veya daha fazla doğru yanıt veren 7 katılımcı ile 5'ten daha az doğru yanıt veren 7 katılımcının hata miktarları karşılaştırılmıştır. Bu iki grubun hata miktarları arasındaki farkı tespit edebilmek amacıyla Bağımsız Örneklem T-Testi yapılmış ve p değeri 0.201 bulunmuştur. %95 güven oranına göre yapılan analiz, 2B geleneksel pafta yönteminin uzamsal görselleştirme sınav sonuçlarına dayalı olarak hata miktarını ayırt edici bir faktör olmadığını ortaya koymaktadır.

3.3. Değerlendirme Anketi Sonuçları

Saha çalışmalarının ardından, AG Grubu katılımcıları, uygulama sahasından ayrılmadan önce deneyimlerini değerlendirebilecekleri bir ankete tabi tutulmuştur. Katılımcılardan, soruları 10 dereceli Likert ölçeği kullanarak yanıtlamaları istenmiş ve verilen puanların ortalaması hesaplanmıştır. Katılımcıların bireysel puan ortalamaları ile tüm yanıtların toplam bölüm puan ortalamaları, Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. AR uygulaması değerlendirme anketi

Grup	Varlık Hissi	Katılım	Daldırma	Akış	Kullanılabilirlik	Duygu	Deneyim Sonuçları	Teknoloji Benimseme	Değerlendirme
AG-1	9,58	9,67	8,71	8,81	7,33	8,40	0,00	10,00	10,00
AG-2	8,50	7,67	7	9,36	8,67	9,20	1,11	9,22	9,83
AG-3	7,92	8,33	6,86	8,46	8,67	9,20	0,00	9,78	10,00
AG-4	10,00	10,00	6,71	8,18	9,00	9,87	0,00	10,00	10,00
AG-5	9,58	10,00	9,00	9,27	10,00	9,53	0,00	9,56	9,92
AG-6	8,75	8,66	8,00	9,46	8,67	9,67	0,44	9,33	9,33
AG-7	9,50	9,67	9,14	9,64	9,33	8,73	1,33	8,22	9,75
AG-8	7,17	7,00	6,29	6,09	10,00	7,00	0,00	7,22	7,17
AG-9	10,00	10,00	9,71	9,91	9,33	9,93	0,00	10,00	10,00
AG-10	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00	10,00	10,00
AG-11	6,92	8,00	6,29	8,91	9,67	10,00	0,00	10,00	10,00
AG-12	8,33	8,67	7,86	8,00	9,33	9,47	4,11	9,56	9,58
AG-13	9,58	10,00	7,43	9,36	10,00	9,87	1,33	9,56	9,58
AG-14	8,08	7,33	7,57	8,09	8,33	9,60	5,44	8,67	8,75
Toplam Ortalama	8,85	8,93	7,90	8,82	9,17	9,32	0,98	9,37	9,57

Katılımcılar anket sonucunda en yüksek puanı Değerlendirme kısmına vermişlerdir. Değerlendirme kısmı, katılımcıların hem AG uygulamasını hem de teknolojiyi genel olarak değerlendirdikleri kısımdır. Katılımcıların düşük puan verdikleri bölüm Deneyim Sonuçları bölümüdür. Ancak bu bölümdeki sorular diğer bölümlerin aksine negatif yargılı sorular

içermektedir. Katılımcıların deneyim sırasında baş dönmesi veya mide bulantısı gibi fiziksel rahatsızlıklar duyup duymadıklarını sorgulamaktadır. Deneyim Sonuçları bölümünün düşük puan olması, katılımcıların fiziksel bir rahatsızlık hissetmedikleri anlamına gelmektedir. Ankette Deneyim Sonuçları bölümünün ardından en az puan verilen ikinci bölüm daldırma bölümüdür. Bu bölüm kullanıcıların uygulama içinde ne derece kaybolduklarını ölçen bölümdür.



4. TARTIŞMA

Bu bölümde, elde edilen bulgular doğrultusunda AG teknolojisinin inşaat sektörüne adaptasyonu üzerine değerlendirmeler yapılacaktır. Çalışmada, merdiven kalıbı montaj sürecinde AG kullanımının hata oranlarına ve uygulama sürelerine etkisi analiz edilmiş, elde edilen veriler kontrol grubuyla karşılaştırılmıştır. Tartışma kapsamında, elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla ilişkilendirilerek yorumlanacak, AG teknolojisinin sağladığı avantajlar ve karşılaşılan potansiyel zorluklar detaylandırılacaktır. Ayrıca, bulguların sektörel uygulamalar açısından ne anlama geldiği ve AG'nin yaygınlaştırılmasına yönelik öneriler de ele alınacaktır.

4.1. Uygulama Süreleri

Çalışmanın ana hedeflerinden biri, AG teknolojisinin inşaat sektöründe emek verimliliğine katkı sağlayıp sağlamadığını incelemektir. Bu araştırma, “Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel iki boyutlu uygulama proje paftası yerine AG modeli kullanmak, ustaların merdiven kalıbı uygulama süresini etkiler mi?” sorusu etrafında gerçekleştirilmiştir. Teknolojinin emek verimliliğine etkisini belirleyebilmek amacıyla, bu bölümde döner merdiven kalıp montajı yapan 2B grup katılımcıları ile AG katılımcılarının uygulama süreleri karşılaştırılacak ve araştırma sorusuna yanıt verilecektir.

Döner merdiven ahşap kalıp uygulamaları üzerinde yapılan çalışmalarda, AG grubunun ortalama uygulama süresi 168,93 dakika iken, geleneksel 2B kâğıt pafta grubunun uygulama süresi 256,14 dakika olarak belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, AG grubu, merdiven kalıbı montaj görevini geleneksel kâğıt pafta uygulayıcılarına kıyasla yaklaşık %34 oranında daha hızlı tamamlamıştır. Bu bulgu, AG teknolojisinin inşaat sektörüne büyük bir fırsat sunduğunu ve bu teknolojinin yatırım ve araştırmalarla desteklenmesi gereken bir alan olduğunu göstermektedir.

AG teknolojisinin uygulama süresine sağladığı verimlilik katkısını daha iyi anlayabilmek amacıyla, en uzun sürede montaj yapan AG grubu katılımcısının süresi, 2B grubu katılımcıları ile karşılaştırılmıştır. AG-3 katılımcısı, AG grubundan görevi en uzun sürede tamamlayan katılımcıdır ve görevini 220 dakikada bitirmiştir. Bu katılımcı, grup ortalamasına kıyasla %30 daha uzun sürede görevini tamamlamış olup, bu durum daha

düşük bir verimliliği yansıtmaktadır. Ancak, buna rağmen 2B grubundan yalnızca üç katılımcı (2B-1, 2B-4, 2B-8) AG-3 katılımcısından daha kısa sürede görevlerini tamamlamıştır. Geriye kalan 11 2B katılımcısının tamamı, AG-3 katılımcısının performansından daha uzun sürede görevlerini tamamlamıştır. Benzer şekilde, 2B-7 katılımcısı, AG-7 katılımcısından tam olarak iki kat daha uzun bir sürede uygulamayı tamamlamış ve 2B-9 katılımcısı da, AG-9'un süresinin neredeyse iki katına yakın bir sürede görevi tamamlamıştır. Bu sonuçlar, AG teknolojisinin, en düşük performans gösteren katılımcı dahil olmak üzere tüm AG grubunun geleneksel yöntemleri kullanan katılımcılara göre daha verimli olduğunu ortaya koymaktadır. AG teknolojisi, montaj sürecini yalnızca kısaltmakla kalmayıp, aynı zamanda katılımcıların iş verimliliğini ve hızını önemli ölçüde artırmaktadır. Süre farkları, AG'nin sunduğu görsel rehberlik ve etkileşimli özelliklerin, geleneksel yöntemlere kıyasla büyük bir zaman tasarrufu sağladığını ve uygulama süreçlerini daha verimli hale getirdiğini açıkça göstermektedir.

Gruplar oluşturulurken her bir AG katılımcısının karşısına denk bir 2B katılımcısı yerleştirilmiştir. Teknolojinin emek verimliliğine katkısı, birebir eşleşmelerdeki uygulama sırasının kıyaslanması da net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Sonuçlar, AG grubundaki her katılımcının kendi denk eşleşmesindeki 2B katılımcısından daha kısa sürede uygulamayı tamamladığını ortaya koymuştur. Bir başka deyişle, 2B grubundaki hiçbir katılımcı, kendi AG denk eşleşmesinden daha hızlı olamamıştır. Bu bulgu, AG teknolojisinin yalnızca genel ortalamada değil, bireysel bazda da belirgin bir verimlilik artışı sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

Bağımsız örneklem t testi ile yapılan analiz, iki grup arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymuştur ($p < 0.001$). Genellikle, p değeri 0.05'in altında ise farkın anlamlı olduğu kabul edilir. Ancak, p değerinin 0.001'den küçük olması, gözlemlenen farkın tesadüfi olma olasılığının son derece düşük olduğunu ve bulguların çok daha güçlü bir güvenle geçerli olabileceğini göstermektedir. Bu durum, AG teknolojisinin uygulama süresi üzerindeki etkisinin yalnızca anlamlı olmadığını, aynı zamanda oldukça güvenilir ve geçerli olduğunu vurgulamaktadır. %95 güven düzeyinde elde edilen bu düşük p değeri, gözlemlenen farkın sistematik bir etkiye dayandığını ve metodolojik hataların veya rastlantısal etkilerin olasılığının çok düşük olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, AG teknolojisinin inşaat uygulamalarında verimlilik artışı sağlama potansiyelini istatistiksel olarak güçlü bir şekilde desteklemektedir.

