KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ENDÜSTRİDE ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK UYGULAMALARI VE İNSAN-BİLGİSAYAR ETKİLEŞİMİ PERSPEKTİFİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

ZAFER BOZYER

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ENDÜSTRİDE ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK UYGULAMALARI VE İNSAN-BİLGİSAYAR ETKİLEŞİMİ PERSPEKTİFİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

ZAFER BOZYER

Prof. Dr. Alpaslan FIĞLALI Danışman,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Dr. Öğr. Üyesi Atakan ALKAN Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Dr. Öğr. Üyesi Pınar ONAY DURDU Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet CİHAN Jüri Üyesi,	Düzce Üniversitesi	.....
Dr. Öğr. Üyesi F. Serab ONURSAL Jüri Üyesi,	İstanbul Ticaret Üniversitesi	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 04.01.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Dijitalleşme ile hayatın her alanında etkisini göstermeye başlayan Endüstri 4.0 devrimi birçok uygulama ve araştırma alanından oluşmaktadır. Geleceğin önemli teknolojileri arasında olacağı vurgulanan Artırılmış Gerçeklik teknolojileri de Endüstri 4.0'ın temel uygulama alanlarından birisidir. Artırılmış Gerçeklik, görme duyumuz ile algıladığımız gerçek dünyayı dijital öğelerle zenginleştirerek insanlara çok daha gelişmiş bir gerçeklik deneyimi sunması nedeniyle geleceğin önemli teknolojilerden birisi olacaktır.

Öncelikle kaleme aldığım bu tez çalışmasının ortaya çıkma sürecinden başlayarak sürecin tamamında desteğini benden esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Alpaslan FIĞLALI'ya ve tez çalışmasının şekillenmesine görüşleri ile katkı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Pınar ONAY DURDU ve Dr. Öğr. Üyesi Atakan ALKAN'a teşekkürlerimi sunuyorum. Kullanıcı deneylerinin yapılabilmesi için gerekli olan akıllı gözlüğün, yurtdışından tedarik edilmesi konusunda yardımcı olan değerli arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Okan YILMAZ'a da ayrıca teşekkür ediyorum.

Son olarak hayatım boyunca beni destekleyen aileme de sonsuz minnet duygularımı sunuyor; özellikle umutsuzluğa düştüğüm her anda yanımda olan, desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen, "başarmak" eyleminin varlığıyla anlam kazandığı, fedakâr eşim Sinem BOZYER'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Ocak – 2019 Zafer BOZYER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 4
1.1. İlgili Kavramlar 4
1.1.1. Dijitalleşme ve endüstri 4.0 4
1.1.2. Artırılmış gerçeklik, artırılmış sanallık ve sanal gerçeklik 5
1.1.3. İnsan-bilgisayar etkileşimi, kullanılabilirlik ve kullanıcı arayüzü 6
1.2. Çalışmanın Motivasyonu 7
1.3. Çalışmanın Amacı 8
1.4. Çalışmanın Soruları ve Hipotezleri 8
2. ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK 10
2.1. Geçmişten Günümüze Artırılmış Gerçekliğin Gelişimi 11
2.2. Artırılmış Gerçeklik Görüntüleme Aygıtları 20
2.2.1. Başa giyilen AG sistemleri 21
2.2.2. El ile tutulan AG sistemleri 25
2.2.3. Mekânsal AG sistemleri 26
2.3. Artırılmış Gerçeklik Takip Metotları 29
2.3.1. Sensör ve modül tabanlı takip metotları 30
2.3.2. Görme tabanlı takip metotları 32
2.3.2.1. İşaretçi kullanılan takip metotları 32
2.3.2.2. İşaretçi kullanılmayan takip metotları 34
2.4. Artırılmış Gerçeklik Uygulama Geliştirme Ortamları 39
2.4.1. AG uygulamalarında doğrudan kullanılan yazılımlar 40
2.4.2. AG uygulamalarını oluşturmak için kullanılan yazılımlar 42
2.4.3. AG uygulamalarına içerik oluşturan yazılımlar 43
2.4.4. AG ile ilgili diğer yazılımlar 44
2.5. Artırılmış Gerçeklik Uygulama Alanları 45
2.5.1. Mimarlık ve inşaat uygulamaları 46
2.5.2. Eğitim uygulamaları 48
2.5.3. Pazarlama ve reklamcılık uygulamaları 48
2.5.4. Turizm ve kültürel miras uygulamaları 50
2.5.5. Spor uygulamaları 51
2.5.6. Oyun ve eğlence uygulamaları 52
2.5.7. Askeri uygulamalar 52
2.5.8. Medikal uygulamalar 54

2.6. Endüstride Artırılmış Gerçeklik Uygulamaları 55
2.6.1. Endüstriyel AG uygulamalarına örnekler 57
2.6.2. Bakım ve montaj AG uygulamalarının sistematik haritası 62
2.6.2.1. Sistematik haritalamanın metodu 62
2.6.2.2. Sistematik haritalama çalışmasında SALSA adımlarının uygulanması 63
2.6.2.3. Sistematik haritalama çalışmasının sonuçları 68
3. İNSAN BİLGİSAYAR ETKİLEŞİMİ 75
3.1. Kullanıcı Arayüzü ve Deneyimi 76
3.2. İnsan-Bilgisayar Arayüz Türleri 77
3.2.1. Komut tabanlı kullanıcı arayüzleri 78
3.2.2. Grafik tabanlı kullanıcı arayüzleri 79
3.2.3. Dokunsal (temas tabanlı) kullanıcı arayüzleri 80
3.2.4. Doğal kullanıcı arayüzleri 81
3.3. İnsan-Bilgisayar Etkileşim Türleri 83
3.3.1. Talimat verme 83
3.3.2. Diyalog kurma 84
3.3.3. Manipülasyon ve gezinme 86
3.3.4. Keşfetme ve tarama 87
3.4. Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarında Etkileşim 88
3.4.1. Doğrudan etkileşim ortamları 89
3.4.2. Dolaylı etkileşim ortamları 91
3.4.3. Entegre (aracısız) etkileşim ortamları 92
3.5. İnsan-Bilgisayar Etkileşimi Kullanılabilirlik Değerlendirme Yöntemleri 92
3.5.1. İnceleme yöntemleri 93
3.5.1.1. Sezgisel değerlendirme 94
3.5.1.2. Bilişsel gözden geçirme 98
3.5.2. Test yöntemleri 99
3.5.3. Kullanıcı raporları 100
3.6. Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarında Kullanılabilirlik Çalışmaları 101
3.6.1. Başa giyilen AG sistemlerinde kullanılabilirlik ve etkileşim 101
3.6.1.1. Sistematik literatür taramasının metodu 102
3.6.1.2. Sistematik literatür taramasında SALSA adımlarının uygulanması 102
3.6.1.3. Sistematik literatür taramasının sonuçları 107
4. KULLANILABİLİR BİR AG UYGULAMASI: MONTAJ A+ 112
4.1. Uygulamanın Genel Çerçevesi 112
4.2. Kullanılacak AG Teknolojisinin Belirlenmesi 114
4.3. Arayüzün Tasarlanması 115
4.3.1. Uygulama alanı ve hedef kitle 115
4.3.2. Takip yöntemi 115
4.3.3. Etkileşim yöntemi 116
4.3.4. Dijital içerik türleri 117
4.4. Artırılmış Gerçeklik Yazılımının Geliştirilmesi 118
4.4.1. Sezgisel kriterlerin geliştirilmesi ve uygulamanın değerlendirmesi 120
4.5. Kullanıcı Deneyleri Aşaması 125
4.5.1. AG uygulamasının kullanıcı testi ile değerlendirilmesi 126

4.5.2. Uygulamanın montaj süreçlerine uygunluğunun değerlendirilmesi 128
4.5.2.1. Performans değerlendirmede kullanılan ölçütler 128
4.5.2.2. Performans verilerinin kıyaslanmasında kullanılan istatiksel yöntemler 129
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 131
5.1. Sezgisel Değerlendirme Çalışmaları 131
5.2. Kullanılabilirlik Deneyleri Aşaması 136
5.3. AG ile Bilgisayar Donanım Bileşen Montajının Değerlendirilmesi 142
5.3.1. Performansın istatiksel olarak analizi ve hipotezlerin test edilmesi 143
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 149
KAYNAKLAR 153
EKLER 173
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 178
ÖZGEÇMİŞ 179

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Milgram'ın gerçeklik-sanallık doğrusu 6
Şekil 2.1. Endüstri 4.0 devrimini mümkün kılan teknolojiler 10
Şekil 2.2. Demokles'in Kılıcı 11
Şekil 2.3. Caudel & Mizell tarafından geliştirilen AG teknolojisi 12
Şekil 2.4. KARMA AG sisteminin yazıcı tamir ve bakımında kullananımı 12
Şekil 2.5. AG sistemleri (a) Map-in-the-hat, (b) Tinmith 14
Şekil 2.6. ARToolKit işaretçilerinin AG uygulamalarında kullanımına örnekler 14
Şekil 2.7. Tanımlanmış bir yüzeyin projeksiyon sistemi ile zenginleştirilmesi 15
Şekil 2.8. PDA üzerinde geliştirilmiş mobil video-görme AG sistemi 16
Şekil 2.9. Cep telefonu üzerinde geliştirilmiş mobil video-görme AG sistemi 16
Şekil 2.10. Paralel izleme ve haritalama sisteminin iPhone üzerinde çalışması 17
Şekil 2.11. Wikitude tarafından geliştirilen mekânsal AG uygulaması 18
Şekil 2.12. Farklı senaryolarda LSD-SLAM örnekleri ve tespit edilen düzlemler 20
Şekil 2.13. (a) optik görme AG sistemi ve (b) video görme AG sistemi 22
Şekil 2.14. Epson Moverio BT-300 artırılmış gerçeklik gözlüğü 23
Şekil 2.15. HTC Vive Pro sanal gerçeklik (SG) gözlüğü 23
Şekil 2.16. REFLCT başa takılan projeksiyonlu doğrudan görme sistemi 24
Şekil 2.17. El ile tutulan (HHD) AG sistemleri ve farklı kullanım alanlarına örnekler 26
Şekil 2.18. (a) Lego firması tarafından geliştirilen kiosk ve (b) akıllı ayna FXMirror 27
Şekil 2.19. (a) Uçak kokpitinde HUD, (b) WayRay Navion holografik AG navigasyon 27
Şekil 2.20. Projeksiyon cihazı ve hareket takip sistemi ile artırılmış tırmanma duvarı 28
Şekil 2.21. Hypervsn 3D holografik projeksiyon cihazı 28
Şekil 2.22. Literatürde önerilen çeşitli işaretçiler [59]. (a) ARToolkit; (b) ARTag; (c) ARToolKitPlus; (d) SCR Marker; (e) Data Matrix; (f) QR Code; (g) PDF (h) Intersense IS-1200 Marker; (i) Shotcode; (j) RealTIVision 33
Şekil 2.23. Model tabanlı takip çalışmalarına örnekler 35
Şekil 2.24. SIFT algoritması ile işlenen görüntü ve tespit edilen anahtar noktalar 37
Şekil 2.25. Moverio eğitim aracında CAD model ile resim köşelerinin işaretlenmesi 45
Şekil 2.26. AG teknolojisi ile görselleştirilen Fibrasa Connection projesi 47
Şekil 2.27. ELK tarafından sunulan LOOFT-AR uygulaması 47

Şekil 2.28. (a) Mobil AG Kitapta animasyon, (b) ARGE3D arayüzü ve AG görüntüsü 48
Şekil 2.29. Siemens firması tarafından geliştirilen AG destekli broşür 49
Şekil 2.30. (a) Walgreens Pharmacy, (b) IKEA AG pazarlama uygulamaları 49
Şekil 2.31. Archeoguide uygulaması ile Hera tapınağının dijital gösterimi 50
Şekil 2.32. Gökova körfezi için geliştirilen AG uygulaması: GökovAR 51
Şekil 2.33. ARQuake oyun uygulaması 52
Şekil 2.34. BARS sistemi ile çevredeki binaların işaretlenmesi 53
Şekil 2.35. Entegre eğitim uygulaması 53
Şekil 2.36. (a) Dijital tarama görüntüleri (b) Damara girilecek nokta kontrolü 54
Şekil 2.37. SleeveAR, rehabilitasyon tedavisinde kullanıcı geri bildirimi sağlamak için uzamsal projeksiyon tabanlı AG uygulaması. (a) başlangıç pozisyonu, (b) orta performans, (c) kol geri bildirimi. (d) ilerleme raporu 54
Şekil 2.38. Literatür çalışmalarında AG bakım uygulamalarının alt alanlara dağılımı 56
Şekil 2.39. 3D görseller kullanılarak gerçekleştirilen montajın adımları (a-c) 57
Şekil 2.40. Modüler mobilya parçalarının birleştirilmesinde AG'nin kullanımı 58
Şekil 2.41. AG ile verilerin görselleştirilmesi, kontrol ve muayene işlemleri 58
Şekil 2.42. İşaretçi tabanlı başa takılan video-görme AG uygulaması 59
Şekil 2.43. Tablet PC üzerinde verilerinin görselleştirilmesi 59
Şekil 2.44. MARTA ile Tablet PC üzerinde verilerinin görselleştirilmesi 60
Şekil 2.45. Mönitör ve tablet kullanılan uzaktan bakım AG uygulaması 60
Şekil 2.46. motionEAP mekânsal projeksiyonlu görme AG sistemi 61
Şekil 2.47. Üretimde mekânsal optik görme AG uygulaması 61
Şekil 2.48. Çalışmaya göre uyarlanmış PRISMA akış diyagramı 65
Şekil 2.49. AG kullanılan bakım uygulamalarının yıllara göre dağılımı 68
Şekil 2.50. Farklı AG görüntüleme teknolojisi kullanılan bakım uygulamalarının yıllara göre dağılımı 69
Şekil 2.51. Literatürde AG bakım çalışmalarının dağılımı (a) son 10 yıl (b) son 4 yıl 70
Şekil 2.52. Takip yöntemlerinin görüntüleme teknolojilerine göre dağılımı 71
Şekil 2.53. Dijital içeriklerin görüntüleme teknolojilerine göre dağılımı 72
Şekil 2.54. Makalelerin, (a) türlerine ve (b) yapılan analizlere/deneylere göre dağılımı 73
Şekil 2.55. Makalelerin sektörlere (a) ve bakım uygulama türlerine (b) göre dağılımı 74
Şekil 3.1. Komut tabanlı (metin tabanlı) arayüz örneği 79
Şekil 3.2. Xerox Star'ın köşeli tasarıma sahip arayüzü 80
Şekil 3.3. ENIAC ve donanım tabanlı somut arayüz 81
Şekil 3.4. Kinect ile hareket tabanlı soyut arayüz 82
Şekil 3.5. BCI yardımıyla iletişim kuran bir ALS hastası 83

Şekil 3.6. Kinect'e talimat vermek için tanımlanmış fiziksel hareketler 84
Şekil 3.7. Apple tarafından geliştirilen sesli asistan Siri ve diyalog örnekleri 85
Şekil 3.8. Windows işletim sisteminde sürükle-bırak manipülasyonu ile etkileşim 86
Şekil 3.9. (a) SecondLife sanal dünya ortamı (b) Google sokak görünümü uygulaması 87
Şekil 3.10. (a) IGI CAVE sistemi, (b) Araçlarda şerit ve mesafe takip sistemleri 88
Şekil 3.11. Doğrudan (a), dolaylı (b-c) ve entegre (d) etkileşim ortamları 89
Şekil 3.12. Doğrudan etkileşimde kullanılan yöntemler 90
Şekil 3.13. Doğrudan etkileşimde kullanılan yöntemler 92
Şekil 3.14. İBE sezgisel değerlendirme çalışmalarında uzmanlıklara göre problem tespit oranları 96
Şekil 3.15. Sistematik tarama çalışmasına ait PRISMA akış diyagramı 104
Şekil 3.16. İBE literatürünün HMD teknolojilerine ve yıllara göre dağılımı 107
Şekil 3.17. HMD teknolojilerinde takip yöntemlerinin dağılımı 108
Şekil 3.18. HMD teknolojilerine göre İBE çalışmalarının makale türleri 108
Şekil 3.19. HMD teknolojilerinde kullanılan dijital içerikler 109
Şekil 3.20. HMD teknolojilerinde etkileşim türlerinin dağılımı 110
Şekil 3.21. Kullanılabilirlik değerlendirme yöntemlerinin dağılımı 110
Şekil 4.1. AG uygulamasının gelişim adımları ve sonuçlandırılması 113
Şekil 4.2. Uygulama arayüzünün bilgisayar kasası üzerinde görünümü 119
Şekil 4.3. Moverio BT-300'ün ekranından alınan arayüz görüntüleri 119
Şekil 4.4. Geliştirilen AG uygulamasının kullanıcı testleri ile değerlendirilmesi 125
Şekil 5.1. Yardım için adımlara eklenen resimler ve arayüzdeki konumu 135

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Donanımına ve konumuna göre Artırılmış Gerçeklik sistemleri 21
Tablo 2.2. SALSA çerçevesinin adımları ve görevler 63
Tablo 2.3. Arama yapılan veritabanları ve arama kapsamı ve sonuçlar 64
Tablo 2.4. Çalışmada dikkate alınan hariç tutma ve dahil olma kriterleri 64
Tablo 2.5. Çalışmalardan elde edilecek anahtar verilere ilişkin detaylar 66
Tablo 2.6. Her bir makale için anahtar verilere ait değerlerin sentezlenmesi 67
Tablo 3.1. İBE çalışmalarında arayüz türleri 77
Tablo 3.2. Belirlenen arayüz tür başlıkları ve kapsamları 78
Tablo 3.3. Kullanılabilirlik değerlendirme yöntemleri 93
Tablo 3.4. Nielsen'in sezgisel kullanılabilirlik değerlendirme kriterleri 95
Tablo 3.5. Nielsen'in 0-4 kullanılabilirlik derecelendirme cetveli 98
Tablo 3.6. Arama yapılan veritabanları ve arama kapsamı ve sonuçlar 103
Tablo 3.7. Çalışmada dikkate alınan hariç tutma ve dahil olma kriterleri 103
Tablo 3.8. Kalite değerlendirmesinde dikkate alınan kriterler 105
Tablo 3.9. Sentezleme aşamasında dikkate alınacak başlıklar ve numaraları 105
Tablo 3.10. Sentezleme adımı sonrasında incelenen makalelere dair veriler 106
Tablo 4.1. Optik-HMD teknolojileri için sezgisel değerlendirme kriterleri 122
Tablo 4.2. Deney katılımcılarına dair temel veriler 126
Tablo 4.3. Kullanıcı deneyleri esnasında yapılacak montaj görevleri 127
Tablo 5.1. Sezgisel değerlendirme ile tespit edilen kullanılabilirlik problemleri 132
Tablo 5.2. AG yazılımında yapılması kararlaştırılan güncellemeler 135
Tablo 5.3. Anket sorularına verilen cevapların frekansları ve ortalaması 137
Tablo 5.4. Kullanıcı deneyleri sonrasında tespit edilen sorunlar 140
Tablo 5.5. NASA-TLX anketi ile tespit edilen zihinsel yükler 140
Tablo 5.6. Katılımcıların deney sonrası performans verileri 141
Tablo 5.7. Deney gruplarına ait performans verileri (Kabloların takılması dahil) 143
Tablo 5.8. Performans ölçütlerinin betimsel istatistikleri ve normallik testleri (Kabloların takılması dahil) 144
Tablo 5.9. Hipotezlerin test edilmesi için kullanılan test istatistikleri (Kabloların takılması dahil) 145
Tablo 5.10. Deney gruplarına ait performans verileri (Kabloların takılması hariç) 146
Tablo 5.11. Performans ölçütlerinin betimsel istatistikleri ve normallik testleri (Kabloların takılması hariç) 147
Tablo 5.12. Hipotezlerin test edilmesi için kullanılan test istatistikleri (Kabloların takılması hariç) 147

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

H_o : Boş Hipotez
H_1 : Alternatif Hipotez
p : Anlamlılık Değeri

Kısaltmalar

ACM SIGCHI: Association for Computing Machinery Special Interest Group on Computer-Human Interaction (Bilgisayar Derneği Bilgisayar-İnsan Etkileşimi Özel İlgi Grubu)
AG : Artırılmış Gerçeklik
API : Application Programming Interface (Uygulama Programlama Arayüzü)
AR : Augmented Reality (Artırılmış Gerçeklik)
AS : Artırılmış Sanallık
BARS : Battlefield Augmented Reality Systems (Muharebe Alanı Artırılmış Gerçeklik Sistemleri)
BCI : Brain-Computer Interaction (Beyin-Bilgisayar Arayüzü)
CAD : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAVE : Computer Aided Virtual Environments (Bilgisayar Destekli Sanal Ortamlar)
CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayar Sayımlı Yönetim)
DOF : Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)
DOG : Difference of Gaussian (Gauss Farkları)
DTAM : Dense Tracking and Mapping (Yoğunluk Takip ve Haritalama)
FAST : Features from Accelerated Segment Testi (Hızlandırılmış Alt Kesit Testi Tabanlı Özellik)
FOV : Field of View (Görüş Alanı)
GUI : Graphical User Interfaces (Grafiksel Kullanıcı Arayüzü)
GPS : Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
HCI : Human-Computer Interaction (İnsan-Bilgisayar Etkileşimi)
HHD : Hand Held Displays (El ile Tutulan Ekranlar)
HMD : Head Mounted Displays (Başa Takılabilir Ekranlar)
HMPD : Head Mounted Projective Display (Başa Takılan Projektörler)
HWD : Head Wear Displays (Başa Giyilebilir Ekranlar)
IDE : Integrated Development Environment (Tümleşik Geliştirme Ortamı)
IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IMU : Inertial Measurement Unit (Atalet Ölçüm Birimi)
ISO : International Standards Organization (Uluslararası Standartlar Enstitüsü)
İBE : İnsan Bilgisayar Etkileşimi
KG : Karışık Gerçeklik

LSD-SLAM	: Large Scale Direct SLAM (Büyük Ölçekli Doğrudan SLAM)
MARS	: Mobile Augmented Reality Systems (Mobil Artırılmış Gerçeklik Sistemleri
NASA-TLX	: National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi Görev Yük Endeksi)
NUI	: Natural User Interface (Doğal Kullanıcı Arayüzü)
PDA	: Personal Data Assistant (Kişisel Veri Asistanı)
PSSUQ	: The Post-Study Usability Questionnaire (Çalışma Sonrası Kullanılabilirlik Anketi)
PTAM	: Parallel Tracking and Mapping (Paralel Takip ve Haritalama)
SALSA	: Search, Appraisal, Synthesis, Analysis (Arama, Değerlendirme, Sentezleme, Analiz)
SAR	: Spatial Augmented Reality (Mekânsal Artırılmış Gerçekler)
SLAM	: Simultaneous Localization and Mapping (Eşzamanlı Konumlandırma ve Haritalandırma)
SfM	: Structure from Motion (Hareket Tabanlı Yapı)
SDK	: Software Development Kit (Yazılım Geliştirme Ortamı)
SG	: Sanal Gerçeklik
UI	: User Interface (Kullanıcı Arayüzü)
USEQ	: The User Satisfaction Evaluation Questionnaire (Kullanıcı Memnuniyeti Değerlendirme Anketi)
UX	: User Experience (Kullanıcı Deneyimi)
ZG	: Zenginleştirilmiş Gerçeklik

ENDÜSTRİDE ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK UYGULAMALARI VE İNSAN-BİLGİSAYAR ETKİLEŞİMİ PERSPEKTİFİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Bilişim teknolojilerinin hızlı gelişimiyle birlikte ortaya çıkan yeni teknolojiler, yaşam tarzlarımızı ve iş yapma yöntemlerimizi değiştirmektedirler. Bu teknolojilerden birisi olan akıllı gözlükler, Endüstri 4.0'ın bileşenlerinden olan Artırılmış Gerçeklik (AG) uygulamaları için mükemmel bir ortam sunmaları nedeniyle yakın gelecekte hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olacaktır. Halihazırda endüstri kuruluşlarında AG teknolojisinden yararlanılarak iş süreçlerinin daha verimli hale getirilmesi üzerine çalışılmaktadır ve bakım, onarım, montaj, süreç izleme, uzaktan etkileşim, vb. alanlarda geliştirilmiş AG uygulamaları bulunmaktadır. Ancak yeni ortaya çıkan her teknoloji gibi AG teknolojisi de aşılması gereken birtakım problemleri beraberinde getirmiştir. AG teknolojilerinin insanlarla olan etkileşimlerinin iyileştirilmesi gerekliliği söz konusu problemlerden birisidir. Bu nedenle çalışmada öncelikle AG teknolojilerinin endüstriyel uygulamaları konusunda yapılmış İnsan-Bilgisayar Etkileşimi (İBE) araştırmaları incelenmiş; literatürde yer alan araştırmalardan faydalanılarak bu çalışmada geliştirilecek AG uygulamasının değerlendirilmesi için sezgisel kriterler önerilmiştir. Montaj ve bakım süreçlerine olan benzerliği ve kullanıcı testleri için yeterince gönüllü katılımcıya ulaşılabilmesi gibi avantajları nedeniyle masaüstü bilgisayar donanım bileşenlerinin montaj süreci AG uygulaması haline getirilmiş ve geliştirilen uygulama İBE değerlendirme yöntemleri ile test edilmiştir. Akıllı gözlük üzerinde çalışacak şekilde geliştirilen uygulamanın öncelikle uzmanlar tarafından değerlendirilmesi sağlanmış ve uzmanların önerileri dikkate alınarak AG uygulaması iyileştirilmiştir. Akabinde kullanıcı testleri ile tekrar kullanılabilirlik problemleri tespit edilmiş; akıllı gözlükler üzerinde çalışacak AG uygulamaları için geliştirilen sezgisel kriterler güncellenmiştir. Ayrıca deneyimli ve deneyimsiz kullanıcı gruplarıyla yapılan deneyler sonucunda, akıllı gözlük üzerinde çalışan AG uygulamasını kullanan deneyimsiz katılımcıların başarı oranının deneyimli katılımcılara çok yakın olduğu görülmüştür. Ancak, AG uygulamalarından üst düzeyde fayda sağlanabilmesi için İBE disiplininden uygulamalarının geliştirilmesi sürecinde yararlanılması gerektiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arayüz Tasarımı, Artırılmış Gerçeklik, İnsan-Bilgisayar Etkileşimi, Sezgisel Değerlendirme, Tasarım Kriterleri.

AUGMENTED REALITY APPLICATIONS IN INDUSTRY AND THEIR EVALUATION FROM HUMAN-COMPUTER INTERACTION PERSPECTIVE

ABSTRACT

New technologies emerging due to the rapid development of information technologies change our ways of doing business and our life. Smart glasses, which is one of emerging technologies, will become an indispensable part of our lives in the near future since they provide the perfect medium for Augmented Reality (AR) applications, which are one of the components of the Industry 4.0. Currently; there is work going on in industrial establishments for making the business processes more efficient by using the AR technology and there are AR applications developed in the fields of maintenance, repair, assembly, process monitoring, remote interaction, etc... However, as with any emerging technology, AR technology has brought along some problems that need to be overcome. The necessity of improving AR technologies' interactions with people is one of these prevailing problems. Therefore, primarily the research conducted on Human-Computer Interaction (HCI) on the industrial applications of AR technologies was examined in the study; then by utilizing the research in the literature, the intuitive criteria to evaluate the AR application that will be developed in this study were proposed. The assembly process of desktop computer hardware components was developed as an AR application due to the advantages such as its similarity to assembly and maintenance processes as well as having access to adequate number of voluntary users for testing and the developed application was tested with HCI evaluation methods. The application, which was developed to work on the smart glasses, was first evaluated by the experts and then the AR application was improved considering the recommendations of the experts. Afterwards, re-usability problems were detected with user tests; and then the heuristic criteria developed for AR applications working on smart glasses, have been updated. In addition; as a result of the experiments conducted on experienced and inexperienced user groups, it was determined that the success rate of the inexperienced participants using AR applications was very close to that of the experienced participants. However, it was determined that the HCI discipline should be utilized during the process of application development in order to get maximum efficacy from AR applications.

Keywords: Interface Design, Augmented Reality, Human-Computer Interaction, Heuristic Evaluation, Design Criteria.

GİRİŞ

Tarih boyunca bazı dönemlerde gerek teknolojik ilerlemeler gerekse ekonomik ve toplumsal değişimlerin getirdiği ihtiyaçlar doğrultusunda sanayileşme hamleleri ortaya çıkmış ve bu hamleler dünyayı derinden etkileyerek değiştirmiştir. Buhar gücünün endüstride kullanılmaya başlanılmasından itibaren, seri üretim hatlarının kurulması ve makinaların üretilmesi, bilgisayar başta olmak üzere elektronik ürünlerin hayatımıza girmesi, internetin yaygınlaşması gibi önemli teknolojik ilerlemeler, endüstri devrimleri ile sonuçlanmıştır [1]. Günümüzde ise hayatın her alanında kendini hissettiren dijitalleşmeden, gündelik hayatımızda kullandığımız en basit nesnelerin bile birbirleriyle haberleşmesiyle meydana gelecek yaygın bilişimden ve endüstriyel dönüşümden bahsedilmektedir [2]. İnternete her yerden erişilebilmenin, büyük miktarda veri depolayıp, işleyebilecek donanımların üretilmesinin ve mikroçiplerin neredeyse her şeye entegre edilebilecek kadar ucuz ve küçük üretilebiliyor olması ile ortaya çıkan ve iş yapma yöntemlerimizi, yaşam tarzlarımızı yeniden şekillendirecek yeni bir sanayi devrimine (Endüstri 4.0) tanıklık edilmektedir.

Dijitalleşme ile hayatın her alanında etkisini göstermeye başlayan Endüstri 4.0 devrimi birçok uygulama ve araştırma alanından oluşmaktadır. Sıkça duyulan nesnelerin interneti, bulut bilişim, büyük veri, siber güvenlik, katmanlı imalat, vb. araştırma alanları Endüstri 4.0 devrimi mümkün kılmaktadırlar. Geleceğin önemli teknolojileri arasında olacağı vurgulanan Artırılmış Gerçeklik veya bir diğer adıyla Zenginleştirilmiş Gerçeklik (ZG) teknolojileri de Endüstri 4.0'ın bir bileşeni konumundadır [2]. AG teknolojisinin, verilerin görselleştirilmesi amacıyla kullanılması ve özellikle gerçek dünya algısını zenginleştirerek insanlara çok daha gelişmiş bir gerçeklik deneyimi sunması [3] nedeniyle, yakın geleceğin önemli teknolojilerden birisi olacaktır.

Ancak her yeni teknoloji çözülmesi gereken birtakım sorunları da beraberinde getirmektedir. Farklı teknolojiler üzerinde geliştirilecek AG uygulamalarının insanlarla nasıl etkileşime geçeceği, özellikle uygulama arayüzlerinin insanların

kullanımına uygun hale getirilmesi, AG konusunda çözülmesi gereken başlıca problemlerden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Neyse ki insanlarla bilgisayarlar arasındaki ilişkinin ve bilgisayarların insanlar tarafından nasıl daha kolay, daha etkileşimli ve daha pratik bir şekilde kullanılabileceğin araştırıldığı İBE disiplini [4] bu notada yardıma yetişmektedir. Bu tez kapsamında yapılan literatür taramaları ile AG çalışmalarının 2000'li yıllardan itibaren ivme kazandığı, ancak geliştirilen AG uygulamalarından çok azının İBE perspektifinden değerlendirildiği görülmüştür. Ayrıca akıllı gözlükler üzerinde geliştirilecek AG uygulamalarının değerlendirilebilmesi için önerilmiş kapsamlı bir sezgisel kriterler listesinin literatürde eksik olduğu tespit edilmiştir.

AG uygulamalarının tasarımında kullanılabilecek sezgisel değerlendirme kriterlerinin tespit edilmesi ve literatüre kazandırılması tez çalışmasının amaçlarından birisi olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda İBE literatürü incelenmiş ve ayrıca AG çalışmalarında ortaya çıkan kısıtlardan ve problemlerden yararlanılarak AG uygulamaları için sezgisel değerlendirme kriterleri önerilmiştir. Akabinde çalışma kapsamında geliştirilen AG uygulama prototipi, uzmanlar tarafından önerilen sezgisel kriterlerle değerlendirilmiş ve tespit edilen eksikliklerin giderilerek uygulama iyileştirilmiştir. Akabinde geliştirilen uygulama, kullanıcılar tarafından test edilmiştir. Kullanıcı testleri sonrasında sezgisel değerlendirme kriterleri güncellenerek son hali verilmiştir.

Çalışmanın bir diğer amacı ise; özellikle sanayide tamir, montaj, bakım, kontrol vb. amaçlarla kullanılabilecek AG uygulamalarının, ne ölçüde etkili ve faydalı olduğunun araştırılmasıdır. Çünkü AG, diğer tüm Endüstri 4.0 alanları içerisinde üretilen verilerin ve bilgilerin eş zamanlı olarak kullanıcılara sunulmasını mümkün kılmaktadır. Böylece, bir iş emrine veya talimatlara göre çalışan insanlar talimatları bir yerden okumak zorunda kalmayacakları gibi anlık değişen talimatlara da hemen tepki gösterebileceklerdir. Ayrıca AG, sürekli tekrarlanan işlerde veya karmaşık bakım operasyonlarında hatalı işlemleri neredeyse "hiç" seviyesine düşürme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle çalışmada akıllı gözlükler üzerinde çalışan bir AG uygulaması geliştirilmiş ve yazılım hem deneyimli hem de deneyimsiz farklı deney grupları ile test edilmiştir. Kullanıcı deneyleri ile katılımcıların performansları kayıt altına alınmış ve AG'nin bakım süreçlerine etkisi istatiksel olarak da test edilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, kullanılan kavramlar açıklanmış, çalışmanın amaçları, motivasyonu, kapsamı ve hipotezlerine yer verilmiştir. İkinci bölümde, AG konusunda detaylı bilgilere yer verilmiş, AG'nin gelişimi, teknolojik detayları, geliştirme platformları, uygulama alanları anlatılmıştır. Ayrıca endüstride kullanılan AG uygulamalarından bahsedilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise İBE'nin geçmişten günümüze kadar olan gelişimine, kullanılabilirlik değerlendirme yöntemlerine ve AG uygulamaları üzerine yapılan İBE çalışmalarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde çalışmanın amaçlarına ulaşmak için geliştirilecek uygulamadan, pilot çalışmada kullanılacak materyallerden, metotlardan ve yöntemlerden bahsedilmiştir. AG uygulamasının tasarım aşaması ve kullanılan yazılım geliştirme ortamları anlatılmış; kullanıcı deneylerinin gerçekleştirilme süreci ve verilerin elde edilme ve analiz süreci açıklanmıştır. Beşinci bölümde yapılan deneyler ve araştırmalar sonucunda elde edilen bulgular paylaşılmış; deneye katılan kullanıcıların deney performanslarına ve elde edilen kullanılabilirlik problemlerine detaylı olarak yer verilmiştir. Ayrıca AG uygulamalarının endüstride kullanılmasıyla ortaya çıkan etkiler sunulmuştur. Son bölümde ise tez çalışmasından elde edilen sonuçlara yer verilmiş ve gelecek çalışmalara yön vereceği düşünülen öneriler belirtilmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. İlgili Kavramlar

Her yeni teknoloji ile birlikte hayatımıza yeni kavramlar girmektedir ve söz konusu teknoloji anlamak ve anlatabilmek için bu kavramların net olarak anlaşılması oldukça önemlidir. Bu nedenle, teknolojik gelişmelerle birlikte ortaya çıkan ve bu çalışmada sıklıkla kullanılacak olan Endüstri 4.0, Sanayi 4.0, Dijitalleşme, Artırılmış Gerçeklik, Sanal Gerçeklik, Artırılmış Sanallık, vb. kavramlar bu başlık altında irdelenmiştir.

1.1.1. Dijitalleşme ve endüstri 4.0

Dijitalleşme kavramını ele alırken sayısallaştırma kavramı ile bazen karıştırılabildiğini vurgulamak gerekmektedir. İngilizce dilinde bu iki kavram (digitization & digitalization) bazen benzer anlamda kullanılsa da farklı kavramlardır. Dijitalleşme süreci tanımlanırken akıllarda her şeyin dijital ortama aktarılması, sanallaştırılması gibi bir düşünce oluşabilmektedir. Ancak her şeyi dijital ortama aktarmak yani sayısallaştırmak mümkün değildir. Zira sayısallaştırmak kavramı fiziksel bir kopyası olan fotoğraf, kitap, eşya, vb. nesneleri 0 ve 1 'lerle ifade ederek bilgisayarlara yani dijital ortama aktarmaktır [5]. Sayısallaştırma sonucunda dijital resimler, e-kitaplar, 3D modeller ortaya çıkar. Dijitalleşme kavramı ise, bireyler için günlük hayat içerisinde bilişim teknolojilerinin daha fazla kullanılması iken; işletmeler için dijital teknolojileri ve sayısallaştırılmış verileri kullanarak işletmelerde gerçekleşen operasyonları, iş modellerini, iş süreçlerini yüksek bir fayda sağlayacak şekilde iyileştirmek ve/veya daha etkili olacak şekilde dönüştürmek anlamına gelmektedir [5].

Endüstri 4.0 bir diğer adıyla dördüncü sanayi devrimi, endüstriyel üretim sistemlerine siber-fiziksel sistem uygulamalarının entegre edilmesidir [6, 7]. Endüstri 4.0 kavramı ilk olarak 2011 yılında Almanya'nın Hannover şehrinde düzenlenen dünyanın en büyük endüstri fuarında kullanılmıştır. Amerika'da ise benzer fikirler General Electric firması tarafından "Endüstriyel İnternet" kavramı çerçevesinde dile getirilmiştir [8]. Aslında hepsi endüstrinin dijitalleşmesini işaret ediyor olsa da Endüstri 4.0, "Dijital dönüşüm", "Sanayi 4.0", "Dijitalleşme", vb. kavramlarla da ifade edilebilmektedir.

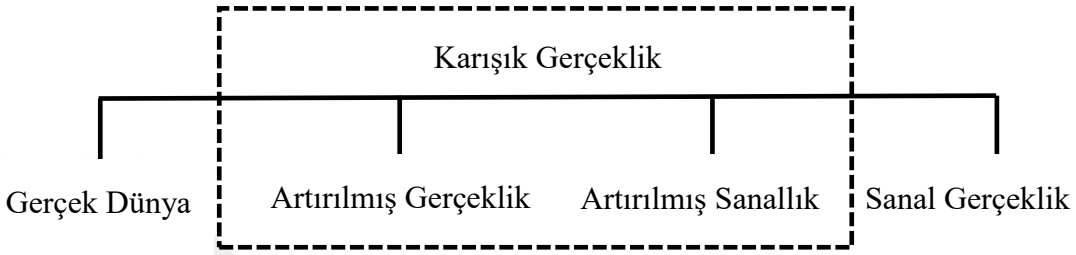
1.1.2. Artırılmış gerçeklik, artırılmış sanallık ve sanal gerçeklik

Mobil ve giyilebilir teknoloji alanlarındaki gelişmeler sayesinde önem kazanan konulardan birisi de Arttırılmış Gerçekliktir. AG, sanal nesneleri gerçek dünya ile birleştiren bir teknoloji setini tanımlamak için kullanılmaktadır. Artırılmış gerçekliğin mevcut dünyası, bilgisayar tarafından üretilen dijital olarak zenginleştirilmiş grafiklerle ilgilidir. Azuma'nın tanımına göre AG, gerçek dünyayı sanal dünyayla birleştiren, etkileşimli, gerçek zamanlı ve üç boyutta sunulan genişletilmiş bir gerçeklik uygulamasıdır [3]. Ayrıca AG, gördüklerimizden daha fazlasını görmeyi, duyduklarımızdan daha fazlasını duymayı ve hatta dokunarak hissettiklerimizden, aldığımız kokulardan daha fazlasını algılamamızı mümkün kılan yeni ve gelişmekte olan bir teknoloji olarak ifade edilmiştir [9]. Bu tanıma göre AG kapsamı daha geniş tutulmuş ve görme duyusu dışında tüm duyuların gerçek dünya algısına yapılacak eklemeler gerçekliğin artırılması olarak değerlendirilmiştir.

AG'nin tanımları irdelendiğinde üç önemli husus ön plana çıkar. İlki sanal nesnelerin gerçek hayata entegrasyonudur. AG tabanlı sistemlerin asıl amacı, sanal öğeleri gerçek dünyadaki çevreye olabildiğince kesintisiz olarak yerleştirmektir. Normal olarak, fiziksel çevrenin sabit analizini ve dijital varlığın gerçek zamanda yeniden yaratılmasını içeren bir süreç olarak karşımıza çıkar. İkincisi ise kullanıcının sistemi nasıl algıladığıdır. İsimde geçen "gerçeklik" (reality) kelimesi, bir AR deneyimini başarıyla sürdürmek için fiziksel ortamının değiştirilmesinin gerektiğini söylemez. Gerçekliği arttırmak için değiştirmeye gerek yoktur. Sadece kullanıcının gerçekliği nasıl algıladığı üzerinde çalışılmaktadır. Üçüncüsü ise kullanılan donanımdır. Gerçeklik algısını bir şekilde değiştirmek için birçok yol bulunsa da modern bilgisayar sistemlerinin kullanımı, kullanılabilirlik, taşınabilirlik ve güvenilirlik anlamında önemli avantajlar sağlayacaktır.

Bazen AG uygulamaları, Sanal Gerçeklik (SG) uygulamaları ile karıştırılıyor olsa da AG uygulamalarında gerçek dünya görüntüsü üzerinde bir miktar sanal nesnelere yer verilmektedir. Halbuki sanal gerçeklik uygulamalarında gerçek dünya sanal ortama taşınmaktadır. SG uygulamalarında kullanıcılar, gerçek dünyanın bilgisayar ortamında tasarlanmış, dijital bir kopyası ile etkileşime geçerken; AG uygulamalarında gerçek dünya ile birlikte sanal öğeler aynı anda kullanıcıya sunulmaktadır. Şekil 1'de de

görüleceği üzere AG, SG ile gerçek dünyanın arasında bir bölgede konumlandırılmıştır [10]. Artırılmış Sanallık ise teknolojik cihazlarda görüntülenebilen sanal ortamların gerçek dünya nesneleri ile zenginleştirilmesidir. AG'de gerçek dünya görüntüsüne sanal nesneler eklenirken, Artırılmış sanallıkta sanal dünya tasarımlarına kullanıcı deneyimini zenginleştirmek maksadıyla gerçek nesneler eklenmektedir. Sanal ve gerçek dünyaların karıştığı bu teknolojiler genel olarak Karışık Gerçeklik (KG) olarak anılmaktadırlar [10].



Şekil 1.1. Milgram'ın gerçeklik-sanallık doğrusu [10]

1.1.3. İnsan-bilgisayar etkileşimi, kullanılabilirlik ve kullanıcı arayüzü

İnsan-Bilgisayar Etkileşimi, genel olarak insanlar ile bilgisayar sistemleri arasındaki etkileşimi incelemeye ve geliştirmeye odaklanan bir araştırma alanı olarak tanımlanmaktadır. ACM SIGCHI'nin (Association for Computing Machinery Special Interest Group on Computer-Human Interaction) tanımına göre İBE, insan kullanımına yönelik bilgisayar sistemlerinin tasarımı, değerlendirilmesi ve uygulanması ve onları çevreleyen başlıca olayların incelenmesi ile ilgili bir disiplindir [4]. İBE disiplininde sıklıkla geçen "kullanılabilirlik" kavramı ise Uluslararası Standartlar Enstitüsü (ISO) tarafından kullanıcıların geliştirilen yazılımlar ile etkili, verimli ve memnuniyet içerisinde etkileşime geçmeleri olarak tanımlanmıştır [11].

Geliştirilen kullanıcı arayüzlerin kullanılabilir olması için, tasarımın yapıldığı yazılımın tüm boyutlarıyla anlaşılması gereklidir. Kullanıcı arayüzü ise, kullanıcıların yazılımla etkileşime geçmek için kullandıkları kontrol panellerinin ve sistem çıktılarını aktaran görselleştirme araçlarının tamamıdır. Kullanıcı arayüzleri, tasarımlarla etkileşime girildiği erişim noktalarıdır. Sesli komutlar kullanılarak kontrol edilen arayüzler sözlü etkileşimi içerirken, el ve vücut hareketleriyle kontrol edilen arayüzler, hareketli ve üç boyutlu etkileşimleri içerebilmektedirler [12].

1.2. Çalışmanın Motivasyonu

Artırılmış gerçeklik teknolojisi sayesinde kullanıcılar, oluşturulan dijital görüntüleri ve nesneleri gerçek dünyanın bir parçası gibi algılamakta ve böylece gerçek dünya algısı zenginleştirilmektedir. Ancak cep telefonu ve tablet bilgisayarlar yaklaşık olarak on yıldır hayatımızda olmalarına rağmen temelleri 1960'larda atılan ve 2000'li yıllarda yapılan çalışmalarda farklı alanlara uygulanmaya başlanan AG yeterince yaygın hale gelememiştir. Elbette teknolojik kısıtların AG'nin gelişimine çok büyük oranda etkisi bulunmaktadır. Zira AG uygulamalarını çalıştıran sistemlerde öncelikle gerçek dünya görüntüsünün alınarak işlenmesi, yerleştirilecek dijital şekil ve nesnelerin nerede ne zaman görülebileceğinin tayin edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bazen kameraların çözünürlüklerinin yetersiz kalması gibi teknik, bazen de uygulamayı çalıştıracak donanımların taşınmasının zor olması gibi fiziksel engeller AG çalışmalarına gösterilen ilgiyi kısıtlamıştır.

Öte yandan son birkaç yıl içerisinde AG uygulamalarına daha fazla taşınabilirlik kazandıracak yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Mobil cihazların gözlükler üzerine entegre edilmesiyle akıllı gözlükler adını verdiğimiz teknolojik cihazlar üretilmiştir. Akıllı gözlükler, üzerlerinde jiroskop, ivme ölçer gibi birçok sensöre sahip oldukları gibi kablosuz bağlantı (wifi, bluetooth) ve GPS modüllerine de sahiptir. Kamera çözünürlüklerinin de yükselmesi ile gerçek dünyayı eş zamanlı olarak algılayarak dijital grafikleri üzerine entegre edebilecek, mükemmel bir AG uygulama donanımı olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Söz konusu avantajları nedeniyle akıllı gözlükler tasarımcıların, uygulama geliştiricilerinin ve hatta endüstriyel kuruluşların dikkatini çekmektedir. Ancak akıllı gözlükler halen gelişmektedir ve son kullanıcılar için dizayn edilmiş ürünler henüz piyasaya sürülmemiştir.

AG, uygulama geliştiricilerinin insanlarla daha iyi etkileşim oluşturmak için kullanabilecekleri AG teknolojilerine özel geliştirilmiş tasarım kriterlerinin eksikliği, AG alanında yapılan çalışmalarda problem olarak karşımıza çıkabilmektedir. Ancak, her yeni teknoloji de olduğu gibi AG'de bir gelişme dönemindedir. Bu gelişme döneminde AG teknolojilerine katkı sağlamak adına akıllı gözlükler için geliştirilecek AG uygulamalarının tasarımında kullanılabilecek sezgisel değerlendirme kriterlerinin önerilmesi gerekliliği bu çalışmanın motivasyonlarından birisidir.

Ayrıca endüstri kuruluşlarının akıllı gözlüklerin yaygınlaşmaya başlaması ile birlikte AG teknolojilerine olan ilgileri artmıştır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde AG'nin endüstri uygulamalarına yer verilecektir. Endüstri kuruluşları, AG teknolojisini yapılan işleri kolaylaştıracak ve olumlu etkileyecek bir teknoloji olarak görmektedirler. Bu nedenle çalışmanın bir diğer motivasyonu da önerilecek olan sezgisel değerlendirme kriterleri kullanılarak endüstriyel bir AG uygulamasının geliştirilmesi ve bu uygulamanın işletmelerde verimlilik artışı üzerine etkilerinin belirlenmesidir.

1.3. Çalışmanın Amacı

Çalışmanın ilk amacı, her iki camı üzerinde görüntü oluşturma (binocularity) özelliğine sahip akıllı gözlükler üzerinde geliştirilecek Artırılmış Gerçeklik uygulamalarının tasarımında kullanılacak sezgisel değerlendirme kriterlerini belirlemektir. Sezgisel değerlendirme kriterlerinin belirlenmesinde literatürden yararlanılacak olup; ayrıca yapılacak kullanıcı deneyleriyle yeni sezgisel kriterlerin belirlenmesi de amaçlanmaktadır. Çalışma ile AG uygulama geliştiricilerinin kolaylıkla etkili kullanıcı arayüzleri oluşturması ve kullanıcıların kişisel durumlarına, tercihlerine uygun olarak arayüze kolay adaptasyonuna olanak tanıyan yeni bir etkileşim modeli ve sezgisel kriterler listesi oluşturulacaktır.

Çalışmanın bir diğer amacı doğrultusunda endüstri kuruluşlarında hayata geçirilen AG uygulamaları irdelenmiş olup akabinde geliştirilecek AG yazılımı kullanıcılar ile test edilmiştir. Geliştirilen uygulama ile endüstriyel AG uygulamalarının sağlayabileceği katkıların belirlenmesi, geliştirilen endüstriyel uygulamaların tasarımında dikkat edilmesi gereken hususların belirlenmesi amaçlanmıştır. AG teknolojisinin zaman, insan, kalite, vb. başlıklarda verimlilik artışı sağlayıp sağlamayacağının belirlenmesi; getireceği fırsatların belirlenmesi de çalışmanın amaçları arasında yer almaktadır.

1.4. Çalışmanın Soruları ve Hipotezleri

Çalışmanın motivasyonu ve ulaşılmak istenilen amaçlar doğrultusunda çalışma boyunca birtakım sorulara cevaplar aranmış ve bu cevaplar literatürde incelemeleriyle, uzman görüşleriyle, kullanıcılarla gerçekleştirilen deneylerle verilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sorularına aşağıda verilmiştir:

- AG teknolojisinin ulaştığı son nokta nedir? Gelişim süreci nasıl seyretmiştir?
- AG teknolojisinden ve uygulamaları hangi alanlarda kullanılmaktadır?
- Endüstriyel AG uygulama örnekleri nelerdir? Daha çok hangi sektör ve iş süreçlerinde AG kullanılmaktadır?
- Kullanılabilir AG uygulamaları tasarlayabilmek için yapılan çalışmalar nelerdir?
- Diğer AG teknolojilerinden farklı olarak doğrudan etkileşim sağlayan görüntüleme sistemleri üzerinde geliştirilen AG uygulamaları nelerdir?
- Akıllı gözlükler için geliştirilen AG uygulamaları kullanılabilirlik yönünden yeterli midir? İBE çalışmaları var mıdır? Varsa yeterli midir?
- Akıllı gözlükler üzerinde çalışacak endüstriyel AG uygulamaları tasarlarken nelere dikkat edilmelidir?
- Akıllı gözlükleri üzerinde çalışacak AG uygulamalarının endüstriyel kuruluşlara katkıları neler olabilir?

Endüstriyel AG uygulamaları ile ilgili çalışma sorularının cevaplanabilmesi için bilgisayar donanım bileşenlerinin montaj görevlerinden oluşan bir test ortamı ve aşağıdaki ifadeler çalışmanın hipotezleri olarak belirlenmiştir.

$H1_0$: Uzman yönlendirmesi ile donanım bileşenlerinin montajını gerçekleştiren deneyimsiz kullanıcılar ile AG gözlüğü (akıllı gözlük) kullanarak montaj görevlerini gerçekleştiren deneyimsiz kullanıcıların performansları arasında fark yoktur.

$H2_0$: Yardım almadan donanım bileşenlerinin montajını gerçekleştiren deneyimli kullanıcılar ile akıllı gözlük yardımıyla montaj görevlerini gerçekleştiren deneyimsiz kullanıcıların performansları arasında fark yoktur.

2. ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK

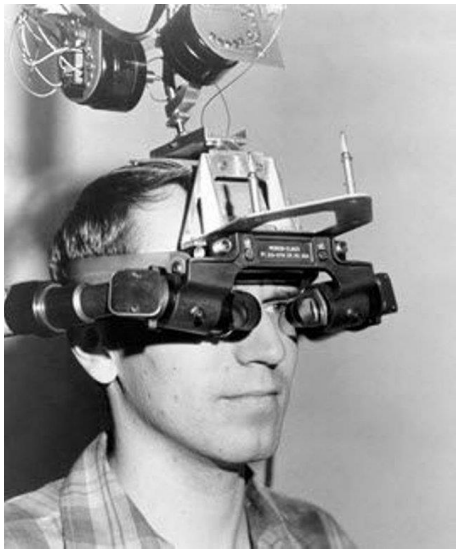
Son yıllarda yaygınlaşan AG kavramı, sanal ve gerçek nesneleri birleştiren geniş bir teknoloji setini tanımlamak için kullanılmış olsa da [3, 13] şimdilik evrensel olarak tüm araştırmacılar tarafından kabul edilmiş bir tanım yoktur. Her AG araştırması kendi içerisinde farklılaşması nedeniyle çalışmalarda farklı yaklaşımlar ve tanımlar ortaya çıkmaktadır [14]. Ancak, bu çalışmada AG'nin daha önce bahsedilen yaygın tanımı dikkate alınmış ve Şekil 1.2'de de verildiği üzere AG'nin Endüstri 4.0'ı mümkün kılan dokuz temel teknolojiden [1,2] birisi olması ön planda tutularak endüstriyel uygulamalarda AG teknolojinden üst düzey faydanın nasıl elde edileceğine dair için sorular sorulmuş ve cevaplar aranmıştır.



Şekil 2.1. Endüstri 4.0 devrimini mümkün kılan teknolojiler [2]

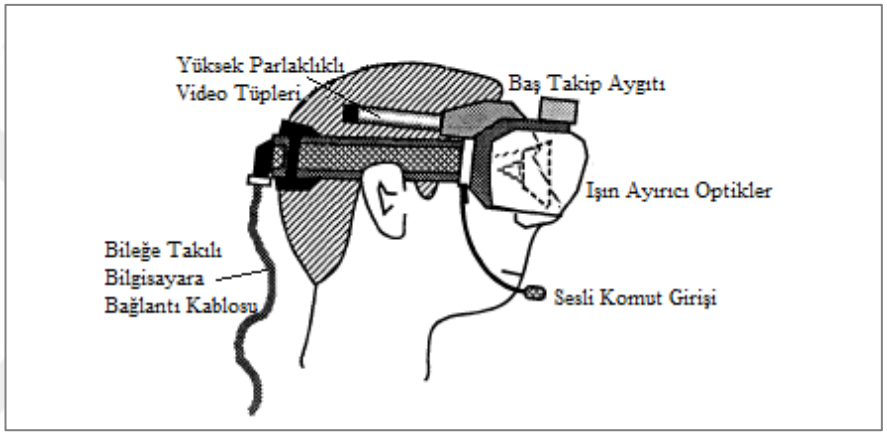
2.1. Geçmişten Günümüze Artırılmış Gerçekliğin Gelişimi

Her ne kadar son yıllarda bu alana yoğunlaşılmış olsa da teknolojiden yararlanarak duyularımızdan elde ettiğimiz algıları artırma fikri çok daha önceye dayanmaktadır. Tam olarak belirtilmese de AG fikrine "Muhteşem Oz Büyücüsü" kitabının da yazarı olan L. Frank Baum'un 1901 yılında yayınlanan "The Master Key" adlı romanında rastlanmaktadır [15]. Romanda tüm verilere erişim sağlayan, video görüntüsü oluşturabilen günümüz cep bilgisayarları benzeri bir cihaza sahip olan bir çocuğun elektriğin şeytanını kazara çağırması ve ortaya çıkan şeytanın karşılaştığı insanların asıl yüzünü tanıması için çocuğa "Karakter İşaretçisi" adını verdiği bir nesneyi vermesinden bahsedilmektedir. Bu karakter işaretçisini giydiği takdirde çocuğun karşılaştıkları insanların alnında kötü, iyi, bilge, aptal, nazik, zalim olup olmadıklarını belirten sadece kendisinin görebileceği harfler belirecek ve çocuk insanları daha doğru tanıyabilecektir. 1962 yılına geldiğimizde bir AG teknolojisi olmasa da bir Artırılmış Sanallık (AS) örneği olarak Heilig tarafından Sensorama adını verilen bir simülatör fikri patenti alınmıştır [16]. Heilig, sensorama ile filmlerde sunulan ses ve görüntüyle birlikte, titreşimi ve kokuyu aktararak filmlerde gösterilen sahneleri artırmayı düşünmüş ve cihazın tehlikeli görevlere dair eğitimlerde kullanılabilecek bir simülatör olacağını belirtmiştir. 1968 yılında gelindiğinde Ivan Sutherland, zamanın bilgisayarlarının kısıtlı işlem gücünden dolayı üç boyutlu basit tel kafes çizimleri gösterebilen bir cihaz (Şekil 2.2) geliştirmiştir [17]. Ağırlığı nedeniyle tavana sabitlenmesinden dolayı geliştirdiği cihaza "Demokles'in Kılıcı" adını vermiştir [18].



Şekil 2.2. Demokles'in Kılıcı [18]

1975 yılına gelindiğinde ise Myron Krueger, kullanıcıların hareketlerinin sanal ortama aktarıldığı ve kullanıcıların oluşan sanal görüntülerle etkileşim kurabildiği, bir yapay gerçeklik ortamı oluşturmuştur [18,19]. Arttırılmış gerçeklik kavramı ise, Boeing firması çalışanlarından Caudell & Mizell tarafından 1992 yılında literatüre dâhil edilmiştir. Çalışmalarında, fabrikalarda çalışan işçilerin kullandıkları koruyucu gözlüklerden esinlenerek gittikçe daha karmaşık hale gelen kablo demetlerinin montaj işlemlerinde kullanılmak; çalışanların verimliliğini, performansını ve yapılan işin kalitesini yükseltmek için başa takılabilir ekranı (HMD) (Şekil 2.3) tasarlamışlardır [18, 20].



Şekil 2.3. Caudel & Mizell tarafından geliştirilen AG teknolojisi [20]

1993 yılına gelindiğinde Feiner, MacIntyre ve Seligmann "Karma" adını verdikleri yazıcıların bakımları ile ilgili talimatları veren ilk bilgi odaklı AG uygulamasını geliştirdiler [18, 21]. Karma ile kullanıcılar başa takılan optik görme cihazı ile yazıcıların bakım ve tamir işlemleri için gerekli adımları sırası ile takip edebilmişlerdir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. KARMA AG sisteminin yazıcı tamir ve bakımında kullananımı [18]

AG çalışmalarının sayısı arttıkça geliştirilen sistemlerde kullanılan cihazların taşınabilir olmasının oldukça önemli olduğu fark edilmiş ve günümüzde giyilebilir teknoloji ürünlerinden olan akıllı gözlüklerin ilk prototipleri geliştirilmeye başlanmıştır. Taşınabilir AG cihazları ile yolumuzu bulmanın daha kolay olacağı, günlük hayat içerisinde önemli anların kayıt altına alınarak hatırlamaya ve öğrenmeye katkı sağlayacağı, görme zorluğu yaşayan engelli insanların yaşadıkları zorluklardan kurtulacağı ileri sürülmüştür [22]. 1997 yılında Feiner vd. GPS teknolojisini de içeren ve sırt çantasında taşınan bir bilgisayara bağlı başa takılabilen bir ekran kullanarak üniversite kampüsünün gerçek üç boyutlu görüntüsü ile çeşitli enformasyonu birleştirip kullanıcıya aktaran ilk mobil AG sistemini (MARS) önermişlerdir [23]. Bu çalışmadan sadece 2 yıl sonra ise MARS'ın daha gelişmiş bir versiyonu tanıtılmıştır [24]. İletişim için radyo modem kullanılmış ve geliştirilen sistem ile etkileşim el bilgisayarı ile gerçekleştirilmiştir. Ancak mobil bir AG sistemi olmasının yanında ağır sırt çantasının aşılması gereken bir engel olduğu da vurgulanmıştır. Yine 1997 yılında Ronald Azuma, bir çalışma alanı haline gelen AG literatürü tarayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. AG'yi gerçek ve sanal ortamı gerçek zamanlı, 3 boyutlu ve etkileşimli olarak bir araya getirme olarak ifade etmiş; yaygın bir şekilde kabul gören ve halen kullanılan AG tanımını ortaya koymuştur [3].

Bruce Thomas vd. 1998 yılında "Map-in-the-hat" (Şekil 2.5a) adını verdikleri, GPS, elektronik pusula ve başa takılı bir ekran içeren sırt çantası tabanlı giyilebilir bir AG sistemini tanıtmışlardır [25]. Sistem, eller serbest bir şekilde navigasyon ihtiyaçlarının giderilmesi amacıyla tasarlanmış; ancak daha sonra sistem geliştirilerek, farklı AG projeleri için kullanılan yeni bir AG platformu olan "Tinmith" geliştirilmiştir[1]. Tinmith (Şekil 2.5b) ile geliştirilen projelerden birisi Quake bilgisayar oyunun AG ile gerçek dünyaya taşınmasıdır. ARQuake, 6 serbestlik derecesine (6DOF) sahip birinci şahsın gözünden gerçek dünyanın görülebildiği bir uygulama olarak geliştirilmiştir. Sistemde, GPS, dijital pusula, sanal nesnelerin belireceği işaretçiler kullanılmış; sistem ile etkileşimler başa takılan ekranlar ve basit bir iki tuşlu giriş cihazı ile gerçekleştirilmiştir. ARQuake'de oyunlardan alışılagelmiş fare ve klavye kontrolleri yerini kullanıcının gerçek ortamda gerçekleştirdiği hareketlere bırakmış ve oyun iç veya dış mekanlarda oynanabilir hale gelmiştir [26]. 2006 yılına kadar Tinmith sistemi

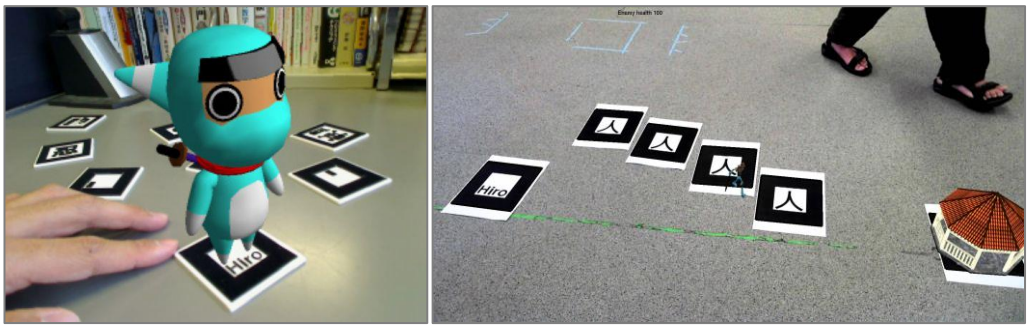
[1] http://www.tinmith.net/

geliştirilmeye devam edilmiş ve hareket kabiliyetinin artırılması için sırt çantasının boyutu düşürülmüştür. Geliştirilen sistem ile etkileşimli üç boyutlu modelleme çalışmaları yapılabilmesi için kablosuz eldivenler ve Tinmith sisteminin kullanıldığı araştırmalar ortaya konulmuştur [12].



Şekil 2.5. (a) Map-in-the-hat, (b) Tinmith AG sistemleri

Hirokazu Kato ve Mark Billinghurst, 6DOF uygulamaların geliştirilmesini kolaylaştırmak adına kare işaretçiler kütüphanesi oluşturmuş ve herkesin kullanımına açmıştır. ARToolkit olarak bilinen işaretçi kütüphanesi 1999 yılında duyuruluncaya kadar AG yazılımları sadece belirli laboratuvarlarda ve özel tasarımlar üzerinde geliştirilebilirken, bu tarihten sonra AG uygulamaları kartonlar üzerine basılmış işaretçiler yardımıyla web kameralar ve tümleşik kameralara sahip cihazlar ile de geliştirilmeye başlanmıştır. Ayrıca bu çalışma ile HMD cihazlarının kalibrasyonu ve oluşan sanal görüntülerin doğru konumlandırılması üzerine de çözümler geliştirilmiştir [27]. ARToolKit, işaretçi tabanlı takip yöntemlerinin ilk uygulamaları arasında yerini almakla birlikte günümüzde işaretçi tabanlı takip AG sistemlerinde halen kullanılmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. ARToolKit işaretçilerinin AG uygulamalarında kullanımına örnekler

Reitmayr ve Schmalstieg çok kullanıcılı mobil bir AR sistemi önermişlerdir [28]. Sistemde kablosuz ağlar, HMD cihazları ve aracılığıyla farklı kullanıcıların artırılmış bir ortamda birlikte çalışabilmeleri ve etkileşime geçebilmeleri amaçlanmıştır. Sanal nesnelerle etkileşim üzerlerinde işaretçiler olan kalemler ile gerçekleştirilmiştir. 2002 yılına gelindiğinde ARToolkit kullanılarak geliştirilen bir diğer uygulamada ise Kalkusch vd. bir bina içerisinde istenilen odaya ulaşılabilmesi için HMD ve duvarlara yapıştırılmış işaretçileri kullanan bir AG sistemi tasarlamışlardır. Bileğe bağlanan bir kontrol bilgisayarı ile sistem kontrol edilmiştir [29].