Katılımcılar, 2B ve AG grupları arasında denk bir şekilde dağıtılmıştır. Denk dağılımın

yanı sıra deneyimsiz ve proje okumayı bilmeyen katılımcıların da AG teknolojisi ile montaj yapabilme becerisi araştırılmıştır. Deneyimsiz katılımcılar, kâğıt pafta okuma konusunda zorluklar yaşadığı için, 2B grubuna pozitif ayrımcılık yapılarak, bu katılımcıların eş katılımcısı deneyimli ve proje okumayı bilen katılımcılardan seçilmiştir. Buna rağmen, deneyimsiz AG katılımcıları, 2B grubundaki eşleri olan deneyimli katılımcılardan daha hızlı ve verimli bir şekilde uygulamayı tamamlamıştır. Örneğin, AG-11 katılımcısı, yalnızca 2 yıl deneyime sahip olup proje okumayı bilmediğini ifade etmiştir. Ancak, AG gözlüğüyle uygulamayı 215 dakikada bitirirken, çok daha deneyimli olan 2B-11 katılımcısı, 30 yıllık deneyimi ve proje okuma bilgisine rağmen uygulamayı 225 dakikada tamamlayabilmiştir. Benzer şekilde, AG-13 katılımcısı, 1 yıl deneyime sahip ve proje okumayı bilmeyen bir katılımcı olarak 178 dakikada uygulamayı tamamlamış, oysa çok deneyimli olan eş katılımcı 2B-13, 30 yıl deneyimi ve proje okuma becerisine rağmen 284 dakikada tamamlamıştır. Diğer bir örnek AG-14 katılımcısıdır. Katılımcı 8 yıl deneyime sahip olup proje okumayı bilmemesine rağmen 182 dakikada görevi tamamlamıştır. Buna karşın, 35 yıl deneyimli ve proje okuma bilgisine sahip 2B-14 katılımcısı, 255 dakikada görevini tamamlayabilmiştir. Bu bulgular, AG teknolojisinin, deneyimsiz katılımcılar dahil herkes için sağladığı önemli verimlilik farkını ortaya koymaktadır. Deneyimsiz katılımcılar bile, AG teknolojisinin sağladığı görsel rehberlik ve etkileşimli özelliklerle, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha hızlı bir şekilde görevlerini tamamlayabilmiştir. Bu sonuç, AG teknolojisinin, deneyim seviyesi ne olursa olsun, tüm katılımcılara önemli bir verimlilik artışı sağladığını ve hatta çok daha deneyimli ve proje okumayı bilen ustaların dahi önüne geçirerek başarılı bir sonuç verdiğini göstermektedir.

Çalışmanın katkılarının daha iyi anlaşılabilmesi için, literatürde AG teknolojisini uygulama süresi bağlamında kullanan çalışmalarla karşılaştırmalar yapılmış ve bu farklılıklar ortaya konulmuştur. Literatürde yer alan bazı çalışmalar, AG teknolojisinin uygulama süresini kısaltmadığını belirtmiştir. Moghaddam vd. (2021) boru montajı görevinde, Chalhoub vd. (2021) elektrik ekipman montajı görevinde, C. H. Chu vd. (2020) geleneksel bir mimari model montajı işleminde, AG kullanıcılarının, geleneksel yöntemleri kullananlara kıyasla görevlerini daha kısa sürede tamamlayamadıklarını ifade etmişlerdir. Ancak bu örnekler, literatürdeki istisnai durumlar olup, çoğu çalışma AG uygulamasının montaj görevlerinde süre avantajı sağladığını belirtmektedir. Örneğin, Kwiatak vd. (2019) boru montajı görevinde, Bartuska vd. (2022) ahşap duvar montajı görevinde, Qin vd. (2021) duvar montajı görevinde, Chalhoub & Ayer (2019) elektrik ekipman montajı görevinde, Hou

vd. (2013) lego montajı görevinde, Shirazi & Behzadan (2015) lego montajı görevinde, Wu vd. (2023) demir donatı montajı görevinde AG uygulamalarının süre avantajı sağladığını raporlamışlardır. Literatürde bulunan çalışmalar, genellikle kısıtlı ve basit görevleri içermekte olup, inşaat sahasının gerçek koşullarını yansıtamamaktadır. Döner merdiven ahşap kalıp montajını konu alan bu çalışmada ise, kontrollü deneyler inşaat sahasında uygulanan yöntemle birebir aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Bir laboratuvar ortamının hassas montaj ekipmanlarından ziyade, inşaat sahasındaki standart araçlar olan keser, çivi, testere aletleri kullanılmış ve bu sayede inşaat ortamı ile birebir örtüşen çalışma şartlarında denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, bulgular literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla, inşaat sektörüne daha doğru ve uygulanabilir sonuçlar sunmaktadır.

Literatürde bazı çalışmalarda, artırılmış gerçeklik (AG) ve 2B pafta gruplarına ek olarak, bilgisayar ekranında 3B BIM modelinin görüntülediği bir grup da oluşturularak sonuçlar karşılaştırılmıştır (C. H. Chu vd., 2020; Qin vd., 2021; Tan, Xu, Chen, vd., 2022). Ancak bu çalışmada, geleneksel yöntem ile AG teknolojisinin karşılaştırılması amaçlandığından, 3B BIM model görüntüleme yöntemi değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Çalışmanın temel odak noktası, geleneksel pafta kullanımına kıyasla AG teknolojisinin sunduğu avantajları analiz etmek ve bu teknolojiyi geleneksel yöntemin bir alternatifi olarak ele almaktır.

2B grubu katılımcılarının montaj sürecini daha uzun sürede tamamlamalarının temel nedenlerinden biri, yapılan hataları fark ederek düzeltmeye çalışmaları olmuştur. Katılımcılar zaman zaman bir rıhtı veya yan kalıbı yanlış monte ettiklerini fark ederek bu elemanları sökmüş ve doğru ölçülerle yeniden monte etmek için zaman kaybetmiştir. Buna karşılık, AG grubu katılımcıları AG uygulamasındaki yönlendirmeleri takip ederek ilerledikleri için büyük hatalar yapmamışlar ve dolayısıyla herhangi bir ek düzeltme sürecine ihtiyaç duymamışlardır.

2B grubu katılımcılarının uygulama sürelerinin uzamasındaki bir diğer önemli faktör, 2B grubu katılımcılarının çoğunun uygulama sırasında sistematik ve pratik bir yöntem belirleyememeleridir. Montaj sürecinde, merdiven kalıbını oluştururken öncelikle döşemeyi tamamlamış ve ardından her basamak için ayrı ayrı kot belirlemeye çalışmışlardır. Oysa yan kalıplardan birini yerleştirdikten sonra doğrudan bu yüzey üzerine kot işaretlemek, süreci daha pratik hale getirecek ve iş akışını hızlandıracaktır. Ancak 2B grubundaki katılımcıların büyük bir kısmı bu veya buna benzer bir pratik yöntem tercih edememişlerdir. AG grubu katılımcıları ise süreç boyunca kendi yöntemlerini belirlemek zorunda kalmamış, yalnızca

AG uygulamasındaki aşamaları takip ederek her biri aynı yöntemle ve pratik şekilde ilerlemiştir. Uygulama yardımı ile hazırladıkları her kalıp parçası doğru ölçülerde olduğu için doğru kotları belirleme konusunda vakit kaybı yaşamamışlardır. Bunun yanı sıra, malzeme hazırlık süreci de iki grup arasında süre açısından önemli farklılıklar ortaya koymuştur. 2B grubu katılımcıları, uygulamanın her aşamasında malzeme seçimi ve hazırlığı için fazladan zaman harcamış, uygun malzemeyi belirlemek için sürekli olarak ölçüm yapmış ve her bir ahşap eleman için tekrar tekrar kesim işlemi gerçekleştirmiştir. Buna karşılık, AG grubu katılımcıları AG uygulamasından aldıkları verileri bir liste halinde düzenleyerek, hangi boyutta kaç adet malzeme gerektiğini önceden belirlemiş ve bu sayede malzeme hazırlık sürecinde önemli bir zaman tasarrufu sağlamıştır.

Kararsızlık da 2B grubu katılımcılarının sürecini uzatan faktörlerden biri olmuştur. Bazı katılımcılar bir sonraki aşamada ne yapacaklarını belirlemek için düşündüklerinden ve kararsız ve yavaş hareket ettiklerinden dolayı montaj süresi uzamıştır. Buna karşılık, AG grubu katılımcıları uygulamanın proje inceleme aşamasında sürecin tamamını sanal ortamda gözlemlemişler, montaj aşamasına geçtiklerinde ne yapacaklarını net bir şekilde öğrenmişler ve süreci kararlılıkla ve hızlı bir şekilde yürütmüşlerdir.

Uygulama süresi açısından iki grup arasındaki bir diğer dikkat çekici fark, montaj sisteminin nasıl ayakta duracağına yönelik yaklaşımlarda gözlemlenmiştir. 2B grubu katılımcıları, sistemin stabilitesini sağlamak adına kalıp elemanlarını belirli bir dikey destek (direk) etrafında monte etmeyi tercih etmişlerdir. Bu durum, sistemin dengesini sağlama kaygısından kaynaklanmış, ancak yükü bu direğe aktarmak için oluşturdukları ilave destek direklerinin montajı, sürecin gereksiz şekilde uzamasına yol açmıştır. Buna karşılık, AG grubu katılımcıları sanal model üzerinden yapıyı önceden inceleyerek yan kalıpların taşıyıcı elemanlar olarak kullanılabileceğini görmüş ve ek destek montajı girişiminde süreci daha verimli bir şekilde tamamlamıştır. Ayrıca, AG teknolojisinin konumlandırma özelliği de uygulama süresi açısından önemli bir avantaj sağlamıştır. AG grubu katılımcıları, hazırladıkları kalıpları doğru şekilde yerleştirmek için herhangi bir ölçüm aracına ihtiyaç duymamış, sanal model ile gerçek kalıbı hizalayarak montaj işlemini gerçekleştirmiştir. Bu durum, ölçüm işlemi için harcanan süreyi ortadan kaldırarak katılımcılara önemli ölçüde zaman kazandırmıştır.

Son olarak, AG teknolojisinin aşamalı iş tarifleri sunması ve sesli yönlendirme özelliği de sürecin hızlanmasına katkıda bulunmuştur. Uygulama, katılımcılara her aşamada ne yapmaları gerektiğini hem görsel hem de sesli olarak aktardığından, AG grubu katılımcıları

herhangi bir tereddüt yaşamadan doğrudan uygulamaya geçebilmiştir.

Elde edilen bulgular, bu teknolojinin sektöre sağlayabileceği önemli katkıları ortaya koymaktadır. Katılımcılarla yapılan görüşmelerde, AG teknolojisinin yalnızca merdiven montajı değil, kolon ve kiriş kalıplarının montajında da büyük kolaylık sağlayacağı belirtilmiştir. Özellikle doğru konumun belirlenmesi, yatay ve dikey hizalamanın sağlanması gibi işlemlerde önemli ölçüde zaman harcandığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde, temel kalıplarının konumlandırılmasında da geleneksel yöntemlerin zaman kaybına neden olduğu ve AG desteğiyle bu süreçlerin önemli ölçüde hızlandırılabilceği vurgulanmıştır.

Bu çalışmanın sınırlı bir montaj görevi çerçevesinde gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, daha geniş ölçekli projelere uygulanması durumunda çok daha büyük verimlilik kazanmalarının sağlanabileceği öngörülmektedir. AG teknolojisinin yaygın kullanımıyla, inşaat işçileri ve yöneticileri, montaj süreçlerini daha hızlı bir şekilde gerçekleştirebilecek, iş gücü verimliliğinde önemli artışlar elde edilebilecektir. Çalışmada gözlemlenen etkiler, teknolojinin sektörde daha geniş kapsamlı uygulamalara entegre edilmesi halinde, iş akışlarını optimize edebileceğini ve montaj süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağlayabileceğini göstermektedir.

AG grubu ve 2B grubu katılımcıları arasında uygulama süresi konusunda kıyaslama yapıldığı gibi, grupların kendi içlerinde de kıyaslama ve değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Grupların kendi içinde değerlendirilmesi çalışmanın araştırma sorularının cevaplanmasına hizmet etmemektedir ancak bu alanda çalışma yapacak araştırmacılara ilave öngörüler sunduğu için raporlanmıştır. Gruplar 14 kişiden oluştuğu için yapılan analizlerde kesin yargılara varmak mümkün değildir. Kesin sonuçlar elde edebilmek için her bir grubun katılımcı sayısı 28'e ulaşmalıdır. Yapılan istatistiksel analizlerde ne deneyim süresi ne de uzamsal görselleştirme test sonucu tek başına uygulama süresinin belirlenmesinde anlamlı değildir. Aynı şekilde 2B grubu için de uzamsal görselleştirme test sonucu uygulama süresi açısından tek başına anlamlı değildir. Bir ustanın hem AG özelinde hem de 2B özelinde uygulama süresini etkileyen birçok faktör bulunabilir. Bunlar ustanın yaşı, fiziksel özellikleri, nerelerde deneyim kazandığı, bir hastalığı olup olmadığı gibi birçok değişkene bağlı olabilir. Uygulama süresini etkileyen doğru parametreleri bulmak çok geniş kapsamlı bir çalışma neticesinde ortaya koyulabilir.

Bu çalışma, "Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel 2 boyutlu proje paftası yerine artırılmış gerçeklik modeli kullanmak, ustaların uygulama süresini etkiler mi?" sorusuna yanıt aramıştır. Elde edilen bulgular, AG teknolojisinin montaj süresini önemli

ölçüde kısalttığını ortaya koymaktadır. Geleneksel 2B proje paftası ile çalışan katılımcılar, ölçü alarak malzeme hazırlama, hizalama ve montaj aşamalarında daha fazla zaman harcamış, sıklıkla hatalar yaparak bunları düzeltmek için ek süre kaybetmiştir. Buna karşılık, AG teknolojisini kullanan katılımcılar, sanal modelin sağladığı yönlendirmeler sayesinde süreci hatasız ve sistematik bir şekilde ilerleterek daha kısa sürede tamamlamıştır. Özellikle konumlandırma ve hizalama işlemlerinde sağlanan kolaylık, geleneksel yöntemlere kıyasla önemli bir verimlilik artışı sağlamıştır. Bu doğrultuda, araştırma sorusuna verilen yanıt açıktır: AG modeli kullanımı, merdiven kalıbı uygulama süresini kısaltarak iş gücü verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

4.2. Hata Miktarları

Çalışmanın ana hedeflerinden diğeri, AG teknolojisi kullanan katılımcıların geleneksel metot katılımcılarına göre uygulama hatalarının azalıp azalmadığını araştırmaktır. Bu araştırma “Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel 2B uygulama proje paftası yerine artırılmış gerçeklik modeli kullanmak, uygulama sırasında yapılan hata sayısını etkiler mi?” araştırma sorusunun odak noktasında gerçekleştirilmiştir. Teknolojinin hata miktarına etkisini belirleyebilmek için bu bölümde döner merdiven kalıp montajı yapan 2B grubu katılımcıları ile AG katılımcılarının uygulama sırasında yaptıkları hata miktarları kıyaslanarak tartışılacak ve araştırma sorusuna cevap verilecektir.

Döner merdiven ahşap kalıp uygulaması çalışmalarında AG grubunun hata süresi ortalaması 25,32 cm iken geleneksel 2B kâğıt pafta grubunun hata süresi ortalaması 117,97 cm’dir. Bir başka deyişle AG grubu merdiven kalıbı montaj görevini geleneksel kâğıt pafta uygulayıcılarına kıyasla %78,54 daha az hata ile bitirmiştir. Bu bulgu, AG teknolojisinin daha az hata yapma konusunda inşaat sektörüne sağlayacağı olağan üstü faydayı gözler önüne sermektedir. İnşaat sektöründe hatasız uygulamalar için araştırmacılar ve yatırımcılar AG teknolojisini odak çalışma alanı haline getirmelidirler.

AG teknolojisinin inşaat sektörüne daha az hata yapma konusunda sağladığı olağanüstü katkıyı daha iyi analiz edebilmek için en çok hata yapan AG grubu katılımcısının hata miktarı da incelenmiştir. AG-7 katılımcısı AG grubundan görevi en çok hata ile bitiren katılımcıdır ve görevini 33,58 cm hata ile bitirmiştir. Bu katılımcı aynı gruptaki diğer katılımcılara kıyasla oldukça hatalı bir performans sergileyerek AG grubu ortalamasından %32,62 daha fazla hata yapmıştır. Ancak buna rağmen 2B grubundan yalnızca bir katılımcı

(2B-9) AG -7 katılımcısından daha az hata yapmıştır. Geriye kalan 13 adet 2B grubu katılımcısının tamamı, AG-7 katılımcısından daha fazla hata yapmışlardır.

Teknolojinin hata miktarına etkisi, birebir eşleşmelerdeki uygulama sırasının kıyaslanmasında da net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Sonuçlar, AG grubundaki her katılımcının kendi denk eşleşmesindeki 2B katılımcısından daha az hata ile görevlerini tamamladıklarını ortaya koymuştur. Bu bulgu, AG teknolojisinin yalnızca genel ortalamada değil, bireysel bazda da belirgin şekilde hatasız uygulama yapmaya olanak sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

Bağımsız örneklem t testi ile yapılan analizde, iki grup arasındaki farkın anlamlı olduğu görülmüştür ($p < 0.001$). Genel olarak, p değeri 0.05'in altında ise farkın anlamlı olduğu kabul edilir. Ancak p değeri 0.001'den küçük olması, bu farkın tesadüfi olma olasılığının son derece düşük olduğunu ve bulguların çok daha güçlü bir güvenle geçerli olabileceğini gösterir. Bu, AG teknolojisinin hata miktarı üzerinde sağladığı avantajın sadece anlamlı olmakla kalmadığını, aynı zamanda oldukça güvenilir olduğunu vurgulamaktadır. %95 güven düzeyinde elde edilen bu düşük p değeri, gözlemlenen farkın sistematik bir etkiye dayandığını ve metodolojik hataların veya rastlantısal etkilerin çok düşük bir ihtimal olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuç, AG teknolojisinin inşaat uygulamalarında daha az hatalı uygulamalar sağlama potansiyelini istatistiksel olarak güçlü bir şekilde desteklemektedir.

Özellikle, 2B-3 katılımcısı, AG-3 katılımcısından tam olarak 9,5 kat daha fazla hata ile uygulamayı tamamlamıştır. Benzer şekilde, 2B-6 katılımcısı da, AG-6'dan 8,49 kat fazla hata yaparak uygulamasını tamamlamıştır. Bu tür büyük hata farkları, AG'nin sunduğu görsel rehberlik ve etkileşimli özelliklerin, geleneksel yöntemlere kıyasla büyük bir hata azaltma avantajı sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

Katılımcılar, 2B ve AG grupları arasında denk bir şekilde dağıtılmıştır. Denk dağılımın yanı sıra deneyimsiz ve proje okumayı bilmeyen katılımcıların da AG teknolojisi ile montaj yapabilme becerisi araştırılmıştır. Deneyimsiz katılımcılar, kâğıt pafta okuma konusunda zorluklar yaşadığı için, 2B grubuna pozitif ayrımcılık yapılarak, bu katılımcıların eş katılımcısı deneyimli ve proje okumayı bilen katılımcılardan seçilmiştir. 2B Grubuna sağlanan pozitif ayrımcılığa rağmen, deneyimsiz AG grubu katılımcıları, 2B grubundaki eşdeğer deneyimli katılımcılardan daha az hata ile uygulamayı tamamlamıştır. Örneğin, AG-11 katılımcısı, yalnızca 2 yıl deneyime sahip olup proje okumayı bilmediğini ifade etmiştir. Ancak, AG gözlüğüyle uygulamayı 13,26 cm hata ile bitirirken, çok daha deneyimli olan

2B-11 katılımcısı, 30 yıllık deneyimi ve proje okuma bilgisine rağmen uygulamayı 84,58 cm hata ile tamamlayabilmiştir. Benzer şekilde, AG-13 katılımcısı, 1 yıl deneyime sahip ve proje okumayı bilmeyen bir katılımcı olarak 18,94 cm hata ile görevini tamamlamış, oysa çok deneyimli olan eş katılımcı 2B-13, 30 yıl deneyimi ve proje okuma becerisine rağmen 82,52 cm hata ile görevini tamamlamıştır. Diğer bir örnek AG-14 katılımcısıdır. Katılımcı 8 yıl deneyime sahip olup proje okumayı bilmemesine rağmen 18,94 cm hata ile görevi tamamlamıştır. Buna karşın, 35 yıl deneyimli ve proje okuma bilgisine sahip 2B-14 katılımcısı, 82,52 cm hata ile görevini tamamlayabilmiştir. Bu bulgular, AG teknolojisinin, deneyimsiz katılımcılar dahil herkes için sağladığı önemli hatasız uygulama yapma avantajını ortaya koymaktadır. Deneyimsiz katılımcılar bile, AG teknolojisinin sağladığı görsel rehberlik ve etkileşimli özelliklerle, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha az hata ile görevlerini tamamlayabilmiştir. Bu sonuç, AG teknolojisinin, deneyim seviyesi ne olursa olsun, tüm katılımcılara önemli bir hatasız uygulama imkânı sağladığını göstermektedir.

Çalışmanın katkılarının daha iyi anlaşılabilmesi için, literatürde AG teknolojisini hata miktarı bağlamında kullanan çalışmalarla karşılaştırmalar yapılmış ve bu farklılıklar ortaya konulmuştur. Literatürde yapılan çalışmalarda yalnızca Wu vd. (2023) saha denemelerinde uygulamanın hata miktarını azaltmadığını belirtmiştir. Bunun dışındaki tüm çalışmalarda hata miktarında düşüş gerçekleşmiştir. Örneğin Moghaddam vd. (2021) boru montajı görevinde, Bartuska vd. (2022) duvar montajı görevinde, Chalhoub & Ayer (2019) elektrik montajı görevinde, C. H. Chu vd. (2020) geleneksel Dougong mimari yapısı montajında ve Fazel & Adel (2024a) ahşap birleşim görevlerinde AG teknolojisinin hata miktarını azalttığını belirtmişlerdir. Literatürde bulunan çalışmalar, genellikle kısıtlı ve basit görevleri içermekte olup, inşaat sahasının gerçek koşullarını yansıtamamaktadır. Bu çalışmada ise, inşaat kalıbı montajı görevi, inşaat sahasında uygulanan yöntemle birebir aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, bulgular literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla, inşaat sektörüne daha doğru ve uygulanabilir sonuçlar sunmaktadır.