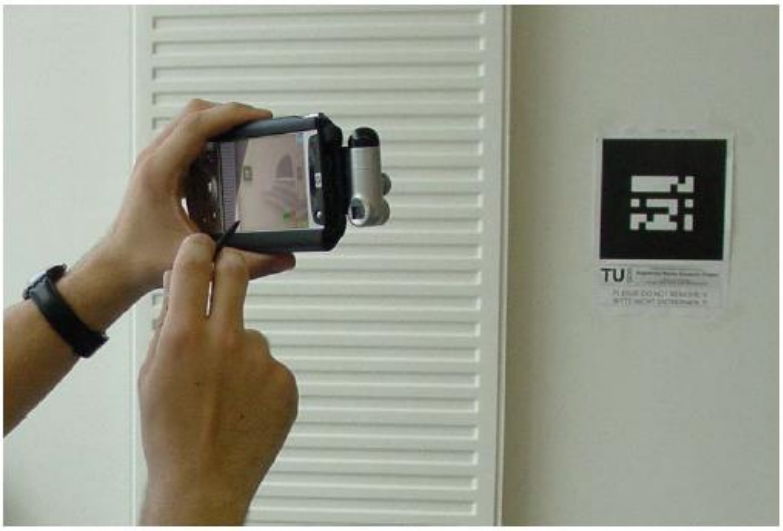
Geliştirilen AG sistemleri her zaman HMD üzerinde olmamıştır. 2003 yılında Mitsubishi Elektrik Araştırma laboratuvarı çalışanlarından Ramesh Raskar vd. iLamps adını verdikleri üzerinde tümleşik bir kamera bulunan ufak bir projeksiyon cihazı ile gerçek görüntüler üzerine sanal görüntüler yansıtan bir AG sistemi tasarlamışlardır (Şekil 2.7). Çalışmada etkileşim teknikleri ve birden fazla nesne arasındaki iletişimin nasıl sağlanabileceği de tartışılmıştır [30].



Şekil 2.7. Tanımlanmış bir yüzeyin projeksiyon sistemi ile zenginleştirilmesi [30]

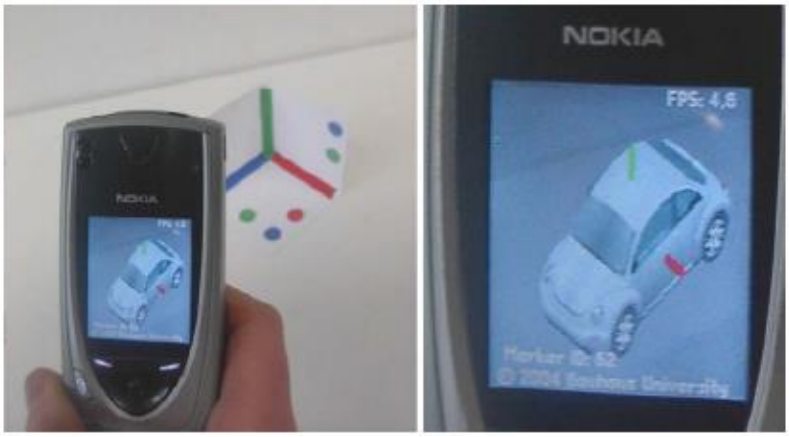
Wagner ve Schmalstieg 2003 yılında cep bilgisayarı (PDA) üzerinde çalışan bir taşınabilir bir AG rehber sistemi geliştirmişlerdir. Sistemde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanılan bir PDA dan yararlanılarak donanım ihtiyacı minimum a indirgenmiştir. Uygulama sayesinde kullanıcılar ufak bir PDA ve ARToolkit

işaretçileri ile doğrudan çevrelerini takip edebilmiş ve etkileşime geçebilmişlerdir [31]. Bu cihaz ilk el ile tutulabilen mobil bir cihaz üzerinde geliştirilen video-AG sistemlerine verilebilecek erken örneklerden birisidir (Şekil 2.8). Kalkusch vd.'nin geliştirdikleri navigasyon sistemi [29] bu çalışma ile birlikte sadece bir yıl sonra PDA kullanılmasıyla çok daha mobil ve kullanışlı bir hale getirilmiştir.



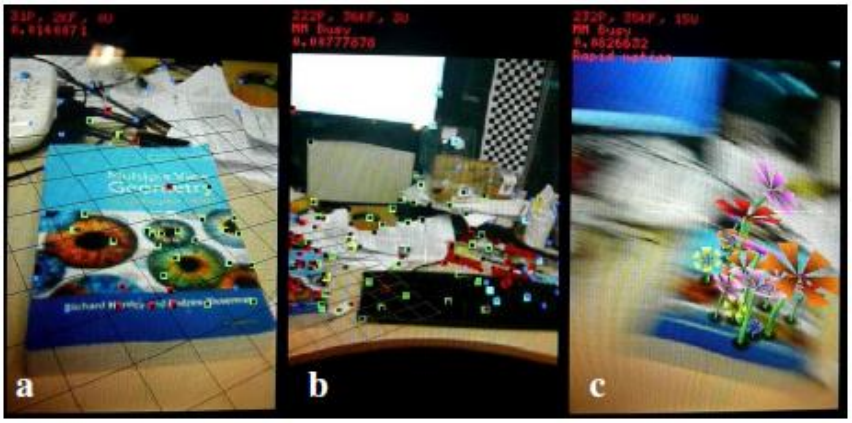
Şekil 2.8. PDA üzerinde geliştirilmiş mobil video-görme AG sistemi [31]

2004 yılına gelindiğinde ise Mohring vd. standart bir cep telefonu ile 3D işaretçiler kullanarak bir video-görme AG sistemi geliştirmişlerdir (Şekil 2.9). Sistem ile farklı işaretçilerin tanınması ve farklı içeriklerin doğru bir şekilde görüntüye eklenmesini sağlamıştır. Çalışma, AG araştırmalarının ticari cep telefonları üzerinde de yapılabileceğini göstermiş ve genele yayılmasına ön ayak olmuştur [32].



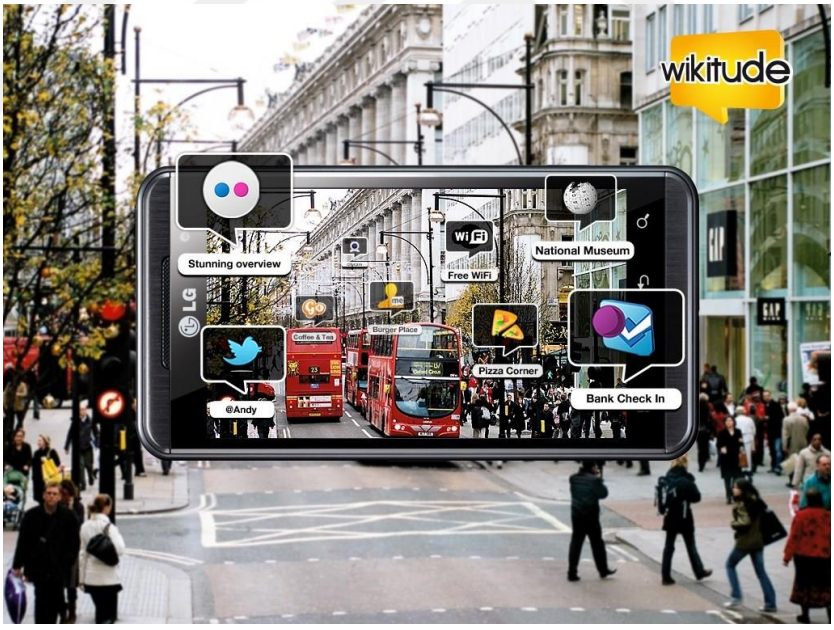
Şekil 2.9. Cep telefonu üzerinde geliştirilmiş mobil video-görme AG sistemi [32]

2007 yılına kadar ARToolkit ile birlikte özellikle mobil aygıtlarda işaretçi tabanlı AG sistemleri geliştirilmiştir. İşaretçiler üzerinde AG görüntülerinin oluşturulmak istenmesinin bir diğer nedeni de donanımların detaylı görüntü işleyecek güce sahip olmamasında kaynaklanmıştır. İşaretçiler özellikle hareket halinde AG görüntüsünün arzu edilen yerde kalmasını sağlamakta ve AG deneyimini daha stabil kılmaktadır. Teknoloji ürünlerinin artan işlem gücü ile birlikte 2007 yılında Klein ve Murray bir kamera aracılığıyla eş zamanlı konumlandırma ve haritalandırma (SLAM) yapmayı mümkün kılan çalışmalar yapmışlardır. Çalışmaları ilk AG SLAM uygulamaları arasında yer almaktadır [33]. Klein ve Murray ilk çalışmalarında sadece 2 yıl sonra iPhone 3D marka cep telefonu üzerinde SLAM yapabilen bir uygulama geliştirmeyi başarmışlardır. Çalışmada cep telefonlarının el ile tutulan AG sistemlerinin tasarlanması için fırsatlar yarattığı ve gelişen teknolojileri sayesinde takip yeteneklerinin de geliştiğinin altı çizilmiştir. İleride ortaya çıkacak daha yüksek işlem gücüne sahip cep telefonları ile daha hızlı ve tutarlı AG uygulamalarının tasarlanabileceği vurgulanmıştır [34]. Şekil 2.10'da uygulamanın çalışması gösterilmiştir. Öncelikle bir kitaba odaklanılmış ve kitabın yerleştiği düzlem (çalışma masası) SLAM ile başarılı bir şekilde tespit edilmiştir (a). Akabinde kamera açısı genişletilmiş ve tespit edilen düzlemin korunduğu görülmüştür (b). Son olarak kitabın üzerine çiçek görüntüsü eklenmiştir (c). Cep telefonlarının AG sistemlerinin tasarımında kullanılmaya başlanılmasında Apple firmasının 2007 yılında ilk çoklu dokunmatik ekrana sahip cep telefonlarını duyurmuş olmasının da payı büyüktür. Bu yeni ekran teknolojisinin yardımıyla AG sistemleri ile daha kolay etkileşim kurulabilmesi mümkün olmuştur.



Şekil 2.10. Paralel izleme ve haritalama sisteminin iPhone üzerinde çalışması [34]

Schmalstieg vd. 2008 yılında düzenlenen bir seminerde Artırılmış Gerçeklik 2.0 fikrini ortaya atmıştır. AG 2.0, Web 2.0 gibi kullanıcıların dijital içeriklerle etkileşime girebildiği, içerik ekleyebildiği ve sosyalleşebildiği bir artırılmış gerçeklik ortamı olarak düşünülmüştür. Böylece AG 2.0 ile kullanıcılar tarafından oluşturulan içeriğe dayanan, iş birliğini ve iletişimi önceleyen mobil bir AG deneyimi sağlanması amaçlanmıştır. AG 2.0 il kullanıcı istediği bilgi katmanlarını görebilmeli ve kendi içeriklerini de sisteme ekleyebilmelidir [35]. AG 2.0 fikri üzerinden çok çekmeden Wikitude aynı yıl içerisinde GPS ile birleştirilmiş, harita verilerini ve Wikitude platformuna girilen bilgileri bileştiren bir AG uygulaması geliştirmiştir. Wikitude AG uygulaması sayesinde Android işletim sistemli bir cep telefonu kamerasının gördüğü çevre hakkında kullanıcılara farklı katmanlarda bilgi eş zamanlı olarak sunulmuştur ve söz konusu bu bilgiler Wikitude platformuna farklı kullanıcılar tarafından yüklenmektedir (Şekil 2.11). Wikitude en çok bilinen ve ilk mekânsal artırılmış gerçeklik uygulamalarından birisidir [36].



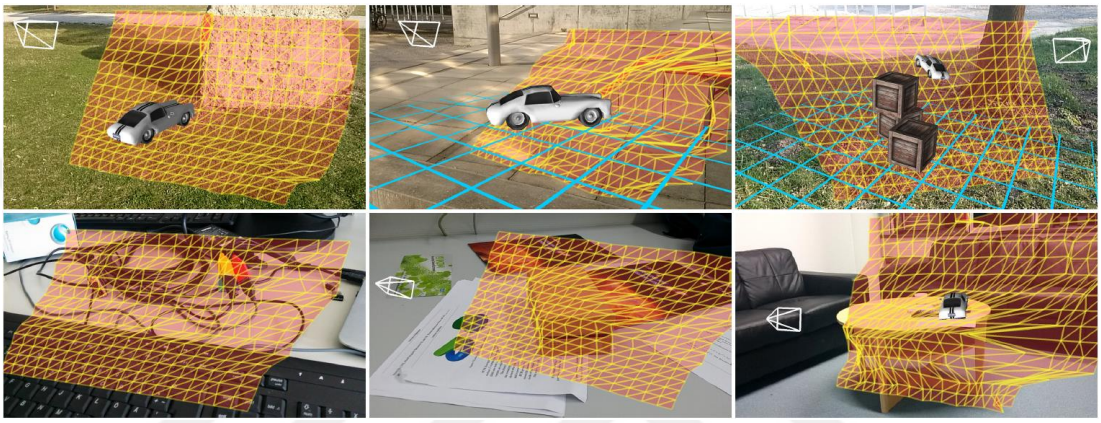
Şekil 2.11. Wikitude tarafından geliştirilen mekânsal AG uygulaması [36]

Bir yıl sonra Wikitude uygulamasının geliştirilmiş bir versiyonu olan Layar tanıtılmıştır. Layar, GPS ve pusula verilerinin farklı içerik katmanları ile birleştirildiği bir istemci-sunucu platformu şeklindedir. İçerik katmanları internet sayfaları gibi tasarlanmıştır ve her katmanda otobüs durakları, mağaza bilgileri, ürün bilgileri, doğa ve şehir rehberleri, vb. hizmetlere dair bilgiler sunulmaktadır [37].

2010 yılından itibaren AG donanımlarının ve AG geliştirme platformlarının sayısında ciddi bir artış gözlenmiştir. 2010 yılında Apple GPS, ivme ölçer, manyetometre, gelişmiş grafik yonga seti içeren gelişmiş özelliklere sahip tablet bilgisayarı iPad'i piyasaya sürmüştür ve bu sayede daha etkili AG uygulamalarının geliştirilmesinin önü de açılmıştır. 2011 yılında Qualcomm firması AG için QCAR adını verdikleri yazılım geliştirme ortamını (software development kit – SDK) duyurmuşlardır [38]. 2014 yılında Vuforia ismini alan SDK, 2015 yılında PTC firması tarafından satın alınmıştır [39]. Vuforia'dan sonra AG için geliştirilen SDK sayısı hızlı bir şekilde artmış olup, en çok kullanılan SDK'lar, Vuforia, Wikitude, Kudan, MaxST, EasyAR, Apple ARKit, ARToolKit, Google ARCore, Ar Lab, Pikkart AR şeklindedir. Ayrıca Apple'ın iPad tablet bilgisayarından sonra giyilebilir teknolojiler üzerine de çalışmalar yapılmış HMD cihazları olan akıllı gözlükler piyasaya sürülmüştür. 2012 yılında Google, Glass isimli gözlüğünü duyurmuş [40], akabinde birçok teknoloji şirketi akıllı gözlük projelerini ilerleyen birkaç yıl içerisinde paylaşmıştır. Günümüzde Microsoft firması Hololens, Epson firması Moverio, Vuzix firması M serisi, Meta firması Meta serisi, vs. akıllı gözlüklerini üretmişlerdir.

2010 yılından itibaren literatürde yapılan çalışmalarda ise yukarıda bahsedilen teknolojik gelişmelerin de etkisi ile SLAM teknolojisinin ve takip sistemlerinin geliştirildiği çalışmalar yapılmıştır. Li vd. eş zamanlı takip sistemlerinde kamera sensör teknoloji ile ilgili olan görüntülerdeki eğilme ve bozulma etkisini (rolling-shutter) azaltmak için çalışmalar yapmışlardır [41]. Sensörler ile kullanıcıların hareketlerinin takip edilerek bozulma etkilerinin düzeltildiği bu çalışma sayesinde dinamik ve eş-zamanlı görüntülerin kullanıldığı AG uygulamalarının daha etkili bir şekilde tasarlanabilmesinin önü açılmıştır. Tan vd. SLAM'a dinamik ortamlarda çalışan bir algoritma önererek, hareket eden nesnelere rağmen izlemeyi ve düzlemin tespiti bozmadan dinamik hale gelmesini sağlamışlardır. Daha önce yapılan PTAM [33,34] vb. çalışmalara göre dinamik ortamlar için önerdikleri algoritmanın çok daha başarılı olduğunu tespit etmişlerdir [42]. Newcombe vd. monoküler SLAM'a görüntülerin tamamının kullanıldığı ve yoğunluk ölçümüne dayalı olarak 3D yüzeylerin belirlendiği yeni bir yaklaşım (DTAM) getirmişler, çalışmalarını PTAM [32,34] ile aynı ortam şartlarında kıyaslayarak test etmişlerdir [43]. Salas-Moreno vd. ise DTAM'ın eksik noktalarını geliştirerek yeni sensörler ve çoklu görüntülü stereo

yeniden yapılandırma metodu yoluyla iyileştirmişlerdir [44]. 2018 yılında ise anahtar noktalar yerine doğrudan görüntü hizalama ve olasılığa bağlı yarı-yoğun derinlik haritaları kullanarak tutarlı bir küresel harita oluşturan Büyük Ölçekli Doğrudan Monoküler SLAM (large scale direct SLAM - LSD-SLAM) yöntemi geliştirilmiştir [45]. Aynı çalışma daha sonra ikili (stereo) kamera sistemlerine de uyarlanmıştır [46]. LSD-SLAM yönteminin mobil AG uygulamalarında daha iyi sonuçlar verdiğini gösteren çalışmalar bulunmaktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Farklı senaryolarda LSD-SLAM örnekleri ve tespit edilen düzlemler [47]

2.2. Artırılmış Gerçeklik Görüntüleme Aygıtları

Artırılmış Gerçeklik deneyiminin kullanıcılara sunulabilmesi için farklı donanımlar tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda tam bir kategorizasyon yapılmamış olsa da temel olarak AG sistemlerini 'görüntü oluşturma teknolojisine/donanımına' göre ve 'insan ile gerçek dünya arasındaki konumuna/tasarımına' göre iki farklı şekilde kategorize etmek mümkündür. Azuma AG cihazlarını kullanıcının gerçek dünyayı doğrudan görüntülediği optik görme ekranları (optical-see through display) ve kullanıcının gerçek dünyayı bir video görüntüsü üzerine eklenmiş şekilde gözlemlediği video görme ekranları (video-see through display) olarak ikiye ayırmıştır [3,48]. Ayrıca projeksiyon cihazları ile oluşturulan yansılar ile de projeksiyonlu doğrudan görme AG sistemleri de çalışılmakta ve geliştirilmektedir. Öte yandan insan ile gerçek dünya arasındaki konumuna göre başa giyilen/takılan, el ile tutulan ve mekânsal olarak AG sistemlerini sınıflandırmak mümkündür [3,49]. Başa giyilen AG teknolojileri bazı çalışmalarda retinal cihazlar ve gözlükler olarak iki alt gruba ayrılıyor olsa da prototipler haricinde

henüz tam olarak geliştirilmiş ve yaygınlaştırılmış bir retinal AG sistemi (lensler) bulunmamaktadır. Tablo 2.1'de literatürden yola çıkılarak AG sistemleri farklı kategorilere ayrılmış, aralarındaki kesişimler dikkate alınarak güncellenmiş ve daha anlaşılır bir biçimde sunulmuştur. Ayrıca her bir sistem bölüm boyunca alt başlıklara ayrılarak örneklerle anlatılmıştır. Tabloda kategorize edilen donanımların tamamı, gerçek ve sanal nesnelerin etkileşimli ve gerçek zamanlı olarak çalışılarak hizalanmasını [48] farklı yöntem ve teknolojilerle mümkün kılmaktadırlar.

Tablo 2.1. Donanımına ve konumuna göre Artırılmış Gerçeklik sistemleri [48-50]

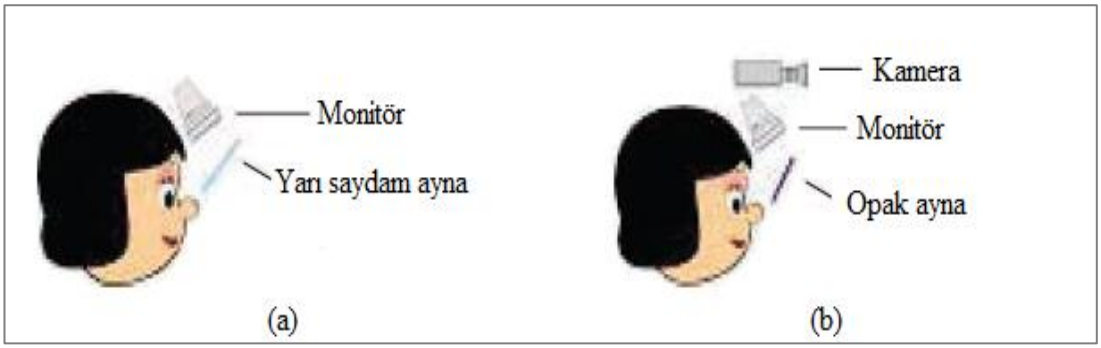
	Başa Giyilen AG Sistemleri	**El ile Tutulan AG Sistemleri**	**Mekânsal AG Sistemleri**
Optik-görme AG Sistemleri	Akıllı Gözlükler, Lensler *(Hololens, Epson BT300, Meta 2, Glass, vb.)*	*Günümüzde kullanılan bir örneği yoktur.*	Optik Hologramlar, Saydam Ekranlar *(WayRay Navion, Kokpit Ekranları,vb.)*
Video-görme AG Sistemleri	SG Gözlükleri *(HTC Vive Pro, vb.)*	Tablet Bilgisayarlar, Cep Telefonları, Cep Bilgisayarları	Mönitörler, Akıllı Aynalar *(FX Mirror)*
Projeksiyonlu doğrudan görme AG sistemleri	Başa Takılan Projektörler *(REFLCT)*	*Günümüzde kullanılan bir örneği yoktur.*	LED Projektörler, Hologram Projektörler *(Hypervsn)*

2.2.1. Başa giyilen AG sistemleri

Başa giyilen AG sistemleri (head worn display – HWD) AG çalışmalarında en çok kullanılan sistemler arasında yer almaktadırlar. Bu sistemlerde sanal görüntü gerçek dünyadan gelen görüntü ile farklı yaklaşımlarla birleştirilerek artırılmış görüntü oluşturulmaktadır. Bu kategori altında farklı teknolojiler üretilmiş olmakla birlikte bu teknolojiler çalışmalarda farklı şekillerde sınıflandırılmışlardır. Yaygın sınıflandırma retinal sistemler, başa takılan ekranlar (head mounted display – HMD) ve başa takılan projektörler (head mounted projective display – HMPD) şeklindedir. En yaygın kullanılan HMD ise sahip olduğu teknolojiye göre optik görme ekranları ve video görme ekranları olarak ikiye ayrılmaktadır. Ancak retinal sistemler olan lensler

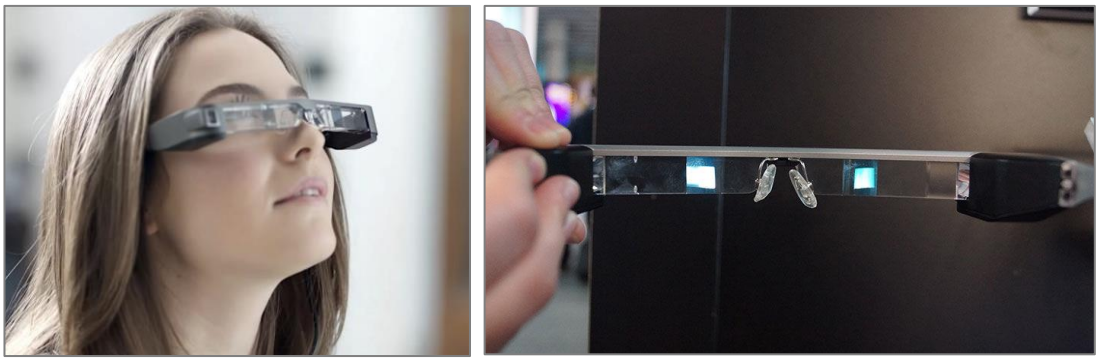
teknolojik olarak optik görme sistemleri arasındadır ve gözlükler gibi göze yakın konumlandırılmaktadırlar. HMPD sistemler ise göze yakın konumlandırılmak yerine bir kask veya başlık yardımıyla kafanın üstüne yerleştirilen sistemlerdir. Bu çalışmada literatürde ortaya çıkan sınıflandırma karışıklığını gidermek adına retinal sistemler, sahip oldukları teknolojiye dayanılarak optik görme sistemlerine dahil edilmiştir. Ayrıca başa giyilen ekranlar ve başa takılan ekranlar kategorileri birbirleri ile karıştırılabilmektedir. Bu nedenle konumuna göre sınıflandırma yapılırken aynı konum (baş bölgesi) için iki farklı kavramın kullanılmamalıdır. Çalışmanın bu kısmından sonra HWD ve HMD kavramları aynı anlamda kullanılmış olmakla birlikte baş bölgesine yerleştirilen tüm AG sistemlerini kapsamaktadırlar.

HMD sistemlerini sanal ve gerçek görüntülerin birleşme yeri ve birleşme şekline göre farklılaşmaktadırlar. Optik görme sistemlerinde artırılmış görüntü, sanal nesnelerin gerçek dünya görüntüsünün üzerine gözün hemen önüne konumlandırılmış yarı saydam bir ekrana yansıtılmasıyla elde edilmektedir. Öte yandan video görme sistemlerinde ise gerçek dünya görüntüsü kamera ile sürekli kayıt edilmekte ve kaydedilen görüntüler üzerine sanal nesneler eklenerek artırılmış bir video oluşturulmaktadır. Elde edilen yeni video sistemin ekranı ile aktarılmaktadır. Şekil 2.13'de literatürden alınan optik görme ve video görme sistemlerine dair bir çizim verilmiştir. Yapılan birçok çalışmada ufak farklılıklar olmakla birlikte aşağıdaki çizime benzer AG sistemleri tasarlanmış ve geliştirilmiştir [19-29].



Şekil 2.13. (a) optik görme AG sistemi ve (b) video görme AG sistemi tasviri

Ancak gelişen teknoloji ile birlikte Şekil 2.13 günümüzde geçerliliğini yitirmiştir. Zira hem optik görme (Şekil 2.14) hem de video görme (Şekil 2.15) sistemlerinde monitör ve kameralar başın üzerinden kaldırılıp gözlüklerin içerisine aktarılmışlardır.



Şekil 2.14. Epson Moverio BT-300 artırılmış gerçeklik gözlüğü

AG gözlüklerinde görüntü gözlük camlarının hemen yanlarında bulunan kameralar ile alınmakta ve işlenip yan taraflara konumlandırılmış projeksiyon sistemleri ile gözlük camının içerisinde yer alan ekrana yansıtılmaktadır. Hatta bazı AG gözlüklerinin camları opak bir kapak ile kapatılarak sanal gerçeklik gözlüğü haline dönüştürülebilmektedirler. Ancak, AG için tasarlanan gözlükler hem optik görme hem de video görmenin yapılmasının mümkün olduğu bir teknolojiye sahip olsa da görüş alanı (field of view – FOV) SG için tasarlanmış gözlükler kadar kaliteli bir SG deneyimi sunması henüz mümkün değildir.



Şekil 2.15. HTC Vive Pro sanal gerçeklik (SG) gözlüğü

HTC Vive Pro ise günümüzde daha çok tamamen sanal dünyalar olan sanal gerçeklik uygulamaları için geliştirilmiştir. Ancak bu gözlükler saydam bir cama sahip olmamalarına rağmen video görme AG sistemi olarak kullanılabilmektedirler. AG gözlüklerinden en büyük farkı sanal nesnelerle birlikte gerçek dünya görüntüsünün tamamının da ekran aracılığıyla kullanıcıya sunuluyor olmasıdır. Bu durum hem daha yüksek işlem gücü gerektirdiği gibi hem de görüş alanını kısıtlayarak gerçek dünya deneyiminin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, HTC Vive Pro AG uygulamalarının kullanılabileceği nadir cihazlardan birisi olarak karşımıza

çıkmaktadır. Birçok SG gözlüğünde tek kamera sistemi olması AG deneyimini kısıtlarken; Vive Pro'nun iki kameraya sahip olması nedeniyle gerçek dünya üzerine eklenecek sanal nesnelerin daha tutarlı yerleştirilmesi mümkündür.

Projeksiyonlu doğrudan görme sistemlerinde ise kullanıcılarla gerçek dünya arasında herhangi bir ekran/monitör kullanılmamakta, sanal nesne görüntüleri gerçek dünya nesneleri üzerine, başın üstüne gözler ile hizalanarak konumlandırılmış bir projeksiyon sistemi ile yansıtılmaktadır. Örnek olarak Şekil 2.16'da güney Kalifornia Üniversitesi tarafından 2011 yılından itibaren geliştirilmekte olan REFLCT projesinden resimlere yer verilmiştir [51]. Şekilde de görüleceği üzere başlıkların üzerine yerleştirilmiş bir projeksiyon sistemi ile gerçek dünyada sanal insanlar oluşturulmaktadır. Proje 'dünyanın sanal insanlarla paylaşılabilmesi' üzerine kurgulanmış olup özellikle fiziksel olarak kondisyon ve eğitim gerektiren (asker, polis, vb.) mesleklerde kullanılması düşünülmektedir.



Şekil 2.16. REFLCT başa takılan projeksiyonlu doğrudan görme sistemi [51]

Özetle, AG (optik-görme) ve SG (video-görme) gözlüklerinin en temel farkları gerçek dünya görüntüsünün kullanıcıya ulaştırılma şeklidir. Optik-görme sistemlerinde gerçek dünya görüntüsü işlenmediğinden en net ve doğal haliyle, yüksek çözünürlükte kullanıcılara ulaşmaktadır. Zaten AG uygulamalarının da amacı budur. Gerçek dünya görüntülerinin işlenip sanal nesne ile birleştirilmesi gerekmediğinden optik-görme sistemlerinde gecikme yaşanmamaktadır. Öte yandan optik-görme sistemleri video-görme sistemlerine göre dış etkenlerden daha fazla etkilenebilmektedirler. Örneğin güneş ışığı, lamba gibi ortam ışıklarının yoğun olduğu durumlarda sanal nesnelerin görülmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca, sanal nesneleri gerçek dünya ile birleştirmek hassas bir konudur ve kullanılan donanımların kişiye özel ayarlanabilmesi gerekmektedir.

Kullanıcıların farklı göz boyutları, gözler arası mesafe farklılıkları gibi birçok ergonomik faktörden ötürü aynı AG gözlüğü kişiye özel ayarlanamadığı sürece her kullanıcı için aynı sonuçları vermemektedir. HMPD sistemleri ise görüntüleri birleştiren ara bir süreç olmaması nedeniyle gecikmelerin sıfıra yakın olduğu ve ekran veya yarı saydam camlar gibi aracı nesnelerin kullanılmadığı sistemlerdir. Sadece bir projeksiyon cihazının yeterli olması nedeniyle hafif tasarlanma potansiyeline sahiptirler ve az enerji tüketirler. Öte yandan uygulama alanları kısıtlıdır ve optik görme AG sistemlerinde olduğu gibi dış ortam ışığı sistemi etkilemektedir.

2.2.2. El ile tutulan AG sistemleri

El ile tutulan AG sistemleri (hand-held display – HHD) denilince akla ilk gelen tablet bilgisayarlar ve cep telefonları ve cep bilgisayarları olmaktadır. Özellikle son on yılda gelişimi hız kazanan, ivme ölçer, jiroskop, manyetometre, pusula gibi sensörlere ve kamera, GPS, kablosuz alıcılar gibi modüllere sahip teknolojiler, AG uygulamalarının geliştirilebilmesi için uygun bir ortam oluşturmaktadırlar. Literatürde de yapılan birçok AG çalışmasında el ile tutulan sistemlere rastlanmaktadır [31-32,34-35]. Bunun başlıca nedeni taşınabilecek kadar küçük olmaları ve kolayca temin edilebilmeleridir. Bu sistemler çok büyük bir çoğunlukla video görme imkânı sağlamaktadırlar. Şekil 2.17'de literatürde HHD teknolojileri ile geliştirilmiş AG uygulama örnekleri verilmiştir. Öte yandan el ile tutulan yarı saydam camların kullanıldığı optik görme veya projeksiyonlu doğrudan görme sistemleri pratik olarak neredeyse hiç kullanılmamaktadır. Mevcut olanlar ise bir sonraki başlık altında ele alınacak olan Mekânsal sistemlerin kısmen taşınabilir hale getirilmiş versiyonları olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Raskar vd. tarafından geliştirilen iLamps [30] sisteminde de mobil bir projeksiyon cihazı tasarlanmış olsa da aslında mekânsal AG sistemlerde kullanılan projeksiyon sisteminin taşınabilir hale getirilmiş halidir (Şekil 2.7).

HHD-AG sistemlerinin en büyük avantajı kolay erişilebilir olmalarında yatmaktadır. Ancak gerçek dünyayı deneyimlerken ellerin sürekli kullanılıyor olması HHD cihazların kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Ayrıca sürekli kamera ile gerçek dünyanın kayda alınması ve sanal görüntülerin eklenerek kullanıcıya sunulması yüksek enerji tüketimine sebep olurken, enerji ihtiyaçları ve ısınma gibi hem teknik hem de ergonomik nedenlerden dolayı kullanım süreleri kısıtlıdır.



Şekil 2.17. El ile tutulan (HHD) AG sistemleri ve farklı kullanım alanlarına örnekler

2.2.3. Mekânsal AG sistemleri

Mekânsal sistemler, (spatial augmented reality – SAR) insanlardan bağımsız olarak kurgulanmış ve tasarlanmış AG sistemleridir. Bu tür sistemlerde kullanıcılar AG görüntüsünü oluşturan teknolojilerle doğrudan temas etmezler. Kameralarla alınan görüntüler, bilgisayarlarda sanal nesnelerle birleştirilerek artırılmış görüntüler haline getirilmektedirler. Tablo 2.1'de de verildiği üzere optik-görme, video-görme ve projeksiyonlu doğrudan görme olarak üç farklı SAR türü bulunmaktadır. Video-görme mantığı ile bilgisayar monitörleri veya ekranlar üzerinde çalışan, eğitim, pazarlama, turizm, bakım-onarım, vb. birçok alanda farklı AG uygulamaları geliştirilmiştir [52-54]. Bu sistemlerde monitörün üzerine veya yakınına yerleştirilen kameralar aracılığı ile gerçek dünya görüntüsü alınarak sanal nesnelerle zenginleştirilmektedir. Ardından artırılmış görüntü monitör veya özel ekranlar aracılığı ile kullanıcılara sunulmaktadır. Fiorentino vd. bakım süreçlerinin etkinliğini değerlendiren, geniş bir ekran üzerinde çoklu kameralardan görüntülerin aktarıldığı video-görmeye dayalı etkileşimli bir AG sistemi sunmuşlardır [53]. Şekil 2.18(a)'da Lego firmasının ürünlerini henüz satın almadan önce tamamlanmış haliyle gösteren, video-görme prensibine göre çalışan AG

sistemi verilmiştir. AG Kioks sistemi olarak bilinen bu sistem sayesinde müşteriler almak istediği ürüne ait kutuyu cihazın kamerasına göstererek monitörde legoların bitmiş halini animasyonlarla desteklenmiş olarak görebilmektedirler. Şekil 2.18(b)'de ise FXGear firması tarafından geliştirilmiş olan müşterilerin denemek istedikleri kıyafetleri dijital olarak denemelerini mümkün kılan akıllı ayna sistemi verilmiştir.



Şekil 2.18. (a) Lego firması tarafından geliştirilen kiosk ve (b) akıllı ayna FXMirror

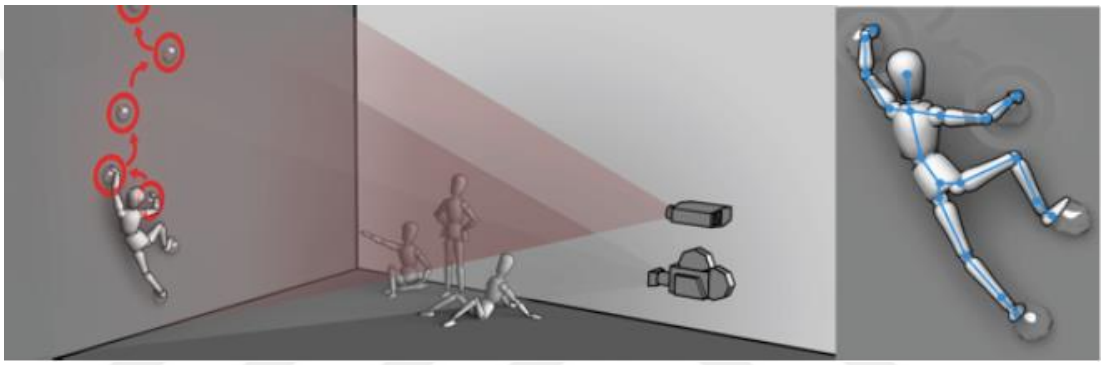
Mekânsal optik-görme sistemlerine ise uçakların kokpitlerinde bulunan head-up (HUD) göstergeler ve yine benzer şekilde araçların ön camlarına konumlandırılabilen navigasyon sistemleri verilebilir (Şekil 2.19a). Ayrıca hologramlar da mekânsal optik-görme sistemleri arasında yer almaktadırlar. WayRay firması optik bir ekran üzerinde hologramların oluşmasını sağlayan holografik bir navigasyon sistemi (Şekil 2.19b) geliştirmiştir [55]. AG hologramlar son yıllarda özellikle eğlence alanında ve uzaktan yapılan görüşmelerde kullanılmaktadırlar.



Şekil 2.19. (a) Uçak kokpitinde HUD, (b) WayRay Navion holografik AG navigasyon

Mekânsal AG sistemlerin son türü olan projeksiyonlu doğrudan görme sistemleri ilk geliştirilen AG sistemleri arasında yer almaktadırlar. Sadece bir projeksiyon cihazına ve kamera, ses, vb. ortam algılayıcılarına ihtiyaç duyulan bu sistemlerde sanal

görüntüler, sabit nesnelerin üzerine arada bir monitör veya yarı-saydam veya saydam bir ekran olmaksızın doğrudan yansıtılmaktadır. Ishii vd. masa tenisi oyunu için geliştirdikleri sistemde de masanın altına yerleştirilen mikrofonlar tarafında algılanan sesler bilgisayara aktarılmış ve topun masaya çarptığı yer tayin edilerek masanın üstünde konumlandırılmış bir projeksiyon cihazı ile işaretlenmiştir [56]. Benzer bir şekilde kaya tırmanışı için artırılmış tırmanma duvarı sistemi geliştirilmiştir. Sistemde bilgisayarlı görme ile interaktif olarak projeksiyon ile yansıtılmış grafikler birleştirilmiştir (Şekil 2.20). Çalışmanın amacı tırmanıcıları motive etmek ve daha doğru bir tırmanma rotası için çeşitli talimatlar vermek için geliştirilmiştir [57].



Şekil 2.20. Projeksiyon cihazı ve hareket takip sistemi ile artırılmış tırmanma duvarı

Yüksek teknoloji görsel çözümler üreten Kino-mo firması tarafından geliştirilen Hypervsn ise yeni bir tür projeksiyonlu doğrudan görme sistemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Hypervsn, üzeri led lambalarla donatılmış dört kanadının yüksek hızlarda dönmesi ve led lambaların belirli bir senkronizasyona göre çalışması ile havada asılı duran hologramlar oluşturmaktadır (Şekil 2.21). Hypervsn, mağazalarda, alışveriş merkezlerinde, vs. artırılmış reklamların sunulması için kullanılmaktadır [58].



Şekil 2.21. Hypervsn 3D holografik projeksiyon cihazı

SAR sistemlerinin en büyük avantajı yukarıda da bahsedildiği gibi kullanıcıların herhangi bir cihaz giymek veya taşımak zorunda kalmamasıdır. Mekânsal olarak oluşturulan AG görüntülerine herkes eş zamanlı olarak erişebilmektedir. Ayrıca HMD ve HHD sistemlerde kullanılan teknoloji ortaya çıkan görüş alanının dar ve kısıtlı olması problemi mekânsal sistemlerin videolu-görme sistemleri dışındaki türlerinde bulunmamaktadır. Projeksiyon cihazları sayesinde oldukça gerçekçi ve yüksek parlaklık ve kalitede AG görüntülerin elde edilmesi mümkündür. Ayrıca HMD-AG sistemleri kullanılan teknolojik cihazların her kullanıcıya uygun olmaması, ağır ve çok büyük olması gibi ergonomik problemlere sahiptir. Öte yandan SAR sistemlerinin dezavantajı görüntülerin kalitesinin yansıtıldığı yüzeye ve ortamın aydınlatmaya bağlı olmasıdır. Koyu renkli nesnelerin görselleştirilmesi bu sistemlerle kolay değildir. Projeksiyonların kullanılması nedeniyle bazen gerçek görüntülerde gölgelerin oluşması gibi sorunlar da ortaya çıkabilmektedir. Son olarak SAR sistemleri kolaylıkla taşınabilir sistemler değildir. Ancak mekânsal AG sistemleri ile başa takılan ve el ile tutulan AG sistemleri birbirlerine rakip olmaktan çok tamamlayıcı AG teknolojileridirler. Taşınabilirliğin önemli olduğu AG uygulamalarında mekânsal AG sistemlerinin kullanılmaması gerektiği gibi, ellerin serbest kalması gereken durumlarda da el ile tutulan AG sistemlerinin kullanılması doğru olmayacaktır.

2.3. Artırılmış Gerçeklik Takip Metotları

Standart bir AG sistemi temel olarak üç önemli bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, gerçek dünyayı algılamak için kullanılan sensörler, sanal görüntülerin gerçek dünya görüntüsü üzerine ekleme işlemini yapacak olan işlemci ve son olarak artırılmış görüntüyü kullanıcılara sunacak olan ekran veya monitörlerdir. Önceki başlık altında AG sistemlerinden kullanılan görüntüleme tekniklerinden ve donanımlarından bahsedilmiştir. AG sistemleri genellikle mevcut teknolojiler (cep telefonu, tablet, bilgisayar, vb.) üzerinde hayata geçirilmeleri nedeniyle özel bir işlemciye ihtiyaç duyulmamaktadır. Öte yandan takip metotları ise AG uygulamalarının etkinliğini önemli ölçüde etkilemektedirler. Etkin bir takip metodunda sanal nesnelerin konumlarındaki hata AG deneyimini olumsuz etkilememesi için miktarı birkaç milimetreyi geçmemeli ve sanal nesnelerin AG sisteminin ekranında belirme süreleri yarım saniyeden daha kısa olmalıdır. Ayrıca takip metotları farklı mesafe ve açılarda dahi doğru bir biçimde çalışmalıdır. AG sistemlerinden kullanılan takip metotları

farklı sınıflandırmalar olsa da temel olarak iki başlık altında toplanmaktadırlar. Bunlar; görme tabanlı takip ve sensör ve modül tabanlı takip metotlarıdır. Melez takip metotları çalışmalarda ayrı bir başlık altında inceleniyor olsa da AG uygulamalarında çoğunlukla farklı birden fazla sensör ile birlikte video kameralar da kullanılmaktadırlar. Bu nedenle melez takip metotlarına, sensör ve modül tabanlı takip başlığı altında değinilmiştir. Görme tabanlı takip sistemleri de kendi arasında işaretçilerin kullanıldığı ve işaretçilerin kullanılmadığı takip metotları olarak iki alt başlığa ayrılmaktadırlar. İşaretçi kullanılmayan metotların bir kısmında sistemin daha tutarlı çalışması için 3 boyutlu bilgisayar destekli tasarımlar (CAD – computer aided design) ön bilgi olarak kullanılmakta iken, ön bilgi gerektirmeyen, doğal özelliklere dayalı takip metotları da bulunmaktadır [59-61]. Günümüz AG uygulamalarında kullanılmayan veya çok ender kullanılan takip metotları bu çalışma kapsamında ele alınmamış ve söz konusu takip metotları ile ilgili bilgiye yer verilmemiştir.

2.3.1. Sensör ve modül tabanlı takip metotları

Günümüzde AG uygulamalarının geliştirilmesinde kullanılan tablet bilgisayarlar, cep telefonları, akıllı gözlükler, vb. cihazlar çevrenin ve konumun daha kolay algılanabilmesi için birçok sensör ile donatılmış olarak piyasaya sürülmektedirler. Sensörler, AG uygulamalarına gerçek dünya hakkında çeşitli amaçlarla bilgiler sağlarlar. Özellikle sanal nesnelerin gerçek nesneler ile ilişkilendirilmeleri için konum bilgilerini sağlayan sensörler oldukça önemlidirler. Genel olarak AG uygulamalarında sensörlerin genel işlevi gerçek dünya nesnelerinin konum ve yönleri hakkında veri toplamaktır. Böylece uygulama önemli bileşenlerin nerede olduğunu ve gerçek dünya içerisindeki tam konumunu belirleyebilmektedir.

Atalet ölçüm birimi (IMU – inertial measurement unit) jiroskop, ivmeölçer ve manyetometre sensörlerini içeren bağlı bulunduğu cihazın hızını, yönünü ve yerçekimi kuvvetlerini ölçen elektronik bir sistemdir. Özellikle SG uygulamalarında kullanılıyor olsa da AG uygulamalarında da nesne takibinin daha tutarlı ve hızlı yapılabilmesi amacıyla kullanılmaktadır. IMU sensörleri hareketlerin tahmini için etkili araçlardır, ancak tek başına AG uygulamalarında kullanımlarına dış etkilere (elektro manyetik alan, vs.) açık olmaları nedeniyle rastlanmamaktadır. Bunun yerine AG sistemlerinin temeli olan görme-tabanlı sistemlere eklenerek melez takip metotları

oluşturulmaktadır. You ve Azuma 1999 yılında iki sisteminin zayıf olduğu noktaları telafi eden görme tabanlı ve atalet ölçüm birimi kullanılan melez bir AG takip metodu geliştirmişlerdir [62]. Kamera ve atalet ölçüm sensörlerinin kullanıldığı AG sistemlerinin başarısı nedeniyle bu melez takip metodu günümüzde de etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu konuda takip metodunu iyileştirmek için yapılmış birçok çalışma [63-66] olduğu kadar teknoloji şirketleri de IMU sisteminin geliştirilmesi doğrultusunda günümüzde yatırım ve araştırmalara devam etmektedirler [67].

AG uygulamalarında kullanılan bir diğer teknolojide dış ortamların neredeyse tamamında konum takibi yapılmasını mümkün kılan GPS teknolojisidir. Uydu tabanlı GPS teknolojisinin konum tahmin doğruluğu 10-15 metre arasında değişirken, yerel baz istasyonlarından yararlanılarak tasarlanan diferansiyel GPS sistemlerinde doğruluk 1-3 metre arasındadır. AG uygulamalarında daha fazla kullanılan gerçek zamanlı kinematik GPS sistemlerinden ise hata payı santimetreler seviyesine inmektedir [50]. GPS kullanılan ilk AG çalışması Feiner vd. tarafından geliştirilen bir metreye kadar doğru ölçüm yapan diferansiyel GPS ve manyetometre kullanılan 'Touring Machine'dir [22]. Ancak her ne kadar yazarlar GPS verilerinde oluşacak hataların sistemi etkilememesi için çalışmış olsalar da uygu bağlantısının kaybolması önemli sorunlara neden olmuştur. Bu nedenle GPS verisinin sürekliliğinin ve doğruluğunun sağlanabilmesi için yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir. Höllerer vd. hata payını santimetrelere düşüren gerçek zamanlı kinematik GPS sistemi ile manyetometre ve atalet sensörlerini kullanarak dış mekanlar için yeni bir AG sistemi tasarlamışlardır [23]. Benzer şekillerde farklı GPS teknolojilerinin IMU, manyetometre, vb. sensörler ile birlikte kullanıldığı, hatta bir sonraki başlıkta bahsedilecek olan işaretçilerin de kullanıldığı çalışmalar ortaya konulmuştur [24, 25].

Sensör yardımıyla gerçekleşen bir diğer takip türü ise ultrasonik seslerden yararlanan akustik takip metodudur. Mikrofonlar akustik takip sistemlerinin sensörleri niteliğindedir. Bu sistemlerde takip edilecek nesnelerden yayılan ses dalgaları analiz edilerek konum tespiti yapılmaktadır. Ishii vd. tarafından geliştirilen PingPongPlus uygulamasında da masanın altına yerleştirilen mikrofonlar aracılığıyla topun çarptığı noktalar tespit edilmiş ve projeksiyonlu görme sistemi ile topun çarptığı bölge işaretlenmiştir [56]. Akustik takip sisteminin avantajı, ışık miktarı ve parlaklığından etkilenmemesidir. Ancak çok gürültülü ortamlar da akustik takip için uygun değildir.

2.3.2. Görme tabanlı takip metotları

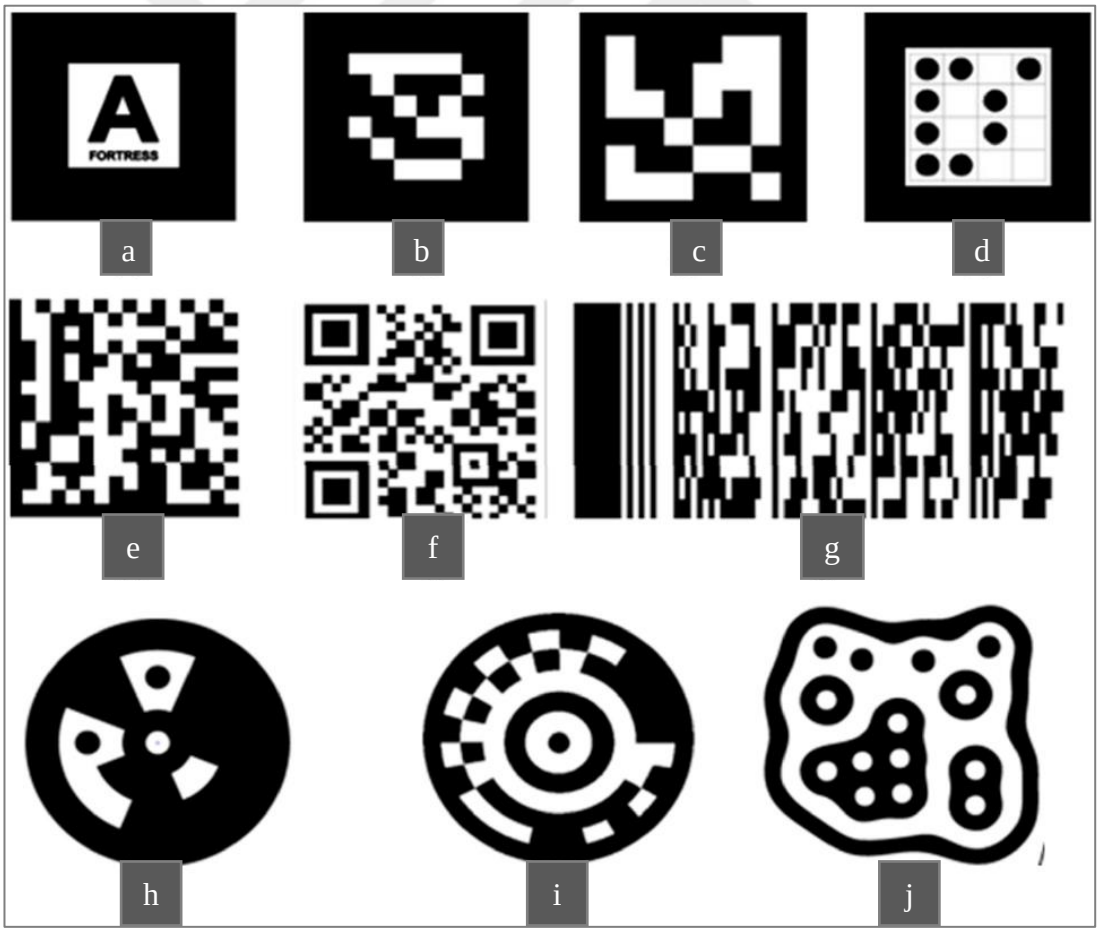
Kamera modülleri ışığı algılayan sensörler bulunan ve neredeyse her cihazda (cep telefonları, tabletler, laptoplar, akıllı gözlükler, saatler vs.) kullanılan teknolojilerdir. AG uygulamalarında kameralar, gerçek dünya görüntüsünü alarak kullanıcılara aktarmalarını yanı sıra kaydedilen görüntülerin işlenmesi ile dijital içeriklerin yerleştirilmesi için kullanılmaktadırlar. Hatta görme tabanlı takip metotları AG uygulamalarında nesnelerin ortama göre durumlarını tespit etmek için kullanılan en iyi yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Farklı sınıflandırmalar yapılıyor olsa da teknik detayları dikkate alındığında görme tabanlı takip metotları, işaretçi kullanılan takip, işaretçi kullanılmayan takip olarak iki grupta incelenmiştir.

2.3.2.1. İşaretçi kullanılan takip metotları

İşaretçi kullanılan takip, dijital nesnelerin gerçek dünya ortamı üzerinde hedeflenen bölgede oluşturulabilmesi için en tutarlı yöntemlerden birisidir. İşaretçi olarak yüksek çözünürlüklü bir şekil veya resim kullanılır ve AG görüntüsünün bu nesne ile eşleştirilir. Bilgisayarlı görme algoritmaları ile işaretçiler tanımlanarak her işaretçi ile eşleştirilmiş olan dijital nesne ekrana yansıtılarak gerçeklik algısı artırılmaktadır. İşaretçi kullanılan takip metotları ile kameralar, dijital nesnelerin konumunu ve yönünü belirleyebilmektedirler. İşaretçileri ilk kullananlardan olan Mellor, geliştirdiği küçük siyah halkaları röntgen görüntülerinin kayıt doğruluğunu araştırmak üzere plastik bir kafatasına bağlayarak çeşitli çalışmalar yapmıştır [68]. Hoff vd. iç içe geçmiş dairesel işaretçiler ve HMD ile bir bakım uygulaması geliştirmiştir [69]. Neumann ve Cho dairesel işaretçilerin kullandıkları çalışmalarında dijital nesnelerin konumlarının gecikme olmadan belirleyebildikleri bir yöntem önermişlerdir [70].

İşaretçiler konusunda birçok çalışma yapılmış olsa da AG alanında en popüler işaretçiler Kato ve Billinghurst tarafından 1999 yılında geliştirilen ARToolkit işaretçi kütüphanesidir [27]. Kare işaretçiler sayesinde duruşun daha kolay tahmin edilebiliyor olması ve tutarlı AG uygulamalarının geliştirilebilmesi ARToolkit kütüphanesinin bilinirliğini artırmıştır. ARToolkit'in avantajı, işaretçilerin kolaylıkla bir yazıcı ile basılabiliyor olması ve mevcut kameralarla kolaylıkla taranarak tanınabilmesidir. ARToolkit kütüphanesi, işaretçi kullanılan takip için önemli bir gelişme olmuş ve sonrasında birçok yeni işaretçi geliştirilmiştir (Şekil 2.22). Ancak işaretçilerin

kullanımı kolay olsa da her ortamda kullanılamamaktadır. Özellikle işaretçilerin iyi ışık alamayacağı ve deforme olacağı ortamlar işaretçi kullanılan takip için uygun olmayabilmektedir. Bu durum sadece kızılötesi ışınlardan yararlanılarak insan gözü ile görülmeyen işaretçilerin kullanıldığı sistemlerde geçerli değildir. Ortama kızılötesi kameralarla algılanabilecek kızılötesi ışık yayan işaretçiler yerleştirilerek hem işaretçi olmadan çalışan bir AG sistemi havası yaratılırken hem de işaretçi tabanlı takip sistemlerinin avantajlarından yararlanılmaktadır [59,71]. Ancak tüm işaretçi kullanılan takip sistemlerinin ortak zayıf noktası, işaretçilerin görüş alanından çıkması veya araya engellerin girmesi sonucunda eklenmiş dijital nesnelerin kaybolmasıdır. Bu nedenle genişletilmiş takip algoritmaları üzerinde araştırmalar yapılarak işaretçilerin kaybolması halinde dahi dijital öğelerin görünürlüğünün korunması sağlanmaya çalışılmaktadır. Çalışmalarda IMU ve çeşitli sensörler kullanılması daha tutarlı AG uygulama sonuçları veren melez takip sistemlerini ortaya çıkarmaktadır [72].

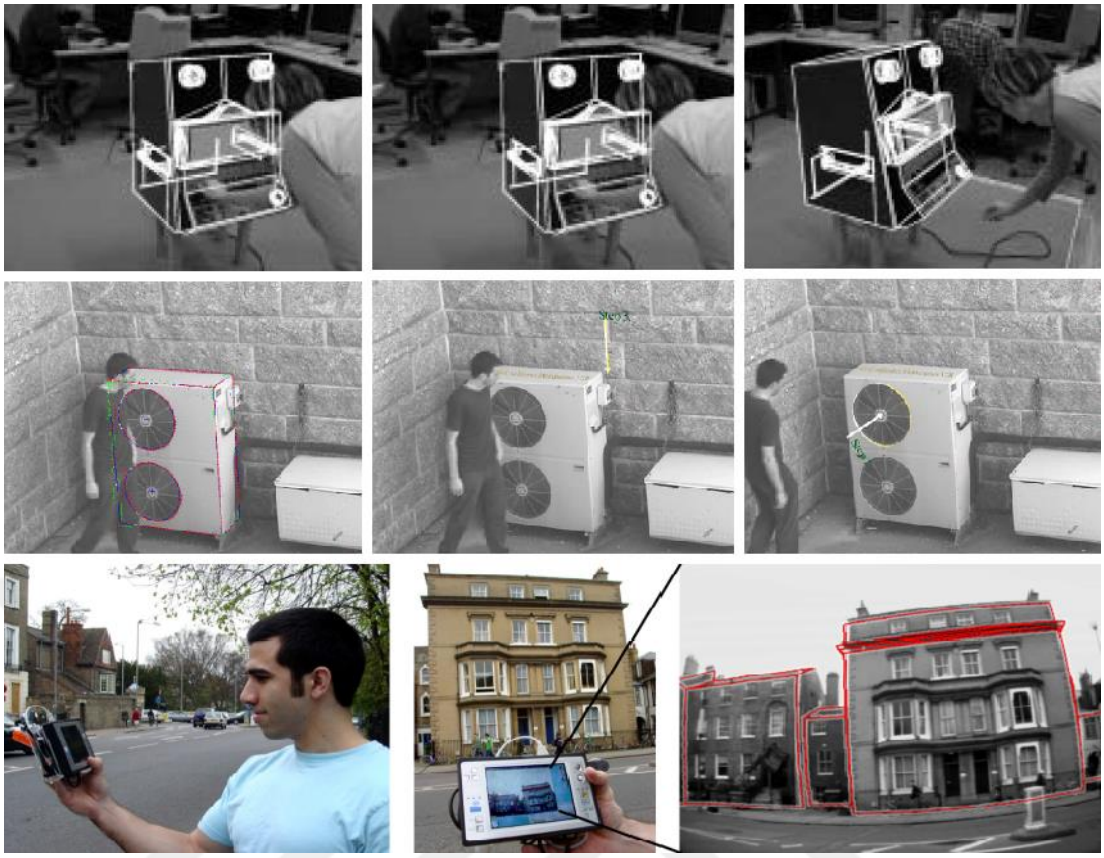


Şekil 2.22. Literatürde önerilen çeşitli işaretçiler [59]. (a) ARToolkit; (b) ARTag; (c) ARToolKitPlus; (d) SCR Marker; (e) Data Matrix; (f) QR Code; (g) PDF (h) Intersense IS-1200 Marker; (i) Shotcode; (j) RealTIVision

2.3.2.2. İşaretçi kullanılmayan takip metotları

İşaretçi kullanılan takip metotları her ne kadar AG donanımları için hızlı ve az güç gerektiren metotlar olsa da gerçek dünya üzerinde işaretçilerin yerleştirilmesine ihtiyaç vardır. İşaretçi kullanılmayan takip metotlarında ise, gerçek dünya görüntülerine ait benzersiz özellikler çeşitli algoritmalar kullanılarak ortaya çıkarılmaktadır. Bu nedenle karmaşık bir yapıdadırlar ve dolayısıyla algoritmaların çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan hesaplama gücü de yüksektir. Gelişen teknoloji ile birlikte özellikle AG gözlükleri, cep telefonları ve tablet bilgisayarları gibi donanımların işlem gücü artmış olsa bile, işaretçi kullanılmayan takip metotlarının kullanıldığı AG uygulamalarını çalıştırırken halen problemler yaşanmaktadır. Sürekli hesaplama yapan işlemciler ve görüntü verisi aktaran kameralar nedeniyle cihazlarda hem ısınma hem de batarya problemleri ortaya çıkmaktadır.

Kullanılan bazı işaretçi kullanılmayan takip metotlarında 3 boyutlu CAD modelleri ile ortam hakkında ön bilgi verilmiş ve sistemin takip hızı ve sürekliliği artırılmıştır. Bu metotlar literatürde model tabanlı takip metotları olarak da geçmektedir. Bir nesnenin şekli hakkında önceden sahip olunan bilginin kullanımı, model tabanlı takip metotlarının temelini oluşturmaktadır. Harris tarafından geliştirilen RAPiD (real-time attitude and position determination) metodu model tabanlı takip metotlarının ilk örneklerinden birisidir. RAPiD rastgele hareket eden nesneler için 3 boyutlu model tabanlı bir takip algoritmasıdır ve takip edilen nesnenin sonraki yeri kalman filtresi aracılığıyla tahmin edilmektedir. RAPiD gibi nesnelerin kenarlarının belirtildiği 3D tel çizimlerin kullanıldığı diğer çalışmalarda ise takip esnasında titremenin ortadan kalktığı ve farklı kamera açılarında nesne takibinin sürdürebildiği bir metot önerilmiş [74,75]; hatta dış mekanlardaki yoğun engellere rağmen çalışan takip yöntemleri geliştirilmiştir [76,77]. Platonov vd. farklı olarak, otomobil tamiri için tel kafes model yerine CAD modeli kullanarak bir takip sistemi geliştirmişler ve sistemi değişken aydınlatma koşulları altında test etmişlerdir. Kameralardan gelen görüntüler eğer varsa aydınlatma farklılıkları dengelendikten sonra, daha önce belirlenmiş çerçeve görüntülerle benzerlik ölçütlerine göre kıyaslanmıştır. Eğer kameradan alınan görüntü ile kıyaslanan çerçeve görüntünün benzerliği tanımlanmış eşiğin üzerindeyse görüntüler eşleştirilmiştir [78]. Şekil 2.23'de çalışmalarda kullanılan modeller ve uygulamalar verilmiştir.



Şekil 2.23. Model tabanlı takip çalışmalarına örnekler. [74, 76, 77].