2B grubu katılımcılarının hata miktarının yüksek olmasının çeşitli nedenleri bulunmaktadır. Bunlardan ilki, katılımcıların genellikle önce döşeme montajını gerçekleştirmeyi tercih etmeleridir. Ardından, döşeme üzerine merdiven rıhtlarını monte etmişlerdir. Ancak, döşeme kotlarını her noktada tam olarak istenilen seviyede oluşturamamaları nedeniyle merdiven rıhtlarının yerleşimi hatalı olmuştur. Yanlış kot taşıma işlemleri sonucu rıht kotları da yanlış belirlenmiştir. Buna karşılık, AG grubu katılımcıları her bir levhayı olması gereken kotta sanal olarak görüntüleyebilmiş ve bu

doğrultuda montaj işlemini hatasız gerçekleştirebilmişlerdir.

İkinci olarak, 2B grubu katılımcıları yatay eksenindeki ölçüleri, bir önceki levhanın konumunu referans alarak taşımışlardır. Her bir basamağın ölçüsü, bir önceki basamağa bağlı olarak belirlenmiştir. Ancak, başlangıç aşamasında yapılan hatalar ilerleyen aşamalarda büyüyerek son basamaklara yansımış ve merdiven dönüşü tamamlanırken basamak ölçülerinde sapmalar meydana gelmiştir. Bu doğrultuda, bazı basamaklar olması gerekenden büyük veya küçük yapılmıştır. Öte yandan, AG grubu katılımcıları her bir bileşeni AG rehberliğiyle, bağımsız olarak modeldeki konumuna göre yerleştirmiştir. Bu sayede, bir noktada yapılan hata diğer basamaklara yansımamış ve montaj süreci daha az hata ile tamamlanmıştır.

2B grubunun hata miktarının yüksek olmasının bir diğer sebebi konumlandırma işlemlerini büyük ölçüde kendi muhakeme yeteneklerine ve sınırlı ölçüm araçlarına dayanarak gerçekleştirmeleridir. Katılımcılar, metre ve şakul kullanarak 3B açıları belirlemeye çalışmışlardır. Ancak, bu süreçte kimi zaman matematiksel bilgi yetersizliği, kimi zaman ise ölçüm ekipmanlarının sınırlılıkları nedeniyle doğruluk sağlanamamıştır. Özellikle, yerden yüksekte ve havada bulunan noktaların doğru şekilde belirlenememesi, hata miktarını artıran önemli bir faktör olmuştur. Buna karşın, AG grubu katılımcıları AG gözlüğünün sunduğu konumlandırma özelliklerinden faydalananarak, ölçüm ekipmanı kullanmaya gerek kalmadan doğru uygulamayı gerçekleştirebilmişlerdir.

2B grubu katılımcılarının hata oranının yüksek olmasının bir diğer sebebi, 2B kâğıt paftadaki tüm detayları tam olarak anlayamamalarıdır. Paftada doğru anladıkları detayları başarıyla monte etmiş olsalar da yanlış yorumlanan ölçü veya bileşenler hata miktarını artırmıştır. Buna karşılık, AG grubu katılımcılarının projeyi tam olarak anlamaları gerekmemiş, AG teknolojisinin sunduğu yönlendirmeleri takip ederek doğru uygulamayı gerçekleştirebilmişlerdir.

Tüm değerlendirilen faktörler göz önüne alındığında, AG teknolojisinin saha uygulamalarındaki hata oranını azaltmada önemli bir katkı sağladığı görülmektedir. Özellikle kot belirleme, ölçüm doğruluğu, montaj süreci ve proje anlama aşamalarında sağladığı avantajlar, geleneksel yöntemlerle çalışan gruplara kıyasla hata miktarını önemli ölçüde düşürmüştür.

Elde edilen bulgular, AG teknolojisinin hata miktarını azaltma açısından inşaat sektörüne sunduğu katkıları ortaya koymaktadır. Katılımcılarla yapılan görüşmelerde, söz konusu teknolojinin sektöre entegre edilmesi halinde pratik uygulamalarda önemli faydalar

sağlayacağı ifade edilmiştir.

Katılımcılar, özellikle Türkiye’de konut inşaatlarında her katta Harita Mühendisi hizmeti alınamaması nedeniyle kolon aplikasyonlarının sıklıkla alt kattaki döşeme referans alınarak ve metre kullanılarak gerçekleştirildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, döşemelerde meydana gelen ölçüm hatalarının üst katların tamamında konumlandırma hatalarına yol açtığını ifade etmişlerdir. Ancak, AG teknolojisinin sektöre entegrasyonu ile tüm katların kalıp konumlarının olması gereken yerlerde dijital olarak görüntülenmesi mümkün olabilecektir. Bu durum, mevcut uygulamalardaki konumlandırma hatalarının en aza indirilmesine olanak tanıyacaktır.

Bunun yanı sıra, katılımcılar Türkiye’de konut inşaatlarında Harita Mühendisliği hizmetlerinin maliyet nedeniyle kısıtlandığını ve binaların temel kalıp uygulamalarında gerekli tüm noktaların Harita Mühendisi tarafından sahada işaretlenmediğini aktarmışlardır. Uygulamada, bu noktaların genellikle ustalar tarafından metre kullanılarak belirlendiği ve hatalı tespitlerin yapılabildiği belirtilmiştir. AG teknolojisi, bu soruna yönelik bir çözüm sunarak temel kalıplarının olması gereken konumda sanal olarak gösterilmesini sağlayabilir. Böylece, yanlış ölçümlerin önüne geçilerek daha hassas ve doğru uygulamalar gerçekleştirilebilir.

Sonuç olarak, AG teknolojisinin inşaat sektörüne entegrasyonu, konumlandırma doğruluğunu artırarak ölçüm hatalarını azaltma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, AG teknolojisi, sahada çalışan işçilerin projeyi yanlış anlaması veya yanlış yorumlaması nedeniyle hatalı yöntemler geliştirerek uygulama hatalarına yol açmasının önüne geçebilir. Bu bağlamda, işçilerin doğru bilgilere anlık erişimini sağlayarak hatalı uygulamaların azaltılmasına katkıda bulunabilir.

AG grubu ve 2B grubu katılımcıları arasında hata miktarı konusunda kıyaslama yapıldığı gibi, grupların kendi içlerinde de kıyaslama ve değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Gruplar 14 kişiden oluştuğu için yapılan analizlerde kesin yargılara varmak mümkün değildir. Kesin sonuçlar elde edebilmek için her bir grubun katılımcı sayısı 28’e ulaşmalıdır. Ancak kesin yargılar elde edilemese de gelecekte yapılabilecek çalışmalara fikir vermesi için grup içi değerlendirmeler de raporlanmıştır. Yapılan istatistiksel analizlerde uzamsal görselleştirme sonucu hem 2B grubu için hem de AG grubu için tek başına anlam ifade etmemektedir. Ancak ilginç bir şekilde istatistiksel analizlerde deneyimsiz katılımcılar deneyimli katılımcılara göre daha az hata yapmışlar ve bu sonucun istatistiksel analizde rastlantısal olmadığı ve anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Genç ve deneyimsiz

katılımcılar rutin iş hayatları sırasında proje okuma konusunda yetersiz oldukları için montaj yapma konusunda geleneksel yöntemde ustalarına bağlı kalsalar da AG teknolojisinde ustalarını geçerek çok daha az hata ile uygulamayı tamamlayabilmektedirler. Bu araştırmada deneyimsiz katılımcıların 2B geleneksel pafta okumayı bilmeseler de montaj çalışması yapıp yapamayacaklarını sorgularken, deneyimli katılımcılardan daha da az hata yaparak montaj yapabilecekleri sonucuna ulaşmıştır. Bu yargının kesinleştirilebilmesi için daha geniş katılımı deneyler tekrarlanmalıdır. Ayrıca ileri çalışmalarda, deneyimsiz katılımcıların genç olup teknolojiye daha yatkın olmalarından dolayı mı daha az hata yaptıkları ile ilgili sorunun cevabı yanıtlanmalıdır.

Bu çalışma, "Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel 2 boyutlu uygulama proje paftası yerine artırılmış gerçeklik modeli kullanmak, uygulama sırasında yapılan hata sayısını etkiler mi?" sorusuna yanıt aramıştır. Elde edilen bulgular, AG teknolojisinin uygulama sırasında yapılan hata miktarını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. Geleneksel 2B proje paftası ile çalışan katılımcılar, ölçüm, hizalama ve montaj aşamalarında hatalar yapmıştır. Buna karşılık, AG teknolojisini kullanan katılımcılar, sanal modelin sağladığı yönlendirmeler sayesinde süreci daha az hata ile tamamlamıştır. Özellikle konumlandırma ve hizalama işlemlerinde sağlanan görsel destek, hata oranını düşürmüştür. Bu doğrultuda, araştırma sorusuna verilen yanıt açıktır: AG modeli kullanımı, merdiven kalıbı uygulama sürecinde yapılan hata sayısını azaltarak uygulama doğruluğunu artırmaktadır.

4.3. Anket Sonuçları

Bu çalışmada, AG teknolojisinin inşaat sahasında kullanımına yönelik kullanıcı geri bildirimlerini değerlendirmek amacıyla dokuz bölümden oluşan bir anket uygulanmıştır. Anket, Likert ölçeği kullanılarak oluşturulmuş olup, katılımcılar her bir ifadeye 1 ile 10 arasında puan vermiştir. Elde edilen sonuçlar, AG teknolojisinin özellikle değerlendirme, teknoloji benimseme, duygu ve kullanılabilirlik boyutlarında yüksek puanlar aldığını ortaya koymaktadır.

Katılımcıların en yüksek puanı verdiği bölüm "Değerlendirme" olup, ortalama puan 9,57 olarak belirlenmiştir. Bu bölümde katılımcılar, teknolojinin kullanışlı ve anlaşılır olduğunu, kafa karıştırıcı olmadığını, sanal ortamın yönetilebilir nitelikte olduğunu, özgün ve yenilikçi bir deneyim sunduğunu ve sıkıcı olmaktan ziyade heyecan verici olduğunu ifade

etmişlerdir. İkinci en yüksek puanı alan “Teknoloji Benimseme” bölümü 9,37 puan ortalamasına sahiptir. Katılımcılar bu bölümde, AG teknolojisini kullanmanın kolay olduğunu ve bu teknolojiyi inşaat sahasında kullanmak istediklerini belirtmişlerdir.

9 puanın üzerinde değerlendirilen bir diğer bölüm ise “Duygu” bölümü olup, bu bölüm ortalama 9,32 puan almıştır. Katılımcılar, AG teknolojisini kullanmanın keyif verici ve heyecan uyandırıcı bir deneyim olduğunu ifade etmiştir. Benzer şekilde, “Kullanılabilirlik” bölümü de 9,17 puan ortalamasıyla yüksek puan alan bölümler arasına girmiştir. Bu bölümde, teknolojinin kullanım kolaylığı ve zahmetsiz olduğu değerlendirilmiştir.

“Katılım” bölümü ise 8,93 puan ile yüksek bir puan almasına rağmen 9 puanın altına düşmüştür. Bu bölümde, sanal görüntünün katılımcıyı ne derece içine çektiği ve ne kadar sürükleyici olduğu değerlendirilmiştir. Katılımcılar görsellerin sürükleyici olduğunu düşünmekle birlikte, bazı katılımcılar sanal ortamın sürükleyiciliğine tam puan vermemişlerdir. Benzer şekilde, “Varlık Hissi” bölümü 8,85 puan almıştır. Katılımcılar, sanal ortamda rahatça hareket edip edemediklerini ve cisimleri detaylı şekilde inceleyip inceleyemediklerini değerlendirmişlerdir. Bu puanlama, her ne kadar kullanım kolaylığına yüksek puan verilmiş olsa da, ilk deneyimde katılımcıların belirli zorluklar yaşadığını göstermektedir.

“Akış” bölümü, 8,82 puan ile varlık hissi bölümüyle benzer bir eğilim göstermiştir. Katılımcılar bu bölümde, gözlük kullanımı sırasında hareketlerini ne derece kontrol edebildiklerini ve sürecin ne kadar akıcı olduğunu değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, bazı katılımcıların gözlükle hareket etme konusunda ilk deneyimlerinde zorluk yaşadığını ortaya koymaktadır.

Ankette en düşük puan alan bölümlerden biri “Daldırma” olup, ortalama 7,90 puan almıştır. Bu bölümde, katılımcıların gözlük takılıyken gerçek dünyayı ne ölçüde fark ettikleri ve sanal ortamın bir parçası olup olmadıkları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, AG teknolojisinin SG’den farklı olarak kullanıcıyı tamamen sanal dünyaya daldırmadığını ve gerçek dünya ile etkileşimin devam ettiğini anket sonuçları ile de göstermektedir.

En düşük puan alan bölüm ise “Deneyim Sonuçları” olup, bu bölümde ortalama puan 0,98 olarak belirlenmiştir. Bu bölümde, deneyim sırasında katılımcıların baş ağrısı, terleme ve mide bulantısı gibi fiziksel rahatsızlıklar yaşayıp yaşamadıkları sorgulanmıştır. Diğer bölümlerin aksine bu bölümde yüksek puan negatifliği, düşük puan pozitifliği ifade etmektedir. Yani katılımcı hiçbir fiziksel rahatsızlık hissetmemişse o soruya 0 puan vermiştir. Elde edilen sonuçlar, deneyim sırasında önemli bir fiziksel rahatsızlık

yaşanmadığını ortaya koymaktadır.

Genel olarak anket sonuçları, AG teknolojisinin inşaat sahasında kullanımının katılımcılar tarafından büyük ölçüde olumlu karşılandığını ve teknolojinin pratik uygulanabilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ancak, ilk kullanım deneyimlerinde bazı zorlukların yaşandığı ve sanal ortamın içine çekilme hissinin sınırlı olduğu da görülmektedir. Bu bulgular, AG teknolojisinin inşaat sektörüne entegrasyonu sürecinde, kullanıcı deneyimini iyileştirmeye yönelik ek çalışmaların gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, literatürde yer alan benzer araştırmalarla karşılaştırıldığında önemli paralellikler taşımaktadır. Örneğin, Qin vd. (2023) tarafından yapılan araştırmada, AG teknolojisinde NASA-TLX yöntemi kullanılarak katılımcıların zihinsel yükleri ölçülmüş ve AG teknolojisinin ek zihinsel yük oluşturmadağı belirlenmiştir. Bu bulgu, bu çalışmada uygulanan anketin varlık hissi bölümündeki sonuçlarla örtüşmektedir. Katılımcılar, AG teknolojisinin kolay ve alışılabilir olduğunu yüksek puanlarla ifade etmiştir. Benzer şekilde, Cuperschmid vd. (2016), duvar montajı görevinde AG teknolojisini kullanmış ve deneyim sonrası katılımcılarla gerçekleştirilen anket sonuçlarında, AG'nin inşaat sektöründe kullanım potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, bu çalışmanın Teknoloji Benimseme ve Değerlendirme bölümlerinde elde edilen sonuçlarla uyumludur. Katılımcılar, uygulamanın kullanışlı olduğunu ve sahada kullanmak istediklerini belirtmiştir. Marklin vd. (2022), tarafından yapılan çalışmada, AG teknolojisinin kas hareketleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve geleneksel yöntemlerle anlamlı bir farklılık göstermediğı tespit edilmiştir. Bu çalışmada da Deneyim Sonuçları bölümünde, katılımcılar AG gözlüğünün fiziksel rahatsızlıklara neden olmadığını ifade etmiştir. Ayrıca, Syberfeldt vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen lego montajı deneyinde, AG kullanımının model anlamayı kolaylaştırdığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, bu çalışmada da katılımcılar döner merdiven montaj uygulamasını kolay bulduklarını belirtmiştir. Son olarak, H. Kim vd. (2022), tarafından peyzaj tasarımı üzerine gerçekleştirilen araştırmada, katılımcılar AG teknolojisini ilgi çekici bulduklarını ifade etmiştir. Bu çalışmada elde edilen anket sonuçları da AG'nin eğlenceli bir deneyim sunduğunu ortaya koyarak söz konusu bulgu ile örtüşmektedir.

Anket sonuçlarının yanı sıra, saha çalışmaları sırasında elde edilen gözlemler de AG sisteminin yüksek kullanılabilirlik ve olumlu kullanıcı deneyimi sağladığını desteklemektedir. Hem deneyimsiz hem de yaşça büyük katılımcıların tamamı, teknolojiyi rahatlıkla kullanabilmişlerdir. Saha gözlemleri sırasında tuşları tetikleyememe, görüntüleri anlayamama, kullanırken sıkılma veya vazgeçme gibi herhangi bir olumsuz durumla

karşılaşılmamıştır. Katılımcıların tamamı, incelemeyi son derece rahat ve sakin bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Anketlerdeki deneyimden keyif alma ve AG teknolojisini heyecan verici bulma gibi yüksek puanlar da saha gözlemleriyle örtüşmektedir. Katılımcıların gözlük kullanma konusunda istekli olmaları ve gözlüğü kullanırken mutlu görünmeleri, bu durumu açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, katılımcıların bu teknolojinin varlığına şaşırdıklarını ve onu kullanmaktan duydukları memnuniyeti ifade etmeleri, olumlu kullanıcı deneyimini pekiştirmektedir. Teknoloji benimseme konusundaki saha gözlemleri de anket sonuçlarını desteklemektedir. Katılımcılar, AR teknolojisinin yetkinliklerini gördükçe, bu teknolojinin inşaat sahasında kullanılması durumunda önemli faydalar sağlayacağını belirtmişlerdir. Özellikle, proje okuma konusunda yetkin olmayan bir katılımcının, herhangi bir çalışana bağımlı kalmadan gözlükle projeyi okuyarak kendi çalışmasını gerçekleştirmenin motive edici olduğunu ifade etmesi, AG teknolojisinin bağımsız ve verimli çalışma imkânı sunması açısından dikkat çekicidir. Bu durum, AG teknolojisinin kullanıcı dostu arayüzü ve kolay öğrenilebilir yapısıyla birleştiğinde, teknolojinin geniş kitleler tarafından benimsenme potansiyelini açıkça göstermektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, AG teknolojisinin kalıp montajı sürecinde kullanımının işçilerin uygulama süresine ve hata miktarlarına etkisini araştırmaktadır. Bu doğrultuda iki temel araştırma sorusu belirlenmiştir:

- Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel iki boyutlu proje paftası yerine artırılmış gerçeklik modeli kullanımı, ustaların uygulama süresini etkiler mi?
- Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel iki boyutlu proje paftası yerine artırılmış gerçeklik modeli kullanımı, uygulama sırasında yapılan hata sayısını etkiler mi?

Araştırma sorularını yanıtlamak için AG teknolojisi ile kalıp montajı gerçekleştirilebilecek bir yazılım geliştirilmiştir. AG teknolojisi ile gerçekleştirilen kalıp montajı geleneksel pafta ile montaj yapan kontrol grubu ile kıyaslanmıştır. Tüm bulgular ve analizlerin sonuçları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Çalışma, AG teknolojisinin inşaat sektörüne uyum sağlayabileceğini göstermektedir. Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, bu araştırmada inşaat sektörünün ana iş kalemleri ele alınmış ve katılımcılar fiziksel olarak zorlu bir inşaat görevini AG teknolojisi ile gerçekleştirmiştir
- AG grubundaki katılımcılar, merdiven kalıbı montajı görevini kontrol grubuna kıyasla yaklaşık %34 daha kısa sürede tamamlamıştır. İstatistiksel analiz sonuçları, söz konusu farkın anlamlı olduğunu göstermiş ve AG teknolojisinin kalıp montaj sürecini hızlandıran bir araç olduğu ortaya konmuştur. Bu doğrultuda, çalışmanın ilk araştırma sorusu olan "Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel 2B proje paftası yerine artırılmış gerçeklik modeli kullanımı, ustaların uygulama süresini etkiler mi?" sorusu olumlu şekilde yanıtlanmıştır.
- Geleneksel 2B paftalarla çalışan katılımcılar, hata yapma ve bu hataları düzeltme sürecinde zaman kaybetmiş, sistematik ve pratik bir yöntem belirlemekte zorlanmış, malzeme hazırlık aşamasında ölçüm ve kesim işlemleriyle fazladan uğraşmış ve karar verme süreçlerinde tereddüt yaşamıştır.
- AG kullanan katılımcılar, sanal model üzerindeki yönlendirmeler sayesinde montaj aşamalarını hatasız ve tutarlı bir şekilde tamamlamış, malzeme listelerini önceden

oluşturarak hazırlık sürecini optimize etmiş ve konumlandırma özelliklerinden faydalanarak ölçüm gereksinimini ortadan kaldırmıştır.