İşaretçi kullanılmayan takip için kullanılan bir diğer metot ise nesnelerin doğal özelliklerinin tanıma ve takip amaçlı kullanılmasına dayanan algoritmalardır. Bazen işaretçilerin kullanılmasının mümkün olmadığı durumlarda AG uygulamalarını çalıştırabilmek için hedef görüntülerin doğal özelliklerini kullanmamız gerekmektedir. Doğal özelliklerin tespit edilmesi ile kastedilen bir görüntü üzerinde dikkat çeken ve onu diğer görüntü ve nesnelerden ayıran detayların keşfedilerek işaretlenmesidir. Tespit edilen bu detaylara anahtar noktalar da denilmektedir. Nesnelerin doğal özelliklerinin kullanılması ile yapılan takipte nesneler üzerindeki anahtar noktalar kolay tespit edilebilmeli ve görüntünün açısı değişmesi halinde dahi tespit edilen noktalar sabit kalmalıdır. Yani her nesne doğal özellikleri kullanılarak takip edilemez. Bu işlemler yoğun eşleme (dense matching) ve seyrek eşleme (sparse matching) olarak iki farklı şekilde yapılmaktadır. Yoğun eşlemede bir görüntüdeki tüm piksellerin işlenmesi iken seyrek işlemede sadece önemli ayırt edici pikseller ele alınmaktadır. Yoğun işlemede yüksek miktarda işlem gücü gerekirken, seyrek işlemede işlem gücüne nispeten daha az ihtiyaç duyulmaktadır [17].

Anahtar noktaların tespit edilmesi aslında doğal özelliklerin tespiti ile yapılan takip metodunun ilk aşamasını oluşturmaktadır. Takibin gerçekleşmesi için sırasıyla anahtar noktaların tespiti, noktalar için işaretçilerin oluşturulması, işaretçilerin yeni görüntülerle eşleştirilmesi gerçekleşmesi, kamera açısının ve duruşun tespit edilmesi gereklidir. Her aşama için literatürde farklı algoritmalar önerilmiştir [17].

Anahtar noktaları veya diğer bir ifadeyle işaretçilerin tespit edilmesi için farklı algoritmalar geliştirilmiş ve çalışmalar yapılmıştır. Ancak anahtar noktaların hangi özellikleri taşıması gerektiği hakkındaki görüş hemen hemen her çalışmada benzerlik göstermektedir. İyi bir anahtar nokta çevresindeki alan ile birlikte değerlendirildiğinde bir görüntü veya resimdeki tüm noktalardan yoğunluk, renk geçişleri, köşeler, vb. özellikler bakımından farklı olmalıdır. Ayrıca anahtar noktalar gözlemlere bağlı olmaksızın tekrar tekrar bulunabilir olmalıdır. Anahtar noktaların kimliği farklı boyut açı ve ışık şartları altında değişmemelidir. Bir resimdeki köşe noktalarının ve kenarların tespit edilmesini sağlayan Harris köşeleri algoritması anahtar noktaların tespiti için geliştirilen ilk algoritmalardan birisidir [79]. Ancak farklı görsel boyutlarında Harris köşeleri algoritması tutarlı değildir. Bu durumun üstesinden gelmek üzere bir nesnenin veya görüntünün farklı görünümleri arasında güvenilir eşleştirme gerçekleştirilebilmesi için gauss farkları (difference of gaussian – DOG) yöntemi önerilmiştir [80]. DOG her ne kadar farklı ölçeklerdeki görüntüler için uygun olsa da yüksek işlem gücüne ihtiyaç duymaktadır. Birkaç yıl sonra ise işlem gücü ihtiyacını azaltmak ve daha hızlı sonuçlara ulaşabilmek için hızlandırılmış segment testi tabanlı özellik (features from accelerated segment test – FAST) geliştirilmiştir [81]. FAST gerçek zamanlı görüntü işleme yeteneği ve özellikle hızlı bir algoritma olması nedeniyle mobil AG teknolojilerine yönelik yapılan çalışmalarda kullanılmıştır.

Anahtar noktaların tespit edilmesi sonrasında her bir noktayı farklı görüntülerde ve resimlerde de tanımlayabilmek, ayırt edebilmek için işaretçilerin oluşturulması gereklidir. SIFT, SURF, BRIEF, ORB, BRISK ve FREAK, doğal özellikler ile tanıma metotlarında işaretçilerinin oluşturulması için geliştirilmiş algoritmalardır. SIFT [82] ve SURF [83] algoritması, gradyan histogram tabanlı işaret tanımlayıcılarının kullanıldığı ilk algoritmalardır. Bu algoritmalar görüntülerin anahtar noktalarını en detaylı şekilde açıklarken ve en iyi sonuçlar veren algoritmalar olmalarına rağmen çok

fazla hesaplama gücüne gereksinim duymaktadırlar. Şekil 2.24'de bir görüntü üzerinde SIFT yönteminin nasıl çalıştığı ve belirlenen noktalar gösterilmiştir. İkili özellik tanımlayıcıları ise SIFT ve SURF algoritmalarına göre daha az işlemci gücü gerektiren algoritmalardır. En önemlileri BRIEF [84], ORB [85], BRISK [86] ve FREAK [87] algoritmalarıdır.



Şekil 2.24. SIFT algoritması ile işlenen görüntü ve tespit edilen anahtar noktalar [82]

Anahtar noktaların tespit edilebilmesi için görüntülerin yoğun ve düzensiz olması gerekmektedir. Fazla doku detayı olmayan görüntülerde özellik tanımlama algoritmaları yeterince anahtar nokta belirleyemeyecektir. Özellikle tek renkten oluşan nesnelerin bulunduğu ortamlarda takip için daha önce bahsedilen ve nesnelerin kenar bilgilerinden ve CAD modellerinden yararlanılarak yapılan model tabanlı takip kullanılması daha uygun olmaktadır. Bunula birlikte CAD modelli takip metotlarında benzer 3D modellere sahip nesnelerin bazen karıştırılabileceği de unutulmamalıdır.

SLAM ise işaretçilerin kullanılmadığı gibi model de kullanılmayan takip metodudur. Model kullanılmayan takibin en basit şekli ve SLAM'ın öncüsü, görsel odometri (visual odometry) olarak adlandırılmaktadır. Görsel odometri kısaca bir kamera ile elde edilen görüntünün sürekli 6 serbestlik derecesi dikkate alınarak izlenmesi ve bir önceki görüntü ile eş zamanlı olarak kıyaslanmasıdır. Sadece bir önceki görüntü ile kıyaslama yapması nedeniyle hafızası olan bir metot değildir ve görünür olmaktan çıkan noktaları tekrar görünür olduğunda takip edemez. SLAM ise söz konusu bu hafıza eksikliğinin ortadan kaldırıldığı gelişmiş bir görsel odometri yöntemidir [17]. SLAM metotları, herhangi bir ortamın doğal ve ayırt edici özelliklerini kamera görüntüleri üzerinden dinamik olarak tespit ederek gerçek zamanlı bir ilişki ağı haritası oluşturabilmektedirler.

SLAM metotları günümüz bilgisayarlı görme, robotik ve AG çalışmalarında araştırmacıların halen zorlandığı ve her yıl bilimsel çalışmalar yayınlandığı alanlardan birisidir. Çalışmalara göre filtre tabanlı (filter based) ve harekete göre yapılanmış (structure from motion – SfM) olarak iki farklı SLAM yaklaşımı bulunmaktadır. Filtre tabanlı SLAM metotlarında Kalman Filtresi gibi Bayesyen özyinemeli filtreler kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda geçmiş ve mevcut sonuçlara göre gelecekte oluşacak durum keşfedilmeye çalışılmaktadır. Ancak özellikle geniş alanlarda AG'nin kullanılması halinde durum kestirimi işlemin karmaşıklığını artırırken, işlem hızı yavaşlamaktadır [59]. Davison vd. tarafından 2007 yılında önerilen monoSLAM metodu önceden bilinmeyen ortamlarda eş zamanlı kamera görüntüleri kalman filtreleri kullanılarak izlemeyi mümkün kılmaktadır [88].

Filtre tabanlı SLAM tekniğinden farklı olarak, SfM SLAM veya bir diğer adıyla anahtar çerçeve tabanlı SLAM tekniği, fotoğraf koleksiyonları veya takip eden video kareleri ile 3D yapıların yeniden oluşturulmasını mümkün kılmaktadır ve projeksiyon hatalarının minimize edilmesi için paket dengeleme (Bundle Adjustment – BA) algoritmaları kullanılmaktadır [42]. Klein ve Murray, gerçek zamanlı bir SfM SLAM sistemi olan paralel izleme ve haritalama yöntemi (PTAM) önermişlerdir [33]. PTAM ile başlangıç görüntüsü olarak ortamın ilk görüntüsünü kullanılmaktadır ve daha sonra paket dengeleme algoritması ile her yeni video karesinden üç boyutlu model oluşturulmaktadır. Aynı zamanda, yakalanan karelerden alınan özellikler, kamera poz dönüşümü tanımlamak için saklanan modellerle karşılaştırılır. SLAM literatürüne bakıldığında monoSLAM ve PTAM çalışmalarından yola çıkılarak her iki tür SLAM tekniği için geliştirilmiş farklı teknikler [42-47] ve SLAM algoritmalarından bahsedildiği ve çeşitli performans kriterlerine göre kıyaslandığı inceleme çalışmaları bulunmaktadır [89-91].

Son yıllarda geliştirilen AG uygulamalarında SLAM tekniklerinin kullanıldığı takip metotları oldukça artan bir paya sahiptir. Bu gelişmede en büyük pay SLAM tekniklerinde kullanılan algoritmaları çalıştırabilecek güce sahip AG donanımlarının piyasaya sürülmeye başlanmış olmasıdır. Ayrıca artan mobil AG cihazları ile işaretçi tabanlı takip sistemleri yerini işaretçi kullanılmayan takip sistemlerine bırakmaktadır. Bu nedenle yeni geliştirilen AG geliştirme ortamları ve yazılımlarında SLAM teknolojine ayrıca yer verilmekte ve iyileştirme çalışmaları hızla devam etmektedir.

2.4. Artırılmış Gerçeklik Uygulama Geliştirme Ortamları

Önceki başlıklarda AG teknolojisinin detayları ve nasıl çalıştığı bahsedilmiş olsa da AG uygulamalarının hayata geçirilmesi için donanım kadar önemli olan bir diğer konu ise doğru geliştirme ortamlarının ve yazılımların seçilmesidir. AG uygulamaları bilgisayarlı görmenin kullanılarak işaretçilerin ve nesnelerin takip edildiği, ortamların analiz edildiği, 2D ve 3D olarak tasarlanmış dijital grafiklerin gerçek dünya ile birleştirildiği ve hatta ses, koku, dokunma gibi görme duyusu dışında kalan diğer duyularımızın da kullanıldığı programlardır. AG uygulamalarını geliştirmek için yazılım kütüphaneleri ve ayrıca birçok farklı özelliği bünyesinde barındıran SDK'lar olsa da dijital içeriklerin oluşturulabilmesi için ses işleme, montaj, 2D veya 3D tasarım, model geliştirme ve animasyon yapma gibi tek bir amaç için geliştirilmiş profesyonel yazılımların da kullanılması gerekebilmektedir.

Craig 2013 yılına kadar AG uygulamalarının geliştirilmesinde kullanılan yazılımları dikkate alarak bu yazılımları kabaca dört kategoriye ayırmıştır. Bunlar; AG uygulamalarında doğrudan kullanılan yazılımlar, AG uygulamalarını oluşturmak için kullanılan yazılımlar, AG uygulamalarına içerik oluşturan yazılımlar, AG ile ilgili diğer yazılımlar şeklindedir. Ayrıca AG sistemleri için yazılımların düşük seviyeli programlama kütüphaneleri, görselleştirme ve uygulama geliştirme kütüphaneleri, eklenti yazılımları, tümleşik AG uygulamaları ve içerik geliştirme yazılımları olarak ta beş kategoride incelenebileceğini ifade etmiştir [92].

Schalmastieg vd. ise AG geliştirme yazılımlarını programlama bilgisi ihtiyacına göre programlama bilgisi gerektirmeyen ve programlama bilgisi gerektiren yazılımlar olarak ikiye ayırmışlardır. Ayrıca karmaşıklıklarına göre de sadece AG içeriklerinin takip edilmesini mümkün kılan düşük seviyeli yazılımlar ve 3D modelleri ve etkileşim tekniklerini kullanabilen yüksek seviyeli yazılımlar olarak da gruplandırmışlardır. Ayrıca, AG geliştirme yazılımlarının bir kısmında yüksek düzeyde programlama bilgisine ihtiyaç duyulurken, kalan kısmında ise programlama bilgisi olmaksızın AG uygulamalarının geliştirilebileceğinden bahsetmektedirler [35].

Hem Craig hem de Schalmastieg tarafından yapılan sınıflandırmalar çalışmaların kaleme alındığı yıllar itibariyle birde fazla kütüphaneden oluşan yazılım geliştirme kitlerinin ve ileri seviye tümleşik geliştirme ortamlarının (IDE – integrated

development environment) henüz yayın bir şekilde kullanmadığı zamanlara karşılık gelmektedir. Günümüzde her ne kadar programlama bilgisi gerektiren veya gerektirmeyen AG uygulama geliştirme ortamları bulunsa dahi, yeni AG geliştirme ortamlarını düşük seviyeli olarak kategorize etmek artık pek mümkün değildir.

2.4.1. AG uygulamalarında doğrudan kullanılan yazılımlar

Her AG uygulamasının bir donanım birde yazılım boyutu bulunmaktadır. Geliştirilen AG uygulamasının sunduğu deneyimin kalitesini bu iki boyut arasındaki ilişkinin ne kadar tutarlı ve etkili olduğu belirlemektedir. AG uygulamalarında kullanılacak yazılımlar geliştirilen platformlara göre seçilmektedirler. Çünkü her geliştirme kiti ya da kütüphane her donanımı ve platformu desteklememektedir. AG uygulamalarında doğrudan kullanılan yazılımlar çevrenin sensörler aracılığıyla tanınması, sensörlerin birbirleriyle ve sistemle olan entegrasyonu, sensörlerden girdi olarak alınan verileri ve kullanıcılardan gelen talepleri toplayarak görsel veya işitsel sonuçların üretilebilmesini sağlayan uygulama motorunu ve render alma (görsel, işitsel) bileşenlerini kapsamaktadır [92]. Bu bileşenler genellikle özel olarak geliştirilmiş bir kütüphane paketi veya yazılım geliştirme kitleri içerisinde yer almaktadırlar. Bu nedenle her kütüphane ya da kit içerisinden dilediğimiz bileşeni seçmek mümkün değildir. Bu nedenle geliştirme için seçilen kütüphanenin, AG uygulamasının kullanılacağı platforma uygunluğu önceden değerlendirilmelidir.

AG uygulamalarında kullanılan en eski ve en çok bilinen kütüphane 1999 yılında duyurulan ARToolKit'tir [27]. 2 boyutlu işaretçilerin izlenmesi ve OpenGL ile dijital içeriklerin eklenmesini mümkün kılan bir kütüphanedir. Birçok farklı platformu desteklemektedir. Açık kaynak kodlu olması nedeniyle yıllar boyunca geliştirilerek farklı türevleri kullanıma sunulmuştur. Örneğin NyARToolKit[1], Java gibi sanal makine platformlarını destekleyen ve C# gibi farklı programlama dillerinde uygulama geliştirmeyi mümkün kılan ARToolKit kütüphanesinin optimize edilmiş bir versiyonudur. İnternet tabanlı AG uygulamalarının geliştirilmesini mümkün kılan farklı versiyonlar da geliştirilmektedir. Web tabanlı AR deneyimlerini hızlı bir şekilde geliştirmek için kullanılabilen FLARToolKit[2] ise Flash Actionscript 3 yazılımı[3] ile

[1] https://nyatla.jp/nyartoolkit/wp/?page_id=198
[2] http://www.libspark.org/wiki/saqoosha/FLARToolKit/en
[3] https://www.adobe.com/devnet/actionscript/learning.html

çalışabilen bir başka ARToolKit sürümüdür ve büyük bir geliştirici topluluğu desteğini arkasına almış en yaygın kullanılan Flash tabanlı AR kütüphanesidir. SLARToolkit[1] ise Microsoft Silverlight[2] ile Windows Phone ortamlarında kullanılabilecek AG uygulamalarının kolay ve hızlı bir şekilde geliştirilmesi amacıyla oluşturulmuş NyARToolkit ve ARToolkit'e dayanan başka bir türev kütüphanedir. AndAR[3] ise Android platformu için geliştirilmiş tamamen Java tabanlı AG kütüphanesidir.

Günümüzde yazılım geliştirme kitleri AG uygulamalarının geliştirilmesi için kullanılmaktadırlar. Hem işaretçili hem de işaretçisiz takip yapılmasını mümkün kılan, SLAM desteği bulunan, resim ve yüz tanıma özellikleri bulunan, bulut teknolojisinin entegre edildiği birçok farklı platformda çalışabilen oldukça fazla SDK geliştirilmiştir. 2011 yılında Qualcomm firmasının QCAR ismiyle kullanıma sunduğu SDK [38], daha sonra PTC firması tarafından alınmış ve günümüzde Vuforia[4] SDK olarak kullanılmaktadır.

Volkswagen otomobil firması tarafından 2003 yılında AG uygulamalarının geliştirilmesi için kurulan Metaio, 2005 yılında ilk AG uygulamasını ve üçüncü şahısların AG uygulamaları geliştirmek için kullanabilecekleri Unifeye adını verdikleri platformu hizmete sunmuşlardır. 2011 yılına gelindiğinde geliştirdikleri işaretçi kullanmadıkları 2D takip sistemi ile ödül almışlardır. Metaio 2015 yılında İOS platformunda çalışacak AG uygulamalarını geliştirilmesi amacıyla Apple firması tarafından alınmış [93] ve ARKit[5] adı altında kullanıma sunulmuştur. Google firması ise Android platformunu kullanan cihazlar için ARCore[6] SDK paketinin kararlı versiyonunu 2018 yılında kullanıma sunmuşlardır. 2008 yılında internet üzerinden çalışan bir AG tarayıcı olarak hizmet vermeye başlayan Wikitude,[7] günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan SDK'lardan birisidir. Birçok farklı platformu ve programlama dilini destekleyen Wikitude SDK, Epson Moverio, Vuzix M100, vb. akıllı gözlüklerde kullanılabilecek şekilde optimize edilmiştir.

[1] https://archive.codeplex.com/?p=slartoolkit
[2] https://www.microsoft.com/silverlight/
[3] https://code.google.com/archive/p/andar/
[4] https://www.vuforia.com/
[5] https://developer.apple.com/arkit/
[6] https://developers.google.com/ar/
[7] https://www.wikitude.com/products/wikitude-sdk/

MaxST[1] son yıllarda geliştirilen en etkili SDK dağıtımları arasında yer almaktadır. Birçok farklı takip metodunu bünyesinde barındırdığı gibi bulut tanıma opsiyonu sunulmaktadır. Bulut tanıma sayesinde büyük boyutlu ve fazla miktarda resim işaretçilerine ihtiyaç duyulan; verilerin sık sık güncellenmesini gerektiren AG uygulamaları yapılabilir hale gelmektedir. EasyAR[2] SDK ise benzer şekilde farklı takip metotlarını barındıran ve tek kameralı SLAM desteği olan, ücretli ve ücretsiz farklı paketlerinin olduğu başka bir dağıtımdır. Kudan[3] ise özellikle SLAM konusunda çok daha başarılı bir SDK olarak karşımıza çıkmaktadır. Epson teknoloji firması ise Moverio AR SDK[4] adı altında ürettikleri akıllı gözlüklerde yazılım geliştirilmesini kolaylaştırmak için geliştiricilerine kendi SDK paketini sunmaktadırlar. Ayrıca endüstriyel prosedürlerin AG ile desteklenmesi, yönetilmesi, yönlendirilmesi ve güçlendirilmesi maksadıyla geliştirilecek AG uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmış olan AugmentedPRO[5] ve HyperIndustry[6] gibi endüstriyel amaçlı SDK'lar da bulunmaktadır. Artırılmış gerçeklik uygulamaları için geliştirilmiş olan SDK'ların değerlendirildiği ve kıyaslandığı çalışmalar bulunsa dahi [94, 95], teknolojideki değişimlerle yeni yazılımlar ortaya çıkarken, mevcut yazılımlar ise sürekli güncellenmektedirler. Bu nedenle her zaman geçerliliğini koruyacak bir şekilde geliştirme ortamlarının karşılaştırmasını yapmak pek mümkün değildir.

2.4.2. AG uygulamalarını oluşturmak için kullanılan yazılımlar

Her ne kadar PTC, HP, Wikitude, vb. şirketlerin internet tabanlı doğrudan AG uygulama geliştirme ortamları (Wikitude Studio[7], Vuforia Studio[8], HP Reveal[9]) olsa da önceki başlıkta bahsedilen SDK'lar ve AG kütüphaneleri ile ileri seviye AG uygulamaları geliştirebilmek için birtakım tümleşik geliştirme ortamlarına (IDE) veya oyun motorlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin Unity 3D[10] gibi oyun motorları sensörlerden gelen verileri, kameralardan gelen görüntüleri ve sisteme yüklenen 2D

[1] http://maxst.com/#/en/arsdk
[2] https://easyar.com/view/sdk.html
[3] https://www.xlsoft.com/en/products/kudan/index.html
[4] https://epson.com/moverio-augmented-reality-ar-sdk-software-kit
[5] https://www.augmentedpro.com/
[6] http://hyperindustry.inglobetechnologies.com/
[7] https://www.wikitude.com/products/studio/
[8] https://www.ptc.com/en/products/augmented-reality/vuforia-studio
[9] https://www.hpreveal.com/
[10] https://unity3d.com/

ve 3D dijital içerikleri zaman, mekân, uyum gibi parametreler doğrultusunda birleştirip, işleyerek tam bir uygulama motoru görevi üstlenmektedirler. Ayrıca binlerce farklı dijital içeriğe kolayca erişilebilmesi, dijital içerik sağlayan yazılımların model formatlarının neredeyse tamamının desteklemesi ve kolayca farklı platformlar için uygulamaların tasarlanabilmesi gibi fırsatlar Unity 3D oyun motorunu AG uygulama geliştiricileri için ayrı bir noktaya taşımıştır. Günümüz popüler SDK dağıtımlarının tamamı Unity 3D oyun motorunda çalışabilecek şekilde bir eklenti seçeneği ile birlikte sunulmaktadır.

Uygulamaların çalıştırılacağı platformlar ve işletim sistemleri de AG uygulamaları geliştirmek için kullanılacak yazılımların seçiminde de rol oynamaktadır. IOS platformunu kullanan cihazlar için geliştirilen ARKit SDK ile uygulamaların geliştirilebilmesi için Xcode[1] tümleşik geliştirme ortamına (IDE) ihtiyaç duyulmaktadır. Benzer şekilde C++ ve C# gibi programlama dillerini kullanarak daha özelleştirilmiş AG uygulamaları oluşturmak için Microsoft Visual Studio[2] IDE kullanılmaktadır. Eclipse[3] ise, Anroid cihazlarda kullanılmak üzere geliştirilecek AG uygulamalarında kullanılan Java tabanlı oldukça popüler bir IDE'dir. Ayrıca Java yerine C/C++ ve PHP dillerini kullanan yazılım geliştiriciler için ise bu dillere uygun Eclipse IDE sürümleri bulunmaktadır. Özetle ihtiyaçlara göre özelleştirilmiş AG uygulamalarının tasarlanması için programlama bilgisine ve dolayısıyla gelişmiş bir İDE'ye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle günümüzde Wikitude, Epson Moverio, Vuforia, Kudan, EasyAR, MaxST gibi SDK dağıtımlarının, Unity, Eclipse, Xcode, vb. oyun motorları ve tümleşik geliştirme ortamları (IDE) ile uyumlu bir şekilde çalışan yazılım sürümleri bulunmaktadır.

2.4.3. AG uygulamalarına içerik oluşturan yazılımlar

AG uygulamalarının etkinliği dijital içeriklerin doğru zamanda ve doğru konumda sunulması ile ilişkilidir. Ancak dikkat edilmesi gereken asıl nokta kullanıcılara gerçek dünya ile sanal dijital nesneler arasındaki geçişi çok yumuşak ve belirsiz bir biçimde sunabilmektedir. Yani dijital nesnelerin tasarımı, uygunluğu ve görsel kalitesi AG uygulamalarının yaratacağı gerçeklik algısı için oldukça önem arz etmektedir.

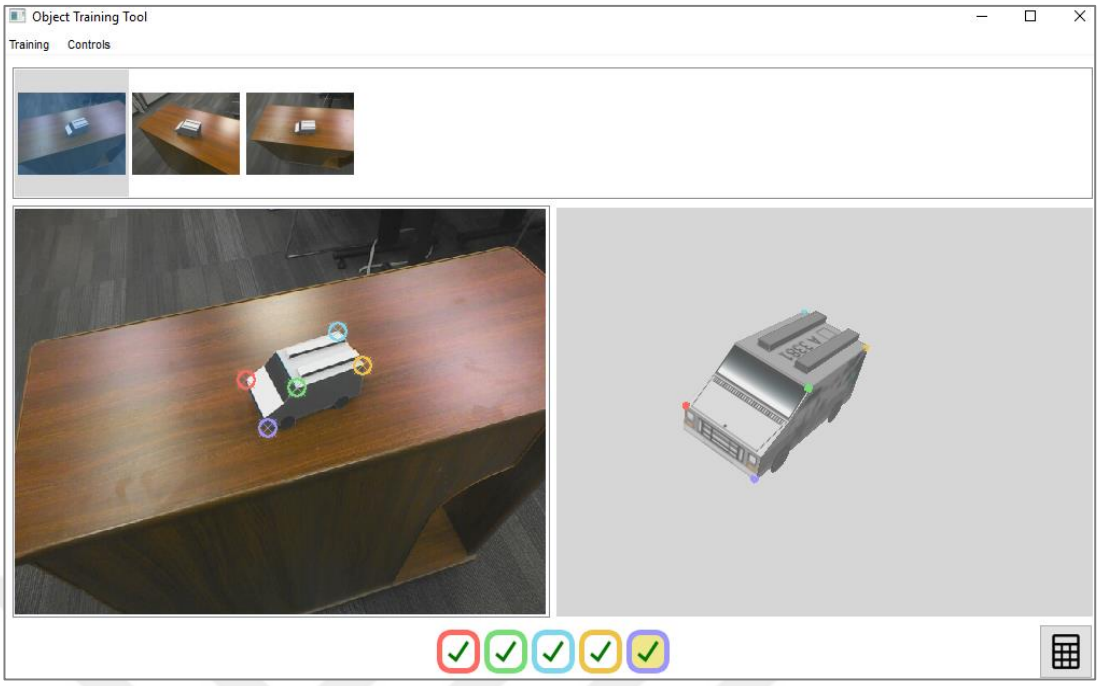
[1] https://developer.apple.com/xcode/
[2] https://visualstudio.microsoft.com/tr/vs/
[3] https://www.eclipse.org/downloads/packages/release/neon/m6/eclipse-android-developers

AG uygulamalarında kullanılan dijital içerikler ihtiyaçlar doğrultusunda çeşitli 3D veya 2D görselleştirme, modelleme ve animasyon yazılımları kullanılarak oluşturulmaktadırlar. Blender[1], 3ds Max[2] ve Maya[3] yazılımları animasyon, model, simülasyon, karakter geliştirme gibi üç boyutlu içeriklerin oluşturulmasında kullanılan yazılımlara başlıca örneklerdir. Resim, düğme, arka plan vb. iki boyutlu içerikler için ise Photoshop[4], Illustrator[5], vb. yazılımlar AG uygulamalarına içerik sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca AG uygulamalarında sesli öğeler de önemli bir yer tutmaktadır. Sanal bir düğmenin tıklandığını anlatmak veya bir menünün açıldığını duyurmak amacıyla tasarlanan ses dosyaları, sanal öğeleri gerçek dünya öğeleri ile daha fazla bütünleştirmektedirler. AG'de arayüz tasarımında ve sesli yönlendirmelerde ses dosyalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle, metinleri sese dönüştüren konuşma sentezleyici yazılımlar ile ses dosyalarını düzenlemek için kullanılan montaj yazılımları, içerik oluşturmak maksadıyla kullanılmaktadırlar.

2.4.4. AG ile ilgili diğer yazılımlar

AG uygulamalarını geliştirmek bazen karmaşık olabilmektedir ve özel amaçlar doğrultusunda bir takım destek yazılımları da kullanılabilmektedir. İnternet içeriği olan bir AG uygulamasında verilerin saklandığı bir veritabanı sistemi, internet içeriği oluşturma, yönetme ve aktarma araçları, lisans yönetimi yazılımları kullanılan diğer yazılımlara örnek olarak gösterilebilirler. Hatta MaxST, Epson Moverio SDK dağıtımları model tabanlı takip ve resim tabanlı takip için kullanılacak model dosyalarını oluşturmak için eğitim yazılımları geliştirmişlerdir.[6] Şekil 2.25'de Epson Moverio SDK paketi ile birlikte gelen eğitim aracı içerisindeki model tabanlı takip için kullanılan eğitim aracına sunulmuştur. 3D modelin (sağ) köşe noktaları ile resim (sol) eşleştirilerek AG uygulaması ile nesne takip edilebilmektedir. Ayrıca her iki SDK'nın akıllı gözlüklerin farklı fizyolojik özelliklere sahip bireyler tarafından kullanılması durumunda ortaya çıkacak görüntü kayması, ikiz görüntü oluşması, bulanıklık, vb. durumları önlemek için kalibrasyon yazılımları da bulunmaktadır.

[1] https://www.blender.org/features/
[2] https://www.autodesk.com.tr/products/3ds-max/features
[3] https://www.autodesk.com.tr/products/maya/features
[4] https://www.adobe.com/tr/products/photoshop.html
[5] https://www.adobe.com/tr/products/illustrator.html
[6] https://developer.maxst.com/MD/download/mapm



Şekil 2.25. Moverio eğitim aracında CAD model ile resim köşelerinin işaretlenmesi

2.5. Artırılmış Gerçeklik Uygulama Alanları

Artırılmış gerçekliğin ortaya çıkışından itibaren teknolojik gelişmeler ile birlikte algıladığımız dünyamızı zenginleştirebilmek için araştırmacılar birçok farklı alanda AG uygulamaları geliştirmişlerdir. Ortaya konulan çalışmalar incelendiğinde genel olarak oyun ve eğlence, endüstri, eğitim, tıp ve sağlık, askeri, turizm ve gezi, mimarlık, ulaşım, erişilebilirlik başlıkları altında geliştirilmiş AG uygulamaları bulunmaktadır. Azuma 90'lı yıllarında sonunda yaptığı literatür çalışmasında AG uygulama alanlarını tıp, üretim ve tamir, görselleştirme, robot hareket planlama, eğlence ve askeri havacılık olarak belirlemiştir [3]. Ancak günümüze kadar hem AG uygulama alanları genişlemiş hem de geliştirilen uygulamaların kalitesi ve işlevselliği büyük ölçüde artmıştır. Karışık gerçeklik ve artırılmış gerçeklik konularında yapılan bilimsel çalışmaların tartışıldığı ve 1998 yılından itibaren düzenlenen ISMAR (The IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality)[1] sempozyumlarında sunulan çalışmaların incelendiğinde her geçen yıl daha farklı alanlarda AG uygulamalarının geliştirildiği ve mevcut alanlardaki uygulamaların gelişen teknolojiler ile birlikte farklılaştırıldığı görülebilmektedir. Arttırılmış gerçeklik coğrafi bilgi sistemleri ile birleştirilerek askeri uygulamalarda, fabrika kurulumu, montaj sıralaması, planlama,

[1] http://www.ismar.net/

bakım yönetimi gibi işletme uygulamalarında, turizm ve kültürel miras, müzecilik, sağlık, mimarlık, medya, spor vb. alanlarda ve mobil teknolojilere entegre edilebilmesinin mümkün olmasının ardından kişisel asistan uygulamalarında, iş birliği ve uzaktan bağlantı vb. konularda da sıklıkla kullanılmaktadır [18, 50, 61, 96-98].

Gelişen teknoloji sayesinde mobil cihazlarda çalışan uygulamalarda geliştirilmektedir. Özellikle cep telefonları, tablet bilgisayarlar ve hatta AG'nin entegre edilebileceği akıllı saatler ve gözlüklerde standart hale gelen GPS modülü ve yükseklik, yakınlık gibi sensörler sayesinde mobil AR uygulamaları daha kolay gerçekleştirilebilmektedir. Akıllı telefonlarda spor, oyunlar ve eğlenirken öğrenme, kültürel miras & turizm, tıp, eğitim, pazarlama olmak üzere beş alanda daha çok AG uygulamasının geliştirildiği ifade edilmektedir [99]. Her ne kadar araştırmacılar AG uygulamalarını sınıflandırmış olsalar da günümüzde bu sınıflandırma gittikçe daha bulanık bir hale gelmekte ve sınıflar iç içe girmektedir. Zira bir AG uygulaması, turistik geziniz esnasında antik bir kenti binlerce yıl önceki hali ile gösterebileceği gibi, tatilinizi daha keyifli bir şekilde geçirebilmeniz için size restoran ve otel önerileri sunabilir ve istediğiniz destinasyona ulaşabilmeniz için en kısa yolu görsel olarak size gösterebilir. Bu nedenle yakın gelecekte birden fazla uygulama alanını bünyesinde barındıran AG uygulamaları ile karşılaşmamız kaçınılmazdır.

2.5.1. Mimarlık ve inşaat uygulamaları

Mimarlık, 2 boyutlu ve 3 boyutlu görsel öğelerin, gelişmiş detaylı tasarımların ve modellerin oldukça fazla önem arz ettiği alanlardan birisidir. Önceleri el ile yapılan 2D çizimlerle ortaya konacak mimari eserler hayat bulmaya başlamış, bilgisayar ve çizim yapmayı mümkün kılan yazılımlarla birlikte 3 boyutlu modeller dijital olarak hayat bulmuştur. Ancak eş zamanlı olarak gerçek dünya üzerinde eserleri veya yapılacak değişiklikleri görmek veya 2D bir çizim anında 3D olarak sunabilmek AG teknolojisi ile mümkün olmuştur. Ayrıca mimarlık alanında uzun zamandır kullanılan coğrafi bilgi sistemlerinin temel dayanağı olan GPS modüllerine sahip AG teknolojilerinin ortaya çıkmaya başlamasıyla mimarlık çözümlerine yeni bir boyut kazandırılmıştır. AG teknolojileri sağladığı görsel zenginleştirme imkânı ile bu alanda gelecek vaat eden uygulamaların geliştirilmesine zemin hazırlamıştır [100].

Königsberger Vannucchi mimarlık firması tarafından 2010 yılında geliştirilen proje en büyük işaretçinin kullanıldığı AG uygulaması olarak Guinness rekorlar kitabına girmiştir. Şekil 2.26'da da görüleceği üzere gökdelenin inşa edileceği alana büyük bir işaretçi yerleştirilmiş ve dijital ortamda hazırlanan 3D model bir helikopter ile alınan kuşbakışı görüntü ile birleştirilerek müşterilere sunulmuştur.



Şekil 2.26. AG teknolojisi ile görselleştirilen Fibrasa Connection projesi [101]

ELK Grubu is AG çözümleri üreten Augment firmasının uygulama platformundan yararlanarak müşterilerine çizimler üzerinden evlerinin son halini görebilme imkanını sunmuştur. Prefabrik evler üreten firma AG teknolojilerini kullanarak müşterilerinin cep telefonları ve tabletleri üzerinden duvarları hareket ettirerek evlerinin iç tasarımlarını özelleştirebilmesini sağlamış ve müşterilerinin kendi ihtiyaçları doğrultusunda evlerini sipariş etmelerini mümkün kılmıştır (Şekil 2.27). Böylece müşteriler yeni evleri için alışveriş yaparken daha fazla bilgilendirilebilmektedirler.

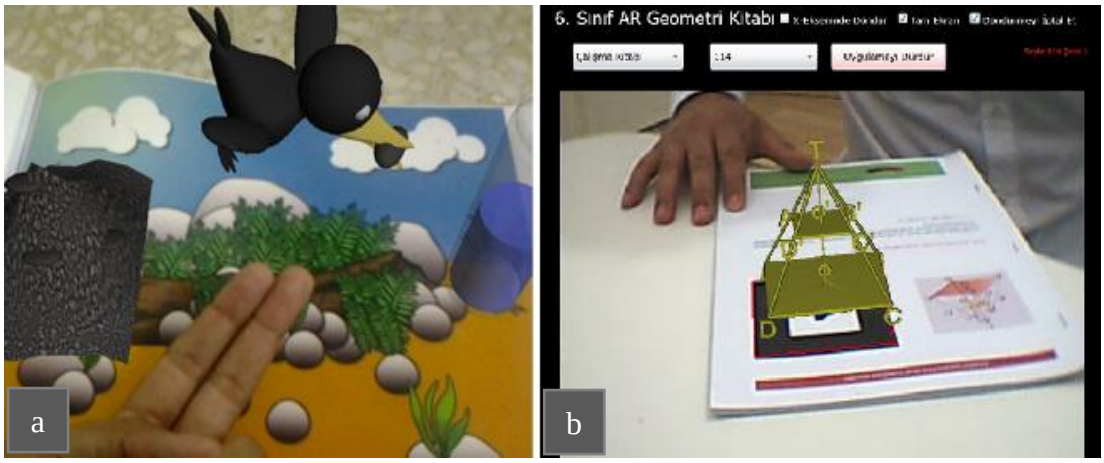


Şekil 2.27. ELK tarafından sunulan LOOFT-AR uygulaması [102]

2.5.2. Eğitim uygulamaları

Eğitim alanında da ortaya çıkan yeni teknolojiler denenmekte ve kendilerine uygulama alanı yaratmaktadırlar. Eğitimde AG uygulamaları da neredeyse AG'nin ortaya çıkışı kadar dayanmaktadır. Hatta literatürde eğitimde AG uygulamalarının oranı oldukça fazladır ve halen bu konuda çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda AG uygulamalarının bazı durumlarda, geleneksel yöntemlere göre öğrencilerin daha etkili öğrenmelerini sağladıkları ve bilgi birikimini arttırdıkları gösterilmiştir.

Eğitim uygulamalarına Billinghurst vd. tarafından 2001 yılında yayınlanan "The Magic Book" (Büyülü Kitap) başlıklı çalışma temel oluşturmuştur [103]. Büyülü kitap uygulamalarının geliştirilmesinin kolaylığı ve uygulamadan elde edilen faydanın yüksek olması nedeniyle birçok AG destekli kitap ortaya çıkmıştır. Normal okuyucular normal bir kitap okuyormuş gibi hissederlerken; AG için üretilmiş ekran, gözlük, vb. teknolojileri kullanan okuyucular ise 3D şekiller, animasyonlar, videolar ile zenginleştirilmiş içeriklerle karşılaşmaktadırlar [103-107]. Eğitim uygulamaları genellikle işaretçi ve resim tabanlı olup, ilgili eğitim içeriklerinin işaretçilerle ve resimlerle eşleştirilmesi prensibi ile çalışmaktadırlar (Şekil 2.28).

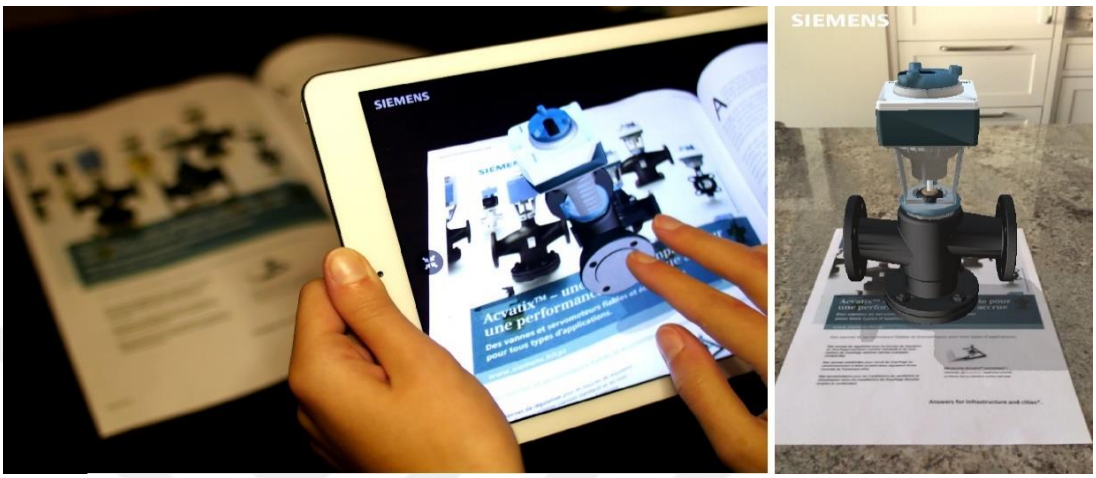


Şekil 2.28. (a) Mobil AG Kitapta animasyon, (b) ARGE3D arayüzü ve AG görüntüsü

2.5.3. Pazarlama ve reklamcılık uygulamaları

Özellikle mobil cihazların yaygın hale gelmesiyle birlikte AG pazarlama ve reklamcılık alanlarında da artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Dijital ve gerçek dünyanın birleştirilmesi ile markaların ve ürünlerin daha dikkat çekici olması ve müşterilerle daha iyi etkileşim kurulması sağlanmaktadır.

Eğitimde kullanılan Sihirli kitaplar gibi tanıtım broşürlerine yerleştirilen işaretçiler veya resimler yardımıyla canlı tanıtım broşürleri geliştirilebilmekte[1] (Şekil 2.29) ve reklam amacıyla kullanılan billboardlar mobil cihazlara yüklenen uygulamalar ile izlendiğinde canlanmaktadır.



Şekil 2.29. Siemens firması tarafından geliştirilen AG destekli broşür [108]

Walgreens Pharmacy, tarafından geliştirilen AG uygulamasında müşterilere alışveriş esnasında kullanacakları cihazlar verilerek gerçek ürünlerin dijital öğelerle birleştirilerek müşterilere geçtikleri bölgedeki ürünler hakkında bilgiler ve yüksek indirimler sunulmaktadır (Şekil 2.30a). Ayrıca bir ürünün mağaza içerisinde nerede olduğu müşterilere gösterilebilmektedir. IKEA ise bunu bir adım öteye taşıyarak ürünlerini dijital ve üç boyutlu olarak tüketicilerin evlerine getirmekte ve mobilyaları satın almadan ev içerisinde görsel olarak test etme imkânı sunmaktadır (Şekil 2.30b).



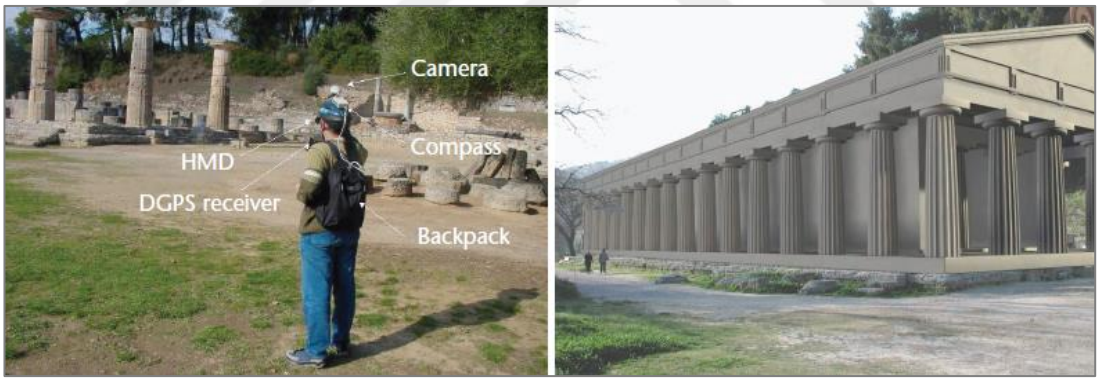
Şekil 2.30. (a)Walgreens Pharmacy [109], (b)IKEA [110] AG pazarlama uygulamaları

[1] Siemens tarafından hazırlanan tanıtım broşürü https://www.youtube.com/watch?v=XrQ4-V9TmGk

2.5.4. Turizm ve kültürel miras uygulamaları

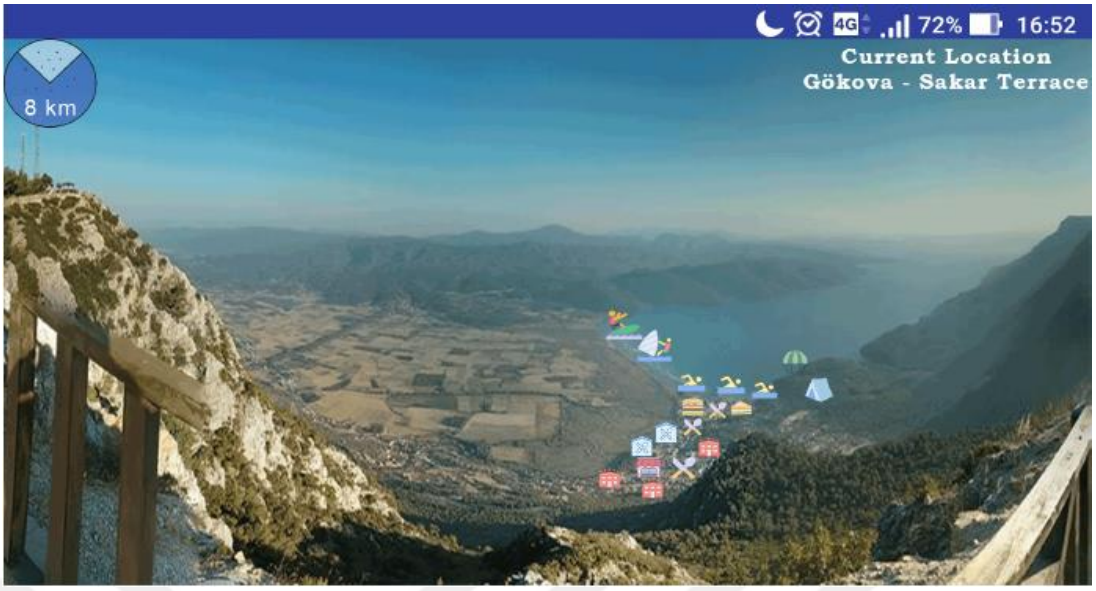
Günümüzde birçok alanda işaretçi tabanlı AG uygulamaları ağırlıkta iken, turizm alanında ise GPS, pusula gibi geo-sensörlerinin kullanıldığı AG uygulamaları gerçekleştirilmektedir. AG ile tatilcilerin, isteklerine uygun bir rota planlamaları, oteller, restoranlar ve destinasyonlar hakkında bilgi sahibi olmaları ve hatta tesislerin ön izlemelerine ulaşmaları mümkün hale gelmiştir. AG sistemleri turistik destinasyonların nasıl bir görünüme ve tesislerin ortama sahip oldukları konusunda fikirler verdiği gibi, müzeler ve tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilen uygulamalarla tarihe yolculuk yapılabilmektedir.

Vlahakis vd. tarafından 2002 yılında Olimpos arkeolojik alanı üzerine yapılan Archeoguide isimli çalışma, turizm ve kültürel miras üzerine yapılan ilk uygulamalardan birisidir. Sırt çantasında taşınan bir bilgisayara bağlı bir kamera ile Hera tapınağının görüntüsü alınmış ve dijital olarak üretilen tapınağın orijinal hali birleştirilerek kullanıcıya sunulmuştur (Şekil 2.31).



Şekil 2.31. Archeoguide uygulaması ile Hera tapınağının dijital gösterimi [111]

Bir başka turizm uygulamasında ise konum verileri ve görüntü işleme teknikleri yardımıyla turistik bir bölgede yer alan önemli merkezler, turistik yerler, restoranlar, oteller ve gezi yerleri yerli ve yabancı turistlere tanıtılması amaçlanmaktadır. Mobil olarak tasarlanan uygulamada, cihaz kamerasının gördüğü açı içerisinde kalan tesislerdeki yoğunluk, fiyat bilgileri ve hatta sosyal medya verileri ile yorumlar sunulmuştur [112]. Benzer bir şekilde Londra Müzesi, Londra şehrine ait tarihi fotoğrafları günümüz sokakları ile birleştirerek geliştirdikleri uygulama ile şehri bir müze haline getirmiştir. Mobil AG uygulaması ile caddelerin, binaların ve hatta Thames nehrinin tarihi görüntüleri gerçek dünya üzerinde izlenebilmektedir [113].



Şekil 2.32. Gökova körfezi için geliştirilen AG uygulaması: GökovAR [112]

2.5.5. Spor uygulamaları

Spor da AG uygulamalarının geliştirildiği temel alanlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Spor alanında genellikle sporcu eğitimi ve sporcu performanslarının izlenmesi amacıyla uygulamalar geliştirilmiş olmakla birlikte müsabakaların yayınlanması aşamasında da medya kuruluşları ve yayıncılar AG teknolojilerine başvurmaktadırlar. Sporun doğası gereği bu aladan geliştirilen AG uygulamalarının büyük bir çoğunluğu herhangi bir teknolojik ekipmanın kullanılmadığı uzamsal AG uygulamaları şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Örneğin tırmanma duvarlarının daha eğlenceli ve eğitimin daha etkili olması amacıyla geliştirilen "Artırılmış Tırmanma" uygulaması (Şekil 2.20) spor alanında geliştirilmiş uzamsal AG uygulamalarına bir örnektir. Çalışmada, tırmanma duvarının bulunduğu alan izlenmiş ve toplanan görüntüler işlenmiştir; Sporcuların vücut hareketlerini takip ederek sporcuların bir sonraki hareketi ve rota bilgisi projektör aracılığıyla tekrar duvara yansıtılmıştır [57].

Bir diğer örnekte ise spor koçlarının sporcuları takip etmesi gereken branşlarda sürekli koç gözetiminde çalışma gerekliliğini ortadan kaldırarak okçuluk sporu için sanal koçluk görevi üstlenen bir AG uygulaması önerilmiştir. Sporcuya ve kullanılan yay kanatlarına ait farklı açılardan alınan görüntüler işlenerek, sonuçlar sporcunun kullandığı AG ekranına aktarılabilir. Böylece sporcunun, bir koç olmadan doğru yay çekme hareketini yapması ve duruşunu kontrol etmesi mümkün olmaktadır [97].

2.5.6. Oyun ve eğlence uygulamaları

Her ne kadar sanal gerçeklik oyun ve eğlence amaçlı kullanımı daha yaygın olsa da artırılmış gerçekli de oyunlarda ve eğlence amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle eğitim uygulamaları oyunlaştırılarak öğrencilerin kendilerine sunulan içerikleri daha kolay öğrenmeleri sağlanmaktadır. Günümüzde AG oyunları genellikle eski ve köklü oyunların sanal ortamlardan gerçek hayatın içerisine dahil edilmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır. ARQuake, ünlü nişancı oyunu olan Quake'i artırılmış gerçeklik versiyonu olarak ilk çıkan AG oyunlarından birisidir [25, 114]. Başa takılan bir gözlük ve ateş etmek ve etkileşim için kullanılan plastik temsili bir tabanca ile gerçek dünya içerisinde beliren dijital rakiplerle mücadele edilmektedir (Şekil 2.33). Son yılların popüler uygulaması Pokemon Go oyununda ise GPS ve pusula modüllerini kullanılarak tüm şehir bir oyun alanı haline getirilmekte ve oyuncuları gün içerisinde yürüyüş yapılan daha aktif bir yaşama doğru yöneltmektedir [115].

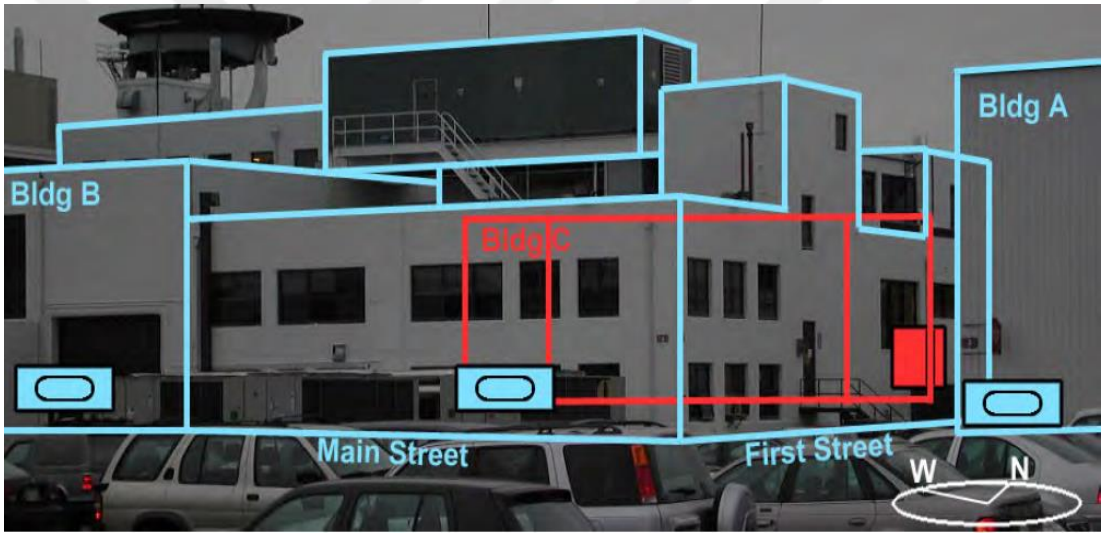


Şekil 2.33. ARQuake oyun uygulaması [114]

2.5.7. Askeri uygulamalar

Diğer bütün teknolojik gelişmelerde olduğu gibi AG teknolojilerine de öncelikle askeri alanda kullanım için araştırma fonları sağlanmıştır. Sutherland tarafından 1960'larda geliştirilen ve ilk başa takılabilen AG sistemi olarak kabul edilen "Demokles'in Kılıcı" da A.B.D. Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) tarafından desteklenmiştir [16].

Son yıllarda askeri uygulamalar geliştiren birçok çalışma grubu ve işletme bulunmaktadır. Askeri ihtiyaçları yüksek karşılama kapasitesi olan AG sistemlerinin geliştirilmesi desteklenmeye devam edilmektedir [116-118]. A.B.D. Deniz Araştırmaları Laboratuvarı (U.S. Naval Research Laboratory) araştırmacıları, 5581 kodlu "Sanal Çevreler ve Görselleştirme" projesi kapsamında derinlik algılama, durum farkındalığı (Şekil 2.34), bilgi filtreleme, iş birliği, entegre eğitim (Şekil 2.35), vb. konular üzerinde "Muharebe Alanı Artırılmış Gerçeklik Sistemleri" (BARS-Battlefield Augmented Reality Systems) üzerinde çalışmalar yapmaktadırlar [116]. Şekil 2.35'de örnek olarak verilen entegre eğitim uygulaması eğlence amaçlı geliştirilen ARQuake [25, 114] sistemi ne benzemesine rağmen, içerik olarak askeri amaçlarla donatılmıştır.



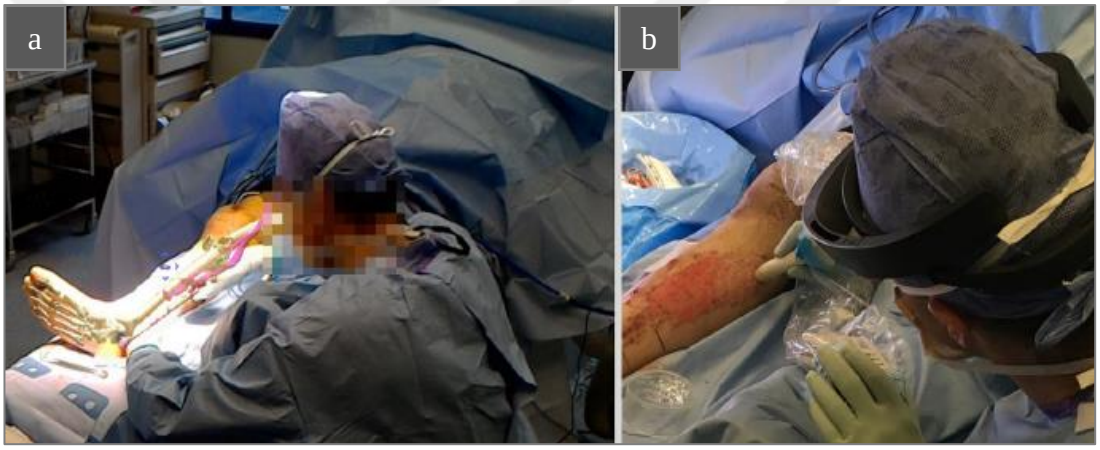
Şekil 2.34. BARS sistemi ile çevredeki binaların işaretlenmesi [117]



Şekil 2.35. Entegre eğitim uygulaması [117]

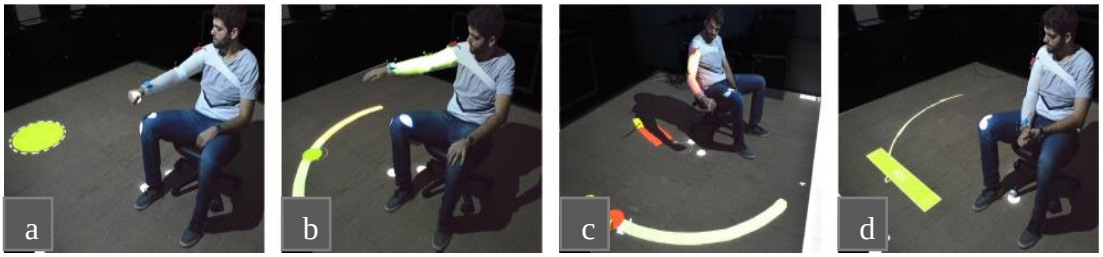
2.5.8. Medikal uygulamalar

Medikal ve sağlık alanında planlama, ameliyat, eğitim, alıştırma, terapi, izleme, görüntüleme vb. birçok konuda AG uygulamalarından yararlanılmaktadır. Özellikle cerrahların ellerin serbest kalmasının ve hastaların tedavi sürecinde donanımlar tarafından rahatsız edilmemesi gerekliliği nedeniyle uzamsal veya başa takılan AG teknolojileri bu alanda daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Microsoft Hololens kullanılarak yapılan bir çalışmada, Koroner BT Anjiyografi ile elde edilen görüntüler artırılmış gerçeklik ile hayata geçirilmiş ve cerrahın, hastanın cildi altındaki damarları görmesi sağlanarak tek bir kesi yapılmadan giriş yapılacak noktalar doğrudan belirlenebilmiştir (Şekil 2.36).



Şekil 2.36. (a) Dijital tarama görüntüleri (b) Damara girilecek nokta kontrolü [119]

SleeveAR adı verilen uzamsal bir AG uygulamasında (Şekil 2.36) ise, rehabilitasyona ihtiyaç duyan hastaların kollarına bağlanan kızılötesi işaretçiler, hareket algılayıcı kameralar ve projeksiyon cihazı kullanılarak tedavi sürecinde yapılacak hareketler odanın tabanına yansıtılmış ve geliştirilen sistem fizik tedavi amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 2.37. SleeveAR, rehabilitasyon tedavisinde kullanıcı geri bildirimi sağlamak için uzamsal projeksiyon tabanlı AG uygulaması. (a) başlangıç pozisyonu, (b) orta performans, (c) kol geri bildirimi. (d) ilerleme raporu [120].

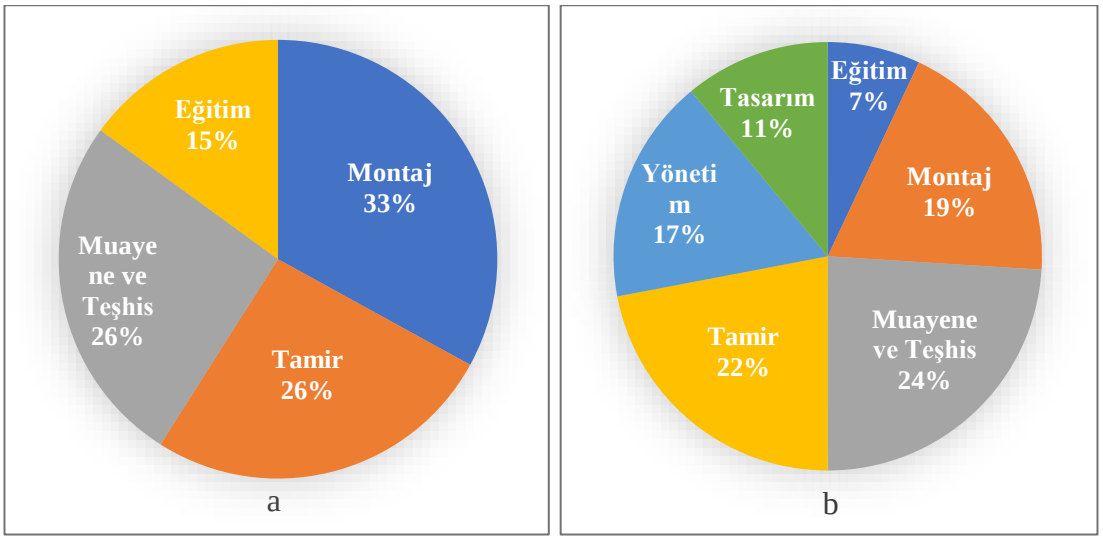
2.6. Endüstride Artırılmış Gerçeklik Uygulamaları

Son yıllarda üreticiler ve araştırmacılar artırılmış gerçekliğin endüstriyel alanlarda kullanılmasının sağlayacağı katkıların daha fazla farkına varmaya başlamışlardır. AG'nin endüstride kullanımı alana dair çalışmaların erken dönemlerinde ortaya çıkmaya başlamış olmasına rağmen, gelişen teknoloji ile birlikte uygulamalar sürekli gelişmekte ve değişmektedirler. Yapılan çalışmaların büyük ölçüde kullanılan görüntüleme teknolojisi ve takip yöntemi ile birlikte endüstriyel uygulama alanına bağlı olarak özelleşmeleri nedeniyle, AG uygulamalarının geliştirilmesinde kullanılabilecek standartlardan henüz bahsetmek mümkün değildir. Syberfeldt vd. AG'nin geleceğin akıllı fabrikalarının vazgeçilmez bir parçası olacağını ve umut verici olan bu alandan tam olarak yararlanılabilmesi için yapılması gereken birçok araştırma olduğunun altınız çizmişlerdir [121].

Günümüzde AR çok çeşitli alanlarla kullanılmakla birlikte işletmelerde de yaygın olarak kullanılmaya ve çeşitli uygulamalar geliştirilmeye başlanmıştır. Genel olarak üretim, planlama, kalite kontrol, muayene, güvenlik, bakım ve uzaktan yardım, lojistik, tasarım, eğitim ve simülasyon alanlarında işletme uygulamaları geliştirilmektedir [50, 122-128]. Ayrıca bu alanlarda yapılan çalışmaların incelendiği, teknik açıdan değerlendirilerek kategorize edildiği literatür çalışmaları da yapılmıştır. Bu çalışmalarla özellikle üretim süreçleri ve işletmeler için geliştirilen AG uygulamalarının hangi alanda daha fazla yoğunlaştığı, araştırma trendlerinin yönü ve hızı belirlenmeye çalışılmıştır [125-128]. Dini ve Mura inceledikleri çalışmalara dayanarak, AG'nin sektörel olarak demiryolu (%3), havacılık (%29), otomotiv (%24), endüstri kuruluşları (%24), tüketim malları (%6), mimari (%12) ve askeri (%3) alanlarında kullanıldığını ifade etmiş; uygulamaların ise bakım (%54), muayene (%24), eğitim (%11), kurulum (%8) ve güvenlik (%3) şeklinde dağıldığını ifade etmişlerdir [125]. Bottani ve Vignali endüstriyel AG uygulamalarını 23 farklı alana bölerek yaptıkları literatür çalışmasında en çok pay alan uygulama alanlarının montaj (%15,09), tamir (%14,65), eğitim (%12,5), tasarım (%7,33), güvenlik (%6,03), uzaktan ve işbirlikçi bakım (%5,17) ile robotik (%5,60) olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmaların sektörlere göre payları ise; laboratuvar ve deneysel uygulamalar (%46,55) başta olmak üzere üretim ve makine araçları (%17,24), otomotiv (%6,32) ve mimarlık ve mühendislik uygulamaları (%6.32) şeklinde olduğu belirtilmiştir [128].

Literatür taramalarında ulaşılan sektörel dağılım oranları incelendiğinde en çok pay alan alanların montaj ve tamir olduğu ve ayrıca otomotiv ve havacılık alanlarında yapılan çalışmaların da montaj, tamir ve muayene uygulamaları olduğu görülmektedir. Endüstriyel bakım süreçleri adı altında toplanabilecek AG uygulamalarının, insan performansının artırılması, bakım operasyonlarının yönetiminin iyileştirilmesi ve yönetimsel karar vermenin desteklenmesi konularında iyi sonuçlar vermesi bu alana duyulan ilginin nedeni olarak görülmektedir [129]. Öyle ki endüstriyel AG uygulamaları araştırmalarında bakım süreçlerine olan ilgi nedeniyle sadece bakım alanına odaklanmış literatür tarama çalışmaları da yapılmıştır [129-131].

Palmarini vd. sadece bakım süreçlerine dair literatürde yer alan AG uygulamalarını incelenmiş ve bakım uygulamalarının montaj (%33), tamir (%26), muayene ve teşhis (%26) ve son olarak bakım süreçleri ile ilgili eğitim (%15) şeklinde alt alanlara dağıldığını ifade etmiştir [129]. Del Amo vd. ise bakım süreçlerine bakım yönetimi ve tasarım başlıklarını da ekleyerek yaptıkları çalışmalarında AG bakım uygulamalarının muayene ve teşhis (%24), tamir (%2), montaj (%19), yönetim (%17), tasarım (%11), eğitim (%7) şeklinde bir dağılım sergilediğini belirtmişlerdir [131]. Öte yandan del Amo vd. çalışmalarında belirtilen tasarım ile eğitim (%18) ve yönetim ile montaj (%26) başlıkları birlikte değerlendirilecek olursa sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil 2.38'de her iki çalışmada elde edilen bulgular görsel olarak ayrıca sunulmuştur.

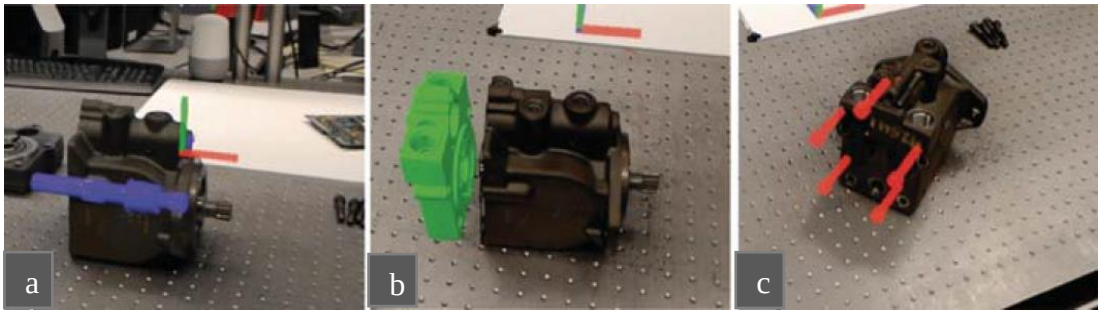


Şekil 2.38. Literatür çalışmalarında AG bakım uygulamalarının alt alanlara dağılımı (a) Palmarini vd. [129]; (b) del Amo vd. [131]

2.6.1. Endüstriyel AG uygulamalarına örnekler

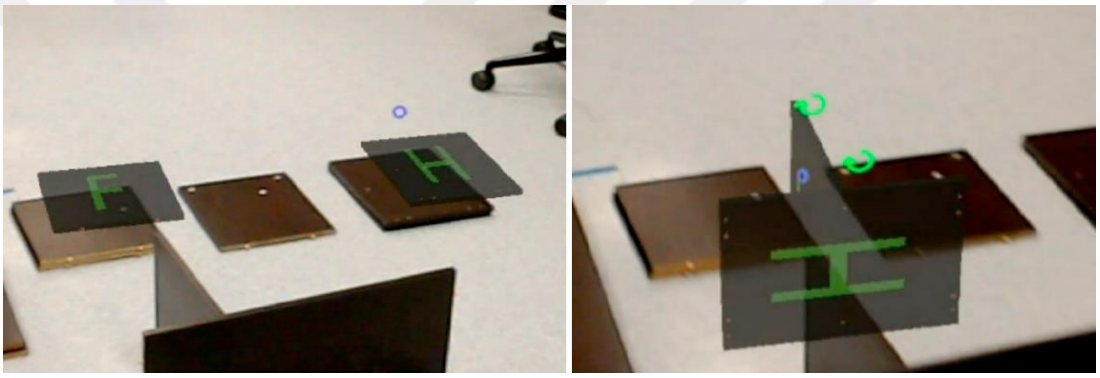
Endüstriyel AG uygulamaları oldukça eskiye dayanmakla birlikte gelişen teknolojilerle birlikte sürekli farklılaşmaya ve kendine yeni uygulama alanları açmaya devam etmektedir. Tablo 2.1'de de belirtildiği gibi teknolojik gelişme ile bağlantılı olarak AG donanımları kullanım yerine göre; başa takılan, el ile tutulan ve mekânsal ve görüntüleme teknolojisine göre ise; optik görme, video görme ve projeksiyon ile doğrudan görme olarak sınıflandırılmışlardır. Literatürde her donanım türü ile yapılmış endüstriyel AG uygulamaları bulunmakla birlikte, her donanımın diğerlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Özellikle son yıllarda başa takılan sistemler mobil olma özelliği ile ortaya çıkarken, hareket edilmesi gereken endüstri uygulamalarında tercih edilmektedirler. El ile tutulan donanımlardan kasıt ise cep telefonu, tablet, vb. cihazlardır. Bu teknolojiler üzerinde kurgulanan AG uygulamalarının en büyük avantajı kolay ulaşılabilir ve maliyetlerinin düşük olmasıdır. Mekânsal uygulamalarda ise kullanıcıların herhangi bir AG donanımı ile temas etmiyor olmaları bu sistemleri kullanışlı kılmaktadır. Ayrıca başa takılan ve mekânsal sistemlerde ellerin serbest olması oldukça fazla avantaj sağlamaktadır.

2010 yılında itibaren başa takılabilen gözlük teknolojilerinde yaşanan gelişmelerle son yıllarda başa takılan teknolojiler ile farklı alanlarda faydalı endüstriyel uygulamalar geliştirilebilmektedir. Başa takılan AG sistemleri optik görme ve video görme olarak ikiye ayrılmaktadır. Optik görme teknolojisine sahip Microsoft Hololens gözlüğü kullanılarak yapılan bir çalışmada, piston motor montajının üç boyutlu dijital görseller ile adım adım yapılması sağlanmıştır (Şekil 2.39). Çalışmada yapılan deneye katılan kullanıcılar, montaj işlemini 6-8 dakika arasında tamamlamışlar ve hem geliştirilen uygulama hem de görüntüleme teknolojisi için olumlu görüşler bildirmişlerdir [132].



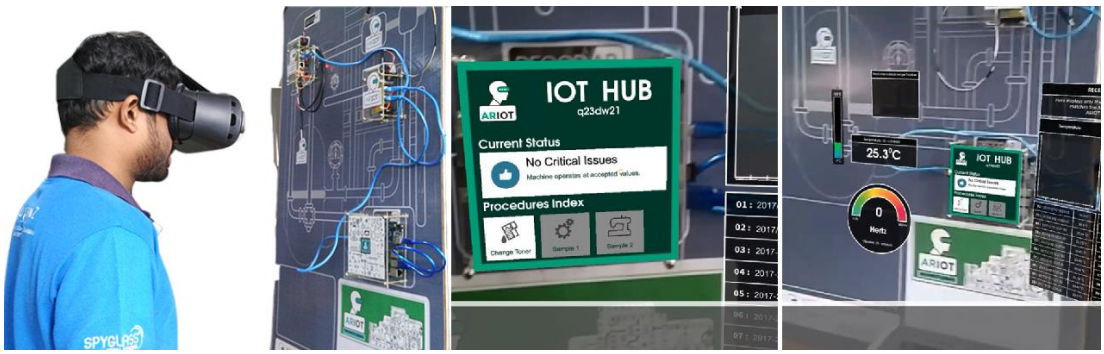
Şekil 2.39. (a-c) 3D görseller kullanılarak gerçekleştirilen montajın adımları [132]

Başka bir çalışmada ise modüler mobilyaların montaj işlemlerinde kullanılmak üzere deneysel bir AG uygulaması geliştirilmiş (Şekil 2.40) ve Hololens kullanılarak daha önce hiç modüler mobilya montajı yapmamış kullanıcılar ile geliştirilen uygulama basit ve zor montaj senaryoları ile test edilmiştir. Deneyler sonucunda AG teknolojisinin basit görevlerde AG kullanılmadan yapılan montaj işlemlerine göre bir avantaj sağlamadığı ancak zor montaj görevlerinde ise hata sayısını %50'den daha fazla azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak deney sonrası yapılan anketlerle Hololens'in katılımcıların bilişsel yükünü artırdığı görülmüştür ve gelecek çalışmalarda bilişsel yükün azaltılması kullanılabilir arayüzlerin tasarlanması üzerine odaklanılması gerektiğinin altı çizilmiştir. [133].



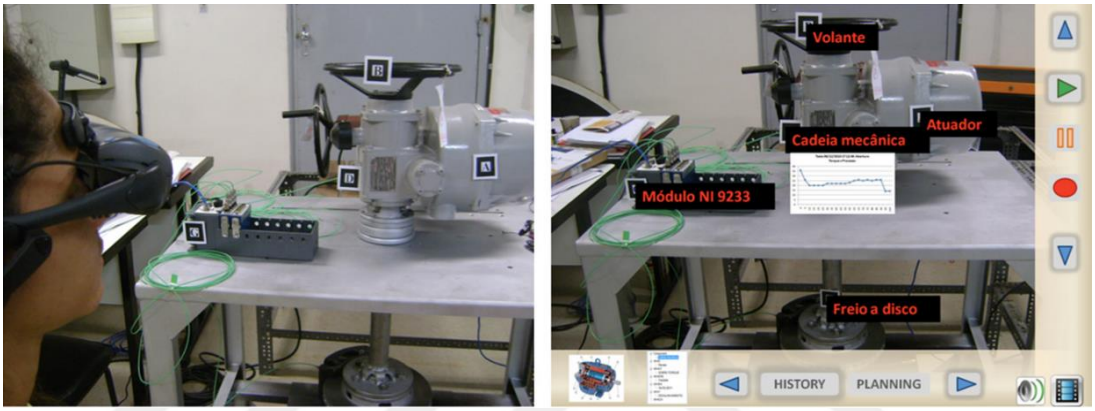
Şekil 2.40. Modüler mobilya parçalarının birleştirilmesinde AG'nin kullanımı [133]

Başa takılan ve video görme teknolojisi ne sahip bir gözlük kullanılarak bakım ve onarım esnasında makinalara ait sıcaklık, frekans, arıza bilgisi gibi bilgilerin eşzamanlı olarak bakım personeline aktarılması sağlanmıştır [134]. Önerilen yöntem ile nesnelerin interneti modülleri aracılığıyla özellikle kontrol ve muayene işlemleri esnasında verilerin görselleştirilerek sunulması, bakım personellerinin doğru zamanda doğru müdahalelerde bulunmasını mümkün kılmaktadır. (Şekil 2.41)



Şekil 2.41. AG ile verilerin görselleştirilmesi, kontrol ve muayene işlemleri [134]

Benzer bir veri görselleştirme amacı taşıyan çalışmada ise yine video görme teknolojisi içeren gözlükler ile işaretçi tabanlı bir AG uygulaması tasarlanmış ve işaretçiler üzerinde makinaya ait parça bilgilerinin görüntülenmesi sağlanmıştır. Çalışmada kullanıcıların sistem ile rahat etkileşime geçmelerini sağlamak amacıyla bir arayüz tasarımı da yapılmıştır (Şekil 2.42). Ancak arayüzün kullanılabilirliği ve görünürlüğünün profesyonel bakım uzmanları tarafından yeterli göründüğü belirtilmiş olsa da arayüzün analizi için kullanılan herhangi bir metot veya yöntem belirtilmemiştir [135].



Şekil 2.42. İşaretçi tabanlı başa takılan video-görme AG uygulaması [135]

Başa takılabilen cihazlar dışında el ile tutulan tablet bilgisayarlar ve akıllı telefonlarda AG uygulamalarında kullanılmaktadır. Flatt vd. geleceğin zeki endüstrilerinde çalışanlara bakım ve operasyon esnasında olabildiğince fazla bilgi sağlamanın önemli olduğunu vurgulamışlar ve tablet bilgisayar üzerinde çalışan bir AG uygulaması geliştirmişlerdir (Şekil 2.43).



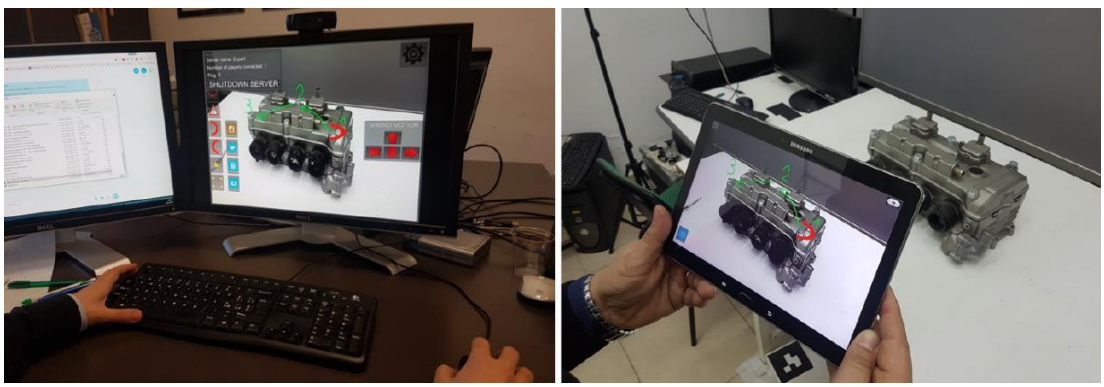
Şekil 2.43. Tablet PC üzerinde verilerinin görselleştirilmesi [136]

MARTA [137] ise Volkswagen otomotiv firması tarafından geliştirilmiş, bir tablet bilgisayar üzerinde çalışan ve kullanıcılara karmaşık bakım prosedürlerini adım adım yönlendiren bir mobil servis bilgi sistemidir. Model tabanlı takip ile çalışan uygulamada ihtiyaç durumuna göre ilgili 3D görseller cihaza indirilerek kullanıcılara sunulmaktadır (Şekil 2.44).



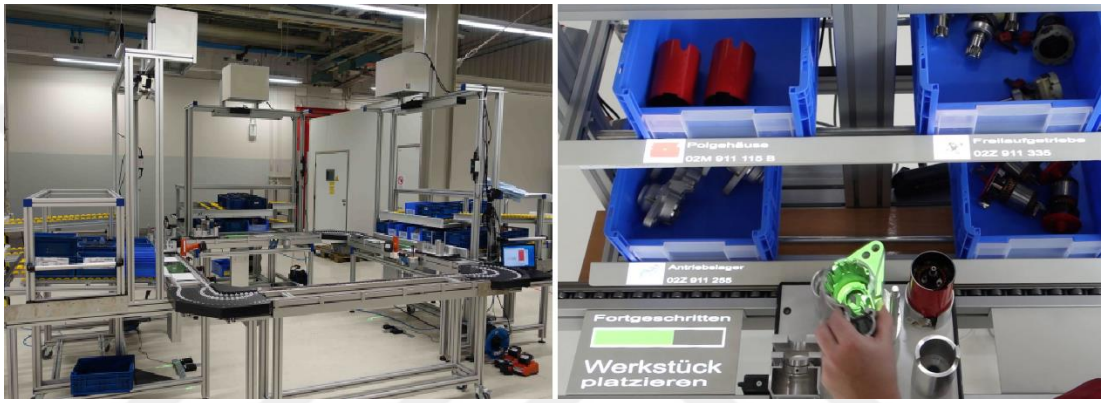
Şekil 2.44. MARTA ile Tablet PC üzerinde verilerinin görselleştirilmesi [137]

El ile tutulan mobil cihazlar dışında bilgisayar monitörleri de video-görme AG sistemlerinde kullanılmaktadırlar. Özellikle sahada görev yapan çalışanlar ile uzaktan destek sağlayan uzmanların buluşturulduğu uzaktan bakım uygulamalarında başa takılan, el ile tutulan ve mekânsal görüntüleme yöntemleri birlikte kullanılabilmektedir (Şekil 2.45). Bakımı yapacak olan operatör, tablet ile sağ üst köşede bulunan düğme yardımıyla ortamın fotoğrafını çekmekte ve fotoğraf masaüstü bilgisayar başında oturan uzman bakım personeline aktarılmaktadır. Gerekli öneri ve işaretlemeleri resim üzerinde yapan uzman, zenginleştirilmiş resmi tekrar sahada çalışan operatöre göndermektedir. Resim ayrıca işaretçi görevi gördüğünden görsel yönlendirmeler bakım yapılacak nesne üzerinde oluşmaktadır [138].



Şekil 2.45. Mönitör ve tablet kullanılan uzaktan bakım AG uygulaması [138]

Video görme sağlayan monitörler dışında projeksiyon cihazlarının da endüstriyel uygulamalarda kullanıldığına rastlanmaktadır. motionEAP, mekânsal projeksiyonlu doğrudan görme AG sistemlerine güzel bir örnektir [139]. Çalışmada işçilerin başlarının üstüne projeksiyon cihazları yerleştirilmiş (Şekil 2.46a) ve hareket tanıma yöntemleri ile ortam algılanarak üretilen dijital içerikler gerçek nesnelerin üzerine yansıtılmıştır (Şekil 2.46b). Projeksiyonlu doğrudan görme sistemleri kullanılarak geliştirilen mekânsal AG uygulamalarının en büyük avantajı, eller serbest olmasının yanı sıra fazladan hiçbir cihazın kullanılmıyor olması olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.46. motionEAP mekânsal projeksiyonlu görme AG sistemi [139]

Bir diğer çalışmada ise bilgisayar sayımlı yönetim (CNC) makinalarının parçaları işlemesi esnasında yapılan işin kolay takip edilebilmesi amacıyla mekânsal optik görme AG sistemi kullanmıştır. CNC makinasının koruma camı önüne yerleştirilen yarı saydam bir ekrana yansıtılan projeksiyon görüntüleri sayesinde işlenen parçayı izleyen operatörlerin aynı zamanda işlenen parçaya dair hız bilgisi, yapılan işlemler ve yapılacak işlemler gibi bilgileri metin şeklinde görsel olarak almalarını sağlanmıştır (Şekil 2.47).



Şekil 2.47. Üretimde mekânsal optik görme AG uygulaması [140]

2.6.2. Bakım ve montaj AG uygulamalarının sistematik haritası

Literatürde AG'nin bakım alanına uygulamalarının irdelendiği yakın zamanda yapılmış literatür taramaları olsa da bu çalışmalarda gelişen AG teknolojileri daha detaylı sınıflandırılmamıştır. del Amo vd. tarafından 2018 yılında yapılan literatür çalışmasında AG görüntüleme teknolojileri irdelenmemiş; yine 2018 yılında Palmarini vd. tarafından yapılan literatür çalışmasında ise AG görüntüleme teknolojilerini, başa takılan (HMD), el ile tutulan (HHD), masaüstü bilgisayarlar, projektörler, dokunsal (haptik) sistemler, ve sensörler olarak ele almışlardır. Ancak, AG teknolojilerinde yaşanan hızlı değişim söz konusu teknolojileri daha detaylı bir şekilde incelemeyi gerektirmektedir. Bu nedenle çalışmada endüstriyel bakım uygulamalarında AG teknolojisinin yönünü tayin etmek için sistematik haritalama yaklaşımı kullanılmıştır. Sistematik haritalama taramaları mevcut çalışmalara genel bir bakış sağlamakta ve ilgili alandaki literatür hakkında daha iyi bir fikir edinmek için kullanılmaktadır [141]. Sistematik haritalama farklı literatür tarama yöntemlerinden birisidir ve bu yöntem ile literatür sistematik bir yaklaşım ile araştırılmaktadır. Ancak sistematik literatür taramalarından farklı olarak makaleler kalite kriterlerine göre hariç tutulmamaktadır. Zira sistematik haritalandırma taramalarında odaklanılan sonuçtan ziyade kullanılan yöntemler ve araçlardır [142]. Grant ve Booth 14 farklı literatür tarama yöntemini irdeledikleri çalışmalarında sistematik haritalama çalışmasını (mapping review/systematic map) araştırma literatüründeki boşlukları belirleyerek daha fazla inceleme ve/veya birincil araştırmayı yürütmek için mevcut literatürün haritalandırılması ve sınıflandırılması olarak tanımlamışlardır [143].

2.6.2.1. Sistematik haritalamanın metodu

Sistematik haritalandırma çalışması adı üzerinde sistematik bir yaklaşım gerektirdiğinden bu çalışmada sırasıyla arama (Search), değerlendirme (AppraisaL), sentezleme (Synthesis) ve analiz (Analysis) aşamalarından oluşan SALSA çerçevesi kullanılmıştır [131, 143]. SALSA çerçevesi ve aşamaları Tablo 2.2'de detaylı olarak verilmiştir. SALSA çerçevesinde belirtilen aşamaları başlamadan önce literatür taraması kapsamının, araştırma sorularının ve hangi veri tabanlarında arama yapılacağının belirlenmesi gerekmektedir. AG'nin endüstriyel uygulamalarının irdelendiği literatür çalışmalarında [125-128] en büyük payın bakım uygulamaları ana

başlığı altında tamir, montaj, eğitim, muayene, teşhis, kontrol işlemlerine ait olmalarından dolayı çalışmanın kapsamı AG teknolojilerinin endüstriyel bakım süreçleri olarak belirlenmiştir. Yapılacak sistematik haritalama çalışması ile yeni ortaya çıkan AG teknolojilerinin yıllar içerisinde hangi alanlarda ve ne yoğunlukta kullanıldıklarının tespit edilmesi ve çalışmaların yönünün tayin edilmesi amaçlanmıştır. Yapılacak tarama sonrasında özellikle Bakım süreci için geliştirilen AG uygulamalarının AG görme teknolojileri çevresinde nasıl şekillendiği diğer teknik detaylarla birlikte değerlendirilerek haritalandırılmıştır.

Tablo 2.2. SALSA çerçevesinin adımları ve görevler

	Aşama	**Görevler**
SALSA	Arama	Arama cümlelerinin/kısıtların belirlenmesi ve seçilmiş veri tabanlarında çalışmaların aranması.
	Değerlendirme	Araştırmanın kriterlerine göre çalışmaların dahil edilmesi ve çıkartılması.
	Sentezleme	Çalışmaların incelenmesi ve elde edilmek istenilen verilerin çıkartılarak kaydedilmesi.
	Analiz	Çalışmaların nicel ve nitel olarak analizinin yapılması, sonuçların çıkartılması ve literatüre dair eksik/önemli hususların belirlenmesi.

Literatür taraması AG çalışmalarının yer aldığı ve özellikle mühendislik uygulamalarına yer veren akademik veri tabanlarında yapılacaktır. Taramanın yapılacağı veri tabanları kapsadıkları bilimsel dergiler ve yayınlar dikkate alınarak Scopus, Science Direct, IEEE, ACM Library, Wiley Online Library, Web of Science, JSTOR, Emerald ve Taylor & Francis olarak belirlenmiştir.

2.6.2.2. Sistematik haritalama çalışmasında SALSA adımlarının uygulanması

Arama işlemlerinin yapılabilmesi için metot kısmında bahsedilen amaçlara uygun olarak bir arama cümlesinin belirlenmesi gereklidir. Ayrıca sistematik haritalama çalışmalarında genel bir çerçeve çizilerek literatürün yönünün belirlenmesi amaçlandığından daha genel bir arama cümlesinin kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür ve artırılmış gerçeklik, bakım ve montaj kelimelerinin (“augmented reality” AND (maintenance OR assembly)) şeklinde bir kombinasyonu kullanılmıştır.

Montaj (assembly) kavramı, bakım ana başlığı altında olmasına rağmen mevcut literatür çalışmalarında oldukça fazla oranda yer bulması nedeniyle arama cümlesine ayrıca eklenmiştir. Arama işlemi JSTOR ile Taylor & Francis veritabanları dışında özet, başlık ve anahtar kelimeler içerisinde gerçekleştirilmiştir. Arama işlemleri sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Arama yapılan veritabanları ve arama kapsamı ve sonuçlar

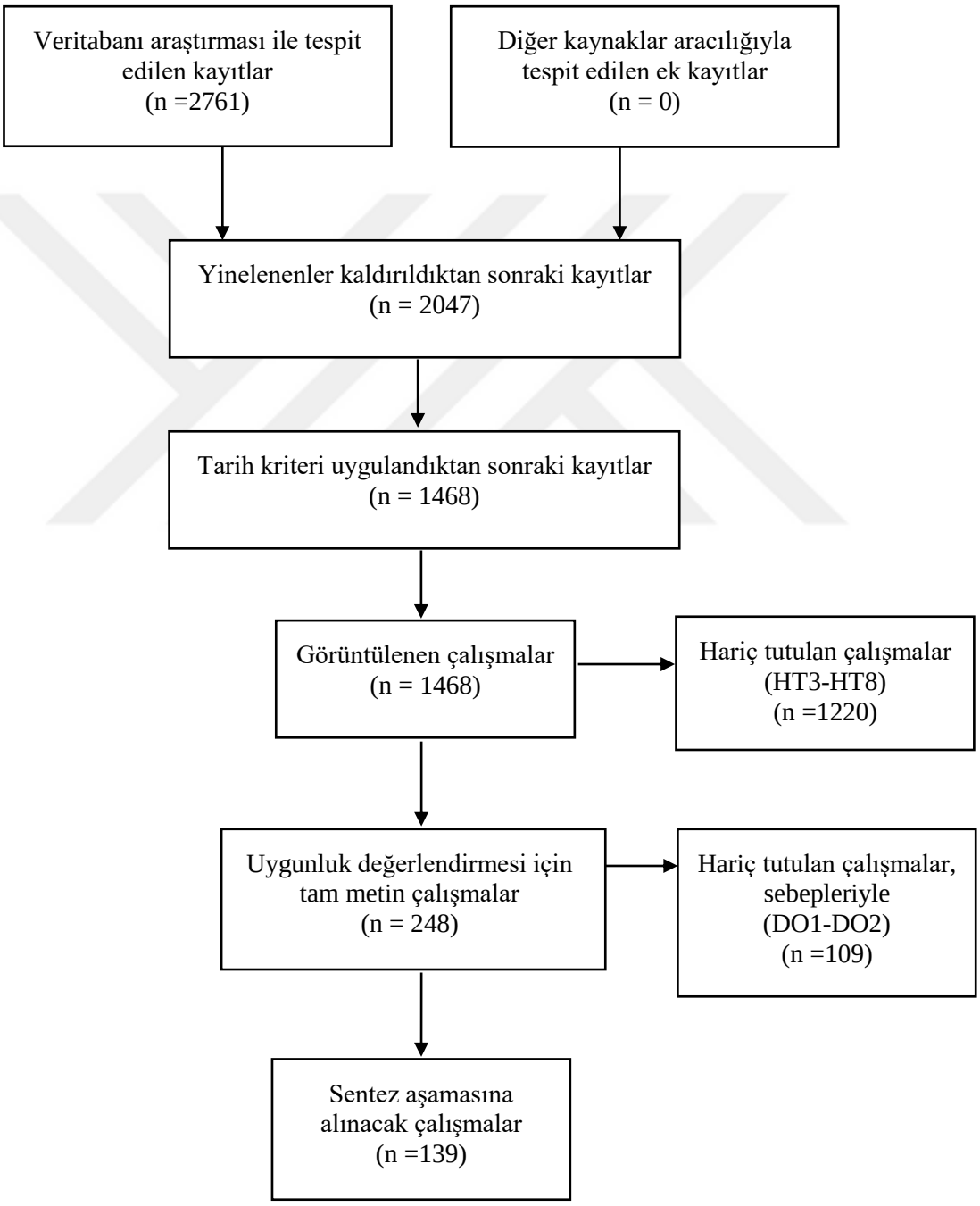
Veri Tabanı	**Arama Kapsamı**	**Sonuç**
Scopus	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	1011
Science Direct	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	141
IEEE	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	349
ACM Library	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	93
Wiley Online	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	10
Web of Science	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	593
JSTOR	Tüm Alanlar	73
Emerald	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	10
Taylor & Francis	Tüm Alanlar	481
	Toplam	2761

Değerlendirme aşamasında ise tarama çalışmasının kapsamında belirlenen kriterler doğrultusunda makalelerin dahil edilmesi ve çıkartılması gereklidir. Bu aşamada uyarlanmış PRISMA akış diyagramından yararlanılmıştır [144]. Öncelikle literatür tarama çalışmalarında standart olan aynı makalelerin çıkartılması kuralı (HT1) uygulanmış ve 714 makalenin tekrarlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, AG çalışmalarına yeni boyutlar kazandıran tablet bilgisayarların, mobil telefonların ve akıllı gözlüklerin yaygın hale geldiği son on yılın içerisinde yayınlanmamış makalelerde değerlendirme dışı tutulmuş (HT2) ve 2009 yılından önce yayınlanmış 579 çalışma çıkartılmıştır.

Tablo 2.4. Çalışmada dikkate alınan hariç tutma ve dahil olma kriterleri

HT1	Tekrarlanan çalışmalar
HT2	2009 yılından önceki çalışmalar
HT3	Dili İngilizce olmayan çalışmalar
HT4	Özet çalışmalar
HT5	Önsöz ve genel açıklamalar
HT6	Bakım süreçleri ile ilgili olmayan çalışmalar
HT7	Endüstri veya teknik uygulamalar içermeyen çalışmalar
HT8	Sanal gerçeklik çalışmaları
DO1	Bir deney/test/analiz/kıyaslama/uygulama içeren çalışmalar
DO2	Kullanılan AG teknolojilerinin açıkça belirtildiği çalışmalar

Ardından çalışmaların başlıkları ve özetleri okunarak Tablo 2.4'de verilen hariç tutma kriterlerinden HT3-HT8 uyan çalışmalar kapsam dışına alınmıştır. Son olarak kalan çalışmaların tamamı okunmuş ve dahil olma kriterlerine (DO1-DO2) uymayan çalışmalarda çıkartılarak sentezleme aşamasında kullanılacak olan çalışmalar belirlenmiştir (Şekil 2.48). Değerlendirme aşaması sonunda toplam 139 adet makale sistematik haritalama aşaması için seçilmiştir.



Şekil 2.48. Çalışmaya göre uyarlanmış PRISMA akış diyagramı

Sentezleme aşamasında yapılan literatür çalışmasının araştırma soruları doğrultusunda incelenmek üzere belirlenmiş makalelere ait veriler (Tablo 2.5) çıkartılmakta ve kayıt altına alınmaktadır. Bu aşamada değerlendirmeye alınacak her bir makalede hangi bakım türüne yer verildiği, uygulama alanı, yayın tarihi, kullanılan takip yöntemi, çalışmanın türü, kullanılan dijital içerikler, deney veya analiz türleri araştırılmış ve tablo üzerinde kaydedilmiştir (Tablo 2.6). Ayrıca her veri AG görüntüleme tekniklerinin bir veya birkaçı ile eşleştirilerek kaydedilmiştir.

Tablo 2.5. Çalışmalardan elde edilecek anahtar verilere ilişkin detaylar

Bakım Süreçleri	montaj/de-montaj(1); tamir/onarım(2); eğitim(3); muayene/teşhis(4); bakım planlama(5); uzaktan/işbirlikçi bakım(6)
Uygulama Alanları	askeri(1); havacılık(2); otomotiv(3); endüstri(4); ağlar ve kablolama(5); dış ortam(6); deneysel(7)
Yayınlanma Tarihi	2009(1)-2018(10)
Takip Yöntemi	işaretçisiz-özellik(1); işaretçisiz-model/nesne(2); işaretçili-resim/kod(3), sadece sensör(4); hibrit(5); belirtilmemiş(6)
Çalışmanın Türü	literatür taraması(1); teknik makale(2), uygulama makalesi(3)
Kullanılan Dijital İçerikler	2D resim/video(1); 2D metin(2); 2D + ses(3); 3D model/animasyon(4); 3D/2D hibrit(5); 3D/2D + ses(6); diğer(7)
Deney / Analiz	kullanılabilirlik(1); performans(2); belirtilmemiş(3)
Görüntüleme Teknolojileri	HMD-optik(a); HMD-video(b); HMD-projeksiyon(c); HHD(d); Uzamsal-optik(e); uzamsal-video(f); uzamsal-projeksiyon(g)

Her bir veri daha alt detaylara bölünerek analiz aşaması için hazırlanmıştır. Son olarak 139 çalışmadan elde edilen tablo üzerinden literatürün haritalandırılması yapılmıştır. Bu aşamada AG teknolojilerinin kullanımının yıllara göre dağılımları, hangi sektörde hangi görüntüleme yönteminin daha fazla kullanıldığı, takip metotlarının kullanım oranı; hangi dijital içeriklerin hangi görüntüleme teknolojilerinde kullanıldığının belirlenmesi gibi çıkarımlar yapılmıştır.

Tablo 2.6. Her bir makale için anahtar verilere ait değerlerin sentezlenmesi (örnek tablo)

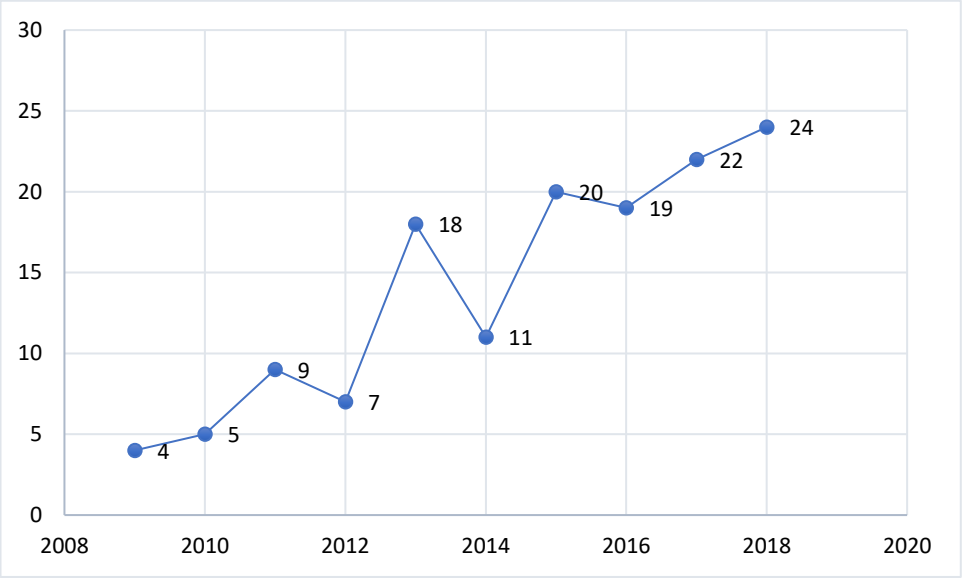
Çalışmanın Başlığı	Bakım Süreçleri	Uygulama Alanları	Yayınlanma Tarihi	Takip Yöntemi	Çalışmanın Türü	Kullanılan Dijital İçerikler	Deney / Analiz
In-Situ instructions exceed side-by-side instructions in augmented reality assisted assembly.	1a	7a	10a	3a	3a	5a	1a
A 3D user and maintenance manual for UAVs and commercial aircrafts based on augmented reality	1a - 2a	2a	7a	3a	3a	4a	3a
A comprehensive survey of augmented reality assembly research	-	-	8x	-	1x	-	-
A computer vision-based assistant system for the assembly of narrow cabin products	3f - 4f	2f	7f(*)	1f	2f - 3f	4f	3f
A context-aware assistance system for maintenance applications in smart factories based on augmented reality and indoor localization	4d	4d	7d	2d	3d	2d	3d
A context-aware augmented reality assisted maintenance system	2b - 4b	4b	7b	3b	3b	1b - 2b	3b
A mobile AR assistant for campus area network management	1b	5b	6b	3b	3b	1b - 2b	2b
A novel navigation system using augmented reality technology for distribution work at optical connector panels	1d	5d	4d	3d(+)	3d	1d	3d
A pedagogical virtual machine for assembling mobile robot using augmented reality	3d	7d	8d	2d	3d	1d - 2d	1d - 2d
RFID-assisted assembly guidance system in an augmented reality environment.	1a	7a	3a	4a	3a	5a	3a
Seamless human robot collaborative assembly–An automotive case study	6a	4a	10a	3a	3a	5a	2a
Secure access augmented reality solution for mobile maintenance support utilizing condition-oriented work instructions	2d	5d	7d	3d	3d	5d	3d

* 7f : 7 sayısı yayınlanma tarihi kısmında 2015 yılına karşılık gelir iken çalışmada uzamsal-video(f) kullanıldığı anlamına gelmektedir.

+ 3d: 3.takip yöntemi işaretçili-resim/kod iken çalışmada el ile tutulan cihaz(d) kullanıldığı anlamına gelmektedir.

2.6.2.3. Sistematik haritalama çalışmasının sonuçları

SALSA çerçevesinin tamamlanmasından sonraki son adım ise çalışmanın sonuçlarının kaleme alınarak raporlanmasıdır. Çalışmada incelenen makalelerin yayınlanma tarihlerine bakıldığında AG çalışmalarında her geçen yıl bir artış olduğu görülmektedir (Şekil 2.49). Ayrıca bu grafik sistematik haritalama çalışmasına dahil edilen makalelerin 2009 yılı ve sonrası olarak sınırlandırılmasının yerinde bir karar olduğunu da göstermektedir. 2009 yılından itibaren bakım konusunda AG çalışmalarının artmaya başlamasının nedenine bu tez çalışmasında AG teknolojilerinin gelişiminin anlatıldığı başlık altında da değinilmiştir. Zira 2008 yılı itibariyle çoklu dokunmatik ekranlar duyurulmaya ve mobil cihazlarda daha yaygın kullanılmaya başlanmış akabinde bir bilgisayarlık görme yöntemi olan SLAM araştırmalarına yoğunlaşılmış ve gelişen teknoloji ile tekniğin birleşmesi AG uygulamalarına doğru araştırmacıları yöneltmiştir.

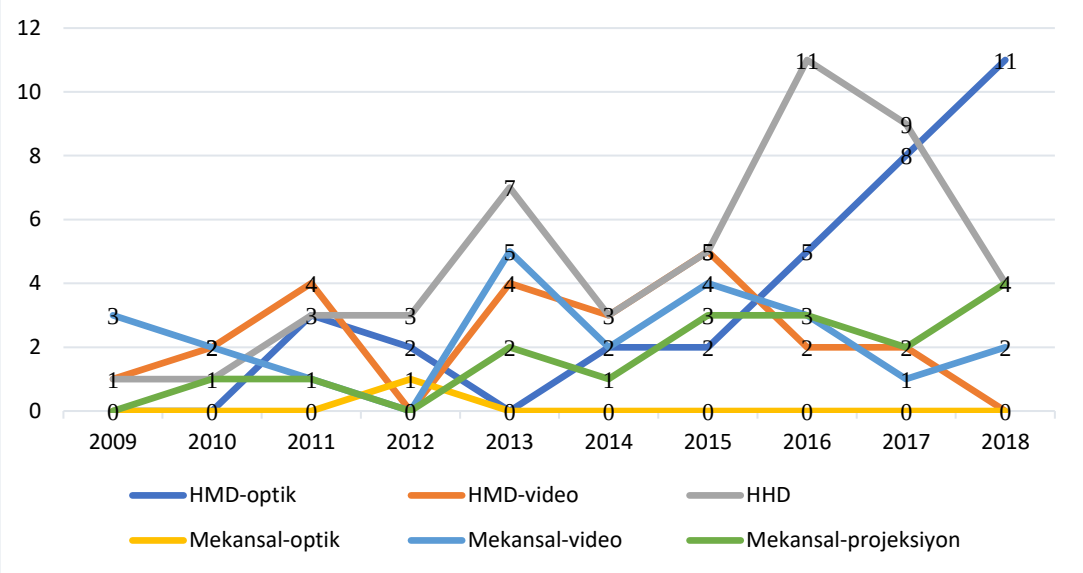


Şekil 2.49. AG kullanılan bakım uygulamalarının yıllara göre dağılımı

AG araştırmalarında gözlemlenen artışı daha derinden anlamlandırmak ve donanım türlerine göre detaylandırarak haritalandırmak gereklidir. Zira AG teknolojisinin hayata geçirilebilmesi için birçok farklı donanım ve cihaz geliştirilmiştir. Bu teknolojilerin hemen hemen hepsinin kullanım alanları farklı olduğu gibi, farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Çalışmaların yıllara göre dağılımı görüntüleme teknolojilerine göre haritalandırıldığında 2015 yılının optik-görme sağlayan HMD teknolojisi için bir dönüm noktası olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 2.50). Zira

2016 yılı itibariyle optik görme özelliği taşıyan birçok gözlük piyasaya sürülmüştür. Bu yıllarda Microsoft, dahili holografik işlemciye sahip Hololens'i, Meta firması Meta 2'yi, Epson firması ise BT 200, vb. gözlüklerini piyasaya sürmüşlerdir. Ancak 2018 yılı son çeyreği itibariyle söz konusu HMD cihazlar küresel ölçekte son kullanıcıya sunulmamış, halen geliştirici versiyonları ön siparişlerle alınarak test edilmekte ve geliştirilmektedir. Optik görme teknolojisine sahip cihazlar yaygınlaşmaya devam ettikçe AG uygulamaları HMD teknolojileri üzerinde daha fazla geliştirilecektir.

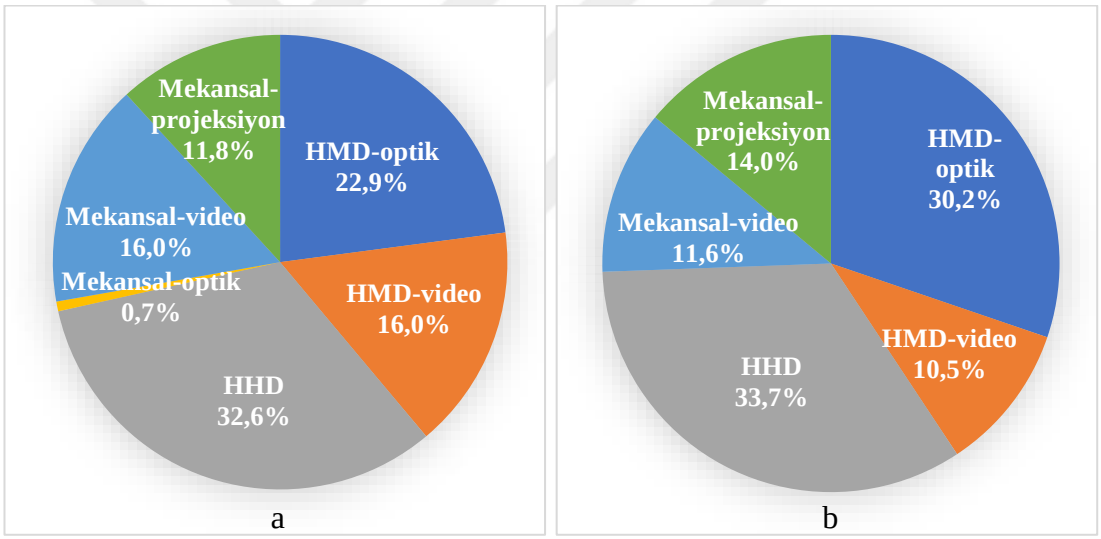
Başka bir önemli sonuç ise bakım uygulamalarında video-görme teknolojilerinin kullanımının gittikçe azaldığıdır. HMD, HHD ve mekânsal AG teknolojilerinde video-görmeye dayalı uygulama sayıları azalmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda da HMD teknolojilerinin, video-görmeye dayalı monitörlere/ekranlara göre bakım uygulamalarında daha kullanışlı olduğu ve gelecekte yapılacak çalışmaların merkezinde HMD teknolojilerinin olması gerektiği vurgulanmaktadır [145, 146].



Şekil 2.50. Farklı AG görüntüleme teknolojisi kullanılan bakım uygulamalarının yıllara göre dağılımı

Son olarak mekânsal projeksiyon AG sistemleri üzerinde geliştirilen bakım uygulamalarının yavaş da olsa yıldan yıla yükseldiği gözlemlenmiştir. Özellikle bu teknolojiyi kullanırken herhangi bir donanım giyme zorunluluğunun olmaması ve görüş açılarının kısıtlanmıyor olması, mekânsal projeksiyonlu görme sistemlerinin bakım uygulamalarında kullanılmasının önünü açmıştır. Ancak asıl etken hem HMD optik-görme hem de mekânsal sistemlerde işçilerin ellerinin serbest olmasıdır.

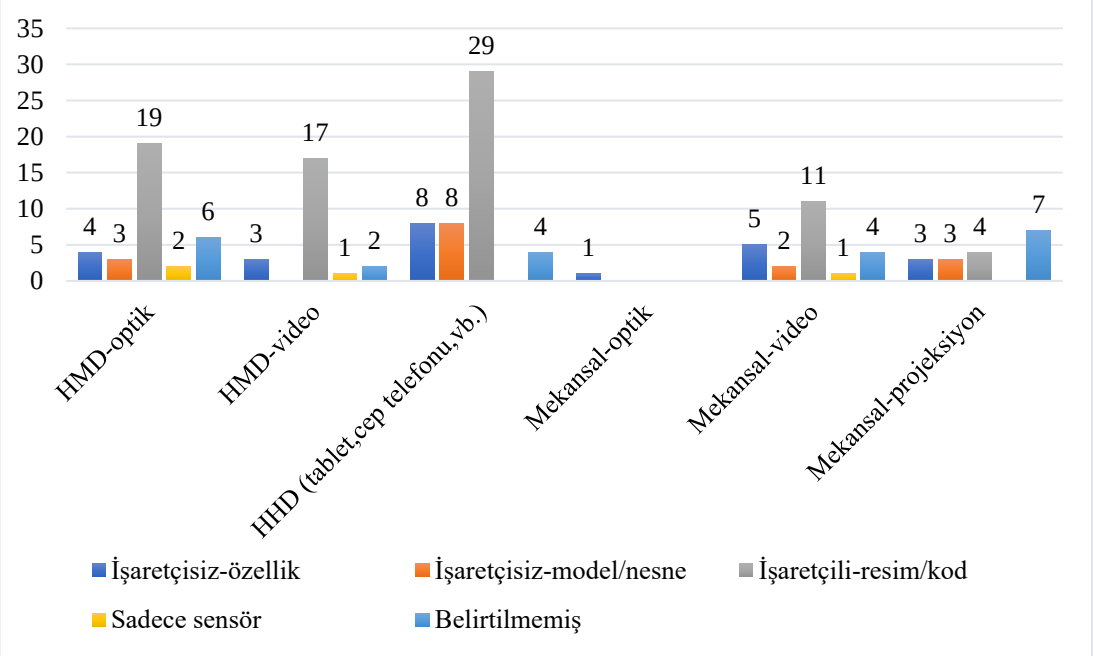
Uygulamaların oransal olarak nasıl dağıldığına bakıldığında ise en yüksek payın el ile tutulan (HHD) cihaz teknolojisinde olduğu görülmektedir (Şekil 2.51). Ancak bu veri Şekil 2.50'de verilenlerle birlikte değerlendirildiğinde, HDD teknolojisinin önümüzdeki yıllarda bakım süreçlerinde kullanımının azalacağını öngörmek mümkündür. Şekil 2.51'de görülebileceği üzere HHD donanımları ile sadece video-görme yapılabilmektedir. Öte yandan HMD teknolojisi optik görme ve video görme olarak ayrı ayrı ele alınmıştır. Halbuki görme teknolojilerindeki ayrımı dikkate almadan donanımlara göre bir değerlendirme yapılırsa, son 10 yılda HMD'nin (optik + video) %38,9; HHD'nin %32,6; Mekânsal sistemlerin (projeksiyon + video + optik) %28,5 kullanım payına sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan son 4 yıllık veriler dikkate alındığında ise bu oran HMD (optik + video) %40,7; HHD %33,7; Mekânsal sistemler için (projeksiyon + video) %25,6 şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 2.51. Literatürde AG bakım çalışmalarının dağılımı (a) son 10 yıl (b) son 4 yıl

AG sistemlerinde önemli konulardan birisi de gerçek dünya görüntüsü içerisinde dijital nesnelerin yerleşimi için nesnelerin nasıl takip edildiğidir. Literatürde işaretçili, işaretçisiz ve sensör destekli olmak üzere temel üç takip yöntemi olsa da bu yöntemlerin ihtiyaçlar doğrultusunda alt başlıklar altında detaylandırılmakta ve hatta bazen farklı takip yöntemlerinin güçleri birleştirilerek melez metotlar olarak birlikte kullanılmaktadırlar. Bakım uygulamalarında AG takip yöntemlerine dair dikkat çeken ilk husus büyük oranda işaretçili takip yöntemlerinin kullanılmasıdır (Şekil 2.52). Bunun nedeni ise, işaretçili takip yöntemi kullanılan uygulamaları geliştirmenin daha kolay olmasıdır. İşaretçisiz takip sistemleri yüksek miktarda bilgi işlem gücüne ihtiyaç

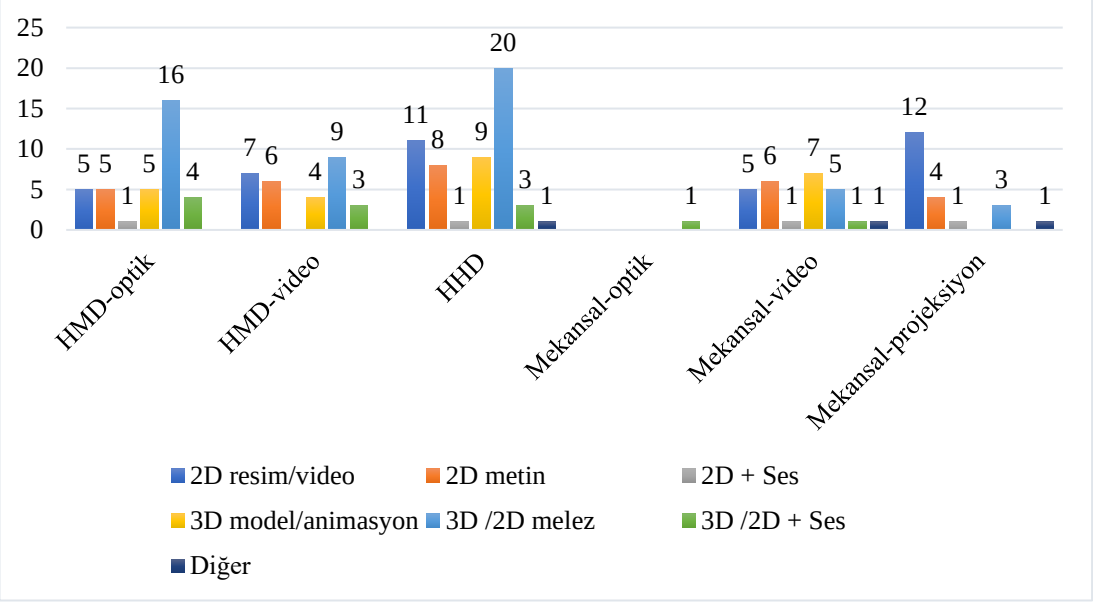
duyabilmektedir. Tez çalışmasının takip yöntemlerinin anlatıldığı ilgili başlığında, gelişen teknoloji ile birlikte AG donanımlarının işlem gücü artmış olsa dahi, işaretçisiz takip metotlarının kullanımında halen problemler olduğu ve işlem gücünün halen yetersiz kaldığı özellikle vurgulanmıştır. Zira, endüstriyel alanda hatanın en aza indirilmesi için geliştirilen AG uygulamaların tutarlı olması oldukça önemlidir. Aksi halde bakım süreçleri için geliştirilen bir uygulama vakit ve nakit kazandırmak yerine kaybedilmesine neden olacaktır. Bu sebeple endüstriyel AG uygulamalarında işaretçili takip sistemleri şimdilik kullanılmakla birlikte, işaretçisiz takip sistemlerinin entegrasyonuna yönelik çalışmalar da yapılmaktadır. İşaretçisiz-özellik tabanlı takip yöntemlerinin test edildiği çalışmalarda uygulamalar halen yüksek işlem gücüne sahip masaüstü bilgisayarlar üzerinde çalıştırılmaktadırlar [146-149]. Wang vd. çalışmalarında AG sistemlerinde nesneleri işaretçiler olmadan takip etmenin zorluğundan ve buna rağmen bu zorluğun aşılması gereken bir engel olduğundan bahsetmişlerdir [147]. Lia vd. de yaptıkları deneyler sonucunda işaretçisiz-özelliğe dayalı takip yöntemlerinin işaretçili takip yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir [149]. Geliştirilen endüstriyel uygulamalarında işaretçili takip yöntemi kullanılıyor ise, işaretçileri yırtılma, vb. deformasyonlara karşı korumak gerekmektedir. Ayrıca montaj işlemlerinde parçaların üzerine yerleştirilmiş işaretçilerin algılanmasının sağlanması montaj süresini uzatabilmektedir.



Şekil 2.52. Takip yöntemlerinin görüntüleme teknolojilerine göre dağılımı

Dikkat çeken bir diğer nokta ise sensörlerin kullanıldığı bakım uygulamalarının sayısının neredeyse yok denecek kadar az olmasıdır (Şekil 2.52). GPS, ivme ölçer, pusula, vb. sensörler genellikle bina dışı ve hareketli AG uygulamalarında (turizm, spor, askeri, vb.) daha fazla kullanılırken, sabit olarak tamir, onarım, inceleme, montaj işlemlerinin yapıldığı endüstriyel bakım uygulamalarında çok fazla yer bulamamaktadır. Zira, AG ile gerçekleştirilen endüstriyel bakım uygulamalarında en önemli donanım bileşeni işlem yapılacak parçaları ve ortamı tanımak için kullanılan kameralardır.

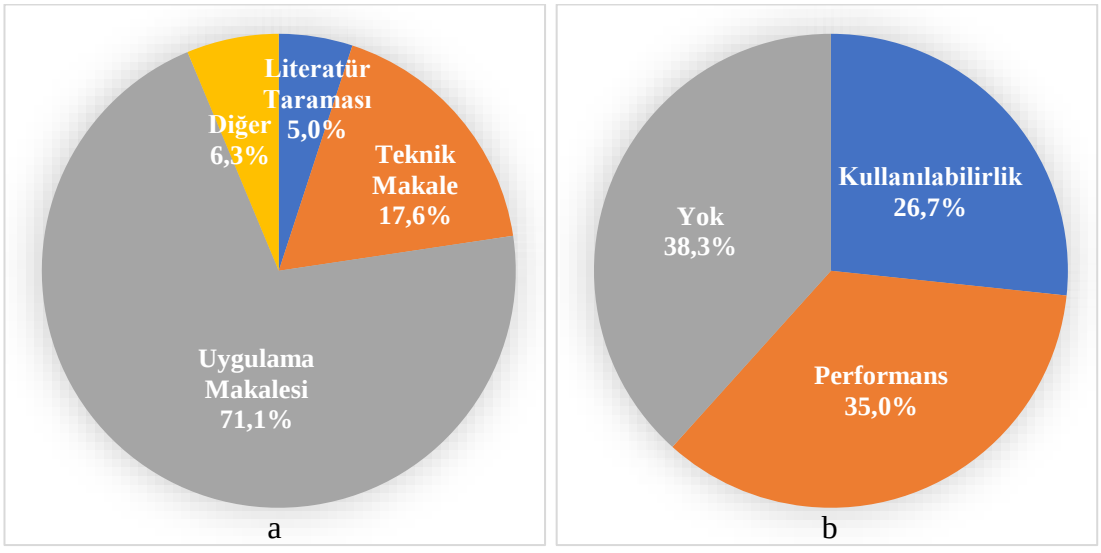
AG uygulamalarında kullanılan dijital içeriklerin nitelikleri ve kullanım oranları incelenmesi gereken önemli hususlardan birisidir. Literatürde yer alan AG uygulamalarında metin, resim, 2D şekiller, 3D modeller, animasyon, ses gibi birçok farklı dijital içerik çeşitli kombinasyonlarda kullanılmaktadır. Sistematik haritalama çalışması ile bakım uygulamalarında kullanılan içeriklerin AG görüntüleme teknolojilerine göre dağılımları üzerinde durulmuştur. Şekil 2.53'de verilen grafikten de görüleceği üzere HMD ve HD teknolojisinin kullanıldığı uygulamalarda büyük çoğunlukla 3D/2D içerikler birlikte kullanılmaktadır. Ancak mekânsal sistemlerde bu durum değişmiş ve 2D içerikler ön plana çıkmıştır. Bunun nedeni özellikle mekânsal-projeksiyon sistemlerde 3D içeriklerin sunulmasının oldukça zor olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca ses etkileşimi ve sesli yönlendirme özelliği bulunan uygulamaların sayısının oldukça az olduğu görülmektedir.



Şekil 2.53. Dijital içeriklerin görüntüleme teknolojilerine göre dağılımı

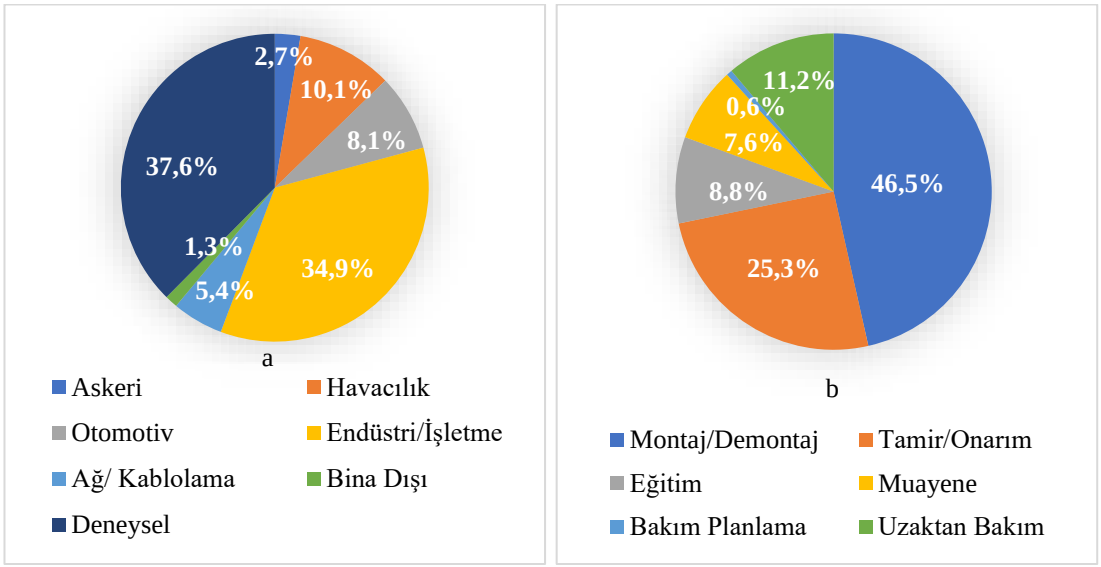
Ancak yapılan çalışmalar sonucunda özellikle bakım uygulamalarında ellerin serbest olmasının öneminden dolayı sesli etkileşim ve yönlendirmeye tasarımlarda yer verilmesi gerektiğine dikkat çekilmektedir. Havard vd. yaptıkları deneyler sonucunda bakım süreçlerinin metinler yerine video ve ses ile kullanıcılara iletilmesinin daha yararlı olduğunu vurgulamışlardır [150]. Sesli etkileşimlere yer verilen çalışmalarda ise ellerin tamamen serbest olabilmesi için ses ile birlikte HMD donanımlarının kullanılması gerektiği öne sürülmüştür [151].

Literatür taraması kapsamında incelenen makaleler, endüstriyel bakım uygulamalarının geliştirildiği uygulama makaleleri, yeni uygulama geliştirme yöntemlerinin kullanıldığı teknik makaleler, literatür ve diğer makaleler şeklinde oransal olarak Şekil 2.54a'da sunulmuştur. Şekil 2.54b'de ise AG uygulamalarının ne kadarının kullanılabilirlik veya performans yönünden değerlendirildikleri verilmiştir. Buna göre AG bakım uygulamalarının sadece %26,7 sinde kullanılabilirlik üzerine analiz ve deneyler yapılmış olup bu oran kullanılabilir endüstriyel AG uygulamalarının geliştirilebilmesi için yetersizdir. Ayrıca çalışmalarda genellikle anketler ile kullanıcı görüşleri alınmış ve zihinsel iş yükleri ölçülmüş olup derinlemesine kullanılabilirlik testleri yapılmamıştır [152-155]. Performans ölçümleri için ise tamamlanma süresi, hata oranı, vb. kriterler kontrol edilmiştir [133, 155-157]. Çalışmaların %38,3 gibi yüksek bir kısmında ise uygulamalar hiçbir değerlendirmeye tabi tutulmamış; sadece geliştirilen endüstriyel AG uygulamalarının okuyuculara tanıtılması amaçlanmıştır.



Şekil 2.54. Makalelerin, (a) türlerine ve (b) yapılan analizlere/deneylere göre dağılımı

Bakım uygulamalarının sektörlerine göre dağılımında en büyük payı endüstriyel uygulamalar ile birlikte deneysel amaçlarla gerçekleştirilmiş uygulamaların aldıkları görülmektedir (Şekil 2.55a). Bu sektörleri havacılık ve otomotiv sektörlerindeki bakım uygulamaları takip etmektedir. Yapılan haritalandırma çalışması sonucunda en büyük paya sahip ilk iki uygulama türünün montaj/demontaj (%46,5), tamir/onarım (%25,3) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.55b). Uzaktan bakım, eğitim ve muayene/teşhis uygulamalarının payları ise sırasıyla %11,2, %8,8 ve %7,6 şeklindedir. Palmarini vd. tarafından yapılan literatür taraması [129] sonucunda da çalışmaların bakım uygulama türlerine dağılımında en büyük payın benzer şekilde montaj/demontaj (%33) ve tamir/onarım (%26) uygulamalarına ait olduğu görülmektedir (Şekil 2.38a). Ayrıca, bakım uygulamalarının hemen hemen hepsi (tamir/onarım, eğitim, uzaktan bakım, montaj/demontaj) parçaların sökülmesi, belirlenmesi, seçilmesi, yerleştirilmesi, sabitlenmesi, vb. işlemler içermektedirler. Bu işlemlerin AG teknolojileri ile desteklenmeleri halinde bakım hizmetlerinde verim artacak, hatalar düşecek ve doğal olarak bakım giderleri de azalacaktır. Özetle, Şekil 2.55'deki grafikler bizlere endüstriyel bakımda AG uygulamalarının deney veya gerçek işletme ortamlarında tamir/onarım ile montaj/demontaj uygulamaları ağırlıklı olmak üzere test edildiği ve temel seviye AG uygulamalarının geliştirildiğini söylemektedir. İnsanı daha fazla etkileyen eğitim, daha zeki ve sistematik yaklaşımlara ihtiyaç duyulabilecek planlama ile muayene alanlarında ise nispeten daha az çalışma olduğu tespit edilmiş olmakla birlikte bu durumun yakın gelecekte değişeceği düşünülmektedir.



Şekil 2.55. Makalelerin sektörlere (a) ve bakım uygulama türlerine (b) göre dağılımı

3. İNSAN BİLGİSAYAR ETKİLEŞİMİ

Teknolojik gelişmelerle birlikte hayatımıza her geçen gün yeni teknolojiler girmektedir. Özellikle gün geçtikçe daha fazla yüksek işlem gücüne ulaşması ve ucuzlaması nedeniyle kolay erişilebilir hale gelen çipler, giyilebilir teknolojileri bir bilim kurgu olmaktan çıkartıp hayatımızın tam merkezine yerleştirmeye başlamıştır. Günümüzde Sony, Samsung, Epson, Microsoft, Google, Meta, Vuzix, Atheer, vb. teknoloji üreten firmalar giyilebilir teknolojiler üretmek için yatırımlar yapmaktadırlar. Öneki bölümde bahsettiğimiz artırılmış gerçekliğin yolu da tam bu noktada akıllı gözlükler olarak anılan teknolojilerle kesişmektedir. 2010'lu yılların başından itibaren birçok farklı HMD türünde ürünün tanıtımı yapılmaya başlanmış ve erken prototipler üretilmiş olsa da söz konusu teknolojiler günümüzde halen geliştirilmeye devam edilmektedir.