- Yapı stabilitesine yönelik kararlar incelendiğinde, AG grubundaki katılımcıların sanal model üzerinden taşıyıcı elemanları önceden analiz edebildiği ve gereksiz destek elemanlarından kaçınarak süreci daha verimli tamamladığı gözlemlenmiştir. AG grubundaki katılımcılar, merdiven kalıbı montajını kontrol grubuna kıyasla %78,54 daha az hata ile tamamlamıştır. İstatistiksel analizler, bu farkın anlamlı olduğunu göstermiş ve AG teknolojisinin kalıp montajı sürecinde hata miktarını azaltan bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Böylece, çalışmanın ikinci araştırma sorusu olan "Merdiven kalıbı uygulama sürecinde, geleneksel 2B proje paftası yerine artırılmış gerçeklik modeli kullanımı, uygulama sırasında yapılan hata miktarını etkiler mi?" sorusu olumlu şekilde yanıtlanmıştır.
- Geleneksel 2B pafta ile çalışan grupların kot belirleme, ölçüm doğruluğu, konumlandırma ve proje anlama aşamalarında çeşitli hatalar yaptığı gözlemlenmiştir. Buna karşın AG grubunun, teknolojinin sunduğu sanal rehberlik sayesinde daha az hata yaptığı tespit edilmiştir.
- AG grubu uygulama sonucunda değerlendirme anketine tabi tutulmuştur. Katılımcılar AG teknolojisinin ve geliştirilen uygulamanın kullanışlı ve kolay uygulanabilir olduğunu, kullanım sırasında kendilerini heyecanlı hissettiklerini, herhangi bir fiziksel rahatsızlık yaşamadıklarını ve günlük çalışmalarında bu teknolojiyi kullanmaya istekli olduklarını ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, AG teknolojisinin inşaat sektöründe önemli bir potansiyele sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, AG teknolojisinin sunduğu 3B görselleştirme ve interaktif özellikler, uygulama süreçlerinde verimliliği artırmakta, hata oranlarını azaltmakta ve çalışanların iş akışlarını optimize etmelerine olanak tanımaktadır. Gerçekleştirilen saha gözlemleri ve anket sonuçları, kullanıcıların AG teknolojisini kolaylıkla benimsediğini ve olumlu bir deneyim yaşadıklarını göstermektedir. Özellikle, karmaşık projelerin görselleştirilmesi ve uygulama adımlarının interaktif bir şekilde sunulması, çalışanların görevleri daha iyi anlamalarına ve daha doğru kararlar vermelerine yardımcı olmaktadır. Bu doğrultuda, inşaat sektöründe AG, sadece bir teknolojik yenilik değil, aynı zamanda iş yapış şekillerimizi kökten değiştirecek bir devrimin başlangıcıdır.

6. ÖNERİLER

AG teknolojisinin inşaat sektörüne uyumunun önünde birtakım engeller bulunmaktadır. Bu bölümde bu engellerin giderilebilmesi için gerçekleştirilmesi gereken çalışmalar ile ilgili öneriler maddeler halinde sunulacaktır.

- AG gözlükleri işçilik maliyetleri ile kıyaslandığında oldukça pahalıdır. İnşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulabilmesi için yalnızca sektörün ihtiyaçlarını karşılayacak daha ucuz gözlükler üretilmesi için çalışmalar gerçekleştirilmelidir.
- Gözlükler kırılabilir yapısı nedeni ile inşaat sahasında her aşamada kullanılmaya uygun değildir. Kontrollü deneylerde fiziksel rahatsızlığa yol açmamış olsa da tam gün kullanımlarda boyutunun büyük olmasından dolayı fiziksel rahatsızlıklara yol açabilir. Gözlüklerin iki saatlik şarj süreleri tam gün kullanım için yeterli değildir. AG gözlüklerinin daha sağlam, günlük kullanım boyutlarında ve daha ergonomik ve daha uzun kullanım süreli şekilde üretilmesi için çalışmalar gerçekleştirilmelidir.
- Literatürde, AG teknolojisinin gerçek inşaat projelerinde montaj görevlerinde kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Dolayısıyla, söz konusu teknolojinin uygulama sürecinde karşılaşılabilecek engeller ve sınırlamalar henüz kapsamlı bir şekilde ortaya konulmamıştır. AG teknolojisinin inşaat sektöründe yaygın olarak benimsenebilmesi için, gerçek inşaat sahalarında ve fiili projelerde uygulandığı çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- 3B inşaat modellerinin hızlı bir şekilde AG gözlükleri ile görüntülenmesine imkân tanıyan hazır yazılım paketleri mevcut olsa da bu programlar inşaat sektöründeki montaj görevlerini gerçekleştirebilecek teknik yeterlilikten yoksundur. Bu nedenle, AG teknolojisinin sektöre uyumu için montaj süreçlerini destekleyen ve otomatik AG uygulamaları geliştirilmesini sağlayan yazılım çözümleri üzerinde çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir. Sektör paydaşları bir imalatın üç boyutlu görüntülerini oluşturabilmekte, kullanılacak malzemeler ile ilgili bilgileri liste haline getirebilmektedir. Oluşturulacak otomatikleştirilmiş paket programlar bu bilgilerden otomatik olarak artırılmış gerçeklik uygulaması oluşturabilmelidir.
- Artırılmış gerçeklik teknolojisinin iki boyutlu geleneksel paftaların gerçekliğini artıracığı, pafta üzerine görüntüleme cihazı yönlendirildiğinde detayların ve

açıklamaların görüntülenebileceği çalışmaların kontrollü deney sonuçlarının gözlemlenmesi de literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

- Artırılmış gerçeklik teknolojisinin uzun vadeli etkileri hakkında daha fazla bilgiye ihtiyaç vardır. Gelecekteki çalışmalarda, bu teknolojinin uzun süreli kullanımının etkileri ve kullanıcı adaptasyonu, bilişsel yük gibi faktörler incelenmelidir.



7. KAYNAKLAR

- Abdeen, F. N., Gunatilaka, R. N., Sepasgozar, S. M. E., & Edwards, D. J. (2022). The usability of a novel mobile augmented reality application for excavation process considering safety and productivity in construction. *Construction Innovation*, 24(4), 892-911.
- Ahn, S., Han, S., & Al-Hussein, M. (2019). 2D Drawing Visualization Framework for Applying Projection-Based Augmented Reality in a Panelized Construction Manufacturing Facility: Proof of Concept. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(5), 04019032.
- Alkan, I. B., & Basaga, H. B. (2022). Use of Visualization Technologies for Increasing Efficiency of Construction Industry. *7th International Project and Construction Management Conference*, 775-786.
- Alkan, I. B., & Basaga, H. B. (2023a). Augmented reality technologies in construction project assembly phases. *Automation in Construction*, 156, 105107.
- Alkan, I. B., & Basaga, H. B. (2023b). Augmented Reality with Hololens 2 and Innovative Applications in the Construction Industry. *International Civil Engineering & Architecture Conference*, 9-21.
- Alkan, I. B., & Basaga, H. B. (2024). Challenges in developing virtual reality education for addressing climate change. *8th Project and Construction Management Conference*, 638-644.
- Barbosa, Jonathan Woetzel, Jan Mischke, Maria Joao Ribeirinho, Mukund Siridhar, Matthew Parsons, Nick Bertram, & Stephanie Brown. (2017, Şubat). *Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity*.: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf> adresinden alınmıştır.
- Bartuska, B., Teischinger, A., & Riegler, M. (2022). Effects of spatial augmented reality assistance on the efficiency of prefabricating timber frame walls. *Wood Material Science and Engineering*, 18(3), 860-869.
- Berger, R. (2016). *Digitalization in the Construction Industry*.: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/tab_digitization_construction_industry_e_final.pdf adresinden alınmıştır.
- Bhattacharya, B., & Winer, E. H. (2019). Augmented reality via expert demonstration authoring (AREDA). *Computers in Industry*, 105, 61-79.

- Bock, T., & Linner, T. (2015). *Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. Cambridge University Press.
- Branting, M. M. (2024). *Lost in Translation - Using Technology to Bridge Communication Issues in Construction: How Concrete Formwork for Unique Situations Can Learn from Prefabrication and Manufacturing in Other Industries*, Washington University, Yüksek Lisans Tezi, Washington.
- Chalhoub, J., & Ayer, S. K. (2019). Effect of varying task attributes on augmented reality aided point layout. *Journal of Information Technology in Construction*, 24, 95-111.
- Chalhoub, J., Ayer, S. K., & Ariaratnam, S. T. (2021). Augmented reality for enabling un- and under-trained individuals to complete specialty construction tasks. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 128-143.
- Chi, H. L., Kim, M. K., Liu, K. Z., Thedja, J. P. P., Seo, J., & Lee, D. E. (2022). Rebar inspection integrating augmented reality and laser scanning. *Automation in Construction*, 136, 104183.
- Choi, S., & Park, J. S. (2021). Development of augmented reality system for productivity enhancement in offshore plant construction. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 209.
- Chu, C. H., Liao, C. J., & Lin, S. C. (2020). Comparing augmented reality-assisted assembly functions-A case study on Dougong structure. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(10), 3383.
- Chu, M., Matthews, J., & Love, P. E. D. (2018). Integrating mobile Building Information Modelling and Augmented Reality systems: An experimental study. *Automation in Construction*, 85, 305-316.
- Clegg, N., & Olivan, J. (2021, Ekim 17). *Investing in European Talent to Help Build the Metaverse | Meta.:*
<https://about.fb.com/news/2021/10/creating-jobs-europe-metaverse/> adresinden alınmıştır.
- Cuperschmid, A. R. M., Grachet, M. G., & Fabrício, M. M. (2016). Development of an Augmented Reality environment for the assembly of a precast wood-frame wall using the BIM model. *Ambiente Construído*, 16(4), 63-78.
- Dallasega, P., Schulze, F., & Revolti, A. (2023). Augmented Reality to overcome Visual Management implementation barriers in construction: a MEP case study. *Construction Management and Economics*, 41(3), 232-255.
- Deshpande, A., & Kim, I. (2018). The effects of augmented reality on improving spatial problem solving for object assembly. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 760-755.