Ancak tam geldiğimiz noktada ortaya cevaplanması gereken sorular ve sorunlar yığını çıkmaktadır. Yeni geliştirilen HMD sınıfındaki akıllı gözlüklerin kullanıcılarla etkileşimi nasıl sağlanacaktır ve bu yeni teknolojilerin yazılımlarla evliliği günümüzde kullandığımız teknolojilerde kullanılan araç, yöntem ve metotlardan farklı mı olacaktır? Her gün üzerimizde taşıyacağımız, birlikte uyuyacağımız, birlikte yemek masasına oturacağımız ve hatta bu tezin konusunda olduğu gibi birlikte çalışacağımız giyilebilir teknolojilerle etkileşimi nasıl sağlayacağımız gibi sorular kısmen cevaplansa da halen cevaplanmayı bekleyen noktalar bulunmaktadır.

İnsan-Bilgisayar Etkileşimi (İBE) disiplini ile bu sorulara sistematik bir şekilde cevap aramak mümkündür. Tezin girişinde de tanıtıldığı üzere İBE; insanlara yönelik geliştirilen teknolojilerin ve bu teknolojilerde kullanılan yazılımların kullanılabilirlik perspektifinden tasarımı, değerlendirilmesi, geliştirilmesi ve uygulanması ile ilgili bir disiplindir [4]. Kullanıcı deneyiminin iyileştirilmesi için arayüz adı verilen etkileşim ortamlarının, tasarlandıktan sonra kullanılabilirliğinin ölçülmesi maksadıyla incelenmesi, test edilmesi ve raporlanması İBE'nin kapsamına girmektedir. Zira, AG teknolojisi kullanıcılara doğru olan yolculuğuna İBE'den alacağı onay ve ehliyet ile

çıkmak durumundadır. Aksi halde yol boyunca meydana gelmesi muhtemel kazalar AG'nin gerçek hayat ile entegrasyonunda hem zaman hem de maliyet kayıplarına neden olabilecektir. Dolayısıyla İBE'yi anlamak bu tez çalışmasının sonuçları için de önem arz etmektedir ve İBE'yi anlamak için ise öncelikle kullanıcı deneyiminin (UX) ve etkileşim tasarımı detaylarının anlaşılması gereklidir. Tez çalışmasının bu bölümünde İBE'ye ilişkin kavramlar, arayüz türleri, etkileşim türleri, kullanılabilirlik analizlerinde kullanılan yöntem ve metotlar hakkında bilgi verilecek; akabinde çalışmanın konusu olan AG teknolojilerine ilişkin İBE çalışmalarının literatürdeki yeri ve geldiği nokta kritik edilecektir.

3.1. Kullanıcı Arayüzü ve Deneyimi

Kullanıcı deneyimi bazen İBE yerine kullanılsa da temel olarak bir kullanıcının herhangi bir arayüzü (ürün, servis veya hizmet) deneyimledikten sonra ortaya çıkan algılarını ve verdiği duygusal tepkileri kapsamaktadır. İBE disiplininde geliştirilen arayüzlerin uygunluğunun belirlenmesi kullanıcı deneyimlerinin ölçülmesi, toplanması ve analiz edilmesi ile mümkündür. İBE uzmanları kullanıcı deneyimi kendilerine göre farklı şekillerde tanımlasalar dahi kullanıcı deneyiminin üç ana özelliği; bir kullanıcıdan söz ediliyor olması, kullanıcının bir ürünle, sistemle veya gerçekten arayüzü olan bir tasarım ile etkileşime giriyor olması ve son olarak kullanıcıların deneyiminin gözlemlenebilir ve ölçülebilir olmasıdır [158]. Bu noktada kullanılabilirlik ile kullanıcı deneyimi kavramlarının da birbirinden ince bir çizgi ile ayrıldığını vurgulamak gereklidir. Zira, kullanılabilirlik kullanıcının bir sisteme ait görevi başarılı bir şekilde yerine getirmesi iken kullanıcı deneyimi kullanıcının sistem ile etkileşimin yanı sıra süreç boyunca ortaya çıkan düşünce, duygu ve algılarını kapsamaktadır. Kullanılabilirlik kullanıcı arayüzünün (UI) sistemin kolay öğrenilebilir olmasını, verimliliğini, uygunluğunu ve eşsizliğini, vs. kapsayan bir kalite ölçütüdür. Ancak kullanıcı deneyimi, mühendislik, pazarlama, psikoloji, grafik tasarımı, endüstriyel tasarım gibi daha geniş bir anlam taşıyan disiplinler arası bir kavramdır [159]. Örneğin; bir havayolu şirketinin internet sayfası kullanılabilirlik yönünden çok iyi tasarlanmış ve kullanıcılara en verimli, en uygun UI deneyimi sunulmuş olsa dahi, uçuş biletlerinin satın alınması aşamasında puan kullanımına izin verilmiyorsa veya uçuş sonrası araç kiralama, otel rezervasyonu gibi ek imkanlar sağlanmıyorsa kullanıcılar için UX zayıf olarak algılanabilir.

3.2. İnsan-Bilgisayar Arayüz Türleri

Tarihsel sürecine bakıldığında dijital teknolojilerin çok uzun bir geçmişi olmadığı, mevcut seviyesine neredeyse yarım yüzyıldan kısa bir sürede ulaştığı görülmektedir. İlerlemenin büyüklüğü dikkat çekici ve göz kamaştırıcı olmakla birlikte ilerlemenin hızı ise korkutucu düzeydedir. Sürekli ve hızlı değişimin hüküm sürdüğü bu alanda sıklıkla farklı araştırma alanlarının ortaya çıkması ve yeni yöntemlerin geliştirilmesi sıradan bir süreç olarak kabul görmektedir. İBE disiplininde de benzer şekilde gelişen teknoloji, yapılan araştırmaları ve kullanılan yöntemleri değiştirmiştir. İBE araştırmalarının dikilmeye hazırlanan kumaşı niteliğini taşıyan kullanıcı arayüzleri de bu süreçte sürekli değişim geçirmiştir ve İBE uzmanları sürekli farklı kumaşları nasıl dikmeleri gerektiği konusuna kafa yormuşlardır.

Bu evrimsel süreç boyunca da farklı arayüz türleri ve yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda da arayüz türleri farklı şekillerde isimlendirilmiş ve gruplandırılmıştır. Bazı çalışmalarda arayüzler genel bir başlık altında toplamış ve donanım arayüzleri, metin tabanlı arayüzler, grafiksel arayüzler ve harekete dayalı arayüzler olarak sınıflandırılırken [160], bazılarında ise daha geniş kapsamlı bir sınıflandırma yapılmıştır. Preece vd. arayüz türlerini komut tabanlı arayüzlerden başlayarak beyin-bilgisayar arayüzüne kadar değişen 20 başlık altında kategorize etmişler ve bu geniş sınıflandırmaya neden olarak ise; internet, mobil cihazlar, kablosuz ağlar, sensör teknolojileri ve diğer yeni teknolojilerin çeşitliliğin artması ile birlikte grafik arayüzleri, konuşma, jest ve el yazısı tanıma alanlarındaki gelişmeleri göstermişlerdir [161]. Tablo 3.1'de söz konusu arayüz türleri listelenmiştir.

Tablo 3.1. İBE çalışmalarında arayüz türleri [161]

Arayüz Türleri			
1	Komut Tabanlı	**11**	Dokunmatik
2	WIMP ve GUI	**12**	Hareket ve İşaret Tabanlı
3	Multimedya	**13**	Duyusal
4	Sanal Gerçeklik	**14**	Çoklu Tip
5	Bilgi Görselleştirme	**15**	Paylaşımlı
6	Web	**16**	Tepkisel
7	Tüketici Elektronikleri	**17**	Artırılmış ve Karışık Gerçeklik
8	Mobil	**18**	Giyilebilir
9	Konuşma	**19**	Robotik
10	Kalem	**20**	Beyin-Bilgisayar

Tablo 3.1'de verilen arayüz türleri, günümüz teknolojileri dikkate alınarak belirlenmiş olsa da bazı teknolojiler birden fazla arayüz türüne dahil edilebilmektedir. Örneğin cep telefonlarında etkileşim için sunulan arayüzler, aynı anda dokunsal (dokunmatik ekranlar), mobil, GUI, tepkisel (tuşa basınca titreşim), konuşma (siri, vb.), kalem (stylus) arayüzlerini içermektedir. Böyle bir sınıflandırma detaylı olması bakımından avantaj sağlarken öte yandan karmaşık ve anlaşılması zor bir durum da ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında hem güncel teknolojileri sınıflandırmaya dahil etmek, hem de benzer özellikler taşıyan arayüzleri kapsayarak, karmaşıklığı azaltacak şekilde arayüz türleri yeniden sınıflandırılmış ve Tablo 3.2'de yeni belirlenen arayüz başlıkları ve kapsamları sunulmuştur.

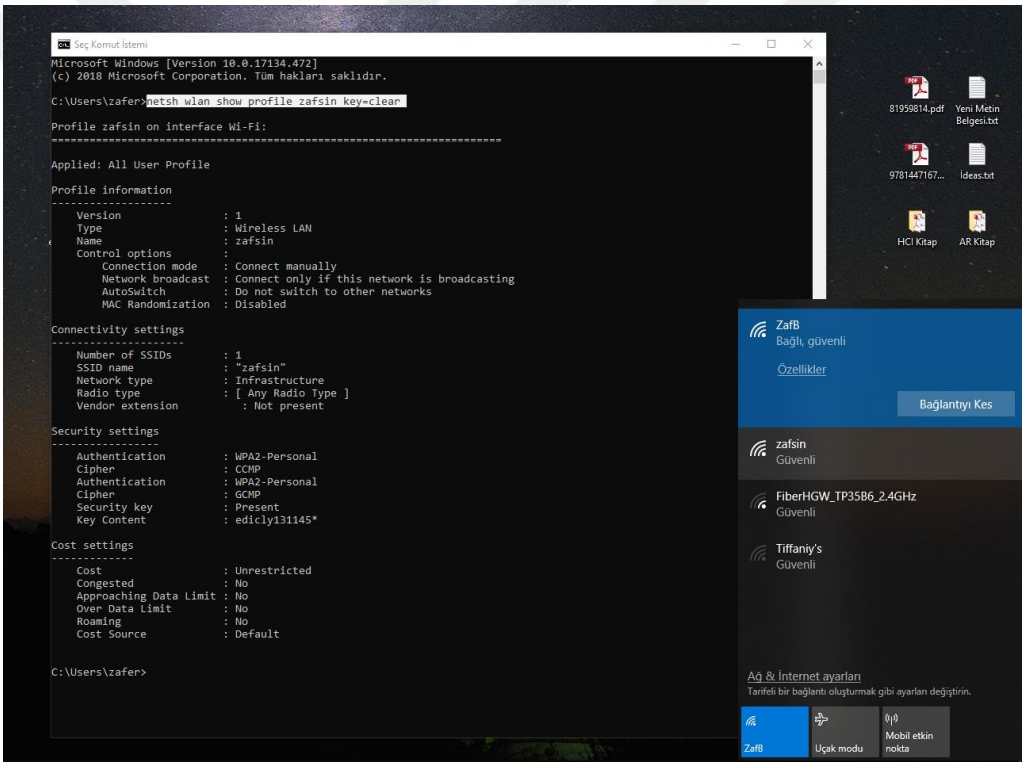
Tablo 3.2. Belirlenen arayüz tür başlıkları ve kapsamları

Belirlenen Başlıklar	**Kapsadığı Arayüz Türleri**
Komut tabanlı kullanıcı arayüzleri	Komut tabanlı, metin tabanlı
Grafik tabanlı kullanıcı arayüzleri	GUI & wimp, multimedya, bilgi görselleştirme, web, artırılmış ve karışık gerçeklik, mobil
Dokunsal (temas tabanlı) kullanıcı arayüzleri	Kalem, dokunmatik, giyilebilir, paylaşımlı, çoklu, artırılmış ve karışık gerçeklik, donanım, tüketici elektronikleri, mobil, tepkisel
Doğal kullanıcı arayüzleri	Konuşma, beyin-bilgisayar, robot, hareket ve işaret tabanlı, artırılmış ve karışık gerçeklik, sensörler

3.2.1. Komut tabanlı kullanıcı arayüzleri

Komut tabanlı arayüzler genellikle sade bir tasarıma sahiptirler ve komutların girilebileceği bir metin alanı ile imlecin nerede olduğunu belirten bir işaretçi içerirler. Günümüzün gelişmiş teknolojik cihazları halen ataları gibi komutlar ile çalışıyor olsalar da bu komutlar grafik tabanlı arayüzlerin altına gizlenmiştir. Yani, bir yazılımda bir sonraki sayfaya geçerken, bir belgeyi yazdırırken veya bir dosyayı kaydederken aslında bazı dilsel komutlar verilmektedir. Ancak bu komut verme işlemi otomatik olarak gerçekleşmekte ve kullanıcıların herhangi bir metin yazmasına gerek duyulmamaktadır. Komut tabanlı arayüzler bilgisayarların ortaya çıktığı erken dönemlerde yaygın olarak kullanılmış, günümüzde ise sadece uzman yazılımcılar ve bazen grafik tabanlı arayüzler kullanması mümkün olmayan engelliler tarafından

kullanılan bir arayüz türüdür. Uzmanlar, işletim sistemleri veya güvenlik ile ilgili sorunlara komutlar kullanarak daha hızlı müdahale edebilmektedirler. Örneğin Şekil 3.1'de bir bilgisayarda kayıtlı olan kablosuz ağın şifresini öğrenmek için tek satırlık bir komut kullanılmıştır. Aynı işlemi grafik arayüzü ile yapmak ise farklı pencerelerde birden fazla tıklama işlemini gerektirmektedir. Oktay ve Folmer ise öğrenme ve sosyalleşme amacını taşıyan bir sanal dünya olan Second Life için görme engellilerin kullanabileceği TextSL adını verdikleri komut tabanlı bir arayüz tasarlamışlardır. Böylece kullanıcıların Second Life'ı keşfetmelerine, nesnelerle etkileşime girmelerine ve Second Life'ın grafik arayüzünü kullanan diğer kullanıcılarla başarılı bir şekilde iletişim kurmalarını sağlamışlardır [162].

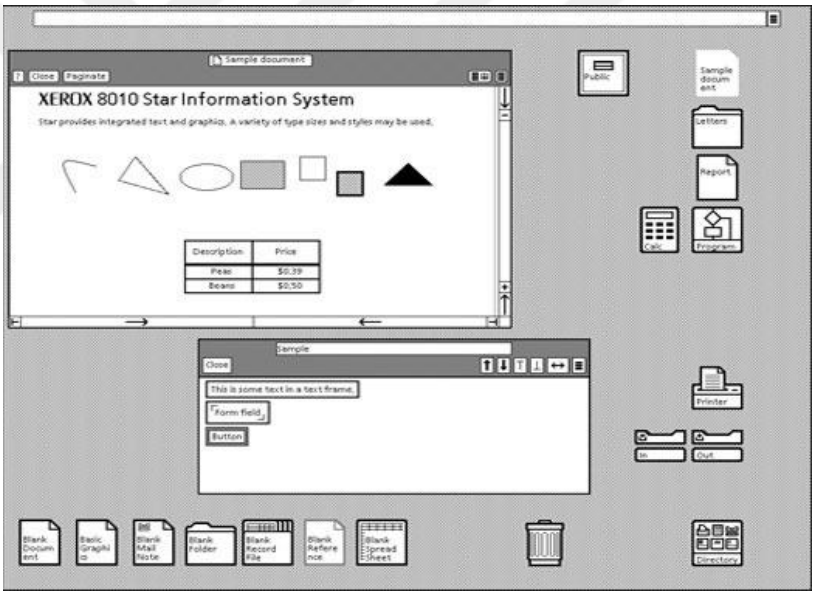


Şekil 3.1. Komut tabanlı (metin tabanlı) arayüz örneği

3.2.2. Grafik tabanlı kullanıcı arayüzleri

Bilgisayarlar ortaya çıkışı ile birlikte öncelikle doğrudan donanımlar ile sonrasında ise komutlar adı verilen özel metinler ile insan-bilgisayar etkileşimi mümkün olmuştur. Ancak 1970'li yılların başında yaşanan gelişmelerle Xerox Alto adı verilen bilgisayar ile ilk grafik tabanlı arayüz hayatımıza girmiştir [163]. Xerox Alto bir fare ile yönetilen ilk grafik tabanlı arayüz ile birlikte işletim sistemlerinde günümüzde de kullanılan

"masaüstü" metaforunu da hayatımıza sokmuştur. 1981'de ise ticari olarak Xerox Star piyasa sürülmüş pencere, ikon, menü ve işaret aracı kelimelerinin kısaltması olan WIMP (windows, icon, menu, pointing device) ve GUI (grafiksel kullanıcı arayüzlerinin) yaygınlaşmasını sağlamıştır [164]. Şekil 3.2'de ilk zamanlarında daha çok köşeli ve siyah beyaz bir görünüme sahip olan ilk grafik tabanlı arayüz örnek olarak verilmiştir. Günümüzdeki modern arayüzlerde de halen WIMP'in (windows, icons, menus, pointers) temel yapısı kullanılmaktadır. Ancak artan grafik işleme gücü ile birlikte farklı form araçları geliştirilmiş, basit ikonlar yerini 3D animasyonlarla desteklenmiş ikonlara, klasik menüler ise sesli menülere bırakmış ve WIMP'de olmayan yeni grafik elemanları arayüzlere eklenmiştir. Günümüzde internet sitelerinin arayüzleri ile mobil uygulama arayüzleri ve hatta artırılmış gerçeklik uygulamalarına ait arayüzlerin bazıları hala grafiklerden oluşmaktadırlar.



Şekil 3.2. Xerox Star'ın köşeli tasarıma sahip arayüzü

3.2.3. Dokunsal (temas tabanlı) kullanıcı arayüzleri

Dokunsal arayüzler ise kullanıcı ile fiziksel temasın gerçekleştiği, dokunma duyusunun kullanıldığı arayüzler olarak gruplandırılmışlardır. İlk bilgisayar olarak kabul edilen ENIAC ile etkileşime geçmek, genellikle donanıma doğrudan ya da harici mekanik cihazlarla müdahale ederek gerçekleşmekteydi (Şekil 3.3). Bu nedenle ilk bilgisayarlar dokunsal arayüzlerin ilk örnekleridirler. Ayrıca günümüzde kullanılan küçük elektronik cihazlarda da donanım tabanlı arayüzler kullanılmaktadır. Ekmek

kızartma makinası, hesap makinası, TV kumandası, vb. cihazlarla etkileşim fiziksel temas gerektiren arayüzler ile gerçekleşmektedir [160]. Mobil cihazlarda kullanılan dokunmatik ekranlar ve dokunmatik kontrol cihazları da dokunsal kullanıcı arayüzlerinin örnekleri arasındadırlar. Artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik teknolojilerinde de dijital öğelerle etkileşime geçilmesini sağlayan grafik tabanlı arayüzler kadar dokunsal kullanıcı arayüzleri de kullanılabilmektedir.



Şekil 3.3. ENIAC ve donanım tabanlı somut arayüz [160]

3.2.4. Doğal kullanıcı arayüzleri

Doğal Kullanıcı Arayüzleri (NUI) ise yapay zekâ ve sensör teknolojilerinin gelişimi ile ortaya çıkmışlardır. NUI, fiziksel dünya ile kurduğumuz doğal etkileşime benzer bir şekilde, bilgisayarlar ile de sesimizi, ellerimizi ve bedenlerimizi kullanarak etkileşime girmemizi mümkün kılan arayüzlerdir. NUI'de, GUI'den farklı olarak klavye ve fare kullanmak yerine bilgisayarlarla konuşarak, elleri havaya kaldırarak, başı hareket ettirerek ve hatta gülümseyerek etkileşim kurulmaktadır. Amaç, günlük hayatta yaptığımız hareketlerin bilgisayar etkileşim için kullanılmasıyla GUI'lere kıyasla daha kolay öğrenilebilir, doğal arayüzler geliştirilmesidir [161].

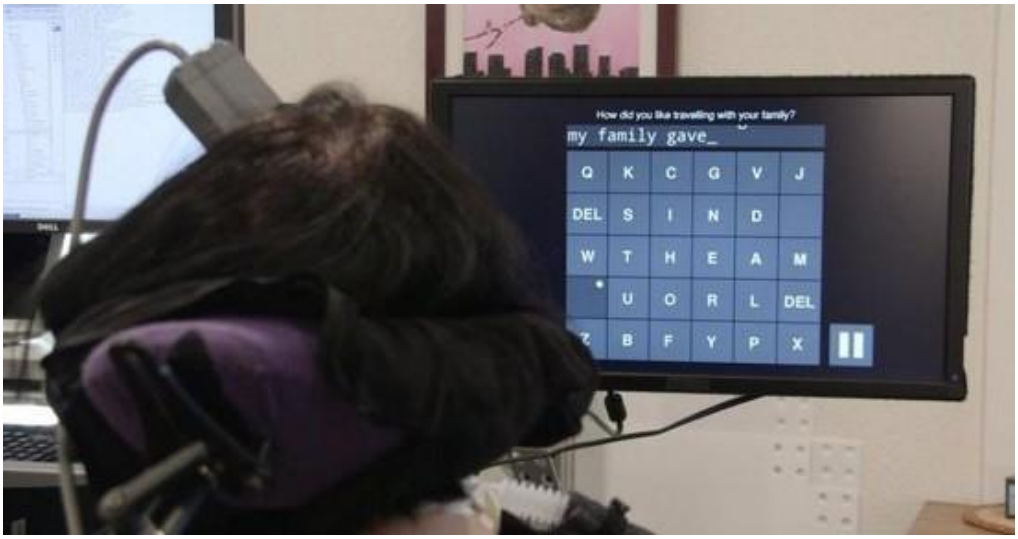
Şimdilik doğal kullanıcı arayüzleri daha çok sesleri algılayarak etkileşim sağlayan sistemlerde kullanılmaktadırlar. Bu arayüzlerde kullanıcılar, konuşarak ve dinleyerek, karşılıklı diyaloglara dayanan bir dil etkileşimi gerçekleştirmektedirler. Mobil cihazlarda kullanımları oldukça yüksektir. Ayrıca kelime işlemci yazılımlar için

konuşmayı metne çeviren ve böylece hızlı metin girişi sağlayan uygulamalarda tasarlanmıştır. Bir diğer popüler NUI ise; el/kol/baş hareketlerinin algılanması ve komutlara dönüştürülmesi prensibine dayanan, hareket tabanlı arayüzlerdir. Örneğin, Wiimote ve XBox Kinect oyun konsollarında kullanıcı hareketleri sistemleri kontrol etmek için kullanılmaktadır Şekil 3.4'de ise Bing arama motoruna ait harita navigasyon uygulamasının bir kullanıcı tarafından kollarını hareketleriyle yönetilmesi örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.4. Kinect ile hareket tabanlı soyut arayüz [165]

İnsan beyni üzerine yapılan araştırmalar ve biyo-sensörlerin gelişimi ile ortaya çıkan ve NUI kapsamında sayılabilecek diğer bir teknoloji ise beyin-bilgisayar arayüzleridir (BCI). BCI, harici cihazların beyin aktivitesiyle kontrol edilmesini mümkün kılan; donanım ve yazılım iletişim sistemlerini içeren hızlı büyüyen bir teknolojidir. Bu sistemlerde başa bağlanmış olan alıcılarla kullanıcıların yapmak istediklerini düşünerek hayata geçirmeleri mümkün olmaktadır. BCI teknolojisinin önemli uygulama alanlarından birisi de engelli insanların hayatını kolaylaştırmaktır [166]. Emotiv [167] ve Neurosky [168] gibi şirketler son kullanıcılara yönelik BCI arayüzü kullanan uygulamalar geliştirmektedirler. Şekil 3.5'de ALS hastalarının BCI sayesinde çevresindekilerle iletişim kurmasını mümkün kılan bir sistem sunulmuştur.



Şekil 3.5. BCI yardımıyla iletişim kuran bir ALS hastası [169]

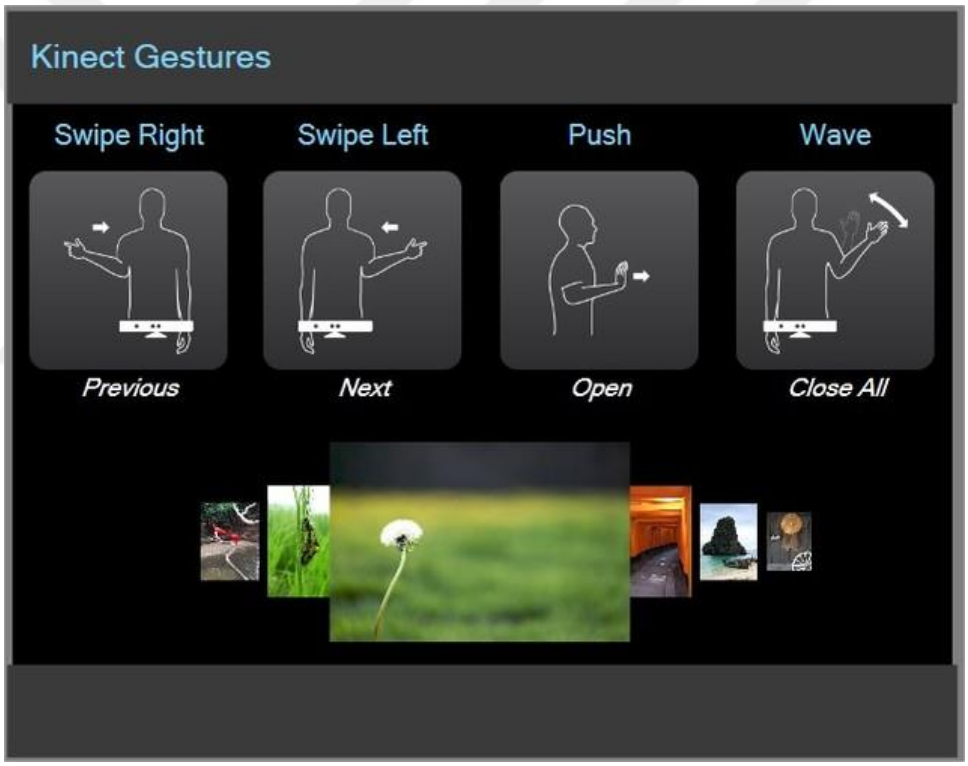
3.3. İnsan-Bilgisayar Etkileşim Türleri

Etkileşim türleri kullanıcıların bir yazılım veya sistem ile etkileşime girme yollarıdır. Bazı çalışmalarda "etkileşim stilleri" olarak geçen "etkileşim türleri", arayüzlerin kavramsal tasarımı ile ilgili olup, sistem ile etkileşime nasıl geçileceğinin ve böylece arayüzün fiziksel olarak tasarımında kullanılacak mekanizmaların neler olacağının tayin edilmesini sağlamaktadır. Literatürde etkileşim türleri temel olarak talimat verme (instructing), diyalog kurma (conversing), manipülasyon ve gezinme (manipulating & navigating), keşfetme ve tarama (exploring & browsing) şeklinde dört başlık altında toplanmıştır [170]. Shneiderman ise etkileşim türlerini, etkileşim stilleri adı altında yukarıdaki başlıklara benzer şekilde temel beş başlık altında gruplandırmıştır [171, 172]. Bunlar, menüden seçim (menü selection), form doldurma (form fill-in), komut dili (command language), doğal dil (natural language) ve doğrudan manipülasyon (direct manipulation) şeklindedir.

3.3.1. Talimat verme

Kullanıcıların bir sisteme yaptırmak istedikleri görevleri komutlar vererek gerçekleştirmeleridir. Metin tabanlı komutlar yazarak, dokümanları yazdırmak, kaydetmek veya silmek için düğmelere tıklayarak, menü içerisinden seçim yaparak, ses veya vücut hareketleri ile etkileşim kurarak komutlar vermek mümkündür. Bilgisayar yazılımların büyük çoğunluğunda kullanılan bir etkileşim türü olarak karşımıza çıkar. Ayrıca küçük ev aletleri ve elektronik diğer cihazlarda da komut

verme ile etkileşim oldukça sık kullanılmaktadır. Arayüzlerde yaygın olarak kullanılan bir etkileşim türü olmasının en büyük nedeni, sistem ile kurulan etkileşimin hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleşmesidir. Ayrıca çok sık tekrarlanan işlemler için en uygun etkileşim türüdür ki yazılımlarda kaydetme, silme, açma, kapatma gibi sürekli tekrarlanan onlarca işlem gerçekleşmektedir. Komut verme etkileşim türü, önceki başlıkta bahsedilen arayüz türlerinin tamamında kullanılmakta olan bir etkileşim türüdür. GUI sistemlerde simgeler tıklanarak NUI sistemlerde ise vücut ve göz hareketleri ile sisteme komutlar gönderilerek etkileşim gerçekleştirilmektedir. Xbox Kinect sisteminde el hareketleri ile etkileşim kurulması talimat vermeye örnek olarak sunulmuştur (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Kinect'e talimat vermek için tanımlanmış fiziksel hareketler

3.3.2. Diyalog kurma

Bu etkileşim türünde dijital sistemlerin bir birey gibi kullanıcılarla sohbet etmesi söz konusudur. Sistem, kullanıcılara gerçek bir insan ile konuşuyormuş hissi uyandıracak şekilde tasarlanmış olup diyaloglar konuşma tabanlı veya metin tabanlı olarak gerçekleşebilmektedir. Komutlara uyan tek yönlü bir iletişim yerine çift yönlü bir iletişim kurulmuş olması bu etkileşim türünü diğerlerinden ayırmaktadır. Diyalog

etkileşimi telefon bankacılığı, bilet rezervasyonu, vb. basit konuşma tabanlı sistemlerden uzman sistemler, kişisel asistan, sanal eğitim vb. yapay zekâ ile güçlendirilmiş daha ileri düzey sistemlere kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Basit konuşma tabanlı sistemlerde kullanıcılara sesli olarak düzenlenmiş menüler seçenekleri içerisinden bir seçim yapılması (x için 1, y için 2, z için 3 tuşlayınız, vb.) istenilmektedir. Bu sistemin mantık olarak açılır bir menü üzerinden bir seçeneği tercih edip akabinde kendisine sunulan alt seçenekleri değerlendirmesinden bir farkı yoktur. Ancak daha ileri seviye diyalog kurma etkileşimi ile donatılmış sistemlerde ise uygulamalar semantiği anlayacak düzeydedirler. 1966 yılında Weizenbaum tarafından geliştirilen Eliza programı doğal dil kullanılarak etkileşim kurmak üzere tasarlanmış ilk uygulama örneği olarak kabul edilmektedir [173]. Erken dönemlerde diyaloglar esnasında mantıksız cümleler kurabilen bu sistemler günümüzde çok daha ileri bir noktaya gelmişlerdir. Örneğin iOS kullanıcıları için kişisel asistan olarak hizmet veren Siri, bağlamsal çıkarımlar yapabilmesi sayesinde sesli olarak iletilen sorulara ve komutlara bir birey gibi cevaplar vermekte ve ilgili sonuçları kullanıcıya geri döndürmektedir (Şekil 3.7).

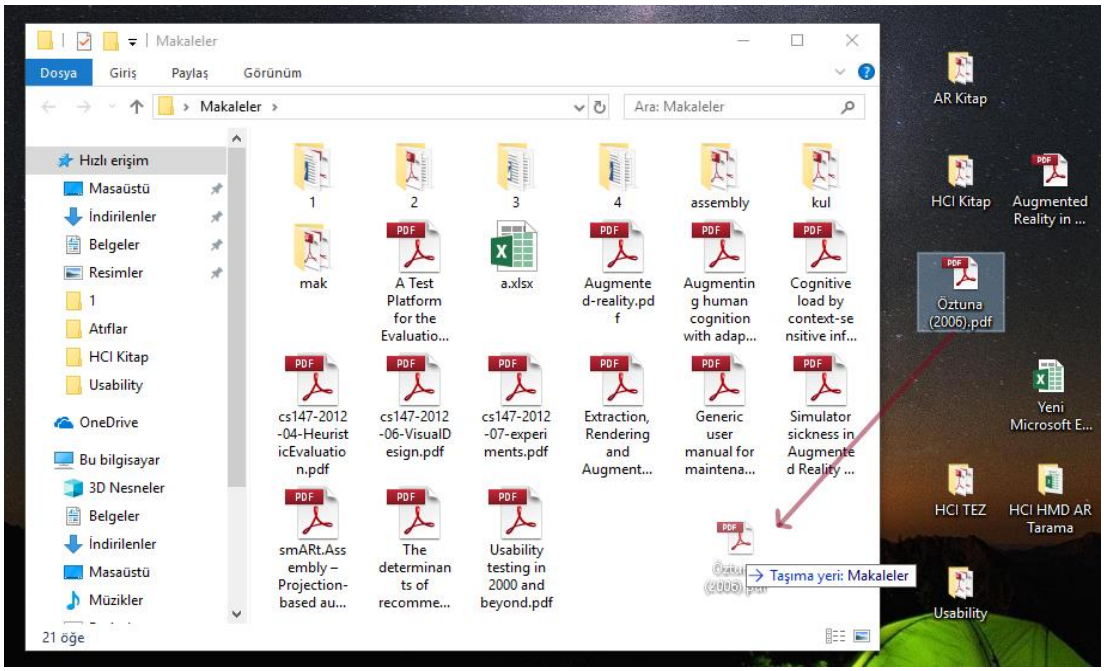


Şekil 3.7. Apple tarafından geliştirilen sesli asistan Siri ve diyalog örnekleri

Diyalog kurma etkileşiminin en büyük avantajı, eller kullanılmadan etkileşimi mümkün kılması ve özellikle acemi kullanıcıların aşina oldukları bir şekilde etkileşim kurmalarının sağlamasıdır. Ancak sistemler bazen konuşmalardan bir çıkarım yapamadıkları için anlam taşımayan cevaplar ve sonuçlar döndürebilmektedirler.

3.3.3. Manipülasyon ve gezinme

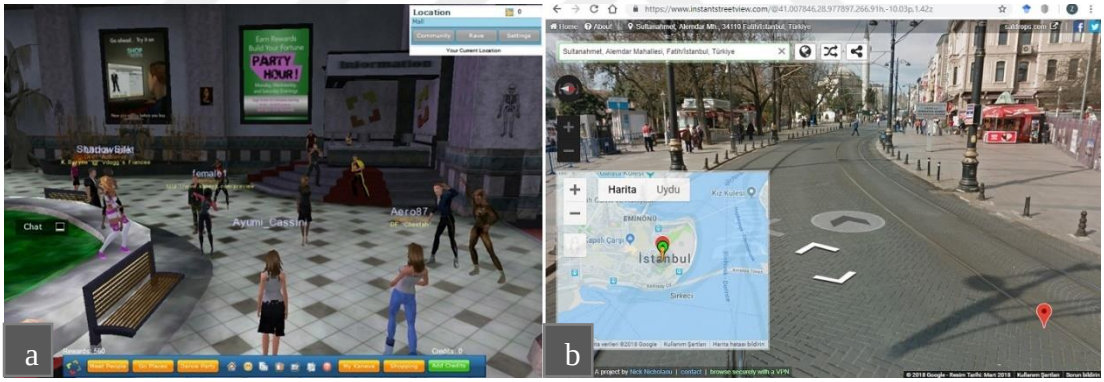
Gerçek hayatta hareket etmek, sürüklemek, gezinmek, açmak, kapatmak gibi sürekli tekrarladığımız eylemlerin etkileşim yöntemi olarak kullanılmasıdır. Bu etkileşim türünde fiziksel dünyada olduğu gibi dijital nesneler de hareket ettirilerek, seçilerek, açılarak ve kapatılarak manipüle edilmektedirler. Ayrıca yakınlaştırma, uzaklaştırma, uzatma, daraltma gibi fiziksel nesnelerde mümkün olmayan farklı eylemlerle kapsam genişletilmiştir. Shneiderman 1983 yılında yaptığı çalışmasında sanal ortamlarda doğrudan manipülasyon kavramını ortaya atmıştır [171]. Doğrudan manipülasyon, kullanıcı arayüzünde yer verilen düğmeler, ikonlar, resimler, formlar, dosyalar, klasörler, vs. nesnelerin sürekli görünür olduğu ve yapılacak eylemler sonrasında anında görsel geri bildirim alınabilen etkileşim tarzıdır. İlgilenilen nesnenin sürekli gösterimi, karmaşık komutlar yerini fiziksel eylemlerin alması ve eylemlerde sürekli geri bildirim sağlanması doğrudan manipülasyon etkileşimini avantajlı hale getirmektedir [174]. Şekil 3.8'de bir doğrudan manipülasyon örneği olan sürükle-bırak etkileşimine örnek bir ekran görüntüsü sunulmuştur. Dorudan manipülasyonun, yeni kullanıcıların sistemi hızlı bir şekilde öğrenmesi; deneyimli kullanıcıların görevlerde daha başarılı olması, sistemin nasıl çalıştığının ezberlenmeden kolayca hatırlanması, hata mesajlarına duyulan ihtiyacın azaltılması, kullanıcı kaygılarının azaltılarak kullanıcılara güven ve kontrol hissi sağlanması gibi faydaları bulunmaktadır [170].



Şekil 3.8. Windows işletim sisteminde sürükle-bırak manipülasyonu ile etkileşim

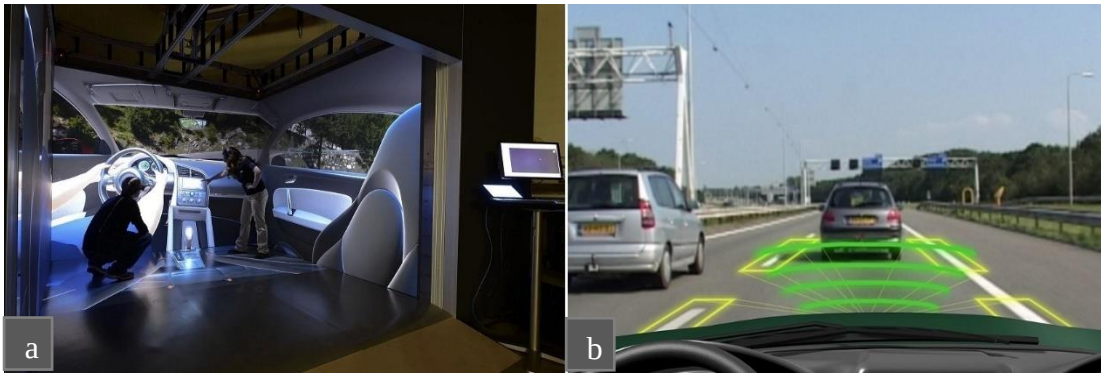
3.3.4. Keşfetme ve tarama

Bu etkileşim türünde kullanıcılar gezerek ve dolaşarak sistem ve çevresi ile dinamik bir etkileşime girmektedirler. Etkileşim mantığı tıpkı bir gazete veya dergide ilgilendiğimiz içerikleri tespit etmek ve okumaya benzemektedir. Keşfetme ve tarama etkileşim türü ile bir binanın üç boyutlu dijital tasarımı içerisinde gezilerek detaylar keşfedilebilmekte veya gerçek dünya içerisinde sensörler yardımıyla ortama dair dijital veya fiziksel bildirimler alınabilmektedir. Yani kullanıcıların eğlence ve sosyalleşme amacıyla fareyi kullanarak keşfettiği masaüstü sanal dünyalar, kullanıcıların kolları, başları, vs. hareket ettirerek keşfettiği Bilgisayar Destekli Sanal Ortamlar (CAVE) ve sensörler ile fiziksel ortamı tanıyarak kullanıcılara dijital bilgi sunan sistemler bu etkileşim türünü kullanmaktadırlar [170]. Şekil 3.9'da masaüstü ortamlarda gerçekleştirilen keşfetme ve tarama etkileşimine dair örnekler sunulmuştur. SecondLife gibi çok oyunculu online ortamlarda farklı etkileşim araçları kullanılsa dahi yönlendirme ve kontrol büyük oranda fare ile sağlanmaktadır.



Şekil 3.9. (a) SecondLife sanal dünya ortamı (b) Google sokak görünümü uygulaması

Gelişen teknoloji ile birlikte etkileşim, fare ve klavye gibi fiziksel araçların dışında el, kol, göz, vb. vücut hareketleri ile jest tabanlı olarak da gerçekleştirilebilir hale gelmiştir. CAVE sisteminde de özel tasarlanmış bir odanın her bir duvarına yansıtılan yüksek çözünürlüklü içerikler, jest tabanlı olarak kontrol edilmektedir. Şekil 3.10a'da kullanıcıların gerçek zamanlı, 3 boyutlu olarak etkileşime geçebilecekleri bir sanal sanal gerçeklik ortamı sunulmuştur. Ayrıca mikroçiplerin artık daha ucuz olmasıyla hemen hemen her nesneye entegre edilebilmeleri ortam farkındalığı yüksek uygulamaları da hayatımıza getirmiştir. Yeni nesil otomobillerdeki araç, mesafe ve şerit takip sistemleri bu uygulamalara örnek olarak gösterilebilir (Şekil 3.10b).



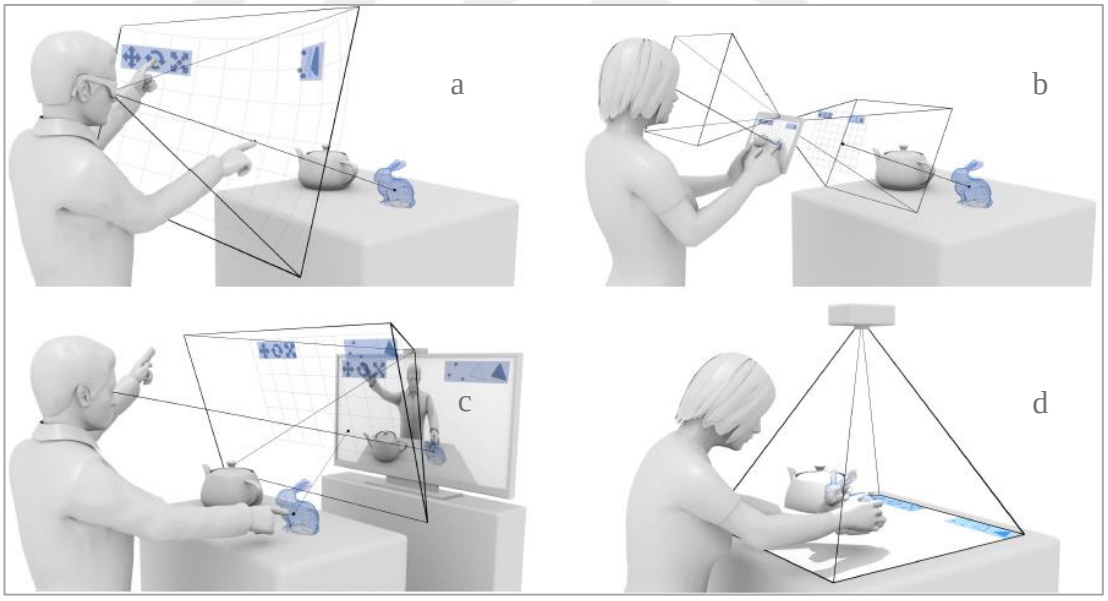
Şekil 3.10. (a) IGI CAVE sistemi [175], (b) Araçlarda şerit ve mesafe takip sistemleri

3.4. Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarında Etkileşim

AG uygulamalarında gerçek nesneler ile dijital nesneler bir uyum içerisinde birlikte kullanılarak dünya algısı zenginleştirilmektedir. Ancak kullanıcıların aynı anda hem gerçek hem de dijital nesnelerle etkileşime geçmeleri göründüğü kadar kolay olmamakla birlikte bu uygulamalar için uygun arayüzler tasarlanması ve hatta yeni etkileşim yöntemleri geliştirilmesi gerekmektedir. Azuma, 1997 yılında AG sistemlerinin üç bileşeni olduğunu ifade etmiş [3] olup bunlardan ilki sanal ve gerçek dünyaların birleşimidir. İkincisi sanal olarak üretilen grafiklerin gerçek dünyadaki nesnelerle etkileşime geçmesidir. Sonuncusu ise AG sistemlerinin eş zamanlı olarak interaktif olması gerektiğidir. Bu tanım bizlere öncelikle sanal nesnelerin gerçek fiziksel nesneler ile ilişkilendirilmesi gerektiğini ve aralarında kurulan bu bağlantının sürekli değişen dinamik gerçek dünyaya rağmen etkileşim içerisinde kalması gerektiğini söylemektedir. Örneğin parçaların sırasıyla birleştirildiği AG destekli bir montaj uygulamasında sistem, her adımda yeni eklenen parça ile görünümü değişen iş parçasını tekrar tekrar tanımalı ve sonraki adımda montajı yapılacak parçayı iş parçası üzerinde dijital içeriklerle ilişkilendirmelidir.

Sanal nesneler ile fiziksel nesnelerin ilişkilendirilmesi AG araştırmalarında hala üzerinde durulan kritik konulardan birisidir. AG uygulamalarının kullanım amacına ve hangi donanım üzerinde çalışacağına göre farklı etkileşim türlerine ve arayüz bileşenlerine gereksinim duyulmaktadır. Zira geleneksel yazılımlarda kullanılan etkileşim türleri, AG için çoğunlukla uygun değildirler. Bu tez çalışmasının önceki bölümlerinde bahsedildiği üzere, gelişen teknoloji ile birlikte uygulamalarının üzerinde çalışabileceği birçok farklı donanım ortaya çıkmış ve spordan askeri

uygulamalara kadar birçok farklı alanda AG uygulamaları geliştirilmiştir. Söz konusu bu donanım ve uygulama alanı çeşitliliği, beraberinde ihtiyaçlara göre farklı etkileşim türlerinin kullanıldığı ve geliştirildiği bir ortamın oluşmasına neden olmuştur. Bu nedenle AG uygulamalarında etkileşimi anlamak için öncelikle uygulamaların doğru bir şekilde sınıflandırılması gereklidir. Literatürde kullanılan ölçüte göre birçok farklı sınıflandırma önerilmiş olmakla birlikte [176-178] Normand vd. sınıflandırmaları teknik merkezli, kullanıcı merkezli, bilgi merkezli, etkileşim merkezli olarak dört başlık altında toplamışlardır [179]. Şüphesiz kullanılan teknoloji hangi etkileşim türünün kullanılacağını etkilemektedir. Bir dokunmatik ekran veya monitör (video-görme) üzerinde oluşturulmuş dijital nesneler ile etkileşim kurmak ile projeksiyon cihazları (aracısız görme) ile yansıtılmış dijital nesnelerle etkileşim kurmak arasında hem teknik hem de kullanılabilirlik yönünden farklılıklar olacaktır. Görme teknolojilerine göre yapılan bir çalışmada da AG teknolojileri ile doğrudan, dolaylı ve entegre olarak etkileşim kurulabileceği ifade edilmiştir (Şekil 3.11).

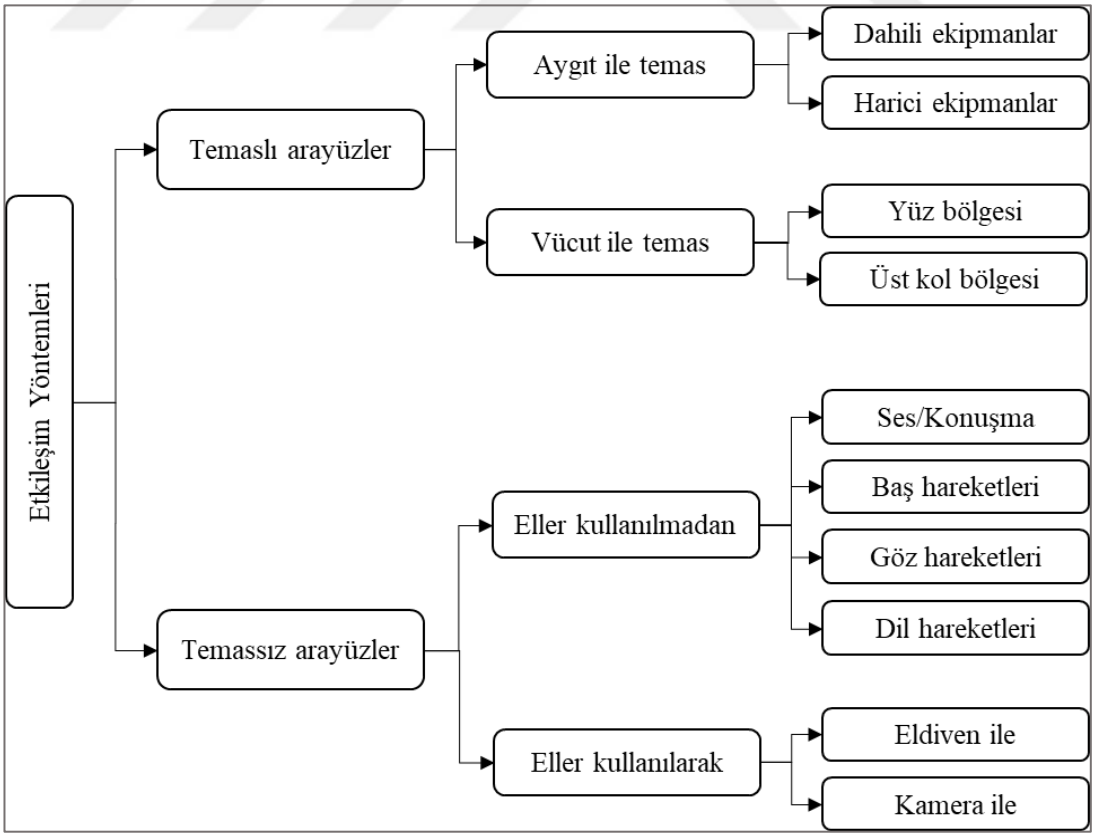


Şekil 3.11. Doğrudan (a), dolaylı (b-c) ve entegre (d) etkileşim ortamları [160]

3.4.1. Doğrudan etkileşim ortamları

Doğrudan etkileşim ortamları, gerçek dünya görüntüsünün bilgisayarlarda dijital görüntü ile birleştirme işlemi uygulanmadan doğrudan kullanıcıya aktarıldığı etkileşim ortamlarıdır (Şekil 3.11a). HMD olarak anılan Epson Moverio BT-300, Microsoft Hololens, Meta-2 gibi akıllı gözlükler doğrudan etkileşimin kullanıldığı

teknoloji ürünleridir (Şekil 2.31). Optik görme yapılabilen doğrudan görme ortamlarında talimat verme, diyalog kurma, manipülasyon ve gezinme ile keşfetme ve tarama etkileşim türleri klasik masaüstü uygulamalardan farklı bir şekilde AG uygulamalarına göre güncellenerek kullanılmaktadırlar. AG uygulamalarında diğer bilgisayar uygulamalarında olduğu gibi menüler, bildirim alanları ve düğmelere yer verilebildiği gibi bazen artırılmış gerçekliği sağlayan dijital görüntü dışında başka hiçbir sanal arayüz elemanına yer verilmemektedir. Bazen düğmelerin yerini ses ile talimat vermeye bırakabilmektedir. Eğer AG uygulamalarında bilgi verilmesi amaçlanmış ise ortamı algılayarak otomatik olarak beliren 3D modellerden yararlanılmaktadır [132-133]. Özellikle holografik işlemci gücüne sahip olan gözlüklerde etkileşim doğrudan dijital nesnenin manipülasyonu ile yapılabildiğinden herhangi bir menü elemanına ihtiyaç duyulmamaktadır (Şekil 2.39 ve Şekil 2.40). Eğer uygulamalar birden fazla aşama veya alt adımlardan oluşuyor ise birtakım düğmeler ve menü elemanları etkileşim için kullanılmaktadır [134-135]. Menü ve form elemanları ile etkileşim dokunmatik ve dokunmatik olmayan şeklinde iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Etkileşim yöntemleri detaylı olarak Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Doğrudan etkileşimde kullanılan yöntemler [180]

Epson firması tarafından üretilen gözlüklerde etkileşim için, gözlüğe bağlı dokunmatik bir cihaz bulunmaktadır. Ayrıca giyilebilir yüzük, kol bandı, bileklik, akıllı saat gibi birtakım harici cihazlar ile de etkileşim kurmak mümkündür [181,182]. Ayrıca vücut ile temas edilerek kurulan etkileşimlerde yüzün farklı bölgelerine dokunularak etkileşim kurulan çalışmalar olsa da [183] genellikle avuç içi [184] etkileşimlerde dijital nesnelerin belirmesi için işaretçi olarak kullanılmaktadırlar. Ellerin kullanılmadığı temassız etkileşimlere ses/konuşma [185] ile baş hareketlerinin [186] ve göz takip sistemlerinin kullanıldığı [187] AG uygulamaları örnek olarak verilebilir. Özellikle ses ile etkileşim ellerin serbest olması gerektiği durumlarda öncelikli olarak kullanılan etkileşim yöntemlerindendir. Ellerin kullanıldığı ancak hiçbir nesneye temas etmeden havada yapılan hareketlerle (gesture) kurulan etkileşimler ise eldivenler [188] veya kameralar [189] yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Kameralardan alınan görüntüler, görüntü işleme algoritmaları ile işlendikten sonra birer dijital nesne olarak tanımlanmakta ve uygulamada düğme amacıyla kullanılan diğer dijital nesneler ile temas etmesi halinde çarpışma olayına (collide) yazılan komutlar yerine getirilmektedir.

3.4.2. Dolaylı etkileşim ortamları

Dolaylı etkileşimde ise, gerçek dünya görüntüsü bir ön işleme tutularak dijital nesnelerle birleştirilmekte ve sonrasında ekranlar aracılığıyla kullanıcılara sunulmaktadırlar. Bu etkileşim türüne şimdilik sadece video-görme teknolojisi kullanan cihazlarda rastlamak mümkündür ve doğal olarak dolaylı etkileşim donanımları literatürde "video içerisinden görme" (video see-through) teknolojileri olarak adlandırılmaktadırlar. Dolaylı etkileşim ortamlarının ilki dokunmatik arayüzlere sahip mobil cihazlardır (Şekil 2.17). Kullanıcılar, HHD olarak kategorize edilmiş olan tablet, akıllı telefon vb. teknolojilerle birlikte dahili olarak gelen ekranlar üzerinden fiziksel olarak dokunarak uygulamalarda etkileşime geçmektedirler [136-138]. Bir başka dolaylı etkileşim ortamı ise kameralardan alınan gerçek görüntülerin, akıllı aynalar veya bir ekran üzerinden zenginleştirilmiş şekilde görüntülenmesidir. Akıllı aynalar ve bilgisayar monitörleri dolaylı etkileşim ortamları olmakla birlikte, monitörlerde etkileşim kameralarla algılanan el ve vücut hareketleri (gesture) ve bazen fare, klavye gibi klasik yöntemler ile [138], akıllı aynalarda etkileşim ise sadece vücut hareketleri yardımıyla sağlanmaktadır (Şekil 2.18b).

3.4.3. Entegre (aracısız) etkileşim ortamları

Entegre etkileşimde ise, kullanıcıların herhangi bir AG teknolojisi kullanmasına gerek kalmadan dijital görsellerin gerçek dünya nesneleri üzerine eş zamanlı yansıtılması söz konusudur (Şekil 2.37). Bu etkileşim türünün en büyük avantajı herhangi bir kullanıcının akıllı gözlük, sanal gerçeklik gözlüğü, mobil telefon, tablet, ayna, ekran, vb. bir donanıma ihtiyacı olmaksızın gerçek şekil ile etkileşime geçebilmeleridir. Şekil 3.13'de kullanıcının yansıtılan görüntünün altına yerleştirilmiş düğmelerle etkileşimi gösterilmiştir. Entegre ortamlarda amaç kullanıcıların minimum seviyede sistem ile etkileşime geçmeleri olup, genellikle kameralar ile otomatik olarak algılanan ortama duruma göre gerçekliği artırmak için projeksiyonlar ile görüntüler yansıtılmaktadır. Sistemin yönlendirilmesini gerektiren durumlarda ise çoğunlukla cihazlar ile temas etmeden, AG sisteminin el ve/veya ses/konuşma ile kontrol edilebildiği doğal kullanıcı arayüzleri kullanılmaktadır.



Şekil 3.13. Doğrudan etkileşimde kullanılan yöntemler [190]

3.5. İnsan-Bilgisayar Etkileşimi Kullanılabilirlik Değerlendirme Yöntemleri

AG, görme duyusunun kullanıldığı her ortamda kullanılabilen ve gerçek dünya algımızı zenginleştirme yeteneğine sahip umut vadeden teknolojilerden birisidir. Ancak AG teknolojisinin birinci dereceden muhatabı insan olduğu için insan-bilgisayar etkileşimi konusunda yapılacak çalışmalarda önem taşımaktadır. Günümüz internet sayfaları, mobil programlar, bilgisayar yazılımları arayüzlerinin ne kadar kullanılabilir olduklarının belirlenmesi için literatürde birçok çalışma yapılmış ve kullanılabilirlik çalışmalarında faydalanılması amacıyla kullanılabilirlik ölçüm yöntem ve teknikleri tanımlanmıştır. İBE disiplininin kapsamında olan kullanılabilirlik

değerlendirme yöntemleri, inceleme yöntemleri, test yöntemleri ve kullanıcı raporları olarak 4 başlık altında toplamıştır [191]. Tablo 3.3'de bu kategorilere dahil olan yöntemler detaylı bir şekilde sunulmuştur. Çağıltay ise kullanılabilirlik değerlendirme yöntemlerini tasarım rehberleri, sezgiseller, deneysel yaklaşım, model temelli yaklaşım olarak gruplandırmıştır [192].

Tablo 3.3. Kullanılabilirlik değerlendirme yöntemleri [191]

Kategori	**Kullanılabilirlik Değerlendirme Yöntemi**
Analitik Yöntem	Görev analizi
İnceleme yöntemleri	Sezgisel değerlendirme Bilişsel gözden geçirme Çoğulcu gözden geçirme Özellik denetimi Kılavuz denetim listesi Perspektif tabanlı denetim
Test yöntemleri	Birlikte keşif (kullanıcı testi) Soru-cevap uygulaması Sesli düşünme uygulaması Performans ölçümü Günlük kayıtları Saha gözlemi
Kullanıcı raporları	Yüz yüze görüşme Anket

3.5.1. İnceleme yöntemleri

Kullanılabilirlik inceleme yöntemleri, değerlendiricilerin bir kullanıcı arayüzünü incelemesine dayanan bir dizi yöntemi içermektedir. Genel olarak bu yöntemlerle tasarım ile ilgili kullanılabilirlik problemlerini tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca test edilen sistemde karşılaşılan kullanılabilirlik problemlerinin ne kadar ciddi olduğu ve sistemin bir bileşeninde karşılaşılan bir problemin sistemin geneli üzerindeki etkisi gibi konular ele alınmaktadır. Bu başlık kapsamında kalan yöntemler Tablo 3.3'de listelenmiştir. Başlık altındaki bütün yöntemler aşağıda kısaca özetlenmiş ancak kullanılabilirlik çalışmalarında sıklıkla kullanılan "sezgisel değerlendirme" ve "bilişsel gözden geçirme" başlıkları ayrıca ele alınarak daha detaylı bir şekilde incelenmiştir.

- Sezgisel değerlendirme: İBE uzmanlarının arayüzün her bir parçasını rehber olarak belirlenmiş sezgisel kriterlere göre incelemesi ve tasarımın iyi ve kötü yanlarını ortaya koyarak tavsiyelerde bulunmasını kapsayan bir yöntemdir.
- Bilişsel gözden geçirme: Bu inceleme yönteminde teste katılan kullanıcılar, kendilerine verilen bir dizi görev ve senaryoyu takip ederek sistemi kullanacak bireylerin yapacağı işlemleri kontrol ederler ve her adımı değerlendirirler.
- Çoğulcu gözden geçirme: Kullanıcı, geliştirici ve İBE uzmanlarından oluşan bir grup ile gerçekleştirilir. Her bir arayüz elemanı bir senaryo (görev) çerçevesinde gözden geçirilir ve hangi eylemlerin yapılabileceği katılımcılar tarafından not alınır. Son aşamada ise grup yöneticisi cevapları toplayarak tartışmaya sunar.
- Özellik denetimi: Standart bir görevi başarmak için gerekli olan işlemler listelenir ve tercih edilmeyecek işlemler ile gerçekleştirilmesi zor işlemler tespit edilir.
- Kılavuz denetim listesi: Arayüz standardı konusunda bilgi sahibi olan uzmanlar veya denetçiler tasarımı yapılmış olan sistem için daha önceden belirlenmiş tasarım standartları varsa o arayüzü ilgili stil kılavuzlarını kullanarak incelerler.
- Perspektif tabanlı denetim: Uzmanlar, kendilerini farklı kullanıcılar yerine koyarak (örneğin acemi veya uzman) çeşitli perspektiflerden arayüzü incelerler. Her perspektif, farklı bir bakış açısı, denetim soruları ve kılavuzlar sunar.

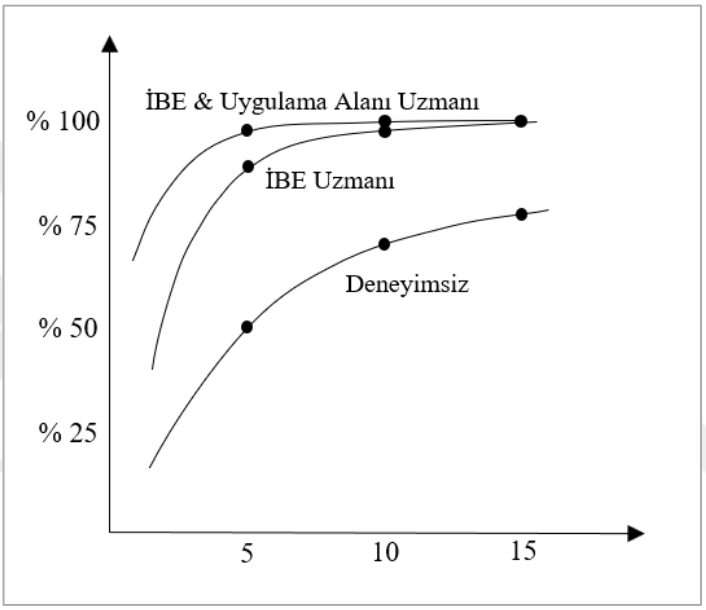
3.5.1.1. Sezgisel değerlendirme

Sezgisel değerlendirme, Nielsen vd. tarafından geliştirilen ve İBE uzmanları tarafından sezgiseller olarak bilinen bir dizi kullanılabilirlik kriterleri doğrultusunda sistem arayüzlerinin insanlar tarafından kullanılmaya uygun olup olmadığının test edilmesi sürecidir. Nielsen ve Molich 1990 yılında yaptıkları çalışmalarında sezgisel değerlendirme yöntemi fikrini ortaya atmışlar ve bu yöntem sayesinde kullanılabilirlik analizleri için yapılan laboratuvar testlerinden hem zaman hem de maddi olarak tasarruf edilebileceğini vurgulamışlardır [193]. Nielsen orijinal sezgisel setini ampirik olarak 249 kullanılabilirlik problemini analiz ederek türetmiş [194] ve orijinal sezgisel setinin gözden geçirilmiş bir versiyonunu [195] arayüzlerin değerlendirilmesinde kullanılmak üzere yayınlamıştır. Tablo 3.4'de sezgiseller ve açıklamaları verilmiştir.

Tablo 3.4. Nielsen'in sezgisel kullanılabilirlik değerlendirme kriterleri [192,195]

Sezgisel Kriter	**Açıklama**
Sistem durumunun görünürlüğü	Sistem kullanıcıya kullanım esnasında ne gibi etkileşimler olduğunu kabul edilebilir bir zaman dilimi içerisinde uygun bir şekilde geri bildirmelidir.
Gerçek dünyaya yakınlık	Sistem, anlaşılması zor kavram ver terimlerden ziyade kullanıcıların anlayacağı dilden konuşmalıdır. Gerçek dünyadan metafor adı verilen benzetimler ile yazılıma aktarılmalı ve böylece kullanıcının sisteme kendisini yakın hissetmesi sağlanmalıdır.
Kullanıcı kontrolü ve özgürlük	Her kullanıcının sistemi algılaması ve kullanımı benzeşmeyebilir. Hataların yapılması durumunda kullanıcıların sistemi yeniden başlatması yerine hata yaptığı işlemi geri alma veya yanlışlıkla kaldırılan bir işlemi yineleme özgürlüğü olmalıdır.
Tutarlılık ve standartlar	Arayüz tasarımında birbirine benzer kelime ve işaretler kullanıcılarda karışıklık oluşturmamak için kullanılmamalıdır. Ayrıca yazılım endüstrisinde sıklıkla kullanılan ve kullanıcıların aşina olduğu standart simge ve işaretlere yer verilmesi önemlidir.
Hata Önleme	Kullanıcıların hata yapmasını önleyici arayüz katmanları oluşturulmalıdır. Örneğin silme işleminden önce işlemin Evet/Hayır seçenekleri ile tekrar onaya sunulması gibi…
Hatırlanma yerine bilinme	Arayüzde kullanılan objeler, nesneler, eylemler kullanıcının kullanım esnasında maruz kalacağı yükü minimize edilecek şekilde tasarlanmalıdır. Hangi objenin görevinin ne yaptığını hatırlamak zorunda kalması yerine bilmesini sağlayacak tasarım yapılmalıdır.
Esneklik ve kullanım etkinliği	Tasarım amaçlarını karşılayacak ve aynı zamanda kullanıcının ihtiyaçlarının tahmin edildiği etkin bir tasarım yapılmalıdır. Gereksiz adımlar ortadan kaldırılması ve gerekli hallerde kullanıcının özelleştirmesine imkân sağlanmalıdır.
Estetik ve minimalist tasarım	Arayüzde gereksiz bilgiye yer verilmemeli ve bilgi yoğunluğu artırılmamalıdır. Artan yoğunluk sistemin görünürlüğünü düşürücü etki yapacağı için sistemin kullanımını zorlaştıracaktır.
Kullanıcıların hataları tanıması, anlaması ve onlardan kurtulmasına yardım	Hata mesajları kullanıcıların anlayacağı bir dille aktarılması ve kullanıcılara oluşan hatanın üstesinden gelebilmesi için gerekli talimatlar/ yönlendirmeler sunulmalıdır.
Yardım ve dokümantasyon	Sistem hakkında bir dokümantasyon veya yardım menüsü olmadan kullanılması mümkün olsa dahi kullanıcılara yardım ve dokümantasyon sunulması gerekli olabilir. Yardım ve Dokümantasyon araçları ihtiyaç halinde kolay erişilebilecek bir şekilde ve çözüm odaklı tasarlanmalıdır.

Sezgisel değerlendirmenin kaç uzman katılımcı ile yapılacağı, çalışmaya katılacak bireylerin deneyimlerine göre değişkenlik göstermektedir. Nielsen, deneyimsiz en az 14, İBE alanında deneyimli 3-5 veya hem İBE hem de test edilecek uygulamanın kullanım alanına dair bilgisi olan (çift deneyim sahibi) 2-3 uzmanın kullanılabilirlik problemlerinin %75'in den fazlasını tespit edebildiğini göstermiştir [196]. Şekil 3.14'de deney katılımcılarının bilgi düzeylerine göre kullanılabilirlik problemlerinin ne kadarlık bir kısmını tespit edebilecekleri görsel olarak verilmiştir. Şekil, sezgisel değerlendirme çalışmalarında neden uzmanların tercih edildiğini de açıklamaktadır.



Şekil 3.14. İBE sezgisel değerlendirme çalışmalarında uzmanlıklara göre problem tespit oranları [196]

Sezgisel değerlendirmeler, ele alınan yazılım arayüzünün her bir elemanının sezgisel kriterlere göre analiz edilmesi suretiyle yapılmaktadır. Ancak bir yazılımın her bir elemanının sezgisellerin tamamına uyması her zaman mümkün değildir ve hatta Nielsen'in sezgisellerinin tamamına uyan bir yazılımın da kullanıcıların tüm ihtiyaçlarını karşılayabileceği garanti edilemez 197]. Amaç zayıf arayüz tasarımı nedeniyle kullanım esnasında ortaya çıkabilecek sorunların azaltılmasıdır. Öte yandan literatürde yazılımların değerlendirilmesi için önerilen başka sezgisel kriterler de bulunmaktadır. İBE alanında yapılan çalışmalarda, Shneiderman'ın "Arayüz Tasarımının 8 Altın Kuralı" [198], Tognazzini'nin "Etkileşim Tasarımının İlk Prensipleri" [199] gibi farklı sezgisellerden de yararlanılmıştır.

Sezgisel değerlendirme, sadece sezgisel kriterlere uygunluk değil, ayrıca İBE ile ilgili bilinen diğer kullanılabilirlik değerlendirme ölçütleri dahilinde uzmanların kendi deneyim ve görüşlerini de dahil ederek gerçekleştirilir [200]. Değerlendirmeyi yapan uzmanların kendi deneyimlerini dahil ediyor olmasından dolayı sezgisel değerlendirme uzman incelemesi olarak da literatürde yer almaktadır. Bir sezgisel değerlendirme (uzman incelemesi) aşağıdaki beş adımdan oluşmaktadır [200]:

- Arayüzün güçlü yanlarının listelenmesi: Değerlendirmeler esnasında sadece problemlerin değil, arayüzün iyi yanlarının da bir listesinin yapılması önemlidir. Böylece sonraki aşamalarda yapılacak arayüz değişiklikleri esnasında güçlü yönlerin korunması sağlanmış olacaktır.
- Kullanılabilirlik problemlerinin listelenmesi: Uzmanlar deneyimlerine ve dayanak aldıkları sezgisel kriterlere göre karşılaştıkları kullanılabilirlik problemlerini listelerler. Ancak problemlerin listelenmesi kadar önemli başka bir işlem ise problemin hangi sezgisel ile bağlantılı olduğunun ve nasıl düzeltilebileceğinin belirtilmesidir. Hatta probleme dair kaynaklar, okumalar da tasarımcıya tavsiye edilebilir. Uzman, bir sezgisel kriter ile doğrudan ilişkili olmadan geçmiş deneyimlerine dayanarak bir problem tespit etmiş ise, bahsettiği konunun neden bir problem olarak değerlendirilmesi gerektiğini açıkça belirtmelidir. Uzman incelemesinde belirtilen tüm kullanılabilirlik problemlerine öznel eleştiriler değil, objektif açıklamalar eşlik etmelidir.
- Kullanılabilirlik problemlerinin önem derecelendirmesi: Tespit edilen her bir kullanılabilirlik probleminin önem derecelerine göre değerlendirilmesi tasarımcıların işleri nasıl sıralayacağı konusunda yardımcı olmaktadır. Bir kullanılabilirlik probleminin önemini üç faktör belirlemektedir [201]. Bunlar; problemin oluşma sıklığı, sorunun ortaya çıkması halinde etkisi ve sorunun sürekliliğidir. Nielsen'in kullanılabilirlik sorunlarının önemini değerlendirmek için önerdiği 0-4 değerlendirme ölçeği önem derecelendirmesinde kullanılmaktadır (Tablo 3.5).
- Kullanılabilirlik problemlerinin düzeltilmesi için tavsiyeler: Bir değerlendirme çalışmasının en önemli adımından birisi de tespit edilen problemleri nasıl çözüleceğine dair tavsiyelerde bulunulmasıdır. Çoğu zaman problemlerin altında yatan nedenler anlaşıldığında, çözümün de ne olduğu kolaylıkla görülebilmektedir.

- İyi uygulama örneklerinin verilmesi: Bazen iyi bir örneğin sunulması binlerce kelime ile kaleme alınmış bir öneriden daha iyi olabilir. Mümkün oldukça öneriler aynı problemlerle karşılaşılmış diğer uygulama örnekleri ile desteklenmelidir.

Tablo 3.5. Nielsen'in 0-4 kullanılabilirlik derecelendirme cetveli [201]

Önem Derecesi	Açıklama
0	Bir kullanılabilirlik problemi yoktur.
1	Yalnızca kozmetik sorun: proje için fazladan zaman mevcut olmadıkça düzeltilmemelidir.
2	Küçük kullanılabilirlik problemi: bu sorunu düzeltmek düşük öncelikli olmalıdır.
3	Başlıca kullanılabilirlik sorunu: düzeltilmesi önemli, bu nedenle yüksek öncelik verilmelidir.
4	Kullanılabilirlik felaketi: Ürün kullanım için piyasaya sürülmeden önce bu sorun kesinlikle düzeltilmelidir.

3.5.1.2. Bilişsel gözden geçirme

Bilişsel gözden geçirme yönteminde kullanıcılar ile arayüz arasındaki etkileşim önceden tanımlanmış bazı görevleri ile değerlendirilmektedir. Bilişsel gözden geçirmenin tanımlayıcı özelliği arayüzleri öğrenim kolaylığına göre değerlendirmesidir. Yöntemin ana odağı keşfederek öğrenmedir [202]. Keşfederek öğrenme ise, test edilen arayüz hakkında yeterli bilgiye sahip olmayan bir kullanıcının, sistemi eğitim almadan ne kadar iyi kullanabileceğidir. Yöntem, bir arayüz tasarlarken, prototip aşamasında veya test aşamasında kullanılabilmektedir. Bilişsel gözden geçirme süreci aşağıda verilen beş adımdan oluşmaktadır [203]:

1. Sistemin tipik kullanıcılarının özellikleri tanımlanır ve belgelenir. Değerlendirilecek tasarımın özellikleri doğrultusunda testte kullanılacak görevler ve gerekli eylemleri yerine getirebilecekleri bir prototip geliştirilir.
2. Gözden geçirmeyi yapmak için bir tasarımcı ile bir veya daha fazla uzman değerlendirici bir araya getirilir.
3. Değerlendiriciler, bir senaryo bağlamında kendilerine verilen her bir görev için gerekli eylemleri birtakım sorulara cevap arayarak gerçekleştirirler. Bu sorular;

a) Kullanıcılar görevi başarmak için ne yapacağını bilir mi?
b) Kullanıcılar sonraki eylemde kullanmaları gereken menü öğelerini görebilir mi?

c) Kullanıcılar geribildirimlere bakarak doğru veya yanlış bir seçim yaptıklarını anlayabilir mi?

4. Bilişsel gözden geçirme esnasında aşağıda verilen kritik hususlar kayıt altına alınır.

a) Nelerin, neden probleme yol açabileceğine dair varsayımlar tanımlanır.

b) Beklenmeyen sorunlar ve tasarım değişiklikleriyle ilgili notlar alınır.

c) Sonuçların bir özeti derlenir.

5. Raporlanan problemlerin çözümü için tasarım revize edilir.

Bilişsel gözden geçirmede tüm süreci iyi bir şekilde kayıt altına almak oldukça önemlidir. Görevler esnasında cevaplanan soruların yanıtlarının kaydedildiği standart formlar kullanılır. Ancak olumsuz cevaplar çok daha detaylı bir şekilde ayrı bir formda kayıt altına alınmalıdır. Sezgisel değerlendirme ile kıyaslandığında belirlenmiş görevler esnasında çıkabilecek problemlerin tespitine odaklanılmaktadır. Karmaşık arayüzlerde faydalıdır ancak bilişsel gözden geçirme yüksek zaman gerektirmektedir.

3.5.2. Test yöntemleri

Test yöntemleri, inceleme yöntemlerinden farklı olarak sistemin gerçek kullanıcıları ile gerçek arayüz üzerinde ve mümkünse gerçek uygulama ortamında gerçekleştirilen testlerdir. Testler esnasında elde edilen veriler analiz edilerek geliştirilen arayüzün kullanılabilirlik açısından değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde öncelikle kullanılabilirlik kriterlerinin neler olduğu belirlenir. Akabinde test hedef kullanıcı kitlesine uygulanır ve elde edilen sonuçlar arayüzün iyileştirilmesi için kullanılır [192]. Test yöntemleri, diğer kullanılabilirlik değerlendirme yöntemlerine göre daha fazla maliyet ve zaman gerektirmektedir [204]. Bu yöntemin en büyük avantajı ise hedef kullanıcıların ne istediğinin doğrudan tespit edilebilmesidir. Test yöntemleri aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir [191].

- Birlikte keşif: İki katılımcının (genellikle birbirlerini tanıyan arkadaşlar) uzmanın gözetimi altında test edilen sistemi birlikte keşfederek serbestçe tartıştıkları test yöntemidir. Test esnasında bir uzman bulunmaması durumunda süreç video ile kayıt altına alınır. Amaç, yakın arkadaşların birbirleriyle görüş paylaşmalarının daha kolay olmasından dolayı daha fazla yorum elde etmektir.
- Soru-cevap uygulaması: Kullanıcılardan bir açıklama ya da kullanım kılavuzu olmadan görevlerle arayüzü kullanmaları istenir. Test süresince kullanıcıların

sorularına cevap verecek bir uzman hazır bulundurulmaktadır. Bu test yöntemi ile kullanıcıların sorduğu sorulara dayanarak, hangi konularda sorun yaşandığı tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Sesli düşünmeye göre daha doğal bir yöntemdir.

- Sesli düşünme uygulaması: Kullanılabilirlik testi sırasında, test kullanıcılarının sistemle etkileşime girerken düşüncelerini, duygularını ve fikirlerini sözlü olarak belirtmeleri istenir. Çok çeşitli bilişsel etkinlikleri yakalamakta çok faydalıdır.
- Günlük kayıtları: Kullanıcılar bir ürünü uzun süreli kullanırken, sistemden istatiksel bilgiler otomatik olarak toplanır.
- Saha gözlemi: Kullanıcıların bir ürünü nasıl kullandıklarını anlamak için gerçek yaşam alanlarında gözlemlenmeleridir. Saha gözlemleri, uygulamanın doğal ortamında kontrol edilmesini sağlaması açısından önemlidir.
- Performans ölçümü: Performans ölçümünde kullanıcılar kendilerine verilen görevleri yerine getirirken, deneyi takip eden uzmanlar tamamlama zamanı, hata, vb. performans verilerini toplarlar. Deneyler esnasında kullanıcıların hareketleri, sesleri video ile kayıt altına alınabilir. Böylece, testin nasıl ilerlediği tekrar tekrar izlenebilir. Kullanıcılar deneyi yapılan arayüz ile ilgili deneyimli olabileceği gibi deneyimsiz de olabilir. Kısacası bu yöntem deney sahibine oldukça yüksek esneklik tanımaktadır.

Yukarıda verilen yöntemlerden performans ölçümü kontrollü bir ortamda gerçekleştiriliyor olması ve deney sahibinin ölçümde kullanılacak değişkenler üzerinde kontrol sahibi olması bakımından önlemlidir. Görevler "yapılandırılmış" ve "yapılandırılmamış" olarak iki farklı şekilde verilir. Yapılandırılmış görevlerde kullanıcının yerine getireceği görevler adım adım bir liste halinde sunulur. Kullanıcı bu listeyi takip etmekle yükümlüdür. Yapılandırılmamış görevlerde ise kullanıcılara görevler verilir ancak sıralama kullanıcıya bırakılır. Görevler arasından seçtiği herhangi bir görev istediği sırada ve şekilde tamamlar [205].

3.5.3. Kullanıcı raporları

Kullanıcı raporları diğer yöntemlere göre çok az zaman gerektiren ve daha az karmaşık yöntemlerdir. Kullanıcıların bakış açılarını tam olarak değerlendirmek ve objektif olarak ölçmek zordur. Bu durumda kullanıcı raporları öznel verilerin toplanmasına yardımcı olurlar. Yüz yüze görüşme ve anket uygulaması olarak ikiye ayrılırlar [190].

- Yüz yüze görüşme: Değerlendiriciler, yüz yüze veya çevrimiçi toplantı yoluyla kullanıcıların ürün kullanılabilirliği hakkındaki görüşlerini alırlar. Kullanıcı deneyleri sonrasında tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılabilir. Kullanıcılardan karşılaştıkları sorunlara dair bilgileri daha detaylı bir şekilde toplamak mümkündür.
- Anket Uygulaması: Sistemin değerlendirilmesi için hazırlanmış anket formları kullanıcılara dağıtılır ve sorulara cevap vermeleri istenir. Anketler genellikle test yöntemlerinden önce veya sonra yapılırlar [206]. Öncelikle geliştirilen prototipin kullanıcılar tarafından denenmesine izin verilir ve ardından kullanıcılar, önceden hazırlanmış soruları cevaplandırırlar. Cevaplardan arayüzün kullanılabilirliği konusunda çıkarımlar yapılır. Anketler ile kullanıcılar arayüzün yeterliliği, etkinliği, anlaşılabilirliği ve estetiği ile ilgili sonuçlara ulaşılmaktadır. Ancak anketler tek başına kullanılmamalıdırlar.

3.6. Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarında Kullanılabilirlik Çalışmaları

AG alanı ile ilgili çalışma sayısında son yıllarda bir artış olsa da başarılı bir AG uygulaması geliştirmek oldukça zordur. Teknolojide yaşanan gelişmelere rağmen AG uygulamaları halen laboratuvar ortamlarıyla sınırlı kalmakta gerçek hayat problemlerinin çözümü için sayıda uygulama geliştirilmektedir. Çünkü eş zamanlı takip, donanım yeterliliği gibi aşılması gereken konular bulunmaktadır [127].

AG uygulamalarının geliştirilmesi tarafında üzerinde durulması gereken bir diğer konuda kullanılabilirlik ve etkileşimdir. Zira, teknoloji ne kadar ilerlerse ilerlesin, insan-bilgisayar etkileşimi perspektifinden değerlendirilmemiş bir uygulamanın sürdürülebilir olması mümkün değildir. AG uygulamalarında etkileşimin nasıl kurulması gerektiğini, kullanılacak yöntemlerin neler olduğunu, hangi kriterlere dikkat edilmesi gerektiğini açığa kavuşturmak elzemdir. Bu nedenle mevcut durumun tespiti amacıyla ilgili literatür incelemesi yapılmış ve bu başlık altında sunulmuştur.

3.6.1. Başa giyilen AG sistemlerinde kullanılabilirlik ve etkileşim

Akıllı gözlükler gibi başa giyilen teknolojiler artırılmış gerçeklik deneyimini ellerin kullanılmasına gerek kalmadan sağlayabilmektedirler. Artırılmış gerçekliğin endüstriyel uygulamalarında da ellerin serbest kalması (etkileşim amacıyla kullanılmaması) yapılacak görevlerin veriminin ve etkililiğinin artırılması için oldukça

önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında AG'nin endüstri uygulamalarının üzerinde duruluyor olması ve ayrıca Şekil 2.50'de de verildiği üzere son yıllarda HMD sistemlerinin AG alanında daha fazla kullanılması nedeniyle, literatürde başa giyilen teknolojiler üzerine yapılmış kullanılabilirlik ve insan-bilgisayar etkileşimi çalışmaları sistematik olarak taranmış ve incelenmiştir.

3.6.1.1. Sistematik literatür taramasının metodu

Tarama çalışmasında yöntem olarak sistematik tarama metodu kullanılmıştır. Sistematik derleme, ele alınana bir konuya dair oluşan sorulara cevap bulmak amacıyla ilgili alanda yapılmış akademik çalışmaların kapsamlı bir şekilde taranmasıdır. Sistematik taramada ulaşılan çalışmalara dahil etme ve dışlama kriterleri uygulanmakta ve çalışmanın sorularına cevap verebilecek uygun araştırmalar tespit edilmektedir. Ayrıca araştırmaların kalitesinin değerlendirilmesiyle gerçekten katma değerli araştırmalara ulaşılabilmektedir. Son olarak taramanın son aşamasına kadar ulaşan araştırmalarda yer alan bulgular sentezlenmekte ve raporlanmaktadır [131, 143]. Literatür çalışmalarının sistematik olarak ele alınması sürecinde bu amaçla geliştirilen SALSA çerçevesi kullanılacaktır. SALSA aşamaları önceki bölümlerde anlatılmış ve Tablo 2.2'de detaylı olarak verilmiştir. Sistematik taramalarda çalışmanın kapsamı ve cevap aradığı araştırma soruları net bir şekilde tanımlanmalıdır.

1) HMD teknolojileri kullanılan AG uygulamalarında İBE ve kullanılabilirlik çalışmalarının durumu nedir?
2) HMD sistem arayüzlerinin değerlendirilmesinde kullanılması gereken sezgiseller ve kriterler nelerdir?

Literatür taraması kapsadıkları bilimsel dergiler ve yayınlar dikkate alınarak, Scopus, Science Direct, IEEE, ACM Library, Wiley Online Library, Web of Science, JSTOR, Emerald ve Taylor & Francis online veri tabanlarında yapılmıştır.

3.6.1.2. Sistematik literatür taramasında SALSA adımlarının uygulanması

SALSA sırasıyla arama, değerlendirme, sentezleme ve analiz adımlarından oluşmaktadır. Arama işleminin yapılabilmesi için çalışma kapsamında benimsenen amaçlara uygun arama terimlerinin öncelikle belirlenmesi gerekmektedir. Taramam çalışmasının soruları doğrultusuna "insan bilgisayar etkileşimi", "kullanılabilirlik",

“sezgiseller”, “artırılmış gerçeklik”, başa takılan”, “başa giyilen” ve “gözlük” kelimeleri kullanılarak (("human-computer interaction" OR "usability" OR “heuristics”) AND ("augmented reality") AND ("head worn" OR "glasses" OR "head mounted")) şeklinde bir arama terimi belirlenmiştir. Aramaların hangi veritabanlarında gerçekleştiği ve tespit edilen çalışma sayıları Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6. Arama yapılan veritabanları ve arama kapsamı ve sonuçlar

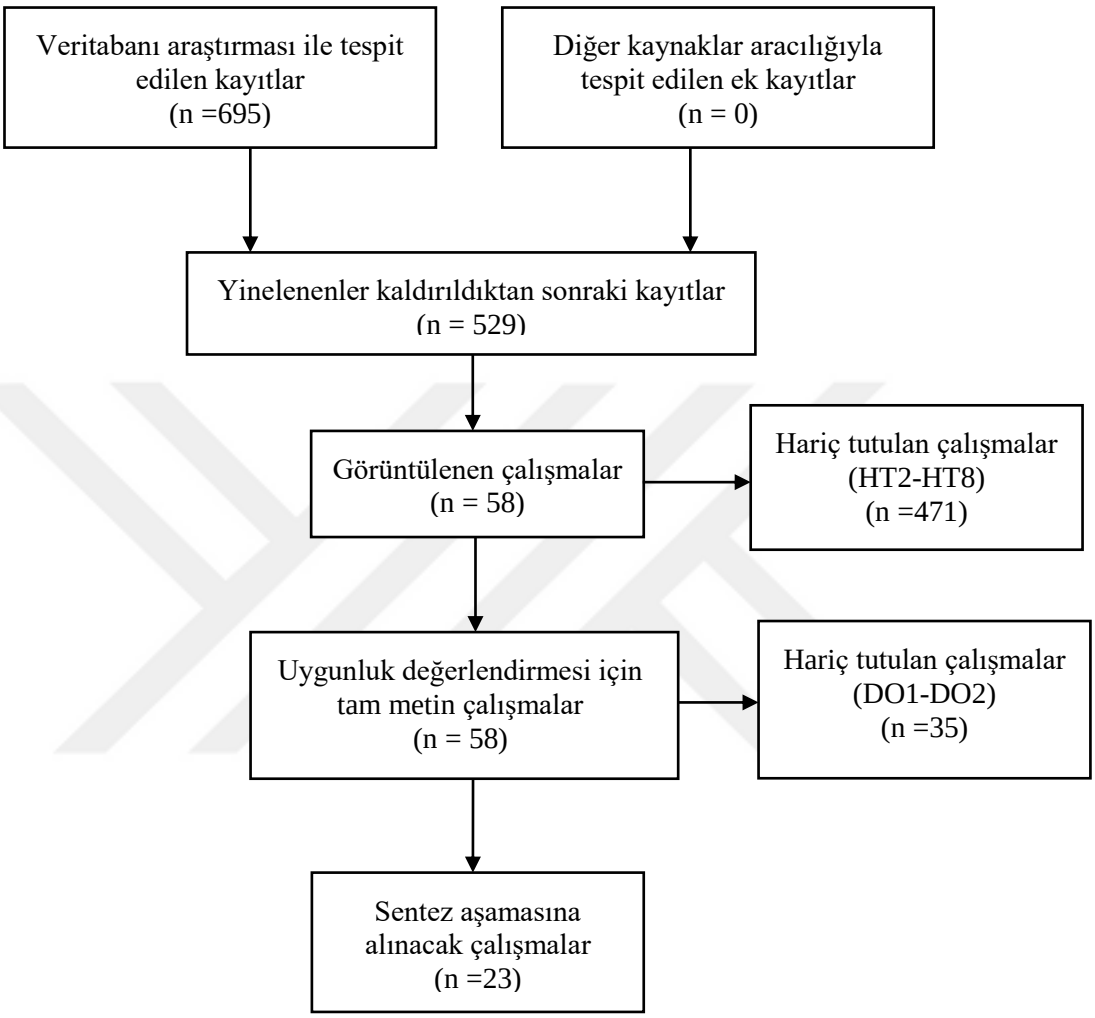
Veri Tabanı	**Arama Kapsamı**	**Sonuç**
Scopus	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	265
Science Direct	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	20
IEEE	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	91
ACM Library	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	31
Wiley Online	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	3
Web of Science	Başlık + Özet + Anahtar Kelimeler	69
JSTOR	Tüm Alanlar	17
Emerald	Tüm Alanlar	28
Taylor & Francis	Tüm Alanlar	171
	Toplam	**695**

Değerlendirme aşamasında ise tarama çalışmasının hedeflenen kapsamı doğrultusunda belirlenen dahil etme ve hariç tutma kriterleri dikkate alınarak ilgili makalelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Değerlendirme aşamasında kullanılacak kriterler Tablo 3.7’de sunulmuştur. Bu aşamada PRISMA akış diyagramından yararlanılmıştır [144]. İlk olarak tekrarlanan çalışmalar tespit edilen makaleler havuzundan kaldırılmış, ardından hariç tutma kriterleri (HT2 - HT8) doğrultusunda ön inceleme yapılarak kriterlere uyan çalışmalar değerlendirme dışına alınmıştır.

Tablo 3.7. Çalışmada dikkate alınan hariç tutma ve dahil olma kriterleri

HT1	Tekrarlanan çalışmalar
HT2	Dili İngilizce olmayan çalışmalar
HT3	Özet çalışmalar
HT4	Önsöz ve genel açıklamalar
HT5	İBE ve kullanılabilirlik ile ilgili olmayan çalışmalar
HT6	HMD teknolojisi kullanılmayan çalışmalar
HT7	Sanal gerçeklik çalışmaları
HT8	Kullanılan yöntem ve metotların açıkça belirtilmediği çalışmalar
DO1	Kullanılabilirlik analizi içeren çalışmalar
DO2	Sezgiseller veya çeşitli kriterler geliştirilen çalışmalar

Son olarak dahil etme kriterleri dikkate alınarak kalan makalelerin tam metinleri okunmuş ve bu tarama çalışmasının sorularına cevap verebilecek çalışmalar tespit edilmiştir. Gerçekleşen hariç tutma ve dahil etme işlemleri Şekil 3.15'de verilmiştir.



Şekil 3.15. Sistematik tarama çalışmasına ait PRISMA akış diyagramı

Yapılan işlemler sonucunda, arama işlemi ile elde edilen 695 makaleden 23 adetinin kriterlere uygun olduğu görülmüştür. Ancak sistematik literatür çalışmalarında sentezleme adımına geçilmeden önce makalelerin kalitesinin de gözden geçirilmesi gereklidir. Aşağıda kalite değerlendirilmesinde kullanılacak kriterler verilmiştir (Tablo 3.8). Kriterler tarama çalışmasının amacı ve araştırma soruları çerçevesinde belirlenmiştir. Her bir makale kriterlere göre değerlendirilmiş ve makalelerin kalitesi karşılama durumlarına göre "evet", "kısmen" veya "hayır" olarak belirlenmiş ve 1, 0.5 veya 0 değerleri verilmiştir. Toplamda 7 puan üzerinden değerlendirilen makalelerin kalite değerleri ortalaması 5,2 olarak bulunmuştur.

Tablo 3.8. Kalite değerlendirmesinde dikkate alınan kriterler

Sorular	**Seçenekler**
Amaç ve araştırma soruları net bir şekilde açıklanmış mıdır?	e/k/h
Benzer çalışmalar incelenmiş ve tartışılmış mıdır?	e/k/h
Önerilen bileşen veya arayüz veya etkileşim türlerinin yapısı net bir şekilde tarif edilmiş midir?	e/k/h
Önerilen bileşen veya arayüz veya etkileşim türleri bir prototip ile denenmiş midir?	e/k/h
Önerilen bileşen veya arayüz veya etkileşim türleri kullanılabilirlik testleri ile test edilmiş midir?	e/k/h
Çalışmada elde edilen bulgular açıkça belirtilmiş midir?	e/k/h
Gelecek çalışmalara katkı sağlayacak bir sonuca ulaşılmış mıdır?	e/k/h

Son değerlendirme aşamasında geçen 23 makale detaylı bir şekilde incelenmiş ve Tablo 3.9'da listelenmiş olan veriler derlenmiştir. Yayınlanma tarihi çalışmaların yıllara göre nasıl bir seyir izlediğinin tespit edilmesinde önemli iken, takip yöntemi verileri HMD sistemlerinde hangi takip yöntemlerinin kullanıldığının belirlenmesi için gereklidir. Zira takip yöntemleri bir yazılımın arayüz tasarımını ve etkileşim türünü belirleyebilmektedir. Çalışmanın türü tamamlayıcı bir veri olup, çalışmaların ne kadarının yeni yöntem ve metotları geliştirilen teknik makale ne kadarının ise alan uygulamaların gerçekleştirildiği uygulama makaleleri olduğunun tespit edilmesi için eklenmiştir. Çalışmalarda kullanılan dijital içeriklerde yine arayüz tasarımını etkileyen detaylardır. Son olarak doğrudan İBE disiplini ile ilgili etkileşim türü ve değerlendirme yöntemleri verileri sentezleme aşamasında dahil edilmiştir.

Tablo 3.9. Sentezleme aşamasında dikkate alınacak başlıklar ve numaraları

Yayınlanma Tarihi	2000(1)-2018(19)
Takip Yöntemi	işaretçisiz(1); işaretçili(2), sadece sensör(3); belirtilmemiş(4)
Çalışmanın Türü	teknik makale(1); uygulama makalesi(2); diğer(3)
Kullanılan Dijital İçerikler	2D resim/video/model(1); 2D metin(2); 3D model/animasyon(3); 3D/2D melez(4); ses(5); menü, form, düğme(6); belirtilmemiş(7)
Etkileşim Türü	Aygıt ile temas(1); vücut ile temas(2); eller kullanılmadan(3); eller kullanılarak(4); belirtilmemiş(5)
İBE Değerlendirme Yöntemleri	inceleme yöntemleri(1); test yöntemleri(2); kullanıcı raporları(3); belirtilmemiş(4)
Görüntüleme Teknolojileri	HMD-optik(a); HMD-video(b)

Sentezleme işlemi ile birlikte makaleler detaylı olarak incelenmiş ve çalışmaların her bir başlığa göre dağılımları belirlenmiştir. Sistematik tarama yöntemlerinin en büyük özelliği tekrar edilebilir olmasıdır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar SALSA çerçevesinin son adımı olan analiz aşaması için Tablo 3.9'da verileri temsil eden rakamlar ve harfler kullanılarak görselleştirilmiştir. Tablo 3.10'da incelemeye alınan 23 makaleye ait veriler detaylı bir şekilde sunulmuştur. Burada rakamlar sentez aşamasında dikkate alınan verilerin alt başlıklarını, harfler ise optik-HMD (a) ve video-HMD (b) teknolojilerini göstermektedir. Örneğin, yayınlanma tarihi sütunundaki veri değeri '12a' olan bir makalenin, 2013 yılında yayınlandığı ve bu çalışmada optik-HMD sistemi kullanıldığı çıkarımı yapılabilir.

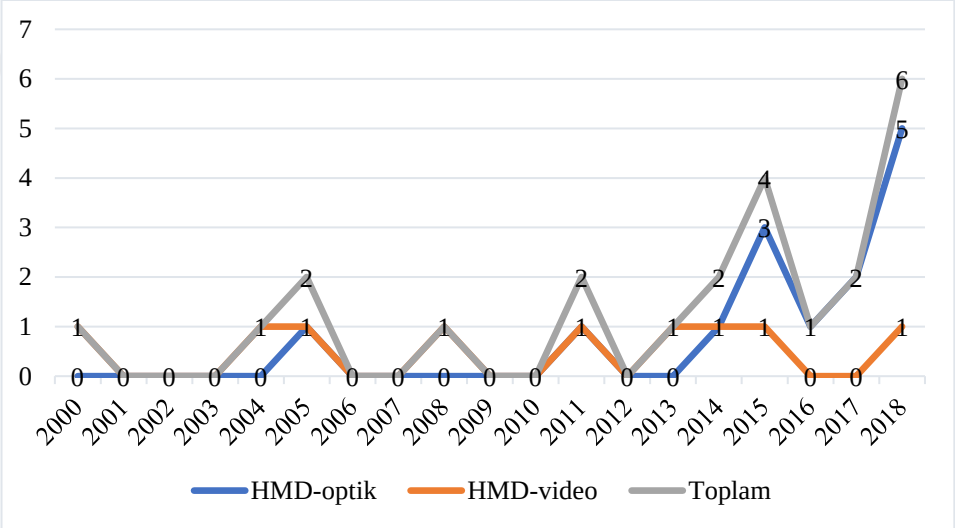
Tablo 3.10. Sentezleme adımı sonrasında incelenen makalelere dair veriler

Makale	Yayınlanma Tarihi	Takip Yöntemi	Çalışmanın Türü	Kullanılan Dijital İçerikler	Etkileşim Türü	İBE Değerlendirme Yöntemi
[189]	15b	4b	1b	6b	4b	2b - 3b
[207]	6b	4b	1b	7b	4b	4b
[208]	16a	4a	2a	7a	3a - 4a	2a
[209]	19a	4a	2a	7a	3a - 4a	2a - 3a
[210]	12a	3a	1a - 2a	3a - 5a	3a	2a - 3a
[211]	1b	1b	1b	6b	2b	4b
[212]	18a	1a	2a	3a	5a	2a - 3a
[213]	19a	4a	1a - 2a	3a	5a	2a
[214]	18a	4a	2a	1a - 2a	3a	4a
[215]	6a	4a	2a	7a	4a	2a
[216]	19a	4a	2a	4a - 6a	4a	2a - 3a
[217]	19a	4a	2a	3a	5a	2a - 3a
[218]	19b	4b	1b	1b - 6b	4b	2b
[219]	16a	4a	3a	7a	5a	4a
[220]	20a	4a	2a	1a - 2a	5a	2a - 3a
[221]	14b	1b - 2b	1b - 2b	4b	4b	2b
[222]	16a	2a	2a	2a	5a	2a
[223]	5b	4b	2b	2b - 6b	3b - 4b	2b
[224]	16b	4b	2b	4b - 6b	2b	2b - 3b
[225]	9b	4b	2b	2b	5b	2b
[226]	15a	4a	1a - 2a	1a	5a	4a
[227]	17a	3a	2a	1a - 2a	5a	4a
[228]	12b	3b	2b	1b - 2b	5b	2b - 3b

3.6.1.3. Sistematik literatür taramasının sonuçları

SALSA çerçevesinin son adımı analiz adımıdır. Grant ve Booth'un literatür çalışması türlerini irdeledikleri çalışmalarına göre, sistematik literatür taramasının analiz adımı tespit edilen sonuçları, önerileri, tespit edilemeyen konuları, belirsizlikleri ve gelecekteki araştırmalar için tavsiyeleri içermelidir [143]. Başlıkta öncelikle Tablo 3.9'deki verilerden elde edilen sonuçlar açıklanmış akabinde makalelerden elde edilen fikirler ve genel çerçeve hakkında bilgi sunulmuştur.

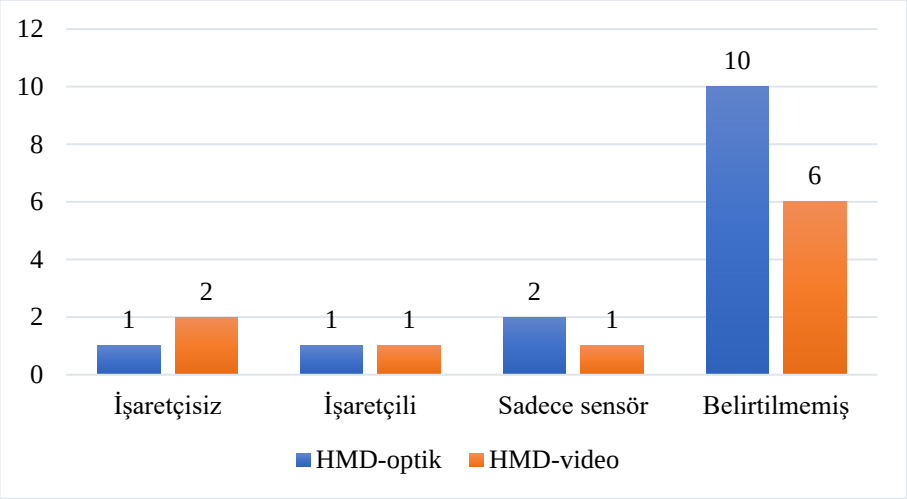
Şekil 3.16'da çalışmaların HMD teknolojilerine ve yıllara göre dağılımları verilmiştir. Literatür taramasında bir yıl sınırlaması hariç tutma kriterleri arasına alınmamış olmasına rağmen ilk çalışmanın 2000 yılına ait olduğu görülmektedir. Sentez aşamasında 23 makale ele alındığı için kesikli bir grafik oluşmuştur. Ancak bu grafikte en dikkat çeken husus son yıllarda optik-HMD teknolojisinin kullanıldığı çalışmalarda gözlemlenen yükse ivmeli artıştır. Video-HMD teknolojilerine ilişkin çalışma sayısı oldukça durağan seyretmiştir.



Şekil 3.16. İBE literatürünün HMD teknolojilerine ve yıllara göre dağılımı

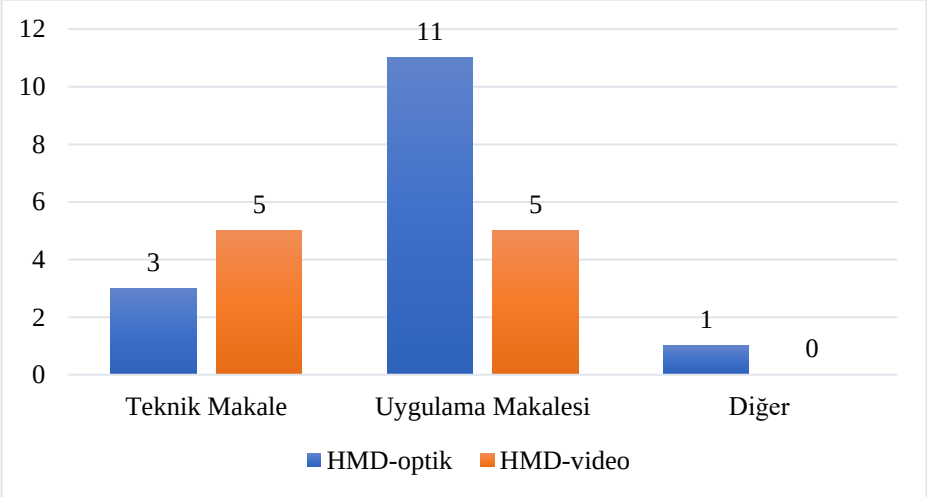
HMD teknolojilerinin takip yöntemlerine göre dağılımları incelendiğinde çalışmaların yaklaşık %65'inde herhangi bir takip yönteminin belirtilmediği görülmektedir. İşaretçili, işaretçisiz ve sensörlü takip yöntemleri sadece birkaç çalışmada yer almışlardır. Bu literatür taramasının asıl amacının HMD teknolojilerinin kullanıldığı AG uygulamalarında İBE ve kullanılabilirliğin değerlendirilmesi olduğu dikkate alındığında literatürdeki çalışmaların kurulacak etkileşim için elzem olmasına rağmen

takip yöntemlerini deneylerine dahil etmedikleri ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.17). Ayrıca PRISMA akış diyagramında belirtilen uygunluk değerlendirme aşamasında ele alınan 58 çalışmanın tam metinlerinin okunması esnasında da takip yöntemlerinin bahsedildiği çalışmalarla nadiren karşılaşılmıştır.



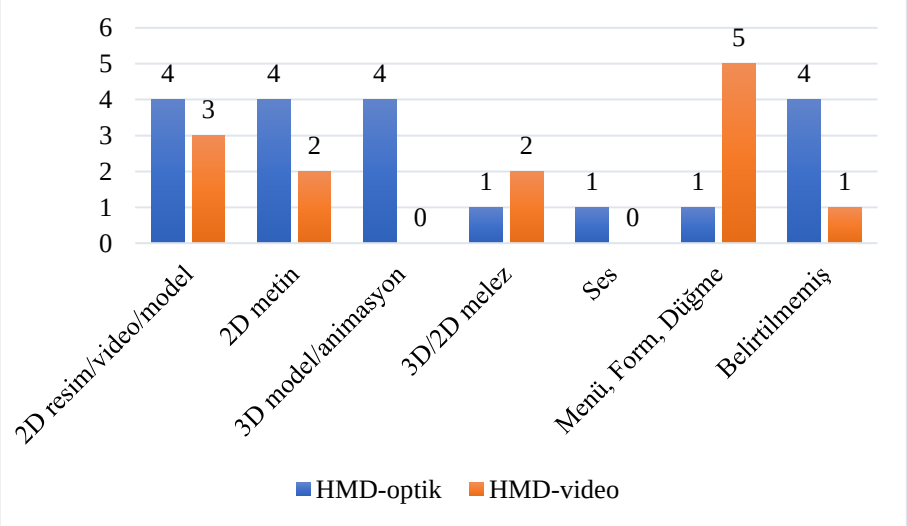
Şekil 3.17. HMD teknolojilerinde takip yöntemlerinin dağılımı

Şekil 3.18'de ise makale türlerinin dağılımları verilmiştir. İncelenen çalışmaların büyük çoğunluğunun uygulama makalesi olduğu görülmüştür. Bunun meali, yapılan çalışmaların yeni yöntem ve teknik geliştirmek yerine çeşitli alanlara AG uygulamaların uyarlandığıdır. Uygulama makaleleri AG'nin kullanım alanları doğrultusunda yeni ufuklar açmakta ve kapsamı genişletmektedir. Ancak bu çalışmaların kullanılabilirlik, sezgisel kriterler, etkileşim yöntem önerileri gibi teknik makalelerle desteklenmesi gerekmektedir.



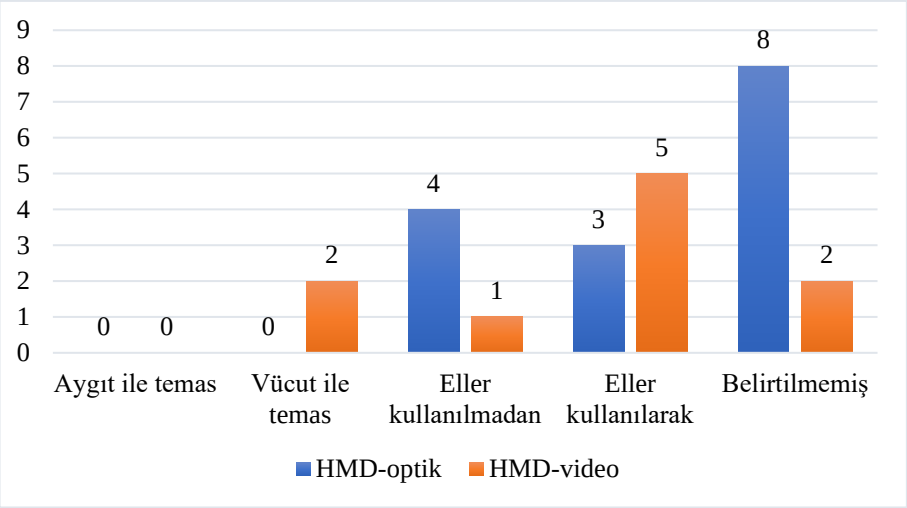
Şekil 3.18. HMD teknolojilerine göre İBE çalışmalarının makale türleri

Çalışmalarda gerçekliğin artırılması için kullanılan dijital içerikler incelendiğinde ise 2D içeriklerin daha fazla kullanıldığı görülmektedir (Şekil 2.19). Bunun nedeni AG teknolojilerinin halen gelişme aşamasında olmaları ve çalışmaya konu olan HMD cihazlarının işlem gücü ile birlikte ortaya çıkan batarya sorunudur. Zira dijital içerikler ne kadar detaylı ve karmaşık olursa cihazların elektrik tüketimi de o oranda artmaktadır. Hatta gerçekleştirilen testlerin bile tamamlanamaması mümkündür. Bir diğer önemli husus ise tablet bilgisayarlar gibi görüntüyü bir ekran üzerinden sunan video-HMD cihazlarında menü, form, düğme tipi etkileşim daha fazla kullanılmaktadır (Şekil 2.19). Son olarak sesli içeriklerin kullanılmadığı görülmüştür. Halbuki kullanıcıların daha rahat AG deneyimi yaşamasını mümkün kılan HMD teknolojileri ile geliştirilen uygulamalarında sesli içeriklerin daha fazla kullanılması beklenmektedir.



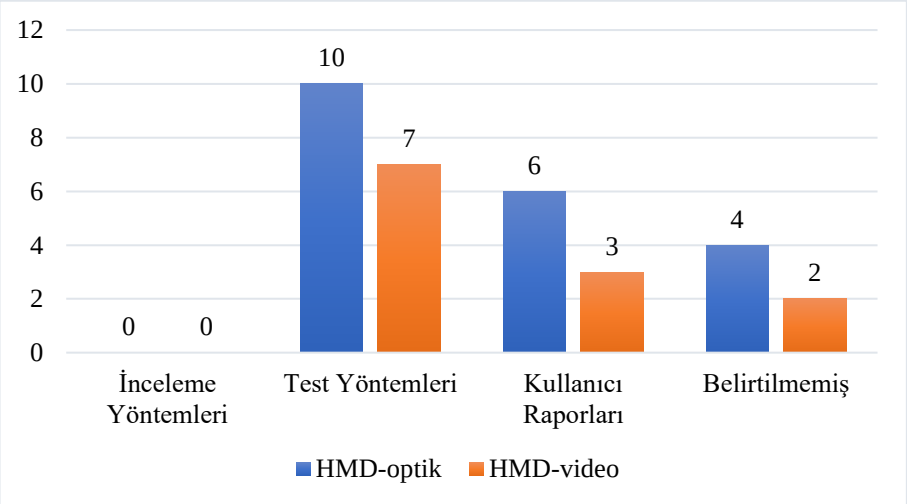
Şekil 3.19. HMD teknolojilerinde kullanılan dijital içerikler

Şekil 3.20'de etkileşim türlerinin dağılımlarına dair veriler sunulmuştur. Etkileşim türleri temas gerektiren ve temas gerektirmeyen olarak iki gruba ayrılmışlardır. Bu verilerden dikkat çeken temas gerektiren etkileşim türlerinin HMD teknolojilerinde kullanımının oldukça az gerçekleşmesidir. Hatta optik-HMD teknolojileri kullanılan çalışmalarda temas gerektiren etkileşim yöntemleri kullanılmamıştır. Temas gerektirmeyen etkileşim türlerinde ise havada yapılan el hareketleri ile etkileşim (gesture) daha fazla tercih edilmiştir. Ayrıca etkileşim yöntemi belirtilmeyen veya kullanılmayan makale sayısının da oldukça yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.20. HMD teknolojilerinde etkileşim türlerinin dağılımı

Son olarak Tablo 3.21'de çalışmalarda önerilen uygulamaların değerlendirilmesi için kullanılan kullanılabilirlik değerlendirme yöntemlerinin dağılımları verilmiştir. İBE uzmanlarının görüşlerinin alındığı sezgisel değerlendirme veya bilişsel yürüyüş, vb. yöntemlerin kullanımına rastlanılmamıştır. Çalışmaların çoğunluğunda geliştirilen uygulamaya dair performans testleri yapılmış; ayrıca test yöntemleri sonrası anketler uygulanmış bilişsel yükü ölçmek için NASA-TLX gibi kullanıcı raporları uygulanmıştır. Çalışmaların yaklaşık %25'inde kullanılabilirlik değerlendirilmesi yapılmamıştır. Bu verilerden elde edilebilecek ne ciddi çıkarım ise; sezgisel değerlendirme yöntemlerinin kullanılmamasının, AG uygulamalarının tasarım aşamasında yeterince kontrol edilememesine ve dolayısıyla son kullanıcılara kullanılabilirliği düşük uygulamaların sunulmasına sebep olma potansiyelidir.



Şekil 3.21. Kullanılabilirlik değerlendirme yöntemlerinin dağılımı

Sistematik literatür taraması sonucunda incelenen makalelerden ikisinde arayüz tasarımı ile sezgisel kriterlere rastlanmıştır. Ancak diğer çalışmalarda toplu bir şekilde sezgisel kriterlerin önerilmesi söz konusu olmasa da arayüz bileşenlerinin en az birine dair bir öneri bulunmaktadır. Gale vd. çalışmalarında daha çok eğlence amaçlı uygulamalarda kullanılmak üzere sezgisel kriterler önermişledir. Ancak uygulamaların tamamında kullanılabilecek "sesli ve görsel temsillerin desteği", "işaretçilerin görünür olması", "kullanıcının güvenliğini öncelemesi"," uygulama kullanım süresinin konfor etkisi" gibi kriterlere yer vermişlerdir [219].

Werrlich vd. ise montaj işlemlerinde eğitim amacıyla kullanılmak üzere için geliştirdikleri bir uygulama üzerinde 13 erkek 2 kadın katılımcı ile deneyler yapmışlar ve AG uygulamalarında kullanılmak üzere on adet tasarım kriterleri önermişlerdir [216]. Bu kriterler, basit tasarla, kullanıcıya kontrolü ver, birden fazla geri besleme kullan, farklı kullanıcı seçenekleri sun, sesli etkileşim kullan, bağlam bilgisi ekle, oyunlaştırma için öğe ekle, farklı biçimlerde bilgi sun, temiz ve çok katmanlı bir mimari oluştur, 3d içerik kullan olarak belirlenmiştir. Kriterlerin oldukça kapsayıcı olmaları nedeniyle, birçok farklı alana uyarlanmaları mümkündür.

Rehman ve Cao ise literatürdeki çalışmalar dayanarak, bir AG uygulamasının arayüzünün hangi özelliklere sahip olması gerektiğini listelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre; "arayüz elemanlarını ayırt etmek kolay olmalıdır", "görsel talimatlar seslendirme ile desteklenmelidir", "sanal görseller basit, duyarlı, yaygın bilinen ve anlaşılır olmalıdır", "en uygun takip metodu kullanılmalıdır" [212].

Ayrıca bazı makalelerde el ile dokunmadan etkileşim yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmıştır [189, 218]. Özellikle HMD teknolojisinin kullanılması ile ellerin serbest kalasının önemli olduğu ifade edilmiştir. El doku renginin tespit edilerek elin sınırları belirlenmeye çalışılmış ancak arka plan ve ortam renklerinin el rengine yakın olması durumunda algılama sorunları yaşanmıştır [189]. Datcu vd. ise farklı etkileşim türlerini test etmişler ve serbest el etkileşiminin somut etkileşimden daha iyi olmadığı sonucuna ulaşmışlardır.ve ayrıca tek el üzerinde canlandırılan sabit klasik menü arayüzünün de daha iyi bir etkileşim sunmadığı görülmüştür [224].

4. KULLANILABİLİR BİR AG UYGULAMASI: MONTAJ A+

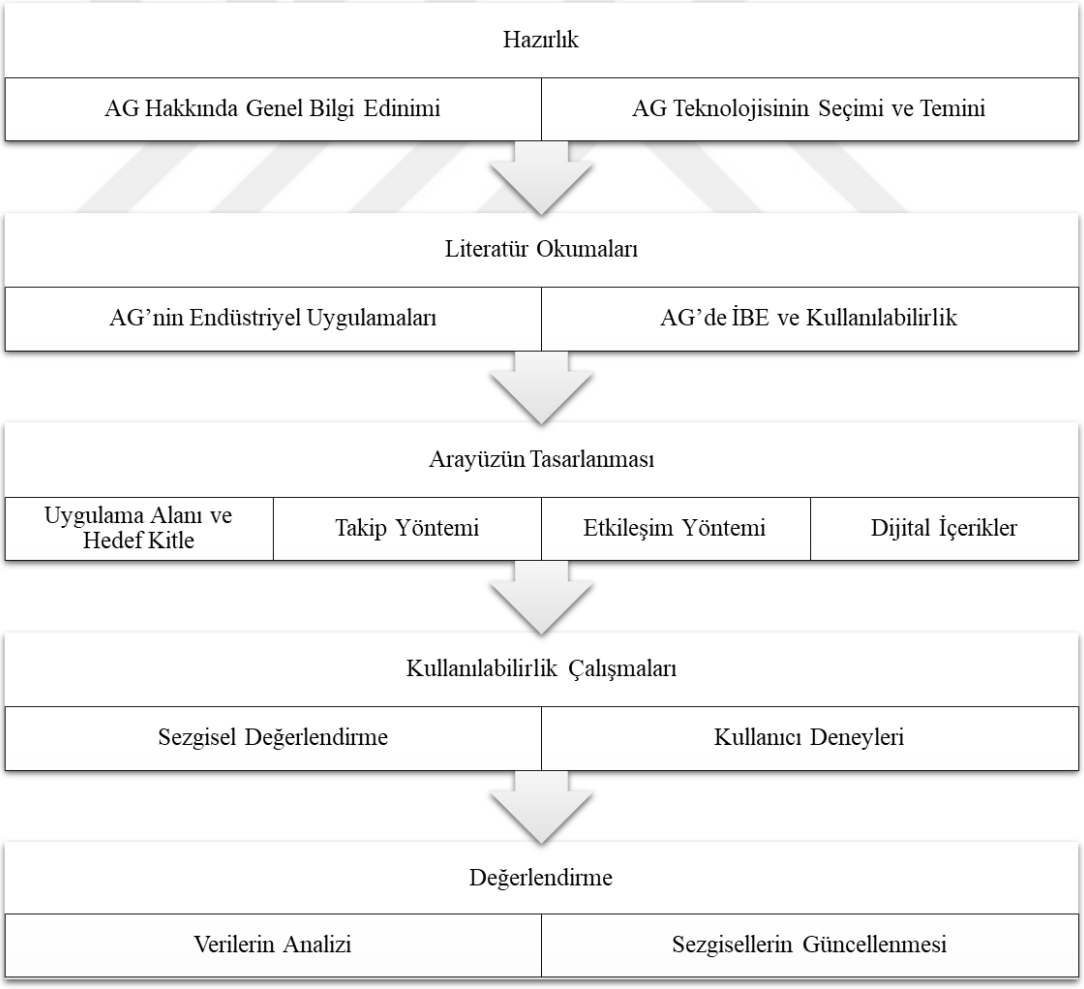
Bu başlık altında insan-bilgisayar etkileşimi perspektifinden değerlendirilerek, AG'nin endüstride uygulanabilirliğinin test edilmesi amacıyla geliştirilen bir uygulamaya yer verilmiştir. Montaj A+ olarak adlandırılan uygulamada gerçekliği artırmak için optik-HMD teknolojisi kullanılmış ve kullanılabilirlik testlerinin yapılabilmesi için bilgisayar donanımlarının montaj işlemleri ve süreci test ortamı olarak çalışmaya dahil edilmiştir.

4.1. Uygulamanın Genel Çerçevesi

Tezin bu bölümüne kadar artırılmış gerçeklik ve insan-bilgisayar etkileşimi konularında teoriye ve pratiğe dair bilgiler verilmiş; literatürde yer alan akademik çalışmalar sistematik yöntemlerle taranmış ve raporlanmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde endüstriyel uygulamalar içerisinde bakım uygulamalarının çok ciddi oranda pay sahibi olduğu ve işletmeler tarafından pratik olarak da kullanılmaya başlanıldığı görülmüş; ayrıca optik HMD türü cihazların son yıllarda daha popüler hale geldiği ve yakın gelecekte bu donanım türü üzerinde oldukça fazla AG uygulamasının geliştirilebileceği görülmüştür. Ancak literatür İBE ve kullanılabilirlik perspektifinden incelendiğinde ise optik-HMD ve video-HMD kullanılan AG uygulamalarında birçok farklı arayüz ve etkileşim metodu önerilmesine rağmen, tam anlamıyla kullanılabilirlik değerlendirmesinin yapıldığı çalışmalara rastlanmamıştır. Ek olarak 3. bölümde raporlanmış ve bulguları sunulmuş olan sistematik literatür taramasında, incelenen makalelerden hiçbirinde sezgisel değerlendirme veya bilişsel gözden geçirme gibi inceleme yöntemlerinin kullanılmadığı tespit edilmiştir.

Bu hususta hareket ile AG'nin endüstriyel alanda umut vadeden uygulama türlerinden birisi olan bakım süreçleri için kullanılabilir bir AG uygulaması geliştirilmiştir. Ancak geliştirilen uygulamanın kullanılabilir kılınabilmesi fikir aşamasından başlayarak tasarım ve sonlandırma aşamalarına kadar İBE disiplinini sürece dahil etmeyi gerektirmiştir. Kullanılacak donanımın temininden, geliştirme ortamları ve eklentilere kadar tüm bileşenlerin en uygunları seçilip temin edilmiştir.

Geliştirilen uygulamanın temel amacı AG yazılımlarının endüstride kullanılıp kullanılamayacağının belirlenmesidir. Ancak bunun için öncelikle kullanılabilir, kolay öğrenilebilir ve etkili bir AG yazılımın geliştirilmesi gereklidir. Zira arayüzün kullanılabilirliğinden emin olunamayan bir yazılımın endüstride kullanım için uygun olup olmadığını anlamak mümkün değildir. Bu nedenle bir endüstri uygulaması olan montaj/demontaj işlemlerini modelleyecek bir deney ortamı oluşturulmuştur. Deney için masaüstü bilgisayara ait donanım bileşenlerinin montaj işlemleri kullanılmıştır. Yapılan testler sonrasında montaj süreçleri için kullanılabilir bir AG yazılımının tasarımında hangi kriterlerin dikkate alınması gerektiği belirlenmiş ve montaj işlemlerine dair performanslar ölçülerek AG'nin endüstriyel uygulamalarının taşıdığı potansiyel tartışılmıştır. Şekil 4.1'de çalışma kapsamında geliştirilen AG destekli bakım uygulamasının geliştirme adımları görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. AG uygulamasının gelişim adımları ve sonuçlandırılması

4.2. Kullanılacak AG Teknolojisinin Belirlenmesi

AG'nin bakım ve montaj süreçlerinde kullanımına dair literatürde yapılmış oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar 2. bölümde yapılan literatür taraması ile analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalara bakıldığında bakım ve montaj uygulamalarında çok farklı AG teknolojisinin kullanıldığı görülmektedir. Burada cevaplanması gereken soru hangi donanımın veya teknolojinin seçilmesi gerektiğidir. Tablo 2.1'de AG teknolojileri kullanım konumuna göre başa giyilen, el ile tutulan ve mekânsal olarak üç gruba; taşıdıkları görme teknolojisine göre ise, optik görme, video görme ve projeksiyonlu görme olarak üç gruba ayrılmışlardır. Öncelikle bakım ve montaj gibi ellerin kullanılacağı bir işlemde öncelikle ellerin serbest olması gereklidir. Ayrıca mobil olmak sorunun olduğu yere hareket edebilmek de önem arz edebilmektedir. Bu nedenle konumuna göre AG teknolojilerinden el ile tutulan ve mekânsal AG sistemleri gereksinimleri karşılamamaktadır. Öte yandan görüntüleme teknolojisine göre değerlendirme yapıldığında, projeksiyonlu görmenin HMD cihazlarında henüz çok yeni ve yetersiz olması; video-görme sistemlerinin de gerçek dünyayı artırılmış görüntü ile birlikte ekranlar ile sunması nedeniyle kapsam dışında kalması gerektiği tespit edilmiştir. Bu nedenle çalışmada kullanılacak AG teknolojisinin başa giyilebilir ve optik görme teknolojisine sahip bir cihaz olması gerektiği düşünülmüştür. Henüz yeni geliştirilen optik-HMD teknolojilerinin de farklı türleri olmakla birlikte rakiplerine göre hafifliği ve gerekli olması halinde dahili dokunmatik paneli ile etkileşime geçilebilmesi Epson Moverio BT-300'ü ön plana çıkarmıştır.

Optik-HMD teknolojisinin bakım uygulamalarında sağladığı avantajlardan literatür çalışmalarında da bahsedilmiştir. HMD teknolojilerinin, video görmeye dayalı sistemlerden ve özellikle monitör ve ekranlarda daha kullanışlı olduğu ve gelecekte bu teknolojinin tercih edilmesi gerektiği çalışmalarda vurgulanmıştır [146, 151]. Henderson ve Feiner kullanılabilirliği en temel üç ölçütü olan kullanım kolaylığı, öğrenme ve tatmin ölçütlerinde ekranlardan daha iyi sonuç verdiğine ulaşmışlardır [145]. Havard vd. akıllı gözlüklerin (HMD), tablet ve kâğıt gibi diğer medya içeriklerine karşı bakım uygulamalarında hem tamamlanma süresi hem de hata oranında daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir [150]. Michalos vd. tablet (video-görme) ile yaptıkları çalışmalarının sonuç bölümünde endüstriyel uygulamalarda tablet kullanımının optimal bir çözüm olmadığını, iki ellerin serbest

kalması gerektiği için HMD teknolojisinin tercih edilmesi gerektiğinin altını çizmiştir [229]. Rentzos vd. ise gelecekte yapacakları çalışmalarda kullandıkları video-görme tabanlı sistem yerine başa takılan bir optik-HMD sistemine geçiş yapacaklarını ifade etmişler; gerekçe olarak ise optik-HMD sistemlerin insan operatörünü doğal ortamda daha az engelleyeceğini düşündüklerini söylemişlerdir [230].

4.3. Arayüzün Tasarlanması

AG uygulamalarında arayüz doğru tasarımı birbirleriyle ilişkili birçok parametrenin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Standart bir AG uygulamasında kullanılacak teknoloji, dijital içeriklerin türü, takip yöntemi, etkileşim yöntemi, uygulama alanı ve hedef kitle arayüz tasarımını şekillendirmektedir. Bu başlık altında AG uygulama arayüzünü etkileyecek değişkenler açıklığa kavuşturulmuştur.

4.3.1. Uygulama alanı ve hedef kitle

Uygulama arayüzünün, montaj desteği sağlamak üzere geliştirilen AG uygulamasının genişletilerek tüm endüstri kuruluşlarının bakım süreçlerinde kullanılabilecek şekilde tasarlanması amaçlanmıştır. Ana hedef kitle ise endüstri kuruluşlarında bakım işlemlerini yürüten bakım uzmanları ve teknisyenlerdir. Ayrıca AG uygulamaları kolaylıkla farklı alanlara uyarlanabilmektedir. Örneğin bir montaj destek sistemi, uygulamada kullanılan dijital nesnelerde değişiklik yapılarak bir eğitim uygulamasına dönüştürülebilir. Montaj işçilerinin oryantasyon eğitimi AG uygulamaları ile sağlanabileceğinden bu işçilerde hedef kitleye dahildir.

4.3.2. Takip yöntemi

Bir AG uygulamasının gerçekliği zenginleştirebilmesi için öncelikle gerçek dünyayı algılaması, anlaması ve değişiklikleri takip etmesi gereklidir. Takip yöntemi iyi tanımlanmış bir uygulama kullanılabilirlik algısına ciddi katkı sağlama gücüne sahiptir. Takip yöntemleri AG araştırmalarında en çok üzerinde durulan konulardan birisidir ve bu nedenle araştırmacılar birçok takip yöntemi geliştirmişler ve geliştirmeye devam etmektedirler. Bu çalışmada takip yöntemleri “sensör tabanlı” ve “görme tabanlı” olarak ikiye ayrılmıştır. Görme tabanlı takip ise kendi içerisinde “işaretçi kullanılan” ve “işaretçi kullanılmayan” olarak iki başlıkta sınıflandırılmıştır.