- Dokumacı Sütçü, N., & Oral, B. (2019). Uzamsal Görselleştirme Testinin Geliştirilmesi: Geçerlik ve Güvenirlik Çalışmaları. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 27(3), 1179-1195.
- Du, J., Shi, Y., Zou, Z., & Zhao, D. (2017). CoVR: Cloud-Based Multiuser Virtual Reality Headset System for Project Communication of Remote Users. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(2), 04017109.
- Durivage, M. (2016, Temmuz 19). *How To Establish Sample Sizes for Process Validation Using The Success-Run Theorem.*:
<https://www.bioprocessonline.com/doc/how-to-establish-sample-sizes-for-process-validation-using-the-success-run-theorem-0001> adresinden alınmıştır.
- Editör Yayınevi Komisyonu. (2024). *Bilsem 3. Sınıf Tamamı Çözümlü Soru Bankası* (T. Meşe, Ed.). Editör Yayınevi.
- Fang, W., Chen, L., Zhang, T., Hu, H., & Bi, J. (2024). Co2iAR: Co-located audio-visual enabled mobile collaborative industrial AR wiring harness assembly. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 90, 102795.
- Fazel, A., & Adel, A. (2024a). Enhancing construction accuracy, productivity, and safety with augmented reality for timber fastening. *Automation in Construction*, 166, 105596.
- Fazel, A., & Adel, A. (2024b). Enhancing construction accuracy, productivity, and safety with augmented reality for timber fastening. *Automation in Construction*, 166, 105596.
- Fazel, A., & Izadi, A. (2018). An interactive augmented reality tool for constructing free-form modular surfaces. *Automation in Construction*, 85, 135-145.
- Feng, S., He, X., He, W., & Billingham, M. (2022). Can you hear it? Stereo sound-assisted guidance in augmented reality assembly. *Virtual Reality*, 27, 591-601.
- Gerber, P., Castagnino, S., Rothballer, C., Renz, A., & Filitz, R. (2016, Mart 8). *The Transformative Power of Building Information Modeling.*:
<https://www.bcg.com/publications/2016/engineered-products-infrastructure-digital-transformative-power-building-information-modeling> adresinden alınmıştır.
- Guay, R. (1976). *Purdue Spatial Visualization Test.*:
https://efcms.engr.utk.edu/ef105-2019-08/PSVT/instructions_2.php adresinden alınmıştır
- Hou, L., Wang, X., Bernold, L., & Love, P. E. D. (2013). Using Animated Augmented Reality to Cognitively Guide Assembly. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(5), 439-451.
- İnak, C., & Evlimoğlu, U. (2017). *İnşaat sektörünün ekonomik büyüme üzerindeki etkileri: Türkiye üzerine ampirik inceleme* [Yüksek Lisans Tezi]. Adnan Menderes Üniversitesi.

- Japan Federation of Construction Contractors. (2021). *Current status of the construction industry*.
<https://www.nikkenren.com/publication/handbook.html> adresinden alınmıştır.
- Kaya, V., Yalçinkaya, Ö., & Hüseyini, İ. (2013). Ekonomik Büyümede İnşaat Sektörünün Rolü:Türkiye Örneği (1987-2010). *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 27(4), 148-167.
- Khan, S., Panuwatwanich, K., & Usanavasin, S. (2023). Integrating building information modeling with augmented reality: application and empirical assessment in building facility management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31(7), 2809-2828.
- Kim, B., Kim, C., & Kim, H. (2012). Interactive Modeler for Construction Equipment Operation Using Augmented Reality. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(3), 331-341.
- Kim, H., Piao, Z., Hahm, S., & Lee, Y. (2022). Depicting a Landscape Architectural Installation Using Augmented Reality. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 7, 443-452.
- Kivrak, S., & Arslan, G. (2018). Augmented Reality Technology Applications in Construction Project Activities. *Journal of Polytechnic*, 21(2), 379-385.
- Kolaei, A. Z., Hedayati, E., Khanzadi, M., & Amiri, G. G. (2022). Challenges and opportunities of augmented reality during the construction phase. *Automation in Construction*, 143, 104586.
- Kwiatek, C., Sharif, M., Li, S., Haas, C., & Walbridge, S. (2019). Impact of augmented reality and spatial cognition on assembly in construction. *Automation in Construction*, 108, 102935.
- Kyaw, A. H., Xu, A. H. C., Jahn, G., van den Berg, N., Newnham, C., & Zivkovic, S. (2023). Augmented Reality for high precision fabrication of Glued Laminated Timber beams. *Automation in Construction*, 152, 104912.
- Lee, S., & Akin, Ö. (2011). Augmented reality-based computational fieldwork support for equipment operations and maintenance. *Automation in Construction*, 20(4), 338-352.
- Liu, P., Yang, Z., Huang, J., & Wang, T. K. (2024). The effect of augmented reality applied to learning process with different learning styles in structural engineering education. *Engineering, Construction and Architectural Management*, ahead-of-print(ahead-of-print).
- Marino, E., Barbieri, L., Bruno, F., & Muzzupappa, M. (2024). Assessing user performance in augmented reality assembly guidance for industry 4.0 operators. *Computers in Industry*, 157-158, 104085.

- Marklin, R. W., Toll, A. M., Bauman, E. H., Simmins, J. J., LaDisa, J. F., & Cooper, R. (2022). Do Head-Mounted Augmented Reality Devices Affect Muscle Activity and Eye Strain of Utility Workers Who Do Procedural Work? Studies of Operators and Manhole Workers. *Human Factors*, 64(2), 305-323.
- McMeel, D. (2019). Robots and AR: Towards a platform economy for construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 24, 527-539.
- Mellenthin Filardo, M., Walther, T., Maddineni, S., & Bargstädt, H. J. (2021). Installing Reinforcement Rebars Using Virtual Reality and 4D Visualization. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 98, 1200-1216.
- Moghaddam, M., Wilson, N. C., Modestino, A. S., Jona, K., & Marsella, S. C. (2021). Exploring augmented reality for worker assistance versus training. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101410.
- Nee, A. Y. C., Ong, S. K., Chryssolouris, G., & Mourtzis, D. (2012). Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), 657-679.
- Nguyen, P. T., Phan, P. T., Nguyen, P.-C., Vu, N. B., & Le, L. P. (2019). Measurement Of Construction Labor Productivity for Formwork of The High-Rise Building Project. *Journal Of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 14(2), 112-120.
- Novet, J. (2021, Mart 31). *Microsoft wins contract to make modified HoloLens for U.S. Army.:*
<https://www.cnbc.com/2021/03/31/microsoft-wins-contract-to-make-modified-hololens-for-us-army.html?msockid=2be456d2ee5a630727d74359eff06273>
 adresinden alınmıştır.
- Osorto Carrasco, M. D., & Chen, P. H. (2021). Application of mixed reality for improving architectural design comprehension effectiveness. *Automation in Construction*, 126, 103677.
- Özçelik, D. A. (1981). *Araştırma teknikleri düzenleme ve analiz* (ÜSYM Yayınları).
- Paes, D., Feng, Z., King, M., Khorrami Shad, H., Sasikumar, P., Pujoni, D., & Lovreglio, R. (2024). Optical see-through augmented reality fire safety training for building occupants. *Automation in Construction*, 162, 105371.
- Pazur, B. (2025, Mart 18). *What Is Meta AI? What You Need to Know About the Social Network's AI Tools - CNET.:*
<https://www.cnet.com/tech/services-and-software/what-is-meta-ai-what-you-need-to-know-about-the-social-networks-ai-tools/> adresinden alınmıştır.
- Qin, Y., Bloomquist, E., Bulbul, T., & Gabbard, J. (2023). Measuring the impacts of AR HMD on users' situation awareness during wood frame assembly tasks. *Journal of Information Technology in Construction*, 28(4), 70-86.

- Qin, Y., Bloomquist, E., Bulbul, T., Gabbard, J., & Tanous, K. (2021). Impact of information display on worker performance for wood frame wall assembly using AR HMD under different task conditions. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101423.
- Qin, Y., & Bulbul, T. (2023a). An EEG-Based Mental Workload Evaluation for AR Head-Mounted Display Use in Construction Assembly Tasks. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(9), 04023088.
- Qin, Y., & Bulbul, T. (2023b). Electroencephalogram-based mental workload prediction for using Augmented Reality head mounted display in construction assembly: A deep learning approach. *Automation in Construction*, 152, 104892.
- Ramos-Hurtado, J., Muñoz-La Rivera, F., Mora-Serrano, J., Deraemaeker, A., & Valero, I. (2022). Proposal for the Deployment of an Augmented Reality Tool for Construction Safety Inspection. *Buildings*, 12(4), 500.
- Rogean, N., & Rezaei Rad, A. (2024). Collaborative timber joint assembly: Augmented reality for multi-level human-robot interaction. *International Journal of Architectural Computing*, 22(4), 642-660.
- Sencer, M. (1989). *Toplum bilimlerinde yöntem*. Beta Basım.
- Settimi, A., Chutisilp, N., Aymanns, F., Gamero, J., & Weinand, Y. (2024). TTool: A Supervised Artificial Intelligence-Assisted Visual Pose Detector for Tool Heads in Augmented Reality Woodworking. *Applied Sciences*, 14(7), 3011.
- Shanbari, H., Blinn, N., & Issa, R. R. A. (2016). Using augmented reality video in enhancing masonry and roof component comprehension for construction management students. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 23(6), 765-781.
- Shirazi, A., & Behzadan, A. H. (2015). Content delivery using augmented reality to enhance students' performance in a building design and assembly project. *Advances in Engineering Education*, 4(3), 1-24.
- Shouman, B., Othman, A. A. E., & Marzouk, M. (2022). Enhancing users involvement in architectural design using mobile augmented reality. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(6), 2514-2534.
- Syberfeldt, A., Danielsson, O., Holm, M., & Wang, L. (2015). Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality. *Procedia Manufacturing*, 1, 98-109.
- Tan, Y., Xu, W., Chen, K., Deng, C., & Wang, P. (2022). An interactive and collaborative augmented reality environment for civil engineering education: steel reinforcement bars teaching as an example. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31(3), 1100-1122.