İlk takip yöntemi grubu olan sensör tabanlı takip bakım uygulamalarında neredeyse hiç kullanılmamaktadır. Sensör tabanlı uygulamalar genellikle turizm, eğlence, askeri alanlarda tercih edilmektedirler. Görme tabanlı takip yöntemlerinden hem işaretçi kullanılan ve hem de işaretçi kullanılmayan yöntemlerle bakım uygulamalarında sıklıkla karşılaşılmaktadır. Ancak işaretçi tabanlı takip AG'nin ilk yaygınlaşmaya başladığı 2000'li yıllarda ortaya çıkmış ve günün işlem gücü düşük donanımlarında kullanılmıştır. Günümüzde hala birçok alanda kullanılabilir olsa da bakım uygulamalarında işaretçilerin kullandığı takip yöntemleri bazen operasyonel zorluklara neden olabilir. Özellikle montaj işlemlerinde parçaların takılıp çıkarılması, taşınması, yağlanması, vidalanması, vb. birçok eylem gerçekleştirilmektedir. Bu eylemler esnasında işaretçilerin bozulmadan parçalar üzerinde sabit kalması çok mümkün değildir. Ayıca bazı parçalar üzerlerine işaretçi etiketler yapıştırılamayacak kadar küçük olabilir.

Sonuç olarak bakım süreçlerine ve hatta endüstriyel uygulamaların geneli için en uygun takip yöntemi olarak elimizde işaretçi kullanılmayan takip yöntemleri kalmaktadır. Özellik tabanlı takip yöntemin, takip edilecek nesneler özel algoritmalarla işlenerek diğer nesnelerden ayırt edici özellikleri belirlenmekte ve dijital nesnelerle eşleştirilmektedir. Ancak bu süreç yoğun bilgi işlem gücü gerektirmektedir. Model tabanlı takip ise, bir nesnenin ortam görüntüsü ile birlikte 3D CAD modeli birlikte kullanılarak takip yapılmasını sağlayan bir yöntemdir. Özellik tabanlı takip yöntemine göre tutarlılığı düşüktür ama yoğun işlemci gücü talep etmemektedir. Neges ve Koch, 3D CAD destekli kenar tabanlı takip metotlarının kullanılmasının daha doğru olduğunu ifade etmişlerdir [149, 231]. Geliştirilecek uygulamada da montajlarının yapılacağı donanım bileşenlerinin küçük boyutlarda olması ve montaj esnasında işaretçileri görünmemesi gibi sorunlar nedeniyle model tabanlı takip yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca donanım parçalarının alınacağı sehpa üzerinde bir işaretçi yerleştirilmiş ve montajı yapılacak bileşene dair animasyonların doğru yerde aktif hale gelmesini sağlamak için kullanılmıştır.

4.3.3. Etkileşim yöntemi

Endüstri kuruluşlarındaki bakım personellerin farklı birçok bakım prosedürünü bilmeleri gerekliliği ve bakım işlemlerinin karmaşıklığı dikkate alındığında

uygulamada kullanılacak etkileşim yönteminin personelin iş yükünü artırmayacak nitelikte olması gerekmektedir. AG etkileşim türleri temaslı etkileşim ve temassız etkileşim olarak ikiye ayrılmıştır. Çalışmada kullanılacak olan Epson Moverio BT-300 model AG gözlüğünün tümleşik bir avuç içi dokunmatik paneli bulunmaktadır. Bu panel ile gözlüğün ekranı bu avuç içi panel ile kontrol edilebilmektedir. Ancak bakım uygulamaları için bu etkileşim sistemi yeterli değildir. Zira bakım personellerinin görevlerini yaparken ellerini kullanmaları gerekmektedir. Bu nedenle ellerin kullanılmadığı temassız bir etkileşim yöntemine ihtiyaç duyulmuştur.

Göz ve baş hareketlerinin takibi ile sesli etkileşim kullanılabilecek yöntemlerdir. Göz ve baş hareketleri ile takip personelin yükünü artırıp kullanılabilirliği artırma ihtimaliyle tercih edilmemiştir ve geliştirilen uygulamada ses ile talimat verilmesini mümkün kılan Google Cloud Speech uygulama programlama arayüzü (API) kullanılmıştır. Bu API ile kullanıcıların sesli komutları metin haline getirilmiş ve metinler komut olarak kullanılarak AG sisteminin cevap vermesi sağlanmıştır. Ayrıca kullanıcılara esneklik sağlamak için sesli etkileşimin dışında menü ve düğmelerden oluşan ve dokunmatik panel ile kontrol edilen bir etkileşim türü de geliştirilen AG montaj sistemine dahil edilmiştir. Rice vd. benzer şekilde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, sesli iletişim kurmak için Google ses tanıma paketini kullanmışlardır [232]. Mauri ve Piumatti ise AG uygulamaları için, Microsoft Speech API (SAPI) kullanarak bir konuşma tanıma sistemi geliştirmişler; tek bir kelime veya kısa bir cümle şeklindeki komutları (örneğin, “video oynat”) algılanıp algılanmadığını test etmişlerdir [208].

4.3.4. Dijital içerik türleri

Son önemli nokta ise uygulamada kullanılacak dijital içeriklerin türüdür. 2D, 3D, ses, metin, animasyon veya bütün bu içerik türlerinin ikili ve üçlü kombinasyonları dijital içerik olarak AG uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Montaj uygulamalarında karmaşık, büyük veya küçük boyutlarda birçok farklı parçanın takılıp çıkartılması söz konusudur. 2D resimler veya şekiller ile etkileşim bu kadar karmaşık bir görev için yeterli olamayabilir. Nitekim, optik-HMD kullanılarak yapılan bir çalışmada, montaj işlemini zenginleştirmek amacıyla kullan 3D dijital içeriklerin 2D boyutlu ve animasyon ile desteklenmiş tel çerçeve şeklindeki 3D görsellere göre açık ara çok iyi

sonuçlar verdiği ispatlanmıştır. 3D içeriklerin sunulduğu katılımcılar, görev tamamlanma süresi, hata miktarı ve bilişsel yük gibi parametrelerin hepsinde daha iyi sonuçlara imza atmışlardır [152].

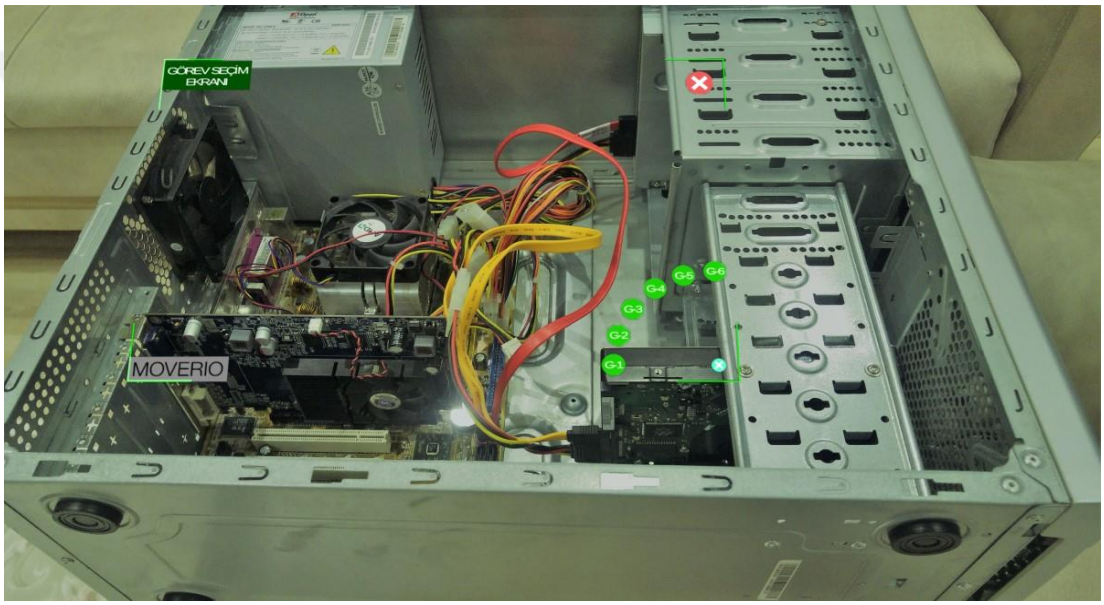
Ancak montaj uygulamalarında aşılması gereken önemli bir diğer nokta ise montaj esnasında kontrol edilmesi gereken ve görsel olarak iletilemeyen detayların kullanıcılara nasıl aktarılacağıdır. Klasik uygulamalarda bu durumda metinler, konuşma balonları kullanılmaktadır. Ancak yapılan çalışmalarda metin ile içerik sunulmasının doğru olmadığı vurgulanmaktadır. Bazen konuşma/metin kutuları önemli gerçek dünya nesnelerini gölgelemekte veya kapatmaktadır [214]. Gattulo vd. arka plan ışık yoğunluğu ile ilgili yaptıkları deneylerde, optik-HMD teknolojisinin ışık yoğunluğundan ciddi oranda etkilendiğini ve metin içeriklerinin görünürlüğünün ışık yoğunluğuna göre değişkenlik gösterdiğini tespit etmişlerdir [222]. Gerçek dünya içerisinde ışık yoğunluğunu ayarlamak oldukça zordur. Bu nedenle geliştirilecek montaj uygulamasında iletilecek detay bilgilerin sesli olarak iletilmesine karar verilmiştir. Zira, Havard vd. bakım süreçlerine dair bilgilerin kullanıcılara metinler yerine ses ile iletilmesinin daha büyük fayda sağlayacağını ifade etmişlerdir [150].

Ancak ilerleyen bölümlerde de bahsedileceği üzere çalışmanın ilk prototipinde gürültülü ortamlarda sesin duyulamaması ihtimaline karşın metin kutuları da bilgi aktarımı için eklenmiştir. Uzmanlar tarafından yapılan değerlendirme sonucunda da yukarıdaki çalışmalarda paralel bir şekilde metin kutularının gereksiz olduğu, kaldırılması gerektiği görüşü bildirilmiştir.

4.4. Artırılmış Gerçeklik Yazılımının Geliştirilmesi

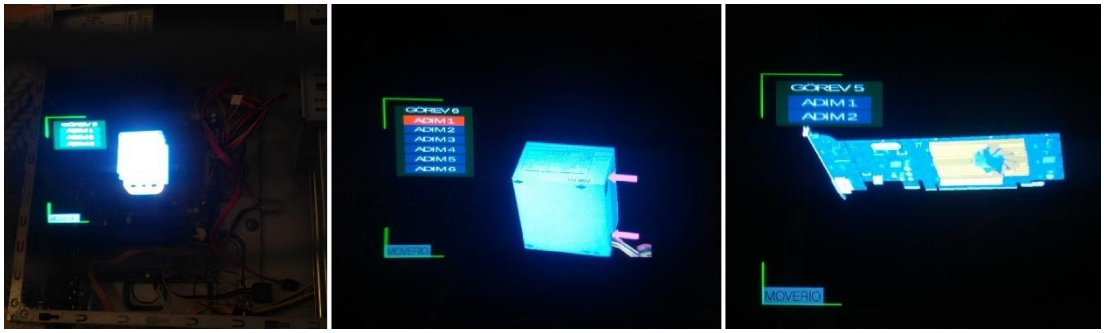
Arayüz tasarımında kullanılacak detaylar belirlendikten sonra testlerinin yapılacağı yazılımın geliştirilmesi gereklidir. Kullanılan optik-HMD gözlüğünün Epson marka bir gözlük olması nedeniyle uygulama, Epson tarafından sağlanan Moverio AR SDK ile 3D içeriklerin kolayca entegrasyonunu mümkün kılan Unity 3D yazılımı ile tasarlanmıştır. Ayrıca uzmanlar tarafından geliştirilen bakım uygulamasının prototipi ilk önce test edilmiş ve sesli komut verme özelliğinin kullanıcı testlerinden önce uygulamaya eklenmesi gerektiği bildirilmiştir. Bu nedenle sesli talimat verme özelliği yazılıma eklenmiştir. Sesli talimat verme için Google Cloud Speech API platformundan yararlanılmıştır. Yazılım bir masaüstü bilgisayar kasasında yer alan

donanım bileşenlerinin doğru ve olabildiğince hızlı bir şekilde montajının yapılabilmesini mümkün kılacak şekilde tasarlanmıştır. Geliştirilen uygulamanın arayüzü Şekil 4.2'de verilmiştir. Arayüzün, sol üst köşesinde kullanıcının hangi görevi yaptığını belirten bir kutucuk bulunmaktadır. Hemen sağ üst köşede ise uygulamadan çıkmak için çıkış düğmesine yer verilmiştir. Sağ altta ise saçılır menü tasarımı kullanılmış ve tek düğmeye tıklanınca alt görevlerin belirdiği bir hiyerarşik menü tasarımı kullanılmıştır. En sağ altta kalan ufak sarı düğmeye tekrar tıklandığında menü elemanları kaybolmakta ve kullanıcının görüşü alanı sürekli meşgul edilmemektedir. Sol alttaki Moverio yazısı ise kullanılan SDK'ya ait filigran olup kaldırılamamaktadır.



Şekil 4.2. Uygulama arayüzünün bilgisayar kasası üzerinde görünümü

Şekil 4.2'de temsili olup Moverio BT-300 ile doğrudan ekran görüntüsü alınamaması nedeniyle oluşturulmuştur. Şekil 4.3'de ise, gözlüğün ekranından uygulamanın çalışması esnasında ortaya çıkan 3D içerikler ve animasyonların görünümü verilmiştir.



Şekil 4.3. Moverio BT-300'ün ekranından alınan arayüz görüntüleri

Uygulamada yerine getirilecek görevlerin sırası, montajı yapılmış bir donanım bileşeninin kendisinden sonra takılacak bileşenleri engellemeyecek şekilde belirlenmiştir. Öncelikle bir prototip geliştirilmiş ve beş İBE uzmanı gözlüğü ve uygulamayı kullanarak sezgisel değerlendirme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Uzmanlardan alınan tavsiyeler ışığında geliştirilen uygulama geliştirilmiş ve kullanıcı testleri aşamasına geçilerek arayüze dair nihai değerlendirmeler yapılmıştır.

4.4.1. Sezgisel kriterlerin geliştirilmesi ve uygulamanın değerlendirmesi

Literatürde yazılımların İBE perspektifinden değerlendirilmesi için yüzlerce sezgisel kriter geliştirilmiş ve önerilmiştir. Ancak, Nielsen tarafından yayınlanan sezgiseller, İBE çalışmalarında diğer sezgisel kriterlere göre en çok bilinen ve kullanılan sezgisellerdir. 3.bölümde sezgisel değerlendirme ile ilgili gerekli bilgiye yer verilmiş olup, bu başlık altında geliştirilen AG uygulamasının arayüzünün sezgiseller ile değerlendirilmesinden bahsedilmiştir. Nielsen tarafından geliştirilen sezgiseller, Tablo 3.4'de suunlmuştur. Ancak tez çalışmasında Nielsen sezgiselleri de dahil olmak üzere literatürden derlenmiş olan sezgisellerden yararlanılarak optik HMD gözlükler için geliştirilmiş sezgiseller kullanılmıştır.

Nielsen'in sezgiselleri gibi sezgisel kriterlerden bazıları literatürde daha fazla yer buluyor olsa da hepsi yazarların görüşünü yansıtmaktadır. Bilişim teknolojilerinin sürekli gelişiyor olması nedeniyle yeni etkileşim türleri ortaya çıkarken bazı sezgisellerin önemi azalmakta ve sezgisel kriterlerin de güncellenmesi gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Artırılmış Gerçeklik bu gelişimin ürünlerinden birisidir. Özellikle son birkaç yıl içerisinde akıllı gözlüklerin yaygın hale gelmeye başlanmasıyla, AG uygulamalarının geliştirilmesi ihtiyacı da artmıştır. Ancak araştırmacılar, kullanım şekli, teknolojisi ve donanımları farklı olan Artırılmış Gerçeklik yazılımlarının kullanılabilirliğinin klasik sezgisel kriterler ile değerlendirilmesinin uygun olmadığını ifade etmişlerdir [233-239].

Dünser vd., pencere-menü-ikon-işaretleme-tıklama etkileşimleri ile çalışan geleneksel arayüzlerin değerlendirilmesinde kullanılan sezgisellerin, AG arayüzlerinin değerlendirilmesi için uygun olmadığını; farklı şekillerde girdi ve çıktı aktarımı olan bu yeni arayüzler için yeni değerlendirme yaklaşımları geliştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Örnek olarak Nielsen'in sezgisellerinin, sanal nesnelerin üç boyutlu uzayda

yerleştirilmesi, seçilmesi, manipülasyonu işlemlerini kapsamadığını belirtmiştir [234]. Stanney vd., kullanılabilir ve etkili sanal ortam (sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik) arayüzlerinin tasarlanabilmesi için gerekli olan kriterlerin belirlenmesinin, İBE alanında çözülmesi gereken bir problem olduğunu; çünkü geleneksel kullanılabilirlik prensiplerinin, görsel, işitsel ve haptik sistem çıktılarının bütünleştirilmesinin yanı sıra, yol bulma ve yönlendirme teknikleri, üç boyutlu nesnelerin seçimi ve manipülasyonu gibi bu yeni alana özgü özellikleri dikkate almadığını ileri sürmüştür. Tasarımcılar, sanal görüntülerin oluşması, etkileşimi, kullanım konforu gibi parametreleri iyileştirirken, kullanım sonrası ortaya çıkabilecek (mide bulantısı, baş ağrısı, göz yorgunluğu, vs.) istenmeyen etkileri en aza indirgemelidir [238].

Bu nedenle, akıllı gözlükler üzerinde çalışacak bir AG yazılımı geliştirilmeden önce AG yazılımlarının değerlendirilmesi için kullanılan donanımın niteliği, özellikleri ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin getirdikleri dikkate alınarak yeni sezgisel değerlendirme kriterlerinin oluşturulması oldukça önemlidir. Bu çalışmanın 3.bölümde bir sistematik literatür taraması yapılmış, ancak optik-HMD veya genel olarak HMD teknolojileri için önerilmiş kapsamlı bir sezgisel değerlendirme kriterlerine ulaşılmamıştır. Literatürde AG uygulamalarının değerlendirilmesi için önerilmiş farklı sezgisel değerlendirme kriterleri bulunmaktadır. Ancak bu sezgisel kriterlerin büyük çoğunluğu cep telefonları, tablet gibi cihazlarda geliştirilen AG uygulamaları dikkate alınarak tasarlanmıştır. Öte yandan optik-HMD teknolojileri birçok açıdan diğer AG teknolojilerinden ayrışmaktadır. Bu nedenle, optik-HMD teknolojiler için sezgisel kriterler geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Öncelikle, literatürde yer alan geleneksel sezgiseller ile birlikte karışık gerçeklik için önerilen sezgiseller incelenerek ortak sezgiseller belirlenmiştir. Önerilen sezgisellerin dahil oldukları gruplar ve detaylı açıklamaları Tablo 4.1'de verilmiştir. Sezgisellerin geliştirilmesinde aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

- Literatürün taranması ve optik HMD için geçerli kriterlerin belirlenmesi
- Benzer sezgisellerin yeniden kaleme alınarak bir başlık altında birleştirilmesi
- Nielsen'in sezgiselleri genişletilerek, HMD için önemli kriterlerin eklenmesi
- Geliştirilen sezgisellerin kullanılabilirlik ölçütlerine göre gruplara ayrılması
- Geliştirilen sezgisellere AG ile ilgili arayüz açıklamaları ve detaylar eklenmesi

Tablo 4.1. Optik-HMD teknolojileri için sezgisel değerlendirme kriterleri

	Açıklama	[48]	[195]	[233]	[236]	[237]	[239]	[240]	[241]
Öğrenme ve Kullanım Kolaylığı									
LU-1. Tutarlı Tasarım ve Yazılım Standartları	Arayüz, kullanıcıların her gün karşılaştıkları standart yazılım tasarım argümanlarını içermelidir. (Örn: Kapat: X işareti; Kırmızı Renk: Uyarı/Dikkat, vb.) Tasarım içerisinde aynı işlevi yerine getiren bileşenler aynı renk ve şekillerle tasarlanarak tutarlılık sağlanmalıdır.		**X**	**X**	**X**		**X**		
LU-2. Etkileşim Çeşitliliği	AR yazılımlarının kullanım amaçlarına göre ellerin serbest olup olmama durumu değişebileceğinden, farklı etkileşim yöntemleri tasarıma dahil edilmelidir. (touchpad, hareket algılama, sesli kontrol, göz takibi, vb.)		**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**
LU-3. Kullanıcı Kontrolü ve Özgürlük	Kullanıcılar sistem üzerinde tam olarak kontrol sahibi olduğunu hissetmelidir. İhtiyaç duyması halinde gerçekleştirdiği son işlemleri tekrarlayabilmeli ve yazılımı özgürce kullanabilmelidir.		**X**		**X**		**X**		
LU-4. Hataları Önleme ve Düzeltme	Arayüz tasarımı, hataların oluşmasını önleyecek şekilde yapılmalı, hatalar oluşmadan engellenmelidir. Hataların oluşması halinde ise sistem kullanıcıyı uyarmalı ve hataların düzeltilebilmesi için yönlendirmelidir.		**X**	**X**	**X**		**X**	**X**	
LU-5. Yardım ve Destek	Yazılımın kullanımı esnasında kullanıcıların sistemin işleyişine dair bilgiye ihtiyaç duyması ihtimaline karşın yardım sunulmalıdır.		**X**		**X**		**X**		
LU-6. Eşzamanlı Geri Bildirim	Arayüz, kullanıcıları sürekli ve kesintisiz bir biçimde sistemin anlık durumunu bildirmelidir. Kullanıcılar verdikleri bir komutun sistemdeki karşılığını ve sonucunu hemen görebilmeli, süreci takip edebilmelidir.	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	
Arayüz Tasarımı ve Etkileşim									
DI-1. Minimal Görsel Tasarım	Kullanıcıların gerçekten ihtiyaç duyacağı bileşenler tasarıma dahil edilmelidir. Bilginin sunumu mümkün olan en az öğe kullanılarak yapılmalı, benzer bileşenler gruplandırılarak bir başlık, menü, düğme altında toplanarak arayüz bileşen yoğunluğu azaltılmalıdır. Ayrıca bileşenler gerçek dünyayı görmeyi engellemeyecek şekilde konumlandırılmalıdır.	**X**	**X**				**X**	**X**	
DI-2. Minimal Bilişsel Yük	Sistemin kullanımı kolaylaştırılmalı, görevler adım adım kullanıcılara sunularak akılda tutmak için çaba harcanması engellenmelidir. Sunulan bilgiler akılda kalıcı olması için kısa ve öz olmalı, gereksiz detaylardan arındırılmalıdır.	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	

Tablo 4.2. (Devam) Optik-HMD teknolojileri için sezgisel değerlendirme kriterleri

	Açıklama	**[48]**	**[195]**	**[233]**	**[236]**	**[237]**	**[239]**	**[240]**	**[241]**
Arayüz Tasarımı ve Etkileşim									
DI-3. Minimal Fiziksel Yük	Sistemi kullanırken yapılacak olan görevler en az adımda tamamlanacak şekilde dizayn edilmelidir. Kullanıcıyı zorlayacak, yoracak ve sağlık problemlerine yol açacak görevlere yer verilmemelidir.			**X**	**X**				
DI-4. Arayüz - Çevre Uyumu	Arayüz tasarımı yapılırken, AG sistemlerinin dinamik oluşu, mekân bağımsız olma durumu dikkate alınmalıdır. Tasarım ortam, çevre koşullarının değişebileceği göz önünde bulundurularak farklı kontrast, renk, parlaklık, boyut kriterleri dikkate alınarak yapılmalıdır.	**X**			**X**	**X**	**X**	**X**	**X**
DI-5. Dünyaya Uyum ve Metaforlar	Tasarımda gerçek dünya ile uyumlu arayüz bileşenleri kullanılmalıdır. Yazılım kullanıcının dilinden konuşmalı, sistem ile etkileşim kurmak için gerçek dünyada kullanılan etkileşim yöntemlerinden, metaforlardan faydalanılmalıdır. (Örn: sistem mesajlarını belirtmek için mektup resmini, uyarılarda "!" işaretini kullanmak.		**X**		**X**	**X**	**X**		
DI-6. Donanım - Yazılım Uyumu	Kullanılan AG donanımı, tasarlanacak yazılımın gereksinimlerini karşılayacak seviyede olmalıdır. Gerçek dünya görüntüsünün detaylı olarak kullanılacağı bir yazılımda kameranın çözünürlüğü, konum bilgisinin gerektiği bir yazılımda ise GPS modülünün kapasitesi ihtiyaçları karşılayabilmelidir.			**X**		**X**	**X**		
Cihaz Ergonomisi ve Konfor									
EC-1. Mobilite ve Taşınabilirlik	Dinamik olan AG yazılımlarından üst düzeyde yararlanabilmek için kullanım donanımların taşınabilirliği yüksek olmalıdır. Kullanıcılar yazılımın çalıştırıldığı aygıtı/cihazı zorlanmadan hareket ettirebilmeli yerini değiştirebilmeli								**X**
EC-2. Ergonomik Tasarım, Kişiselleştirme	AG cihazları/aygıtları kolay kullanım için ergonomik bir tasarıma sahip olmalıdır. Kullanıcılar cihazları/aygıtları kendi ihtiyaçları (antropometrik özellikleri) doğrultusunda ayarlayarak kişiselleştirebilmelidir. (Örn: akıllı gözlük ekranlarının gözler arası mesafeye göre ayarlanabilmeleri, farklı kafa ölçülerine göre uyarlanabilmeleri, vb.)	**X**			**X**	**X**			**X**
EC-3. Kullanıcı Tatmini	Tasarlanan arayüz kullanıcıyı eğlendirmeli ve yazılımı kullanmaktan duyduğu tatmin düzeyini artırmalıdır.			**X**	**X**				

Tablo 4.3. (Devam) Optik-HMD teknolojileri için sezgisel değerlendirme kriterleri

	Açıklama	**[48]**	**[195]**	**[233]**	**[236]**	**[237]**	**[239]**	**[240]**	**[241]**
Cihaz Ergonomisi ve Konfor									
EC-4. Kullanıcı Sağlığı ve Güvenliği	Hem AG aygıtı/cihazı hem de tasarlanan arayüz kullanıcının sağlığını ve güvenliğin tehdit etmemeli, kullanıcıya fiziksel olarak hasar verecek şekilde tasarlanmamalıdır. Kullanım süresine dikkat edilmelidir. (Örn: göz yorgunluğu, baş ağrısı, mide bulantısı, yaralanma, vb.)								**X**
Artırılmış Gerçeklik ve Sanal Nesneler									
AR-1. Sanal Nesnelerin Sunumu	Sanal nesneler birbirlerini veya gerçek dünya nesnelerini engellemeyecek şekilde sunulmalıdır. Çok fazla sanal nesne aynı anda sunulmamalıdır. Sanal nesnelerin ne olduklarını, neden oluşturuldukları anlaşılır olmalı, aktif nesneler animasyon, vs. desteklenmelidir.	**X**			**X**	**X**		**X**	**X**
AR-2. Sanal Nesnelerin Görünürlüğü	Sanal nesneler gerçek ortama uygun olmalı, renk, boyut, çözünürlük, vb. özellikleri yeterli olmalıdır. Sanal nesneler diğer sanal veya gerçek nesnelerle karıştırılmayacak şekilde yerleştirilmelidir.	**X**		**X**	**X**	**X**		**X**	**X**
AR-3. Sanal Nesnelerin Sağlamlığı	Sanal nesneleri görmek, takip etmek çok zor olmamalıdır. Titreme, kaybolma, yerini tayin edememe gibi sorunlar mümkün olduğu kadar azaltılmalıdır. Sanal nesneler kullanıcının hareketine ve bakış açısına göre otomatik olarak ayarlanmalıdır. Harekete rağmen, nesne, kayıtlı olduğu fiziksel nesne veya nokta ile ilişkili kalmalıdır.	**X**			**X**	**X**			**X**
AR-4. Sanal Nesneler ile Gerçek Dünya İlişkisi	Sanal nesneler AG deneyimini artıracak şekilde doğal ve inandırıcı ve diğer nesnelerle sürekli dinamik bir ilişki içerisinde olmalıdır. Her bir sanal nesne bütün parça içerisindeki uzaklık, açı, konum, vb. kriterleri dikkate alınarak sunulmalıdır.	**X**						**X**	**X**

Optik-HMD cihazlar üzerinde geliştirilecek AG uygulamalarının uzmanlar tarafından değerlendirilebilmeleri için yukarıdaki tabloda verilen sezgiseller geliştirilmiş ve her bir sezgiselin kapsamı detaylı olarak açıklanmıştır. Bu çalışmada geliştirilen uygulama prototipi ise, İBE alanında bilgi sahibi bilgisayar mühendisliği bölümü akademisyenlerinden oluşan 5 kişilik bir uzman ekibi ile değerlendirilmiştir. Uzmanlardan uygulamayı gözlük kullanarak denemeleri ve karşılaştıkları problemler ile önerilerini not almaları istenmiştir. Ayrıca değerlendirme esnasında karşılaşılan

problemleri Nielsen'in önem dereceleri skalasına göre 0-4 arasında değerlendirmeleri özellikle belirtilmiştir [201]. Sezgisel değerlendirme aşamasından sonra uzman görüşleri ve önerileri derlenmiş ve uzmanların katılımıyla yapılan bir toplantıda üzerlerinde durulmuştur. Elde edilen bulgular ve tasarım tavsiyeleri doğrultusunda tasarlanan AG yazılımının arayüzü geliştirilmiş ve laboratuvar deneylerine hazır hale getirilmiştir.

4.5. Kullanıcı Deneyleri Aşaması

Geliştirilen AG uygulamasının sezgisellerle değerlendirilmesinin ardından alınan uzman görüşleri ile AG uygulamasının arayüzü üzerinde iyileştirme ve geliştirme yapılarak uygulama kullanıcı deneylerine hazır hale getirilmiştir. Bu aşamada çalışmanın araştırma sorularının cevaplanabilmesi ve hipotezlerin test edilebilmesi için üç farklı test grubu oluşturulmuş ve Şekil 4.4'de verilmiş olan deney ortamında kullanıcı testleri gerçekleştirilmiştir. Her bir grupta yer alan katılımcıların deneyler esnasında tepkilerini ve hareketlerini kayıt altına almak, süreci takip etmek için test ortamını görecek şekilde bir kamera kurularak süreç kayıt altına alınmıştır.



Şekil 4.4. Geliştirilen AG uygulamasının kullanıcı testleri ile değerlendirilmesi

Kullanıcı deneyleri aşamasında, geliştirilen AG uygulamasının kullanılabilirliğinin İBE perspektifinden test edilmesi ve geliştirilen uygulamanın endüstri uygulamalarından birisi olan montaj süreçlerine uygunluğunun değerlendirilmesi olarak iki farklı amaç doğrultusunda testler gerçekleştirilmiştir. Testlere 48 katılımcı

destek vermiş olup, katılımcılar üç gruba ayrılmıştır. Geliştirilen AG uygulamasının ne kadar etkili olduğunu ölçebilmek için bazı katılımcılar, bilgisayar donanımlarının montajı hakkında bilgi sahibi olmayanlar arasından seçilmiştir. Deney grupları ve katılımcılara dair detaylar Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Deney katılımcılarına dair temel veriler

Grup	Deneyim Durumu	Yönlendirme	Katılımcı Sayısı	Cinsiyet
Grup 1	Deneyimsiz	Optik-HMD	18	%40 Kadın %60 Erkek
Grup 2	Deneyimsiz	Uzman	18	%50 Kadın %50 Erkek
Grup 3	Deneyimli	-	12	%100 erkek

Grup 1'deki katılımcılar AG uygulamasının akıllı gözlük kullanılarak değerlendirilmesi için yapılacak olan kullanıcı testlerini gerçekleştirmişlerdir. Kullanıcı testleri esnasında Tablo 4.3'te verilen görevleri yerine getirmeleri istenilmiştir. Grup 2 ve Grup 3'te verilen katılımcılar ise geliştirilen uygulamanın montaj süreçlerine uygunluğunun test edilmesinde görev almışlardır. Bu testte de yine bilgisayar donanım bileşenlerinin montajı gerçekleştirilmiş ancak optik-HMD sistemi kullanılmamıştır. Donanım bileşenlerinin montajı konusunda uzman olan deney grubuna ise Tablo 4.3'deki görev tablosu verilmemiş, istedikleri sıra ile bilgisayar donanımlarının montajını gerçekleştirmeleri belirtilmiştir. Deneyimsiz katılımcılar ise bir uzmanın yönlendirmesi ile montaj görevlerini yerine getirmeye çalışmışlardır.

4.5.1. AG uygulamasının kullanıcı testi ile değerlendirilmesi

Optik-HMD gözlüğü kullanılarak yapılacak bu deneyde katılımcıların masaüstü bilgisayarlara ait bileşenlerin montajı hakkında deneyim sahibi olmadıklarından emin olunmuştur. Aksi halde katılımcılar geçmiş bilgilerinden de yararlanarak hareket edecekleri için uygulama arayüzünün ne kadar kullanılabilir olduğuna dair tespitlerde sapmamalarla karşılaşılması muhtemeldir. Ayrıca, katılımcılardan deneye başlamadan önce 15-20 dakika civarında gözlüğü kullanmaları istenmiş ve böylece gözlüğe alışmaları, etkileşim yöntemlerini çözmeleri, AG teknolojisinin mantığını anlamaları sağlanmıştır. Katılımcıların deneye hazır olduklarını belirtmeleriyle birlikte kullanacakları yazılımın amacı ve yazılım ile nasıl etkileşime geçecekleri anlatılmış ve deneye başlatılmıştır.

Tablo 4.5. Kullanıcı deneyleri esnasında yapılacak montaj görevleri

Görev 1: Sabit disk bileşeninin masadan alınarak bilgisayar kasasına taşınması, AG gözlük tarafından yapılacak yönlendirme ile kasaya yerleştirilmesi ve 2 adet vida ile tornavida kullanılarak bilgisayar kasasına sabitlenmesi adımlarından oluşmaktadır.
Görev 2: CD/DVD Okuyucu yazıcının masadan alınarak bilgisayar kasasının ön yüzünden içeriye doğru kaydırılarak takılması, 2 adet vida ile tornavida kullanılarak kasaya sabitlenmesi adımlarından oluşmaktadır.
Görev 3: İşlemci fanının masadan alınıp anakart üzerinde AG gözlük ile işaretlenen yere oturtulması ve fanın alt iki tarafında bulunan çentiklerin kasaya takılarak sabitlenmesi adımlarından oluşmaktadır.
Görev 4: Ram bileşeninin masadan alınıp bilgisayar kasasında gösterilen yere (slota) takılması ve sabitlemek için her iki tarafında yer alan mandalların parmak ile iterek kapatılması adımlarından oluşmaktadır.
Görev 5: Ekran kartı bileşeninin masadan alınıp bilgisayar kasası içerisinden AG gözlük tarafından gösterilen yere takılması ve kasaya bir adet vida ile tornavida kullanılarak sabitlenmesi adımlarından oluşmaktadır.
Görev 6: Güç kaynağının masadan iki el ile alınıp kasaya taşınması ilgili yere yerleştirilmesi ve kasanın dışından dört adet vida ile tornavida kullanılarak sabitlenmesi adımlarından oluşmakta; ayrıca güç kaynağının kablo uçlarının anakarta, cd/dvd okuyucuya, sabit diske bağlanması adımlarını içermektedir. Veri kablolarının anakarta ve cd/dvd okuyucuya bağlanması adımı ile sonlanmaktadır.

Ayrıca, katılımcılara deney sonrasında tecrübelerini ve yazılım arayüzü ile ilgili düşüncelerini paylaşmaları için sistem kullanılabilirlik anketi ile birlikte NASA tarafından geliştirilen zihinsel yük tespit anketi [242] uygulanmıştır. Güvenirliği 0.90 değerinin üzerinde olan 1995 yılında Lewis tarafından geliştirilen PSSUQ (The Post-Study System Usability Questionnaire) [243] ile birlikte 2001 yılında Lund tarafından geliştirilen USEQ [246] kullanılabilirlik değerlendirme anketlerinden yararlanılarak bir anket formu geliştirilmiştir. Ancak, anketlerin hiçbirinde artırılmış gerçeklik teknolojinin değerlendirilmesine dair sorular bulunmadığından önceki bölümlerde geliştirilen sezgisel kriterler ve literatürde AG ile ilgili yapılan çalışmalar dikkate alınarak ankete AG yazılımının değerlendirilebilmesi için sorular eklenmiştir. Ayrıca kullanıcıların görüşlerini ve önerilerini almak amacıyla her sorunun altına istedikleri takdirde yaptıkları değerlendirmeye dair açıklama yazılmasını mümkün kılan boş alanlar bırakılmıştır. Anketin sonunda ise deney boyunca karşılaştıkları en olumlu ve en olumsuz hususları belirtmeleri istenmiştir. Katılımcılara uygulanan anket Ek-A'da verilmiştir. Kullanıcı testleri ve anketler sonrasında elde edilen sonuçlar doğrultusunda önerilen sezgisel kriterler listesi güncellenmiştir.

4.5.2. Uygulamanın montaj süreçlerine uygunluğunun değerlendirilmesi

Arayüzün değerlendirilmesi için yapılan kullanıcı testinden sonra bir başka deney de geliştirilen uygulama nezdinde AG'nin montaj süreçlerinde kullanmanın mümkün olup olmadığının test edilmesidir. AG'nin montaj süreçlerine uygunluğunun test edilmesinde Tablo 4.2'de verilen katılımcı gruplarının tamamının katkı sağladığı bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Daha önce AG uygulamasının kullanılabilirliğini optik-HMD ile test eden 1. Grup katılımcıların deney esnasında sergiledikleri performanslarının tespit edilmesi için bütün süreç video kaydına alınmıştır. Ayrıca kıyaslama yapılabilmesi için deneyimsizlerden oluşan 2.Grup ve deneyimlilerden oluşan 3.Grup katılımcılardan optik-HMD desteği olmaksızın bilgisayar bileşenlerinin montajını yapmaları istenmiştir. Deneyimsiz katılımcılara süreç boyunca bir uzman eşlik etmiş ve uzmanın yönlendirmeleri ile montaj adımlarını tamamlamışlardır. Deneyimli kullanıcılar ise deney boyunca serbest bırakılmış ve montajı istedikleri gibi gerçekleştirmeleri sağlanmıştır. Katılımcıların her hareketi ve yaptıkları işlemler kayıt altına alınmış; akabinde kayıtlar detaylı bir şekilde incelenerek görevleri tamamlama süreleri ve hata oranları gibi performans ölçütleri elde edilmiştir.

Gruplara deneylere başlamadan önce gerekli bilgiler verilmiş; görevleri nasıl yerine getirebilecekleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. optik-HMD desteği ile montaj işlemlerini gerçekleştiren katılımcıların bazılarının antropometrik özellikleri nedeniyle akıllı gözlüğü kullanmaları mümkün olmamış; ekranı tam görememe, şekilleri bulanık görme, gözlüğün sabit durmaması, vb. sorunlar yaşadığı tespit edilen katılımcılar deneye dahil edilmemiştir. Grup 3 de deneye katılanların ise donanım bileşenlerinin montajı konusunda en az 3 yıl deneyim sahibi, bu konuda çalışmış ve/veya çalışmakta olmaları koşulu aranmıştır.

4.5.2.1. Performans değerlendirmede kullanılan ölçütler

Gözlemler, takip formları veya video kayıtları ile elde edilen verilerin değerlendirilerek montaj sürecine ait performansın değerlendirilmesi için literatürde birçok farklı ölçüt kullanılmıştır. En çok kullanılan performans değerlendirme ölçütleri aşağıda kısaca açıklanmıştır [245].

- Görev Başarma: en çok kullanılan performans değerlendirme ölçütü olduğu söylenebilir. Her bir görev katılımcıların her biri için başarılı veya başarısız olarak işaretlenir. Başarma gibi doğal olarak başarısızlık da ölçüt olarak kullanılabilir. Başarı bazen ikili olarak (1-0) şeklinde kodlanırken bazen de başarma seviyesine göre oransal bir değerlendirme de yapılabilmektedir.
- Görev Tamamlama Süresi: Çok kullanılan ölçütlerden birisidir. Görevlerin ne kadar süre içerisinde tamamlandığı ölçülür.
- Hata Sayısı: Hata miktarı/oranı arayüzün eksik olduğuna, kullanıcıların kafasının karıştığına işaret edebilen etkili ölçütlerden birisidir.
- Verimlilik: Katılıcıların görevleri tamamlamak için sarf ettikleri çabalar ile ilgilidir. Tıklama sayısı, tekrar sayısı, deneme miktarı, vb. gibi veriler bu ölçütte kullanılabilir. Verimlilik, görevlerin başarı oranı ile görevlerinin tamamlanma süresinin bir kombinasyonu olabilir. Kullanılabilirlik Testi Raporları için Ortak Endüstri Standartları'nda (ISO / IEC 25062: 2006) "temel verimlilik ölçüsü" olarak görev tamamlanma oranının görev başına ortalama süreye oranı olarak belirtilmiştir.
- Öğrenme Düzeyi: Katılımcıların zamana bağlı olarak performanslarının iyileşip iyileşmediği bu ölçütte ele alınmaktadır.

4.5.2.2. Performans verilerinin kıyaslanmasında kullanılan istatiksel yöntemler

Çalışmanın hipotezleri "optik-HMD kullanan deneyimsiz katılımcılar ile uzman yönlendirmesi ile montaj işlemlerini gerçekleştiren katılımcıların montaj performansları arasında fark olup olmadığının test edilmesi" ve "optik-HMD kullanan deneyimsiz katılımcılar ile deneyimli katılımcıların montaj performansları arasında fark olup olmadığının test edilmesi" amaçları doğrultusunda oluşturulmuştur. Sıfır hipotezleri aşağıda verildiği gibidir.

$H1_0$: Uzman yönlendirmesi ile donanım bileşenlerinin montajını gerçekleştiren deneyimsiz kullanıcılar ile akıllı gözlük kullanarak montaj görevlerini gerçekleştiren deneyimsiz kullanıcıların performansları arasında fark yoktur.

$H2_0$: Yardım almadan donanım bileşenlerinin montajını gerçekleştiren deneyimli kullanıcılar ile AG gözlüğü yardımıyla montaj görevlerini gerçekleştiren deneyimsiz kullanıcıların performansları arasında fark yoktur.

Yukarıda verilen hipotezlerin test edilmesiyle ilk olarak deneyimli ve deneyimsiz gruplar arasındaki eneyim ve bilgi farkının AG gözlükleri ile kapatılmasının mümkün olup olmadığı test edilecektir. Gözlük kullanmaya deneyimli kullanıcıların performans verileri ile gözlük kullanan deneyimsiz kullanıcıların performans verileri bu süreçler kıyaslanacak ve istatiksel olarak incelenecektir. Ayrıca başka bir önemli konuda uzmanlar tarafından yönlendirilen deneyimsiz kullanıcılar ile gözlük tarafından yönlendirilen deneyimsiz kullanıcıların farklarının incelenmesidir. Böylece AG gözlüklerinin bir uzman gibi yönlendirme yapıp yapamayacağı ve hatta bir uzmanın yerine geçip eğitim, oryantasyon, vb. amaçlarla kullanıp kullanılamayacağı öğrenilmiş olacaktır.

Hipotezlerin test edilebilmesi için bazı istatiksel yöntemlerin ve testlerin kullanılması gereklidir. Farklı iki grup arasında ilişki olup olmadığına deney örnekleminin normal dağıldığı varsayımı altında t-test, normal dağılmadığı varsayımı altında ise Mann-Whitney U test ile kontrol edilmektedir. T-test ile yapılan değerlendirme istatiksel olarak daha güçlü olması nedeniyle öncelikle verilerin t-test için uygun olup olmadığı değerlendirilmelidir. İki veri setinin birbiriyle olan ilişkisini t-test ile değerlendirilmesinde verilerin normal dağılım gösterdiği ve varyansların farklı olmadığı varsayılmaktadır. Bu nedenle öncelikle grup 1 ve grup 2 için kullanılacak performans ölçütlerinin normallik kontrollerinin yapılması gerekmektedir.

Normallik kontrolleri için Jarque-Bera ve Shapiro-Wilk testleri kullanılmıştır. Bu iki normallik testinin seçilmesindeki amaç popülasyonun dağılımı bilmiyor olmamız ve katılımcı sayımızın az olması nedeniyle normallik testi esnasında tip-1 hatayı en aza indirgemektir. Öztuna vd. çalışmalarında farklı normallik testlerini farklı dağılımlardan elde ettikleri rastgele verilerle test etmişler ve Jarque-Bera testinin popülasyon dağılımının normal ve standart normal olduğu durumlarda, Shapiro-Wilk testinin ise popülasyon dağılımının normal olmadığı durumlarda en güçlü testler olduğunu ortaya koymuşlardır [246]. Performans ölçütü olarak görevlerinin toplam tamamlanma süresi ve verimlilik kullanılarak çalışmanın hipotezleri test edilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Geliştirilen arayüz Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de de görüleceği üzere kullanıcıların gerçek dünya deneyimlerini engellemeyecek şekilde, sade ve olabildiğince kullanışlı bir şekilde tasarlanmıştır. Bu arayüz ile amaçlanan asıl hedef ise, uygulamayı kullanan bireylerin ilgili görevleri en az bilişsel yük altında zorlanmadan gerçekleştirmelerini sağlamaktır. Ayrıca deney düzeneği olarak kullanılan bilgisayar donanım bileşenlerinin montaj işlemleri, işletmelerde gerçekleşen birçok montaj işlemine eşit sayılabilecek bir zorluğa ve karmaşıklığa sahiptir. Deney düzeneği deneyimli kullanıcılar üzerinde test yapılmasına imkân tanıdığı gibi deneyimsiz kullanıcılarla aynı deneylerin tekrarlanabilmesini mümkün kılmaktadır. Çalışmada öncelikle yazılım arayüzünün doğru tasarlanabilmesi için sezgisel tasarım kriterlerinin oluşturulması adımı ile hem uzmanlar hem de kullanıcılar tarafından AG uygulamasına ait arayüz test edilmiş ve kullanıcı deneyleri ile sezgisel kriterlere son hali verilmiştir. Akabinde AG teknolojisinin işletmelerde montaj, bakım görevlerinde kullanılabilmesi için deneyimli ve deneyimsiz kullanıcılar tarafından yapılan deneyler incelenerek analiz edilmiştir. Kullanıcı deneylerinde katılımcılar yapılacak görevler hakkındaki bilgi seviyelerine göre deneyimli ve deneyimsiz olarak iki gruba ayrılmış olup deneyimsiz kullanıcılar ise "uzman tarafından yönlendirilenler" ve "akıllı gözlük tarafından yönlendirilenler" şeklinde iki alt deney grubuna ayrılmışlardır.

5.1. Sezgisel Değerlendirme Çalışmaları

Kullanılabilirlik çalışmalarının ilki önceki bölümlerde optik-HMD teknolojileri için geliştirilmiş olan sezgisel kriterlerim kullanılması ile AG uygulamasının değerlendirilmesidir. Bu aşamada İBE alanında deneyimli beş uzmandan yardım alınmış olup; gerçekleşen deneyler sonrasında uzmanlar tarafından tespit edilen kullanılabilirlik problemleri Tablo 5.1'de sunulmuştur. Ayrıca her uzmandan tespit ettikleri problemleri önem derecelerine göre 0-4 arasında puanlandırmaları söylenmiş ve sonuçlar tabloya eklenmiştir.

Tablo 5.1. Sezgisel değerlendirme ile tespit edilen kullanılabilirlik problemleri

Uzman 1		
Sezgisel Kriter	**Önem Derecesi**	**Tespit Edilen Problem**
LU-2	3	Akıllı gözlüğün dokunmatik paneli ile menüler ve görevler arası geçiş mümkün ancak yazılımın tasarım amacı montaj işlemleri olması nedeniyle ses ile yönlendirme eklenmeli ve ellerin kullanımı azaltılmalıdır
LU-4	4	Yazılımı kullanırken görevlerde istenilen adıma geçmek mümkün. Halbuki bazı görevlerde adımlar sırası ile takip edilmesi gerekiyor. Hata yapmaya çok elverişli.
LU-5	3	Yardımda resimler çok küçük, resim yerine video olabilir.
DI-1	2	Her bir adımda yapılacak görevler sesli olarak anlatılmaktadır. Ayrıca metin olarak yazılımda yer verilmesine gerek yoktur.
DI-2	3	Görev 6 da kabloların takılması alt adımlara bölünmelidir. Çok fazla bilgi veriliyor olması nedeniyle bu adımda bilgi yoğunluğu fazladır.
DI-4	2	Bilgisayar kasasının içerisinde oluşan sanal nesneler tam olarak görüntülenememektedir. Arka plan ile farklı renklerde sanal nesneler yerleştirilmelidir.
DI-6	2	Sanal görüntülerin oluşup oluşmadığını ve gözlükte nerede oluşacağını anlamak çok zorlamaktadır. Bu nedenle akıllı gözlükte yer alan ekranın sınırlarını belirleyen bir çizgi, belirteç (oyunlardaki gibi) konulabilir. Böylece sanal görüntülerin oluşacağı alan anlaşılabilir.
EC-2	2	Gözlük biraz ağır ve baş öne eğilince kayıyor. Gözlüğü her birey başına göre ayarlayabilmelidir.
EC-4	1	Gözlük 3D görüntüler oluşturması nedeniyle bir süre sonra göz yorgunluğu yapmaya başlıyor.
AR-1	2	6. görevde kabloların takılması adımında aynı anda çok fazla görsele yer verilmiş.
AR-3	3	Dijital görselleri görmek zor. Her zaman görünmüyorlar ve gözlüğe sığmıyorlar. Uzaklaşınca görseller hiç oluşmuyor.
Uzman 2		
Sezgisel Kriter	**Önem Derecesi**	**Tespit Edilen Problem**
LU-1	2	Adımlar hakkında bilgilerin verildiği metin kutusunun kenarında kaydırma çubuğu çıkmamaktadır.
LU-2	2	Sadece touchpad cihaz kullanılarak yazılım kontrol edilmektedir. Google asistan, Siri gibi ses ile kontrol yapmak lazım.
LU-3	1	Geri düğmesi konulmamıştır. Bir önceki adıma geçmek gerekebilir.
LU-4	2	Donanım parçalarını takarken yanlış yerlere yapılan denemeler vurgulanmalıdır.
LU-5	2	Yardım menüsü geliştirilmelidir. Videolar ile montaj adımları gösterilmesi uygundur.
LU-6	3	AG sanal nesnelerin oluşup oluşmadığı sistem tarafından bildirilmemektedir.
DI-1	2	Ekranda düğme sayısı fazla, azaltılmalı, ayrıca sol üst köşeye konumlanmış olan adımları gösteren bilgi ekranı tek satıra indirgenmeli. Adım 1 Adım 2 … yerine Adım 1/2 daha uygun olur. Adımların tamamını göstermesi gerekmez.
DI-2	3	DI-1'de belirtilen durum bilişsel yük yaratmaktadır. Hem metini takip edip okumaya çalışmak hem de AG sanal nesnelerini takip etmek aynı anda zihni yormaktadır.
EC-3	1	Kozmetik sorunlar giderilirse daha tatmin edici bir uygulama olabilir. Yazılımın bütünselliği sağlanmalıdır.
AR-2	2	Nesnelerin rengi gerçek dünyaya daha yakın seçilebilir. Renk tonu rahatsız etmektedir.
AR-3	3	Bilgisayar kasasına farklı açılardan bakıldığında sanal görüntü yok olmakta ve görülememektedir. Sisteme bakış yönü kullanıcıya belirtilmelidir.
AR-4	2	Sanal görüntüler bazen olması gerektiği yerde belirmemektedir. Kaymaktadır

Tablo 5.1. (Devam) Sezgisel değerlendirme ile tespit edilen kullanılabilirlik problemleri

Uzman 3		
Sezgisel Kriter	**Önem Derecesi**	**Tespit Edilen Problem**
LU-2	3	Ses ile kontrol eklenebilir. Seçim şansı mevcut yazılımda sunulmamıştır.
LU-3	3	Kullanıcılar yapmakta olduğu bir görevi yarıda bırakıp başka bir göreve geçememektedirler. Özgürlük kısıtlanmıştır.
LU-5	1	Görevlerin adımlarına başlamadan önce gelen açıklama ekranında yardıma menüsü çalışmıyor. Ancak adımlar başladıktan sonra yardım açılabiliyor.
LU-6	3	Tuşlar tıklandığında bir ses ile veya kullanılan touchpad de telefonlarda olduğu gibi kısa bir titreşim ile geri bildirim sağlanabilir.
DI-1	3	Tuşların sayısı azaltılmalı her görev için ayrı bir tuş yerine bir sonraki adıma geçilmesini sağlayan İLERİ tuşu kullanılmalıdır. Aksi halde arayüz oldukça gereksiz bileşenlerle kalabalıklaştırılmış olacaktır.
DI-4	1	Adımlar esnasında neler yapılacağı sesli olarak aktarılmaktadır. Ancak gürültülü bir ortamda sesleri duymak zorlaşmaktadır.
DI-5	3	Oluşan sanal şekiller gerçek dünyadaki gibi görünmemektedir.
DI-6	2	Gözlükte görüntü oluşan ekran çok küçük. Yakınlaştırma gibi bir özelliğin eklenmesi gereklidir.
EC-1	3	Cihaz taşınabilir olsa da şarjı az gitmesi nedeniyle serbest dolaşım süresi 20 dakika civarındadır. Sonrasında kullanım için elektriğe bağlamak gerektiğinden hareket kabiliyeti kısıtlanmaktadır.
EC-2	1	Burun üzerinde iz çıkarmaktadır. Biraz daha zarif tasarlanması gerekli.
EC-3	2	Şekiller sürekli kaybolması nedeniyle yazılımı kullanmak sıkıcı olabilmektedir.
EC-4	3	Küçük metinleri okumaya çalışmak göz yorgunluğuna neden olmaktadır.
AR-1	3	Sanal nesneler 3 boyutlu olmakla birlikte daha çok küp, prizma şeklindedir. Her bir nesnenin gerçek görsellerinden yararlanılması 3D CAD çizimlerinin kullanılması daha doğru olacaktır.
AR-3	3	Şekiller kaybolmaktadır. Tekrar bulmak için çok zaman harcanması gereklidir.
Uzman 4		
Sezgisel Kriter	**Önem Derecesi**	**Tespit Edilen Problem**
LU-4	3	Bir görevi sonlandırmak istenildiğinde görevden çıkış hemen yapılmaktadır. Yanlış tıklamaların önüne geçmek için kullanıcıya emin olup olmadığı sorulmamaktadır.
DI-1	3	Adımlar için sunulan metin çok uzun ve dolayısıyla sesli yönlendirmeler de çok uzun tutulmuş.
DI-2	3	Sesli yönlendirmeler art arda iki görev tıklanması halinde çakışıyor. Aynı anda iki tane farklı konuşma geliyor ve anlaşılamıyor.
DI-4	2	Parlak ışık altında şekiller net olarak seçilemiyor.
DI-6	2	Kullanılan akıllı gözlükte sanal görüntülerin oluştuğu alan küçüktür.
EC-2	2	Gözlüğün çerçevesi kullanıcının kafasına göre ayarlanamıyor. Bu nedenle gözlük tam oturmuyor.
AR-1	2	Donanım bileşenlerinin AG ile oluşan görüntüleri gerçeğine uygun tasarlanabilir.
AR-2	1	Montaj esnasında sanal görüntülerle gerçek nesne üst üste geldiğinden donanım bileşenlerin takılacağı yerleri görmek zorlaşıyor.
AR-3	3	Sanal nesneleri bulmak zor ve çok stabil değiller. Algılama ayarları geliştirilmeli.

Tablo 5.1. (Devam) Sezgisel değerlendirme ile tespit edilen kullanılabilirlik problemleri

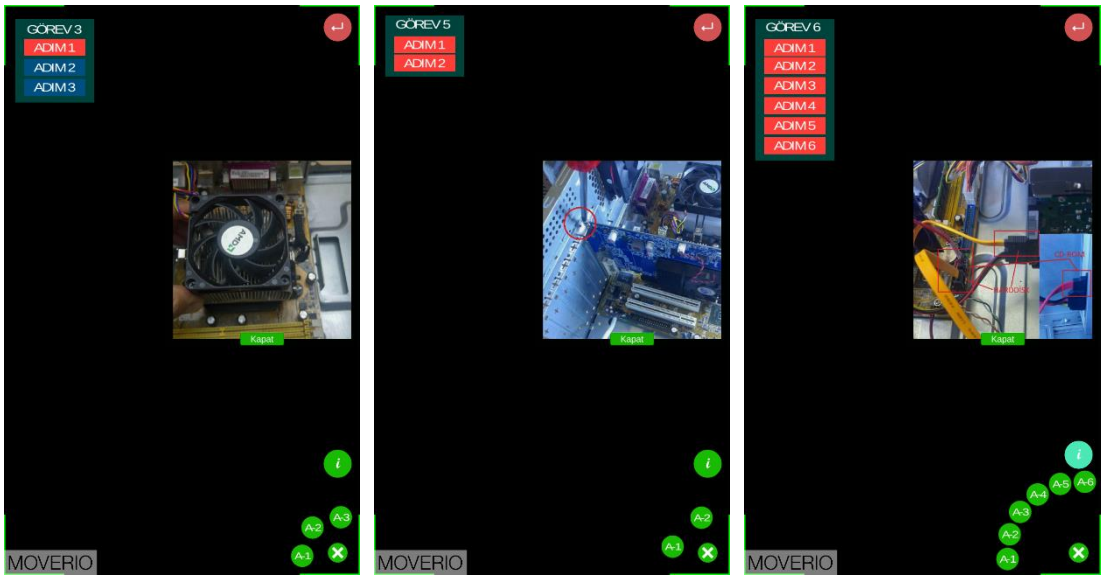
Uzman 5		
Sezgisel Kriter	**Önem Derecesi**	**Tespit Edilen Problem**
LU-2	3	Etkileşim sadece el ile dokunmatik özelliği olan gözlüğe bağlı bir yönlendirme aygıtı ile yapılabiliyor. Ses, el hareketleri, gibi etkileşimler entegre edilmeli.
LU-3	2	Geri gelme özelliği yok. Sesi açıp kapatma imkânı yok.
LU-5.	3	Yardım yetersiz. Yeterince açıklayıcı değil. Görmek maalesef zor.
LU-6	1	Düğmelere tıklandığında sesli bir tepki göstermesi anlaşılır yapar
DI-1	3	Her adımda görevlerin nasıl yapılacağını anlatan metinler çok uzun kısa tutulabilir. Sesli yönlendirmeler olması nedeniyle metinler kaldırılabilir.
DI-2	2	Sesli yönlendirmelerin uzun olması akılda tutmayı zor bir hale getirmekte.
DI-3	2	Akıllı gözlüğü yönlendirmek için kullanılan dokunmatik aygıtı sürekli elde tutmak yorucu.
EC-1	3	Sesli bilgileri dinlemek için kullanılan kulaklığın ve gözlüğün kontrolü için kullanılan touchpad aygıtının kabloları montaj işlemini zorlaştırmakta ve hareket kabiliyetini kısıtlamakta.
EC-2	2	Touchpad aygıtı daha büyük olabilir. Gözlüğe kablo ile bağlı olmak yerine bluetooth vb. bir teknoloji kullanılabilir.
EC-4	1	Touchpad aygıtı aşırı ısınıyor. Patlamasından endişe ettim.
AR-2	2	Adımları anlatan metinler Sanal görüntülerin üzerine gelmekte ve görünürlüğü azaltmaktadır.
AR-3	3	Sanal nesneler bakış yönü ve konuma göre kaybolmaktadır. Her yönden bakıldığında nesnelerin görünmesi gerekir. Tanıma yeteneği yetersiz.

Sezgisel değerlendirme sonrasında tespit edilen problemler uzmanlarında katıldığı bir toplantıda birlikte değerlendirilmiş ve tasarlanan yazılımın daha kullanılabilir olması için yapılması gereken iyileştirmeler tespit edilerek üzerinde tartışılmıştır. Sonuç olarak en önemli güncellemelerin sesli kontrolün eklenmesi, akıllı gözlüğün ekran sınırlarının yazılımda belirtilmesi, her bir adımda yapılacakların metin açıklamalarının kaldırılması, görev adım durumunu gösteren bileşenlerin sadeleştirilmesi, donanım bileşenlerini temsil eden sanal nesnelerin 3D gerçek modelleri ile değiştirilmesi ve sanal nesnelerin daha stabil hale getirilmesi olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen sorunlar önem dereceleri ile birlikte değerlendirilmiş ve literatür taramalarında benzer sorunların yer alıp almadığı kontrol edilmiştir. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere metin kutularının bilgilendirme amaçlı kullanımı özellikle AG sistemlerinde sorunlar çıkarmaktadır. Ayrıca ses ile etkileşim birçok çalışmada önerilmiştir. Kullanıcı deneylerinden önce AG yazılımında yapılmış olan güncellemelerin tamamı Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. AG yazılımında yapılması kararlaştırılan güncellemeler

Sıra	Yazılımda Yapılacak Düzeltmelerin Listesi
1	Ses ile arayüz etkileşimin kurulması, Sesli komutların geliştirilmesi
2	Akıllı gözlükte sanal nesnelerin oluştuğu bölgenin sınırlarının işaretlenmesi
3	Metin kutularının kaldırılması
4	Görüntü kayması, kaybolmasının azaltılması için AG yazılımının iyileştirilmesi
5	6.görevde yapılan kabloların bağlanması işlemlerinin daha fazla alt adıma bölünmesi
6	Yardım menüsünün görsel öğelerle geliştirilmesi
7	Görevlere ait adımların hiyerarşik olarak düzenlenmesi
8	Hata yapmayı önlemek için bir görev adımını tamamlamadan diğerine geçişin engellenmesi
9	Donanım bileşenlerini temsil eden sanal nesnelerin gerçek 3D modeller ile değiştirilmesi
10	Görevleri yarıda bırakma/terk etme özelliğinin eklenmesi (kullanıcı özgürlüğü)

Görüşü kapatması, vb. problemleri nedeniyle metin kutularının kaldırılması sebebiyle sesli yönlendirmeler esnasında sesi açıp kapatma özelliğinin eklenmesine gerek duyulmamıştır. Yine metin kutuları kaldırılması sebebiyle kaydırma çubuklarının eklenmesine de gerek kalmamıştır. Yardım menüsü için video eklenmesi kararlaştırılmış olsa da video desteğinde ortaya çıkan eksiklikler nedeniyle video yerine resimler yerleştirilmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Yardım için adımlara eklenen resimler ve arayüzdeki konumu

Sesli komutlarla etkileşime geçilebilmesi için Google Cloud ses tanıma desteğinden yararlanılmış ve her bir görev ve adımı başlatmak için sesli komutlar geliştirilmiştir. Katılımcıların kolay etkileşime geçebilmeleri için Türkçe dil desteği olan bir araç

kullanılmıştır. Komut sözcükleri karışıklığa sebep vermeyecek şekilde, kolay söylenebilir kelimelerden seçilmiştir. Kullanılan komutlar, “görev[no]”, “adım[no]”, “kapat”, “yardım”, “adım[no] tamam”, “görev[no] bırak” şeklindedir. Donanım bileşenlerinin montajı esnasında sanal görüntülerin montaj yapılacak alanların görüşünü engellemesi nedeniyle, bilgisayar kasasına montaj için yaklaşıldığının anlaşılması halinde uygulamada beliren dijital 3D CAD modelinin otomatik olarak kaybolması sağlanmıştır. Ayrıca, gözlüğün kolay kullanımını ve görüntülerin kolay yakalanmasını sağlamak için gözlüğe bütünleşik sanal görüntülerin oluştuğu ekranların alanları yeşil renkli bir çerçeve içerisine alınarak daha belirgin hale getirilmiştir. Uzman değerlendirmeleriyle elde edilen bir diğer önemli bulgu ise, uzmanların gözlüğün tasarımı ve ergonomisinden kaynaklı birçok kullanılabilirlik problemi belirtmiş olmalarıdır. AG gözlüğünün kablolarının kullanıcıyı engellemesi, dokunmatik kontrol panelini aşırı ısınması, gözlük üzerindeki ekranın görüş alanının dar olması sebebiyle görüntülerin tespit edilmesinde ve stabil kalmasının sağlanmasında zorlanılması gibi birçok husus donanımın kendi üretiminden kaynaklanmaktadır.