- Tan, Y., Xu, W., Chen, K., Deng, C., & Wang, P. (2024). An interactive and collaborative augmented reality environment for civil engineering education: steel reinforcement bars teaching as an example. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31(3), 1100-1122.
- Tan, Y., Xu, W., Chen, P., & Zhang, S. (2024). Building defect inspection and data management using computer vision, augmented reality, and BIM technology. *Automation in Construction*, 160, 105318.
- Tan, Y., Xu, W., Li, S., & Chen, K. (2022). Augmented and Virtual Reality (AR/VR) for Education and Training in the AEC Industry: A Systematic Review of Research and Applications. *Buildings*, 12(10), 1529.
- Tavares, P., Costa, C. M., Rocha, L., Malaca, P., Costa, P., Moreira, A. P., Sousa, A., & Veiga, G. (2019). Collaborative Welding System using BIM for Robotic Reprogramming and Spatial Augmented Reality. *Automation in Construction*, 106, 102825.
- Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., & Richir, S. (2016). Proposition and Validation of a Questionnaire to Measure the User Experience in Immersive Virtual Environments. *International Journal of Virtual Reality*, 16(1), 33-48.
- Tsai, L. T., Chi, H. L., Wu, T. H., & Kang, S. C. (2022). AR-based automatic pipeline planning coordination for on-site mechanical, electrical and plumbing system conflict resolution. *Automation in Construction*, 141, 104400.
- Um, J., Park, J. min, Park, S. yeon, & Yilmaz, G. (2023). Low-cost mobile augmented reality service for building information modeling. *Automation in Construction*, 146, 104662.
- Wang, J., Fan, X., Zhu, Y., Yang, · Xu, & Yin, · Xuyue. (2022). Cross-platform AR annotation for assembly-design communication in pipe outfitting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121, 4981-4998.
- Wang, T. K., Huang, J., Liao, P. C., & Piao, Y. (2018). Does Augmented Reality Effectively Foster Visual Learning Process in Construction? An Eye-Tracking Study in Steel Installation. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2472167.
- Wang, X., Truijens, M., Hou, L., Wang, Y., & Zhou, Y. (2014). Integrating Augmented Reality with Building Information Modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry. *Automation in Construction*, 40, 96-105.
- Wang, X., Zhang, M., Yang, Y., Xiao, F., & Luo, X. (2025). Enhancing building fire safety inspections with cognitive ergonomics-driven augmented reality: Impact of interaction modes. *Automation in Construction*, 170, 105939.
- Wen, J., Gheisari, M., Jain, S., Zhang, Y., & Minchin, R. E. (2021). Using Cloud-Based Augmented Reality to 3D-Enable the 2D Drawings of AISC Steel Sculpture: A Plan-Reading Educational Experiment. *Journal of Civil Engineering Education*, 147(3), 04021006.

- Wolf, M., Teizer, J., Wolf, B., Bükür, S., & Solberg, A. (2022). Investigating hazard recognition in augmented virtuality for personalized feedback in construction safety education and training. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101469.
- Wu, S., Hou, L., Chen, H., Zhang, G. (Kevin), Zou, Y., & Tushar, Q. (2023). Cognitive ergonomics-based Augmented Reality application for construction performance. *Automation in Construction*, 149, 104802.
- Xiang, S., Wang, R., & Feng, C. (2021). Mobile projective augmented reality for collaborative robots in construction. *Automation in Construction*, 127, 103704.
- Xu, Y., Fan, Z., Hou, L., Guan, H., & Mao, C. (2018). *Utilising AR HoloLens to enhance user experience in house selling: an experiment study*.
- Yan, W. (2022). Augmented reality instructions for construction toys enabled by accurate model registration and realistic object/hand occlusions. *Virtual Reality*, 26(2), 465-478.
- Yogeeswaran, K., Chen, Q., & de Soto, B. G. (2023). Utilizing augmented reality for the assembly and disassembly of panelized construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 28(30), 571-584.

8. EKLER

8.1. Ek 1. Artırılmış Gerçeklik Grubu Deneyim Anketi

Aşağıdaki sorular, artırılmış gerçeklik ile merdiven kalıbı montajı hakkındaki görüşlerinizi, hislerinizi ve izlenimlerinizi anlamamıza yöneliktir. Her bir madde için, lütfen deneyiminizle ne kadar aynı fikirde olduğunuzu veya o deneyimi ne ölçüde yaşadığınızı 1’den 10’a (1: Hiç katılmıyorum, 10: Tamamen Katılıyorum) kadar bir ölçekle değerlendirin.

Ek Tablo 1. Katılımcı değerlendirme anket soruları

Varlık Hissi	Puan
Uygulama, yaptığım hareketlere hemen karşılık verdi.	
Gözlük beni doğal hissettirdi	
Gözlükle kalıp çakmak benim için doğal ve alışılabilirdi.	
Uygulamayı rahatça keşfedebildim.	
Nesneleri yakından inceleyebildim.	
Nesneleri farklı açılardan görebildim.	
Deneyimin sonunda uygulamada hareket etme ve etkileşim kurma konusunda kendimi yeterli hissettim.	
Görsel kalitenin yetersizliği görevlerime odaklanmamı zorlaştırmadı.	
Gözlük görevlerime odaklanmamı güçleştirmede.	
Görevlerime odaklanıp gözlüğü düşünmeden montaj görevlerini takip edebildim.	
Gözlükten gelen sesleri doğru şekilde ayırt edebildim.	
Gözlükten duyduğum seslerin hangi yönden geldiğini doğru saptayabildim.	

Ek Tablo 1'in devamı

Katılım	Puan
Gzölükteki uygulamanın görsel yönleri beni içine çekti.	
Gözlükteki nesnelerin üç boyutlu hallerini gerçek ortamda görmek hissi gerçekten sürükleyiciydi (etkileyiciydi).	
Merdiveni incelerken sanal görüntüyü gerçekten var hissettim.	
Daldırma	Puan
Uygulama beni o kadar heyecanlandırdı ve nasıl montaj yapılacağını merak etmemi sağladı.	
Uygulamanın o kadar içindeydim ki etrafımdaki gerçek dünyayı fark etmedim.	
Uygulamada kendimi gerçek dünyada değil sanal bir ortamın bir parçası gibi hissettim.	
Kendimi inşaatta bir montaj yapıyor gibi değil, sanal bir ortamda oyun oynuyor gibi hissettim.	
Sanal ortamda kendimi fiziksel olarak rahat hissettim	
Sanal model ayrıntıları dikkatimi dağıtmadı	
Zamanın nasıl geçtiğini anlamadım.	
Akış	Puan
Hareketlerimi tam anlamıyla kontrol edebildiğimi hissettim.	
Her adımda ne yapacağımı biliyordum.	
Durumu elimde tuttuğumu hissettim.	
Zaman, alıştığımından farklı akıyor gibiydi.	
Zaman sanki hızlanmış gibiydi.	
Zaman duygumu hiç kaybetmedim	
Başkalarının ne düşüneceği umurumda değildi.	
İnsanların hakkımda ne düşüneceğini dert etmedim.	
Çok heyecan verici bir an yaşıyordum.	
Bu deneyim bana büyük bir huzur ve iyi his sağladı.	
Bu deneyimi anlattığımda paylaşmak istediğim güçlü duygular hissediyorum.	

Ek Tablo 1'in devamı

Kullanılabilirlik	Puan
Kulaklık, AR başlık gibi araçları kullanmak kolay geldi.	
Sanal ortamda tutarsızlıklar yoktu	
Etkileşimi sağlamak bana biraz zahmetsiz geldi.	
Duygu	Puan
Bu sanal ortamda bulunmaktan keyif aldım.	
Sanal ortamda hiç gergin değildim	
O kadar heyecan vericiydi ki saatlerce orada kalabilirdim.	
Deneyim o kadar hoşuma gitti ki enerjik hissediyorum.	
Sanal ortamda hiç endişelenmedim	
Yanlış bir şey yapmaktan korkmadım	
Tüm talimatları yerine getirebilir miyim diye endişelenmedim	
Uygulama sırasında hiç kaygılanmadım.	
Sanal ortamdayken aklım başka yerlere kaymadı.	
Gözlük bana sıkıcı gelmedi.	
Hareketlerim yolunda gittiğinde büyük bir heyecan hissettim.	
Araçları kullanırken zaman sanki kısılıyordu	
Bu araçları kullanmayı öğrenmek benim için keyifli bir meydan okumaydı.	
Uygulamayı anladığım için hiç korkmadım	
Bu araçlarla uğraşmaktan zevk aldım.	
Deneyim Sonuçları	Puan
Sanal ortamla etkileşimdeyken yoruldum.	
Etkileşim sırasında başım ağrıdı.	
Etkileşim sırasında gözlerim yoruldu.	
Etkileşim sırasında ağızımda tükürük artışı hissettim.	
Etkileşim sırasında daha fazla terledim.	
Etkileşim sırasında midem bulandı.	
Etkileşim sırasında başım şişti.	
Gözlerim açıkken başım döndü.	
Etkileşim sırasında baş dönmesi/vertigo yaşadım.	

Ek Tablo 1'in devamı

Teknoloji Benimseme	Puan
Aynı sanal ortamı tekrar kullansam, etkileşimim daha net ve anlaşılır olur.	
Bu sanal ortamı ustalıkla kullanmayı kolayca öğrenebilirim.	
Bu sanal ortamı kullanmayı öğrenmek benim için kolay olur.	
Bu etkileşim araçlarını kullanmak iyi bir fikir.	
Bu araçlar işi daha ilginç hale getirir.	
Bu araçlarla çalışmak isterim.	
Bu araçları kullanmak için gereken kaynaklara sahibim.	
Bu araçları kullanmak için gereken bilgiye sahibim.	
Bu teknoloji kullandığım diğer teknolojilerle uyumlu. (Teknoloji seviyesi üstün müydü?)	
Değerlendirme	Puan
Kendi adıma, bu sanal ortamın kullanışlı olduğunu söylerim.	
Bu sanal ortamın net olduğunu düşünüyorum.	
Bu sanal ortamın yönetilebilir olduğunu düşünüyorum.	
Bu sanal ortamı orijinal buldum.	
Bu sanal ortamı heyecan verici buldum.	
Bu sanal ortamı kolay buldum.	
Bu sanal ortam profesyonelce hazırlanmış gibi geldi.	
Bu sanal ortam bana zarif geldi.	
Bu sanal ortamı kullanılabilir buldum.	
Bu sanal ortamı güzel buldum.	
Bu sanal ortam bana sevilebilir geldi.	
Bu sanal ortam benim için motive edici oldu.	

ÖZGEÇMİŞ

İlker Baki ALKAN, lise öğrenimini Samsun Bafra Anadolu Lisesi'nde tamamlamış, 2013 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Lisans programından mezun olmuştur. Yüksek lisans eğitimini 2018 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yapı Anabilim Dalı'nda tamamlamıştır. 10 yılı aşkın bir süredir özel sektörde yönetici olarak görev yapmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Araştırmacı, TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında "Donatı Uygulamasında Emek Verimliliği, Hata Sayısı ve Atık Donatı Üzerindeki Etkilerin İncelendiği Yenilikçi Artırılmış Gerçeklik Modeli Üreten Uygulamanın Geliştirilmesi" başlıklı projede bursiyer olarak görev almaktadır. Tezinin literatür taraması kısmından üretilen "Augmented Reality in Construction Project Assembly Phases" adlı makale, Automation in Construction dergisinde yayımlanmıştır. Alkan evli ve iki çocuk babasıdır.