5.2. Kullanılabilirlik Deneyleri Aşaması

Grup 1’de yer alan 18 katılımcının yarısı lisans diğer yarısı ise lisansüstü eğitimlerine devam eden üniversite öğrencileridir. Katılımcılardan 8’i kadın, 10’u ise erkektir. Katılımcıların tamamı yardım/destek olmadan bilgisayar donanım bileşenlerinin montajını gerçekleştiremeyeceklerini belirtmişlerdir. Hiçbir katılımcı daha önce donanım bileşeni montajı gerçekleştirmemiştir. Donanım bileşenleri hakkında bilgi sahibi olanlar ise söz konusun parçaların isimlerini bildiklerini veya aldıkları derslerden hatırladıklarını söylemişlerdir. Katılımcılardan 14’ü AG kavramını daha önce duyduklarını belirtmiş olmalarına rağmen katılımcılardan sadece 5’i bir mobil AG yazılımı kullandığını söylemiştir. Uygulanan ankette daha hassas ölçüm yapılabilmesi için 7’li likert ölçeği kullanılmıştır. Katılımcılar kendilerine “öğrenme kolaylığı ve hatırlama”, “verimlilik ve etkinlik”, “arayüz tasarımı ve kullanım kolaylığı”, “artırılmış gerçeklik”,” tatmin düzeyi” başlıkları altında yöneltilen ifadeleri katılıp katılmama durumlarına göre -3 ile +3 arasında puanlandırmışlar. Eklemek istedikleri görüşleri ve tavsiyeleri açıklama kısmında belirtmişlerdir. Tablo 5.3’de katılımcıların sorulara verdikleri cevapların frekansları verilmiştir.

Tablo 5.3. Anket sorularına verilen cevapların frekansları ve ortalaması

Anket Soruları	-3	-2	-1	0	1	2	3	Ort.
1. Genel olarak benim için deneyi tamamlamak kolaydı.	0	0	0	0	1	11	6	2,3
2. Sistemi biraz kullandıktan sonra daha pratik/iyi kullanmaya başladım.	0	0	0	0	0	4	14	2,8
3. Sistemi tekrar kullandığımda hiç zorlanmayacağımı düşünüyorum.	0	0	0	0	3	4	11	2,4
4. Yapılan görevler yeni bilgiler (donanım bileşenleri) edinmemi sağladı	0	0	0	0	0	7	11	2,6
5. Artık destek olmadan aynı görevleri (donanımlarının montajı) yapabilirim.	0	0	0	2	3	8	5	1,9
6. Sistem sayesinde deney görevlerinde daha verimli olduğumu düşünüyorum.	0	0	0	0	1	5	12	2,6
7. Sistem sayesinde deney görevlerini daha kolay bir şekilde tamamladım.	0	0	0	0	1	6	11	2,6
8. Sistemin bana zaman kazandırdığını düşünüyorum.	0	0	0	0	1	5	12	2,6
9. Sistemin desteği olmadan görevleri tamamlamam mümkün değildi.	0	0	0	1	0	5	12	2,6
10. Sistemin mümkün olan en az adımda görevleri tamamlamamı sağladığını düşünüyorum.	0	0	0	0	1	5	12	2,6
11. Sistemi kullanmak ve kontrol etmek kolaydı.	0	0	0	2	5	5	6	1,8
12. Sistemin hataları nasıl düzelteceğim konusundaki yönlendirmeleri açıktı.	0	0	0	0	0	8	10	2,6
13. Sistemi kullanırken hata yaptığımda, hatayı düzeltmekte zorlanmadım.	0	0	1	1	1	7	8	2,1
14. Sistemin sağladığı görsel ve sesli bilgilere ihtiyacım halinde ulaşmak kolaydı.	0	0	0	1	0	2	15	2,7
15. Sistemin sağladığı görsel öğelerin/şekillerin yoğunluğu (azlığı/çokluğu) ideal miktardaydı.	0	0	0	1	1	9	7	2,2
16. Sistem tarafından sağlanan sesli yönlendirmelerin/bilgilerin yoğunluğu (azlığı/çokluğu) ideal miktardaydı.	0	0	1	0	2	6	9	2,2
17. Sistem tarafından sağlanan bilgileri/yönlendirmeleri anlamak kolaydı.	0	0	0	1	0	6	11	2,5
18. Sistemin sağladığı sesli yönlendirmelerin görevleri tamamlamama etkisi/katkısı oldu.	0	0	0	0	0	1	17	2,9
19. Sistemin sağladığı görsel öğelerin/şekillerin görevleri tamamlamama etkisi/katkısı oldu.	0	0	0	0	1	6	11	2,6
20. Etkileşim kurmak için sağlanan sesli yönlendirmeler gayet net ve açıktı.	0	0	0	0	3	3	12	2,5
21. Etkileşim kurmak için arayüze eklenen görsel şekiller gayet net ve açıktı.	0	0	1	0	2	9	6	2,1
22. Sistemin bir yazılımda olması gereken her türlü özelliği içerdiğini düşünüyorum.	0	0	0	0	4	9	5	2,1
23. Sistemi kullanırken hiçbir zaman kontrolümü kaybetmedim. İhtiyacım halinde sistem bana hangi adımda olduğumu daima gösterdi.	0	0	0	1	2	5	10	2,3
24. Sistemin gerektiğinde esneklik sağlayan bir kullanıcı arayüzü sağladığını düşünüyorum.	0	0	0	1	1	8	8	2,3
25. Sistem ile etkileşime geçmek için ellerimi neredeyse kullanmam gerekmedi (touchpad, tuşa basma,vb.)	0	0	0	1	0	4	13	2,6
26. Ekranda oluşan sanal AG görüntüler/şekiller, gerçek dünya nesneleri ile örtüşüyordu, tutarlıydı.	0	0	0	0	1	4	13	2,7
27. Sanal AG görüntüler/şekiller kolayca fark edilebiliyordu. Bulanık, çok küçük, titrek vs. değildi.	0	0	0	2	4	7	5	1,8
28. Oluşan AG görüntüler/şekiller, bekletmeden yeterince hızlı bir şekilde ekrana yansıdı.	0	0	1	2	3	7	5	1,7
29. Ortam aydınlatması, arka plan, parlaklık, yansıma, ışık miktarı vb. nedenler AG deneyiminin kalitesini etkilemedi.	0	0	1	1	1	6	9	2,2
30. Ekranda oluşan AG görüntüleri/şekilleri oldukça açık ve anlaşılırdı.	0	0	0	0	4	5	9	2,3
31. Gözlükte oluşan AG görüntüler/şekiller ile etkileşime geçmek kolaydı.	0	0	1	2	2	6	7	1,9
32. Ekranda oluşan sanal AG görüntüler/şekiller stabildi, yok olmuyordu.	0	0	2	2	9	4	1	1,0
33. Ekranda oluşan sanal AG görüntüleri/şekilleri anlamak zihinsel olarak yorucu değildi, bilişsel bir yük yaratmadı.	0	0	1	0	1	6	10	2,3
34. AG gözlüğü ergonomik bir tasarıma sahipti, kullanımı kolaydı, çok fazla zorlanmadım.	1	1	1	2	4	3	6	1,2
35. AG gözlüğü nedeniyle herhangi bir sağlık sorunu (baş ağrısı, göz yorgunluğu, mide bulantısı, baş dönmesi, vb.) yaşamadım.	0	0	2	0	2	2	12	2,2
36. Sistemin kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayan, işlevsel ve görsel olarak iyi tasarlanmış bir kullanıcı arayüzü olduğunu düşünüyorum.	0	0	0	0	0	8	10	2,6

Tablo 5.3. (Devam) Anket sorularına verilen cevapların frekansları ve ortalaması

Anket Soruları	-3	-2	-1	0	1	2	3	Ort.
37. Sistemi kullanırken kendimi rahat hissettim, rahatsız edici bir deneyim yaşamadım.	0	0	0	0	0	10	8	2,4
38. Deney esnasında sıkılmadım, eğlendim.	0	0	0	0	0	3	15	2,8
39. Sistemin işleyişi ve düzeni beni tatmin etti.	0	0	0	0	2	7	9	2,4
40. Artırılmış Gerçeklik teknolojisini beğendim. Hayatımda daha fazla görmek isterim.	0	0	0	0	0	1	17	2,9

Kullanıcı deneyleri sonrasında anketler incelendiğinde sorulara verilen cevapların ortalamalarının büyük oranla "2" yani "katılıyorum" şeklinde olduğu görülmektedir. Anketin ilk 5 sorusunu kapsayan "öğrenme kolaylığı ve hatırlama" başlığına ilişkin anket sorularının frekansları incelendiğinde 5. soru haricinde cevaplarda ciddi bir sapma olmadığı görülmektedir. Bu soruya verilen cevaplara göre katılımcılardan 2'si AG gözlüğü ile gerçekleştirdiği montaj işleminden sonra destek olmadan tekrar aynı görevleri yapıp yapamayacağından emin olmadığını söylemiştir.

Anketin "verimlilik ve etkinlik" ile ilgili olan 6-10. sorularına ise katılımcılar "katılıyorum" ve "kesinlikle katılıyorum" şeklinde cevaplar vermiş olup yapılan değerlendirmelerin ortalaması tüm sorularda "2,6" olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar yazılımın katılımcılar tarafından verimli olarak algılandığını ve değerlendirildiğini göstermektedir.

Üçüncü bölüm olan "arayüz tasarımı ve kullanım kolaylığı" ile ilgili yöneltilen 11-25. sorularda ise sadece 11. soru "2" değerinin altında ortalama puana sahiptir. Yani katılımcılar, sistemi kullanmak ve kontrol etmenin her zaman kolay olmadığını bazen zorlandıklarını dile getirmişlerdir. Zaten, 13., 16. ve 21. sorularda verilen ifadelere katılmayanlar olduğu ve cevaplarda sapmanın yüksek olduğu görülmektedir. Bu cevaplara göre katılımcılar, hata düzeltmek, sesli yönlendirmeleri takip etmek ve yoğunluğu ile başa çıkmak ve son olarak sanal 3D görselleri görebilmek konularında sorun yaşamışlardır. Bu nedenle 11. sorunun ortalaması "2" değerinin altında gerçekleşmiştir.

Artırılmış gerçeklik teknolojisi ve kullanımı ile ilgili yöneltilen 26-35. sorulara 26. ve 30. sorular dışında negatif yorumlar olduğu cevapların ortalamadan saptığı görülmektedir. Bu durum bize geliştirilen yazılımın kullanımı esnasında katılımcıların AG ile ilgili arayüz bileşenleriyle etkileşimlerinde sorunlar yaşadıklarını işaret

etmektedir. Özellikle 3D şekillerin yok olması, tekrar görünür hale getirmenin zorluğu kullanıcıların olumsuz kanaat bulunmalarına neden olmuştur. Ancak burada da AG gözlüğünün üretimi ve tasarımı ile ilgili kısıtların etkileşimde olumsuz etkisi olduğunun dikkate alınması gereklidir.

Anketin son başlığı olan "tatmin düzeyi" ile ilgili 36-40. sorulara verilen cevapların ortalamalarına ve frekanslarına bakıldığında, katılımcıların bir önceki bölümde AG ile ilgili sorunlar yaşamış olmalarına rağmen geliştirilen yazılımdan memnun oldukları görülmektedir. Hatta AG teknolojisini hayatlarında görüp görmek istemeyeceklerine dair yöneltilen soruya verilen cevapların ortalaması "2,9" olarak gerçekleşmiştir. Yani daha ergonomik cihazlarla sunulan AG uygulamalarını katılımcıların kullanmak isteyecekleri görülmüştür.

Deney sonrası uygulanan anketlerde soruların altında katılımcıların tavsiye, düşünce ve görüşlerini paylaşmaları için açıklama bölümlerine yer verilmiş ve anketin sonunda açık uçlu olarak geliştirilen sistemin en olumlu ve en olumsuz yönlerini listelemeleri istenmiştir. Bu bölümlere katılımcılar tarafından düşülen notlar değerlendirilmiş olup, sistem için söylenen olumlu ifadeler çıkartılmış ve katılımcıların yaşadıkları sorunlar, bu sorunların hangi katılımcı tarafından tespit edildiği, sorunların sıklığı ve katılımcılar tarafından sorunların çözümü için verilen tavsiyeler Tablo 3.6'da detaylı bir şekilde paylaşılmıştır. Tablo 5.4'e göre katılımcılar, en çok AG sayesinde oluşturulan sanal nesnelerin bazen yok olması, gidip gelmesi, bu nesneleri görmenin kolay olmaması, sesli yönlendirmelerin çakışması, sesli etkileşim komutlarının tam olarak algılanmaması ve gözlüğün ergonomik tasarımı ile ilgili sorunlar yaşamışlardır.

Katılımcıların performans testi boyunca maruz kaldıkları zihinsel iş yükünü ölçmek için NASA tarafından geliştirilen NASA-TLX değerlendirme anketi çalışmada kullanılmış olup bu ankete verilen cevaplar ve oluşan yükler Tablo 5.5'de verilmiştir. Yazılımın kullanımı ile oluşan zihinsel iş yükleri hesaplanmış, hiçbir katılımcı için iş yükünün 50 puanı geçmediği; sadece üç katılımcının zihinsel iş yükünün 40 puanın üzerinde olduğu görülmüştür. Anket sonuçları geliştirilen yazılımın mevcut halinin dahi yüksek zihinsel iş yükü oluşturmadığını göstermektedir. Tablo 5.4'de belirtilen sorunlar çözüldüğü takdirde bu değerin daha da azalması mümkündür.

Tablo 5.4. Kullanıcı deneyleri sonrasında tespit edilen sorunlar

Kullanıcı Deneyleri Sonrasında Sorunlar	**Sorunu Tespit Eden Katılımcılar**	**Frekans**	**Katılımcı Önerileri**
Sanal nesneler bulanıktı.	5	1	
Sanal görüntüler yer değiştirdi, ilk pozisyonundan kaydı.	2, 3, 9	3	
Sanal nesneler yok oluyor, gidip geliyor.	2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 18	12	
Sanal nesneleri (AG) görmek/bulmak çok kolay değil.	1, 5, 11, 13, 15, 16, 17	7	
Sanal nesnelerin oluştuğu gözlük ekranı dar ve küçük.	3, 6, 7, 10, 11, 14	6	Akıllı gözlük ekranın büyük tasarlanması lazım.
Sesli yönlendirmeler bazen üst üste geliyor, çakışıyor.	1, 2, 3, 7, 8, 12, 13, 18	8	
Sesli yönlendirmeler yeterli düzeyde bilgi içermiyor.	18	1	Daha detaylı bilgi verilmelidir.
Sesli yönlendirmelerde bazı bilgiler çok sık tekrarlanıyor	8, 11	2	Her adımda sistemin kullanımı anlatılmasına gerek yok.
Sesli etkileşim için verilen komutları sistemin algılamıyor veya geç algılıyor.	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 17	9	
AG gözlüğü yeterince ergonomik değil	2, 3, 5, 8, 9, 10, 14, 15, 16, 18	10	Akıllı gözlük kullanıcıya göre ayarlanabilmelidir.
AG gözlüğü göz yorgunluğuna sebep oldu.	16, 18	2	
AG gözlüğü baş ağrısına sebep oldu.	10, 15	2	
Yardım menüsünde sunulan görseller yeterli değil.	1, 3, 4, 15, 16	5	Video eklenirse daha iyi bir yardım menüsü olacaktır.
Yardım menüsünde sunulan resimleri görmek kolay değil.	2, 4, 8, 9, 15	5	Kontrast, saydamlık arka plana göre ayarlanmalıdır.
Adım sayısı olması gerekenden fazla, görevler çok bölünmüş.	7, 8	2	Vidalama adımları bir önceki adımlarla birleştirilebilir.
Sanal nesnelerle birlikte verilen animasyonlar ve ok görselleri yeterli değil	15	1	Görsel yönlendirmelerin sayısı artırılabilir.
Sistemi kullanmaya alışmak kolay değil.	17	1	

Tablo 5.5. NASA-TLX anketi ile tespit edilen zihinsel yükler (0-100 puan)

K1	**K2**	**K3**	**K4**	**K5**	**K6**	**K7**	**K8**	**K9**
33,3	30,0	49,2	35,0	20,8	39,2	15,0	31,7	37,5
K10	**K11**	**K12**	**K13**	**K14**	**K15**	**K16**	**K17**	**K18**
40,8	24,2	35,8	35,0	46,7	33,3	20,0	20,0	18,3

Ayrıca, katılımcıların görevleri gerçekleştirme süreci kamera ile kaydedilmiş ve bu süreç boyunca ne kadar hata yapıldığı, kaç defa yardım menüsü kullanıldığı, sesli yönlendirmelerin ne kadar tekrar dinlendiği ve toplam görev tamamlama süreleri kaydedilmiştir. El becerisi kişiden kişiye değişebileceğinden bileşenlerin kasaya vidalama süresi, toplam görev tamamlama süresine dahil edilmemiştir. Vidalama adımlarında hesaplanan süre, sesli yönlendirmeyi dinledikten sonra vidalanacak yeri tespit etmesi ve vidayı alıp kasaya taşıması olarak değerlendirilmiştir. Tablo 5.6'da katılımcıların deney süresince performanslarını gösteren kriterler sunulmuştur.

Tablo 5.6. Katılımcıların deney sonrası performans verileri

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
Toplam Tamamlama Zamanı (sn)	557	723	687	736	755	638	616	523	722
Başarı Oranı	100,0%	82,4%	82,4%	100,0%	88,2%	100,0%	94,1%	100,0%	88,2%
AG Görsel Olmadan Deneme Oranı	11,8%	17,6%	23,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,9%
Hatalı Deneme	4	3	6	1	2	0	1	1	3
Yardım Talebi	2	3	3	4	1	2	2	1	3
Bilgi Tekrar Dinleme Talebi	0	5	6	7	5	2	5	4	6
	K10	**K11**	**K12**	**K13**	**K14**	**K15**	**K16**	**K17**	**K18**
Toplam Tamamlama Zamanı (sn)	618	493	503	728	779	820	785	813	519
Başarı Oranı	100,0%	100,0%	94,1%	100,0%	100,0%	88,2%	94,1%	88,2%	100,0%
AG Görsel Olmadan Deneme Oranı	5,9%	5,9%	0,0%	5,9%	5,9%	5,9%	0,0%	11,8%	0,0%
Hatalı Deneme	2	3	3	4	2	2	3	3	1
Yardım Talebi	1	2	1	2	3	7	5	3	1
Bilgi Tekrar Dinleme Talebi	3	1	3	1	3	4	5	7	4

Grup 1'de yer alan katılımcıların görevleri ortalama olarak tamamlama süreleri 667,5 saniye olarak gerçekleşmiştir. Bu süreler içerisinde en çok pay 416,4 saniye ile güç kaynağı bileşeninin ve bağlı kabloların bilgisayar kasasına montaj işlemidir. Toplam 6 görev ve 17 alt adımdan oluşan deney sürecini başarılı bir şekilde tamamlama ortalaması ise %94,4 olmuştur. Yani bilgisayar donanım bileşenlerinin montajı konusunda deneyim sahibi olmayan katılımcılar bileşenlerin %94,4'ünün montajını başarıyla gerçekleştirmişlerdir.

Öte taraftan bileşenleri kasa içerisinde hatalı montaj deneme sayıları 0 ile 6 arasında dağılmış olup ortalama değer 2,4'tür. Katılımcılar ortalama 2,6 defa yardım talep etmiş ve 3,9 defa da sesli yönlendirmeleri tekrar dinlemişlerdir. Test için tasarlanan yazılımda 23 farklı sesli yönlendirme bulunduğu dikkate alındığında her bir deneyde ortalama 4/23 sesli yönlendirmenin tekrar dinlendiği ortaya çıkmaktadır. Tekrarlama ihtiyacının bir kısmının yukarıda katılımcıların belirttiği "seslerin üst üste gelerek çakışması" nedeniyle yapıldığı dikkate alındığında elde edilen bu sonuç sesli yönlendirmelerin yeterince açık ve anlaşılır olduğunu ve tasarımda doğru kullanıldığını işaret etmektedir. Ayrıca %94,4 genel başarı oranı da tasarlanan arayüzün katılımcılar tarafından anlaşıldığını, yönergeleri takip etmenin kolay olduğu işaret eden başka bir göstergedir. Bu bulguları yorumlarken grup 1 katılımcılarının daha önce AG gözlüğü kullanmamış oldukları dikkate alınmalıdır. Her ne kadar deney öncesinde gözlük ile alıştırmalar yapılmış olsa da yeterli geleceği kesin değildir.

Bu başlıkta nihai olarak kullanıcı deneyleri sonrasında hem uzman değerlendirmeleri hem de kullanıcı deneyleri sonrasında elde edilen bulgular değerlendirilerek Tablo 3.1'de verilmiş olan sezgisel kriterler güncellenmiştir. "DI-3. Minimal Fiziksel Yük" sezgisel kriterinin "EC-4. Kullanıcı Sağlığı ve Güvenliği" sezgisel kriteri gibi kullanıcıların uğrayacağı fiziksel zararın azaltılması misyonunu içermesi nedeniyle "DI-3" sezgiseli listeden kaldırılmıştır. Öğrenme ve Kullanım Kolaylığı sezgiselleri grubuna "LU-7. AG Ekran Sınırlarının Belirtilmesi." eklenmiştir. Bu sezgisel kriterin eklenme nedeni; temel olarak akıllı gözlüklerde oluşan sanal görüntülerin nerede oluşacağının, nerede başlayıp nerede biteceğinin kullanıcılar tarafından anlaşılamıyor olması ve kullanıcıların gözlüğün normal cam olan bölgelerinde de sanal görüntüleri görmeye çalışmalarıdır. Yine Öğrenme ve Kullanım Kolaylığı sezgisellerinden "LU-6. Eşzamanlı Geri Bildirim" sezgiselinin açıklama kısmına ise "Haptik etkileşimlere/tepkilere yer verilmelidir." ifadesi eklenmiştir. Ayrıca Cihaz Ergonomisi ve Konfor sezgiselleri altında yer alan "EC-3. Kullanıcı Tatmini" sezgiselinin açıklama kısmına "Sistemin arayüzü oyunlaştırılmalıdır. Sistem, kullanıcıların her adımında başarma hissi uyandırmalıdır." ifadesi eklenmiştir. Son olarak Arayüz Tasarımı ve Etkileşim başlığı altında yer verilen "DI-1. Minimal Görsel Tasarım" sezgiselinin açıklama kısmına "Arayüz bileşenleri ve sanal nesneler gereksinim/ihtiyaç halinde ortaya çıkmalıdır." cümlesi eklenmiştir. Sezgisel değerlendirme kriterleri güncellenmiş olarak Ek-B'de verilmiştir.

5.3. AG ile Bilgisayar Donanım Bileşen Montajının Değerlendirilmesi

Yapılan çalışmada performans ölçütü olarak değerlendirilmek üzere katılımcıların görev başarma oranları, görev tamamlama süreleri, hatalı denemeler, yardım ve tekrar bilgi talep sayıları kayıt altına alınmıştır. Ayrıca başarı oranları ile görev tamamlama süreleri oranlanarak verimlilik puanı elde edilmiştir. Katılımcılar ile gerçekleştirilen deneyler sonrasında elde edilen ölçümler Tablo 5.7'de verilmiştir.

Veriler incelendiğinde uzman tarafından yönlendirilen katılımcıların montaj görevlerini süre olarak akıllı gözlük ile yönlendirilen katılımcılara göre daha kısa sürede tamamladıkları; ancak akıllı gözlük kullananların çok az farkla da olsa ortalama başarı oranlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca akıllı gözlük kullanan katılımcıların daha az hatalı deneme yaptıkları ve daha az yardım talep ettikleri

görülürken, yönlendirmeleri daha fazla tekrar tekrar dinlemeye ihtiyaç duydukları ilk bakışta göze çarpmaktadır. Dikkat çeken bir başka nokta ise deneyimli katılımcılar ile AG gözlüğü kullanan deneyimsiz katılımcıların oldukça yakın başarı oranlarına sahip olmalarıdır. Bunun temel nedeni deneyimli kullanıcıların aşırı güven ile bazı kabloları (işlemci fanı, vb) takmayı unutmalarıdır. Öte yandan AG gözlüğü görevlerin atlanmasına unutulmasına fırsat vermemektedir.

Tablo 5.7. Deney gruplarına ait performans verileri (Kabloların takılması dahil)

	Grup 1 (AG Gözlüğü)						**Grup 2 (Uzman Yardımı)**						**Grup 3**			
Katılımcı	Toplam Tamamlama Zamanı (sn)	Başarı Oranı	Verimlilik (BO/T)	Hatalı Deneme	Yardım Talebi	Bilgi Tekrar Talebi	Toplam Tamamlama Zamanı (sn)	Başarı Oranı	Verimlilik (BO/T)	Hatalı Deneme	Yardım Talebi	Bilgi Tekrar Talebi	Toplam Tamamlama Zamanı (sn)	Başarı Oranı	Verimlilik (BO/T)	Hatalı Deneme
1	557	100,0%	0,11	4	2	0	421	76,5%	0,11	8	6	3	421	76,5%	0,11	8
2	723	82,4%	0,07	3	3	5	309	94,1%	0,18	3	8	3	309	94,1%	0,18	3
3	687	82,4%	0,07	6	3	6	404	94,1%	0,14	4	1	2	404	94,1%	0,14	4
4	736	100,0%	0,08	1	4	7	625	88,2%	0,08	8	6	7	625	88,2%	0,08	8
5	755	88,2%	0,07	2	1	5	701	82,4%	0,07	10	9	9	701	82,4%	0,07	10
6	638	100,0%	0,09	0	2	2	537	70,6%	0,08	8	8	5	537	70,6%	0,08	8
7	616	94,1%	0,09	1	2	5	321	88,2%	0,16	3	4	1	321	88,2%	0,16	3
8	523	100,0%	0,11	1	1	4	287	88,2%	0,18	2	3	1	287	88,2%	0,18	2
9	722	88,2%	0,07	3	3	6	216	100,0%	0,28	1	1	0	216	100,0%	0,28	1
10	618	100,0%	0,10	2	1	3	331	88,2%	0,16	2	1	0	331	88,2%	0,16	2
11	493	100,0%	0,12	3	2	1	288	94,1%	0,20	3	0	2	288	94,1%	0,20	3
12	503	94,1%	0,11	3	1	3	301	100,0%	0,20	3	1	3	301	100,0%	0,20	3
13	728	100,0%	0,08	4	2	1	368	100,0%	0,16	8	6	2	368	100,0%	0,16	8
14	779	100,0%	0,08	2	3	3	416	100,0%	0,14	3	4	4	416	100,0%	0,14	3
15	820	88,2%	0,06	2	7	4	283	94,1%	0,20	4	3	2	283	94,1%	0,20	4
16	785	94,1%	0,07	3	5	5	245	100,0%	0,24	2	2	3	245	100,0%	0,24	2
17	813	88,2%	0,07	3	3	7	591	94,1%	0,10	8	10	7	591	94,1%	0,10	8
18	519	100,0%	0,12	1	1	4	367	100,0%	0,16	3	5	2	367	100,0%	0,16	3
Ort.	**667,5**	**94,4%**	**0,09**	**2,44**	**2,56**	**3,94**	**389,5**	**91,8%**	**0,16**	**4,61**	**4,33**	**3,11**	**389,5**	**91,8%**	**0,16**	**4,61**

5.3.1. Performansın istatiksel olarak analizi ve hipotezlerin test edilmesi

Başlık altında optik HMD ile montaj işlemlerini gerçekleştiren ve uzman yönlendirmesi ile montaj işlemlerini gerçekleştiren deneyimsiz katılımcıların performans ölçütleri analiz edilmiş ve ilgili hipotezler test edilmiştir. Uzman katılımcı sayısının yeterli sayıda olmaması (12 kişi) ve istatiksel analizin hataya açık olması

nedeniyle bu grup için analiz yapılmamış ve deneyimsiz kullanıcılarla kıyaslanmamıştır. Nielsen, 2012 yılında kaleme aldığı bir çalışmasında kullanılabilirlik ile ilgili istatiksel analizlerin hedeflendiği çalışmalarda testlerin 20 civarında katılımcı ile yapılması gerektiğini ifade etmiştir [247]. Deneyimsiz katılımcıların performanslarının kıyaslanması için ölçütlerin normallik test sonuçları ve betimsel istatistikler tüm deney grupları için Tablo 5.8'de verilmiştir. Deney görevlerinin tamamlanma toplam süreleri ve verimlilik değerleri performans ölçütü olarak ele alınmıştır. Grup 1 ve grup 2'ye ait toplam süre verilerinin Jarque-Bera testine göre *p* değerlerinin 0.251 ve 0.463 ($p > 0.05$)'den büyük olması H_o hipotezini reddetmek için yeterli kanıt olmadığı anlamına gelir. Yani verilerin normal dağıldığı söylenebilir. Öte yandan bir diğer normallik testi olan Shapiro-Wilk'e göre ise deneyimsiz uzman kontrollü gruba ait *p* değerinin (0.035) 0.05'den küçük olması verilerin normal dağılmadığını işaret etmektedir.

Tablo 5.8. Performans ölçütlerinin betimsel istatistikleri ve normallik testleri (Kabloların takılması dahil)

		İstatistikler								**Normallik Testleri**			
										Jarque-Bera		Shapiro-Wilk	
Grup	**Performans Ölçütleri**	**Ortalama**	**Ortanca**	**Std.Sapma**	**Minimum**	**Maximum**	**Range**	**Çarpıklık**	**Basıklık**	**Jarque-Bera**	**prob.**	**İstatistik**	**prob.**
1	Toplam Süre	389,5	349,0	137,9	216	701	485	1,045	0,198	2,761	0,251	0,887	0,035
	Verimlilik	0,159	0,163	0,057	0,071	0,278	0,207	0,200	-0,181	0,253	0,881	0,960	0,594
2	Toplam Süre	667,5	704,5	111,6	493	820	327	-0,310	-1,348	1,542	0,463	0,915	0,106
	Verimlilik	0,088	0,082	0,019	0,065	0,122	0,057	0,478	-1,298	1,802	0,406	0,896	0,050
3	Toplam Süre	196,3	193,0	31,7	151	244	93	0,063	-1,177	0,729	0,695	0,947	0,590
	Verimlilik	0,297	0,302	0,054	0,231	0,374	0,143	0,208	-1,495	1,049	0,592	0,895	0,139

İki gruba ait performans ölçütlerinin kıyaslanması için normal dağılıma uygunluk şartları sağlanırsa t-test; sağlanmazsa Mann-Whitney U test kullanılması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan normallik testlerinin birbirlerinden farklı sonuçlar vermeleri nedeniyle uzman kontrollü montaj ile optik-HMD destekli montaj görevleri arasında bir fark olup olmadığına toplam süre ölçütü için her iki test ile de bakılmıştır. Öte yandan verimlilik ölçütü için yapılan normallik testlerinde tüm *p* değerleri için 0.05'ten büyüktür ve dolayısıyla H_o hipotezi reddedileceği için her iki gruba ait verilerin normal dağıldığı kabul edilebilir. Grupların kıyaslanması için yapılan testlerin sonuçları Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Hipotezlerin test edilmesi için kullanılan test istatistikleri (Kabloların takılması dahil)

Toplam Süre Ölçütü						
Parametrik test		Levene's Test (varyansların eşitliği)		t-test (ortalamaların eşitliği)		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)
	Varyansların eşit olduğu kabulü	0,219	0,643	-6,648	34,000	0,000
	Varyansların eşit olmadığı kabulü			-6,648	32,583	0,000

Parametrik olmayan test	Bağımsız Örneklem Mann Whitney U Test					
	N	Test İstatistiği	Standart Hata	Z	Asymp. Sig. (2-tailed)	Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]
	36	299	31,607	4,334	0	0

Verimlilik Ölçütü						
Parametrik test		Levene's Test (varyansların eşitliği)		t-test (ortalamaların eşitliği)		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)
	Varyansların eşit olduğu kabulü	9,665	0,004	5,039	34,000	0,000
	Varyansların eşit olmadığı kabulü			5,039	20,970	0,000

Tablo 5.9'a bakıldığında uzman tarafından yönlendirilen montaj deneyleri ile akıllı gözlük tarafından yönlendirilen montaj görevleri arasında, istatistik değerleri testlerde 0.05 değerinden büyük olmaması nedeniyle H_o hipotezi reddedileceği için hem toplam süre hem de verimlilik ölçütleri bakımından fark olduğu görülmektedir. Yani akıllı gözlük ile montaj işlemlerini gerçekleştiren katılımcılar performans olarak uzmanlar tarafından yönlendirilen katılımcıların performansına yaklaşamamışlar ve daha kötü bir performans göstermişlerdir. Bu durum betimsel istatistiklerde de görülmektedir. Sonucun neden farklı olduğu ve akıllı gözlük ile yönlendirilen katılımcıların neden daha kötü performans sergiledikleri araştırılmış ve yapılan hataların nerede yoğunlaştığına bakılarak süre kayıplarının kablo montaj adımlarında olduğu görülmüştür.

Tablo 5.4'de verilen kullanıcı deneyleri sonrasında tespit edilen sorunlar listesinde "sanal nesnelerin yok olması", "sanal nesnelerin oluştuğu gözlük ekranının dar ve küçük olması" birçok kullanıcı tarafından sorun olarak belirtilmiş olup; bu sorunlarla en çok kabloların takılması adımında karşılaşılmıştır. Bu adımda oluşan sanal AG nesnelerinin nispeten diğer donanım bileşenlerine göre küçük olmaları ve gözlüğün ekranı ile ilgili kısıtlamalar nedeniyle oluşan sanal AG nesnelerinin kasa içerisinde

aranması gerekliliği görevleri zorlaştırmış ve görevlerin tamamlanma sürelerini artırmıştır. Bu noktadan hareketle kabloların takılması adımları görev listesinden çıkartılarak grupların performansı tekrar değerlendirilmiştir. Tablo 5.10'da yeni performans değerleri ve Tablo 5.11'de yeni değerlerin normallik test sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.10. Deney gruplarına ait performans verileri (Kabloların takılması hariç)

	Grup 1 (AG Gözlüğü)						**Grup 2 (Uzman Yardımı)**						**Grup 3**			
Katılımcı	Toplam Tamamlama Zamanı (sn)	Başarı Oranı	Verimlilik (BO/T)	Hatalı Deneme	Yardım Talebi	Tekrar Dinleme Talebi	Toplam Tamamlama Zamanı (sn)	Başarı Oranı	Verimlilik (BO/T)	Hatalı Deneme	Yardım Talebi	Tekrar Dinleme Talebi	Toplam Tamamlama Zamanı (sn)	Başarı Oranı	Verimlilik (BO/T)	Hatalı Deneme
1	175	100,0%	0,34	1	0	0	266	75,0%	0,17	5	4	1	87	100,0%	0,69	0
2	339	91,6%	0,16	3	1	2	185	91,6%	0,30	3	7	2	142	100,0%	0,42	2
3	302	91,6%	0,18	6	2	2	261	91,6%	0,21	4	1	1	92	100,0%	0,65	0
4	206	100,0%	0,29	1	0	2	322	91,6%	0,17	3	2	2	144	100,0%	0,42	1
5	245	83,3%	0,20	1	0	1	397	91,6%	0,14	6	6	5	133	100,0%	0,45	2
6	282	100,0%	0,21	0	1	1	358	58,0%	0,10	7	6	2	81	100,0%	0,74	0
7	325	91,6%	0,17	1	1	3	205	83,3%	0,24	3	3	1	169	100,0%	0,36	1
8	213	100,0%	0,28	1	0	1	188	91,6%	0,29	2	1	1	110	100,0%	0,55	2
9	255	91,6%	0,22	2	0	1	125	100,0%	0,48	0	0	0	118	100,0%	0,51	1
10	266	100,0%	0,23	0	0	1	214	83,3%	0,23	2	0	0	121	100,0%	0,50	1
11	212	100,0%	0,28	1	0	0	196	91,6%	0,28	3	0	1	116	100,0%	0,52	0
12	150	100,0%	0,40	1	0	0	182	100,0%	0,33	3	1	1	130	100,0%	0,46	0
13	334	100,0%	0,18	2	1	0	227	100,0%	0,26	8	5	2	..	..	..	..
14	311	100,0%	0,19	1	0	0	249	100,0%	0,24	1	4	3	..	..	..	..
15	261	91,6%	0,21	2	3	0	152	91,6%	0,36	3	2	1	..	..	..	..
16	307	100,0%	0,20	3	2	1	134	100,0%	0,45	1	1	2	..	..	..	..
17	165	91,6%	0,33	1	0	0	390	100,0%	0,15	6	7	4	..	..	..	..
18	172	100,0%	0,35	0	0	0	174	100,0%	0,34	3	1	0	..	..	..	..
Ort.	**251,1**	**96,3%**	**0,25**	**1,50**	**0,61**	**0,83**	**234,7**	**91,2%**	**0,26**	**3,50**	**2,83**	**1,61**	**120,3**	**100,0 %**	**0,52**	**0,83**

Kabloların takılması görevleri montaj uygulamasından çıkartıldıktan sonra Grup 1'deki katılımcıların yani AG gözlüğü kullananların görevleri tamamlama sürelerinden %60 civarında bir azalma gözlenmiştir. Hata oranı ise %96 seviyesinin üzerine çıkmıştır. Yine diğer performans değişkenleri olan hatalı deneme, yardım talebi ve tekrar deneme miktarlarında ciddi azalma görülmektedir. Öte yandan deneyimli kullanıcıların bbaşarı oranı %100'e yükselirken, uzmanlar tarafından yönlendirilen Grup 2 katılımcılarının performanslarında ciddi bir değişim olmamıştır.

Tablo 5.11. Performans ölçütlerinin betimsel istatistikleri ve normallik testleri (Kabloların takılması hariç)

İstatistikler										Normallik Testleri			
										Jarque-Bera		Shapiro-Wilk	
Grup	Performans Ölçütleri	Ortalama	Ortanca	Std.Sapma	Minimum	Maximum	Range	Çarpıklık	Basıklık	Jarque-Bera	prob.	İstatistik	prob.
1	Toplam Süre	234,7	209,5	83,4	125	397	272	0,801	-0,323	1,840	0,398	0,910	0,087
	Verimlilik	0,264	0,254	0,103	0,097	0,480	0,383	0,490	-0,068	0,702	0,704	0,970	0,795
2	Toplam Süre	251,1	258,0	62,0	150	339	189	-0,169	-1,302	1,306	0,520	0,938	0,267
	Verimlilik	0,246	0,214	0,072	0,162	0,400	0,238	0,777	-0,603	1,954	0,376	0,891	0,040
3	Toplam Süre	120,3	119,5	25,7	81	169	88	0,139	-0,230	0,213	0,899	0,972	0,927
	Verimlilik	0,521	0,502	0,118	0,355	0,741	0,386	0,691	-0,372	0,965	0,617	0,932	0,406

Kabloların takılması görevleri çıkartılarak tekrar istatiksel analizler yapılmış ve Ho hipotezi yeni değerler ışığında tekrar test edilmiştir. Öncelikle verilerin normal dağılıp dağılmadığı tekrar test edilmiş ve sonuç olarak parametrik bir test olan t-test ile hipotezin test edilebileceği görülmüştür. Zira, normallik testlerine göre tüm *p* değerleri 0.05'den büyük oldukları için gruplar arasındaki farkların karşılaştırılması sadece t-test ile yapılmıştır. Test sonuçları Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12. Hipotezlerin test edilmesi için kullanılan test istatistikleri (Kabloların takılması hariç)

Toplam Süre Ölçütü						
Parametrik test		Levene's Test (varyansların eşitliği)		t-test (ortalamaların eşitliği)		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)
	Varyansların eşit olduğu kabulü	1,159	0,289	-0,669	34,000	0,508
	Varyansların eşit olmadığı kabulü			-0,669	31,404	0,508
Verimlilik Ölçütü						
Parametrik test		Levene's Test (varyansların eşitliği)		t-test (ortalamaların eşitliği)		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)
	Varyansların eşit olduğu kabulü	1,167	0,288	0,610	34,000	0,546
	Varyansların eşit olmadığı kabulü			0,610	30,388	0,546

T-test sonuçları incelendiğinde hem toplam süre hem de verimlilik performans ölçütlerine ait *p* istatistiklerinin 0.05'den büyük olmaları nedeniyle kablolama görevleri hariç tutulduğunda iki deney grubunun aralarında anlamlı bir fark olmadığı bulgusuna ulaşılmıştır. Yani akıllı gözlük üzerinde çalışan yazılım montaj işlemlerinde

uzmanlar kadar yönlendirme yapabilmektedir. Tablo 5.12'de verilen performans ölçütleri incelendiğinde Grup 1 ve Grup 2 için toplam tamamlanma süreler ortalamalarının birbirlerine çok yakın olduğu da görülecektir. Buradan kolaylıkla akıllı gözlük ile yapılan görevlerde kabloların takılması adımlarının süre kaybına yol açtığı anlaşılmaktadır.

Öte yandan diğer performans ölçütleri olan hata oranı ve yardım talebi sayılarına bakıldığında ise akıllı gözlük kullananların uzmanlar tarafından yönlendirilen katılımcılara göre çok daha az hatalı deneme yaptıkları ve yardım aldıkları görülmektedir. Hatta grup 3 olarak verilen deneyimli katılımcıların hatalı deneme sayılarının bile 0,83 olduğu dikkate alınırsa 1,5 gibi bir ortalama çok iyi bir performans olarak değerlendirilebilir. Görevleri başarma oranlarına da bu durum yansımıştır. Akıllı gözlük ile yapılan montaj görevlerinin %96,3'ü başarılı olmuş iken uzman ile yönlendirilen görevlerde başarı oranı %91,2 seviyesindedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması ile birlikte çalışma kapsamında ele alınan literatür AG teknolojilerinin ve uygulamalarının geleceğin bir parçası olacağını açıkça göstermektedir. 2000'li yıllardan itibaren AG konusunda yapılan çalışmalar büyük bir hızla artmaya başlamış ve teknolojik gelişmeler ile kendisine çok fazla uygulama alanı bulmuştur. Eğlence amaçlı AG uygulamalarından askeri amaçlı AG uygulamalarına, endüstriyel AG uygulamalarından spor alanında AG uygulamalarına kadar, görme duyusunun kullanıldığı her alanda bu yeni teknoloji ile karşılaşmak mümkündür. Bu nedenle işletmeler, AG uygulamalarının üzerine günümüzde ciddi bir oranda eğilmektedirler.

Öncelikle yapılan incelemeler sonucunda, literatürde henüz başa giyilebilir AG gözlükleri için önerilmiş sezgisel değerlendirme kriterler listesinin olmadığı görülmüş ve farklı çalışmalardan derlenen bulgular ve sonuçlar değerlendirilerek, AG gözlüklerinde kullanılmak üzere 20 sezgisel kriterden oluşan bir sezgisel listesi önerilmiştir. Ayrıca AG'nin endüstriyel uygulamalarının dağılımın tespit edilmesi amacıyla bir de sistematik literatür haritalandırma çalışması gerçekleştirilmiştir. AG'nin endüstriyel alanda daha fazla bakım, onarım, montaj, eğitim alanlarında uygulama ortamı bulduğu önceki çalışmalara paralel bir şekilde tekrar tespit edilmiştir.

Ayrıca geliştirilen AG uygulamalarının büyük bir çoğunluğunun uygulama makalesi olduğu ve genellikle var olan mevcut teknolojilerin bir konuya uyarlanmasını içerdiği görülmüştür. Bu durum, AG'nin özellikle yazılım yönünün gelişmesi için yavaşlatıcı bir sebeptir. Zira, teknoloji ne kadar ilerlerse ilerlesin yazılımların kalitesi teknolojiyi yakalayamıyorsa, kullanılabilir bir İBE sisteminden bahsetmek mümkün değildir. Başa giyilebilir AG gözlükleri için sezgisel değerlendirme kriterlerinin literatürde bulunamamasının temel sebebinin, çalışmaların AG'nin farklı alanlara uyarlanmasına yönelik olmasından kaynaklandığı görüşü oluşmuştur. Ancak sezgisel kriterlerin geliştirilmesi gibi teknik makalelerin de ele alınması elzemdir. Ek olarak kullanılabilir AG arayüzlerinin tasarlanabilmesi ve yine uygulama alanlarının genişletilebilmesi için işaretçisiz takip yöntemleri konusunda da çalışmalar yapılmalıdır.

Bu tez çalışmasında literatüre önerilen sezgiseller öncelikle İBE alanında uzman katılımcılar ile değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda arayüz tasarımı ile ilgili tavsiyeler alınmış olmakla birlikte bazı ciddi sorunların arayüz tasarımından kaynaklanmadığı; AG gözlüklerinin ergonomik tasarımları ile ilgili eksiklikler olduğu görülmüştür. Donanım ve yazılım uyumu kullanılabilirlik için önemli olmasından dolayı, tasarlanacak yeni AG teknolojilerinde kullanıcı görüşlerine daha fazla kulak verilmesi gerektiği düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında önerilen sezgisel kriterlerin, kullanılabilirlik değerlendirmesinde kullanılabilecek yeterlilikte olduğu tespit yapılan deneyler sonucunda da test edilmiştir. Deney katılımcılarının belitmiş olduğu problemlerin sezgisel kriterler içerisinde karşılık bulduğu görülmektedir. Ancak sezgisel kriterler içerisinde yer verilmiş olmasına rağmen her kriteri günümüz AG teknoloji dahilinde karşılamak her zaman mümkün olmayabilir. Örneğin, henüz kullanıcıların geniş açı ile görmelerini sağlayacak veya oldukça hafif tasarlanmış AG gözlükleri üretilememiştir. Çalışmada, kullanılabilir bir AG sisteminde hangi özellikle ve yetenekler olması gerektiğine odaklanılmış olması nedeniyle, sezgisel kriterlerin önerilmesinde mevcut AG teknolojisinin kriterleri sağlamaya yetkin olup olmadığı dikkate alınmamıştır. Zira, bu tez çalışması kapsamında AG gözlükleri için önerilmiş sezgisel kriterler, yeni çıkacak teknolojileri de kapsayacak şekilde dizayn edilmiş ve açıklanmıştır.

Çalışma kapsamında geliştirilen ve uzman görüşleri ile son hali verilen AG uygulaması, montaj işlemleri konusunda deneyimsiz ve deneyimli kullanıcılarla test edilmiştir. Bu testler sonucunda AG gözlüğü kullanılarak gerçekleştirilen montaj işlemlerinde görevlerin toplam tamamlanma süresinin ciddi bir oranda arttığı tespit edilmiştir. Öte yandan görevler esnasında yapılan hata oranı ise azalmıştır. Bunun nedeni AG teknolojilerinin görsel olarak dinamik bir şekilde sürekli bilgi aktarıyor olmasıdır. Aynı zamanda görevlerin tamamlanma süresini uzatan da aynı AG'nin aynı özelliğidir. Sürekli bilgi akışı kullanıcıları sürekli bilgiyi takip etmeye zorlamaktadır ve bu bazen kaçırılan bilgiler tamamlanma sürelerine olumsuz yansımaktadır. Ayrıca AG sistemleri her koşulda uygun dijital bilgi sağlayamamaktadır. Zira, yapılan montaj görevlerinden kabloların takılması aşamaları çıkartıldığından AG gözlüğü kullananların görevleri tamamlama süreleri ciddi oranda azalmıştır. Buradan AG gözlüklerinin, teknolojik limitleri nedeniyle henüz küçük parçaların montajında

verimli olmadığı tespit edilmiştir. Montajı yapılacak parçaların dijital temsillerinin görünürlüğü problem teşkil etmediği müddetçe geliştirilecek endüstriyel AG uygulamalarından yüksek oranda performans alınabileceği bulgusuna ulaşılmıştır.

Hatta deneyimsiz kullanıcıların bir konu hakkında eğitimi dışında da deneyimli kullanıcıların da sistemi kullanmasının faydalı olabileceği görülmüştür. Deneyimli kullanıcılarda aşırı güven nedeniyle özellikle kabloların takılması gibi basit ve küçük görevleri unutmaktadırlar. Ancak sebebi her ne olursa olsun eksik yapılan bir görev işletmelerde hatalı üretim ve ek maliyet anlamına geleceğinden AG sistemlerinden deneyimli çalışanların da hata oranlarını düşürmek için yararlanılabilir. İstatistikler incelendiğinde akıllı gözlüklerle yapılan montaj görevleri her ne kadar uzun sürmüş olsa da diğer performans ölçütleri bakımından iyi sonuçlar elde edilmiştir.

AG gözlüklerinin ayrıca kuruluşlarda eğitim ve oryantasyon programları için de uygun olduğu görülmüştür. İstatiksel sonuçlara göre akıllı gözlük ile yapılan montaj görevlerinde başarı oranının %94,4 olduğu ve deneyimli kullanıcıların başarı oranının ise %94,6 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Öte yandan, uzman bir personelin yönlendirdiği deneyimsiz katılımcıların başarı oranı ise %91,8 olarak ölçülmüştür. Hatalı deneme ve yardım talebi gibi ölçütlere bakıldığında akıllı gözlük kullanan katılımcıların uzmanlardan tarafından yönlendirilen katılımcılara göre yaklaşık yarı yarıya daha az hatalı deneme yaptıkları ve yardım talep ettikleri görülmektedir. Yapılan hipotez testleri de deneyler esnasında uzmanlar tarafından yönlendirilen katılımcılarla, AG gözlüğü tarafından yönlendirilen katılımcıların arasında istatiksel olarak hem görevlerin toplam tamamlanma süresi hem de verimlilik ölçütlerinde anlamlı bir fark olmadığını ortaya koymuştur. Bu bizlere AG gözlükleri üzerinde İBE disiplini dikkate alınarak AG için önerilmiş tasarım kriterleri ışığında geliştirilen uygulamaların, oryantasyon eğitiminde insan uzmanların yerini alabileceğini işaret etmektedir.

Kısaca, AG hızlı gelişen ve Endüstri 4.0 kapsamında ele alınan oldukça önemli bir çalışma alanıdır. Endüstri alanında da AG uygulamalarının geliştirilmesi üzerine yapılmış birçok çalışma olmakla birlikte bu çalışmaların bir bütünün parçaları olmaktan çok bireysel denemeler ve uyarlamalar olduğu görülmüştür. Hatta birçok çalışmada yazılımlar için hayati derecede önemli olan İBE disiplininden ve

kullanılabilirlik analizlerinden yararlanılmamaktadır. Bu nedenle gelecek çalışmalarda AG yazılımlarının kullanılabilirliği üzerine yoğunlaşılmalıdır. Endüstriyel AG uygulamalarının geliştirilmesi, işletmelere birçok konuda avantaj sağlama potansiyeline sahiptir. Ancak bu konuda da AG'nin mevcut donanım gücü ve teknolojisi dikkate alınarak ve yine tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak kullanılabilir uygulamalar geliştirilmelidir. Literatür çalışmaları giyilebilir AG gözlüklerinin daha fazla gelecek vadettiğini göstermiş ve zaten işletmelerde ellerin yapılacak görevler nedeniyle serbest olması gerektiğinden başa giyilen, elleri meşgul etmeyen bir AG teknoloji kullanılması gerekecektir. AG, görme duyusunun kullanıldığı her alanda kullanılabilecek, potansiyeli oldukça yüksek değerli ve gelecek vadeden bir araştırma alanıdır.

KAYNAKLAR

[1] Vaidyaa S., Ambadb P., Bhosle S., Industry 4.0 – A Glimpse, *Procedia Manufacturing*, 2018, **20**, 233–238.

[2] Industry 4.0: the fourth industrial revolution – guide to Industrie 4.0, i-Scoop, https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/ (Ziyaret tarihi: 06 Mayıs 2018).

[3] Azuma R. T., A Survey of Augmented Reality, *Teleoperators and Virtual Environments*, 1997, **6**(4), 355–385.

[4] Ariyana Y., Wuryandari A. I., (2012, September). Basic 3D Interaction Techniques in Augmented Reality, *International Conference on System Engineering and Technology*, Bandung, Indonesia, 11-12 Eylül 2012.

[5] Digitization, digitalization and digital transformation: the differences, i-Scoop, https://www.i-scoop.eu/digitization-digitalization-digital-transformation-disruption/ (Ziyaret tarihi: 06 Mayıs 2018).

[6] Rajkumar R. R., Lee I., Sha L., Stankovic J., Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution, *47th Design Automation Conference*, Anaheim, California, USA, 13-18 Haziran 2010.

[7] Sha L., Gopalakrishnan S., Liu X., Wang Q., Cyber-Physical Systems: A New Frontier, *IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing*, Taichung, Taiwan, 11-13 Haziran 2008.

[8] Annunziata M., Evans P. C., Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines, *General Electric*, 1-37, 2012.

[9] Daponte P., De Vito L., Picariello F., Riccio M., State of the Art and Future Developments of the Augmented Reality for Measurement Applications, *Measurement*, 2014, **57**, 53–70.

[10] Milgram P., Kishino F., A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, *IEICE Transactions on Information Systems*, 1994, **77**(12), 1321–1329.

[11] ISO 9241-11, Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs), *The International Organization for Standardization*, 1998.

[12] Piekarski W., Interactive 3D Modelling in Outdoor Augmented Reality Worlds, Doktora Tezi, Division of Information Technology, Engineering, and the Environment, University of South Australia, Adelaide, 2004.

[13] Kipper G., Rampolla J., *Augmented Reality: An Emerging Technologies Guide to AR*, 1st ed., Syngress, Waltham, 2012.

[14] Butchart B., Salazar M., Liao T., AR Glossary of Terms, *9th AR Standards Community Meeting*, New York, USA, 30 Mayıs 2013.

[15] Johnson, J., The Master Key: L. Frank Baum Envisions Augmented Reality Glasses in 1901, Mote & Beam, https://web.archive.org/web/20130522153011/http://moteandbeam.net/the-master-key-l-frank-baum-envisions-ar-glasses-in-1901/ (Ziyaret tarihi:25 Eylül 2018).

[16] Heilig M. L., Sensorama Simulator, 1962, U.S. Patent No.3050870, *U.S. Patent and Trademark Office.*

[17] Sutherland I. E., (1968, December). A Head-Mounted Three-Dimensional Display, *Fall Joint Computer Conference*, Salt Lake City, Utah, 9-11 Aralık 1968.

[18] Schmalstieg D., Höllerer, T., *Augmented Reality: Principles and Practice*, 1st ed., Addison-Wesley, Boston, 2016.

[19] Carmigniani J., Furht B., Anisetti M., Ceravolo P., Damiani E., Ivkovic M., Augmented Reality Technologies, Systems and Applications, *Multimedia Tools and Applications*, 2011, **51**(1), 341–377.

[20] Caudell T. P., Mizell D. W., Augmented Reality: An Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes, *IEEE 25th Hawaii International Conference on Systems Sciences*, Hawaii, USA, 7-10 Ocak 1992.

[21] Feiner S., MacIntyre B., Seligmann D., Knowledge-Based Augmented Reality, *Communications of the ACM*, 1993, **36**(7), 53–62.

[22] Mann S., Wearable Computing: A First Step Toward Personal Imaging, *Computer*, 1997, **30**(2), 25–32.

[23] Feiner S., MacIntyre B., Höllerer T., Webster A., A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment. *Personal Technologies*, 1997, **1**(4), 208–217.

[24] Höllerer T., Feiner S., Terauchi T., Rashid G., Hallaway D., Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System, *Computers & Graphics*, 1999, **23**(6), 779–785.

[25] Thomas B., Demczuk V., Piekarski W., Hepworth D., Gunther B., A Wearable Computer System with Augmented Reality to Support Terrestrial Navigation, *IEEE Second International Symposium on Wearable Computers*, Pittsburgh, USA, 19-20 Ekim 1998.

[26] Thomas B., Close B., Donoghue J., Squires J., De Bondi P., Morris M., Piekarski W., ARQuake: An Outdoor/Indoor Augmented Reality First-Person Application, *4th International Symposium on Wearable Computers*, Atlanta, USA, 18-21 Eylül 2000.

[27] Kato H., Billinghurst M., Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-Based Augmented Reality Conferencing System, *2nd International Workshop on Augmented Reality*, San Francisco, USA, 20-21 Ekim 1999.

[28] Reitmayr G., Schmalstieg D., Mobile Collaborative Augmented Reality, *4th International Symposium on Augmented Reality*, New York, USA, 29-30 Ekim 2001.

[29] Kalkusch M., Lidy T., Knapp N., Reitmayr G., Kaufmann H., Schmalstieg D., Structured Visual Markers for Indoor Pathfinding, *IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop*, Darmstadt, Germany, 29 Eylül 2002.

[30] Raskar R., Baar J., Beardsley P., Willwacher T., Rao S., Forlines C., iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors, *ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference*, San Diego, USA, 27-31 Temmuz 2003.

[31] Wagner D., Schmalstieg D. First Steps Towards Handheld Augmented Reality, *7th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, New York, USA, 21-23 Ekim 2003.

[32] Mohring M., Lessig C., Bimber O., Video See-Through AR on Consumer Cell-Phones, *3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Arlington, USA, 2-5 Kasım 2004.

[33] Klein G., Murray D., Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, *6th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Nara, Japan, 13-16 Kasım 2007.

[34] Klein G., Murray D., Parallel Tracking and Mapping on a Camera Phone, *8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Florida, USA, 19-22 Ekim 2009.

[35] Schmalstieg D., Langlotz T., Billinghurst M., Augmented Reality 2.0., Editors: Coquillart S., Brunnett G., Welch G., *Virtual Realities*, 1st ed., Springer-Verlag/Wien, Germany, 13-3, 2011.

[36] Muthukumar K., Augmented Reality and Geospatial Technology, Geoawesomeness, http://geoawesomeness.com/augmented-reality-geospatial-technology/ (Ziyaret tarihi: 25 Haziran 2018).

[37] Layar, https://www.layar.com/features/inspiration/ (Ziyaret tarihi 11 Ekim 2018).

[38] Qualcomm Officially Releases its Augmented Reality SDK, CNXSoft, https://www.cnx-software.com/2011/04/28/qualcomm-officially-release-its-augmented-reality-sdk/ (Ziyaret tarihi 11 Ekim 2018).

[39] Needham M., PTC Completes Acquisition of Vuforia, Business Wire, https://www.businesswire.com/news/home/20151103006223/en/PTC-Completes-Acquisition-Vuforia (Ziyaret tarihi: 26 Haziran 2018).

[40] Gannes L., Google Unveils Project Glass: Wearable Augmented-Reality Glasses, AllThings, http://allthingsd.com/20120404/google-unveils-project-glass-wearable-augmented-reality-glasses/ (Ziyaret tarihi: 26 Haziran 2018).

[41] Li M., Kim B. H., Mourikis A. I., Real-Time Motion Tracking on a Cellphone Using Inertial Sensing and a Rolling-Shutter Camera, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, 6-10 Mayıs 2013.

[42] Tan W., Liu H., Dong Z., Zhang G., Bao H., Robust Monocular SLAM in Dynamic Environments, *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Adelaide, Australia, October 1-4, 2013.

[43] Newcombe R. A., Lovegrove S. J., Davison A. J., DTAM: Dense Tracking and Mapping in Real-Time, *IEEE International Conference on Computer Vision*, Barcelona, Spain, November 6-13, 2011.

[44] Salas-Moreno R. F., Glocken B., Kelly P. H., Davison A. J., Dense Planar SLAM, *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Munich, Germany, September 10-12, 2014.

[45] Engel J., Schöps T., Cremers D., LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM, *European Conference on Computer Vision*, Zürich, Switzerland, 6-12 Eylül 2014.

[46] Engel J., Stückler J., Cremers D., Large-Scale Direct SLAM with Stereo Cameras, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Hamburg, Germany, 28 Eylül-2 Ekim 2015.

[47] Schöps T., Engel J., Cremers, D., Semi-Dense Visual Odometry for AR on a Smartphone, *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Munich, Germany, September 10-12, 2014.

[48] Azuma R., Baillot Y., Behringer R., Feiner S., Julier S., MacIntyre B., Recent Advances in Augmented Reality, *Naval Research Laboratory*, 34-47, 2001.

[49] Bimber O., Raskar R., Modern Approaches to Augmented Reality, *ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference Courses*, Boston, USA, 30 Temmuz - 3 Ağustos 2006.

[50] Van Krevelen D. W. F., Poelman R., A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations, *International Journal of Virtual Reality*, 2010, **9**(2), 1-20.

[51] Krum D. M., Suma E. A., Bolas M., Augmented Reality Using Personal Projection and Retroreflection. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2012, **16**(1), 17-26.

[52] Wojciechowski R., Cellary W., Evaluation of Learners' Attitude Toward Learning in ARIES Augmented Reality Environments, *Computers & Education*, 2013, **68**, 570-585.

[53] Fiorentino M., Uva A. E. Gattullo M., Debernardis S., Monno G., (2014). Augmented Reality on Large Screen for Interactive Maintenance Instructions, *Computers in Industry*, **65**(2), 270-278.

[54] Augmented Retail Solutions: FXMirror, FXGear, https://www.fxgear.net/vr-fashion/ (Ziyaret tarihi: 24 Eylül 2018).

[55] Navion AR Navigation, WayRay, https://wayray.com/navion (Ziyaret tarihi: 24 Eylül 2018).

[56] Ishii H., Wisneski C., Orbanes J., Chun B., Paradiso J., PingPongPlus: Design of an Athletic-Tangible Interface for Computer-Supported Cooperative Play, *SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, Pitssburg, USA, 15-20 Mayıs 1999.

[57] Kajastila R., Hämäläinen P., Augmented Climbing: Interacting with Projected Graphics on a Climbing Wall, *SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, Toronto, Canada, 26 Nisan - 1 Mayıs 2014.

[58] Hypervision, Kino-mo, https://kino-mo.com/ (Ziyaret tarihi: 24 Eylül 2018).

[59] Yan D., Hu H., Application of Augmented Reality and Robotic Technology in Broadcasting: A Survey, *Robotics*, 2017, **6**(3), 18-38.

[60] Zhou F., Duh H. B. L., Billinghurst M., Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: A Review of Ten Years of ISMAR, *7th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Cambridge, UK, 15-18 Eylül 2008.

[61] Billinghurst M., Clark A., Lee G., A Survey of Augmented Reality, *Foundations and Trends in Human–Computer Interaction*, 2015, **8**(2), 73-272.

[62] You S., Neumann U., Azuma R., Hybrid Inertial and Vision Tracking for Augmented Reality Registration, *Conference on Virtual Reality*, Houston, USA, 13-17 Mart 1999.

[63] Hesch J. A., Kottas D. G., Bowman S. L., Roumeliotis S. I., Camera-IMU-Based Localization: Observability Analysis and Consistency Improvement, *The International Journal of Robotics Research*, 2014, **33**(1), 182-201.

[64] Kumar K., Varghese A., Reddy P. K., Narendra N., Swamy P., Chandra M. G., Balamuralidhar P., An Improved Tracking Using IMU and Vision Fusion for Mobile Augmented Reality Applications, *The International Journal of Multimedia and Its Applications*, 2014, **6**(5), 13-29.

[65] Faion F., Zea A., Noack B., Steinbring J., Hanebeck U. D., Camera-and IMU-Based Pose Tracking for Augmented Reality, *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Baden, Germany, 19-21 Eylül 2016.

[66] Fang W., Zheng L., Deng H., Zhang H., Real-Time Motion Tracking for Mobile Augmented/Virtual Reality Using Adaptive Visual-Inertial Fusion, *Sensors*, 2017, **17**(5), 1037-1059.

[67] Happich J., High-performance IMU targets virtual and augmented reality applications, eeNews Europe, http://www.eenewseurope.com/news/high-performance-imu-targets-virtual-and-augmented-reality-applications/ (Ziyaret tarihi: 28 Haziran 2018).

[68] Mellor J. P., Enhanced Reality Visualization in a Surgical Environment, *MIT*, 1544, 1995.

[69] Hoff W. A., Nguyen K., Lyon T., Computer-Vision-Based Registration Techniques for Augmented Reality, *15th Intelligent Robots and Computer Vision*, Boston, USA, 18-22 Kasım 1996.

[70] Neumann U., Cho Y., A Self-Tracking Augmented Reality System, *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, Hong Kong, 1-4 Temmuz 1996.

[71] Grundhöfer A., Seeger M., Hantsch F., Bimber O., Dynamic Adaptation of Projected Imperceptible Codes, *6th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Nara, Japan, 13-16 Kasım 2007.

[72] Hou L., Wang X., Bernold L., & Love P. E., Using Animated Augmented Reality to Cognitively Guide Assembly, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2013, **27**(5), 439-451.

[73] Harris C., Tracking with Rigid Models, Editors: Blake A., Yuille A. L., *Active Vision*, MIT Press, Cambridge, USA, 59-73, 1993.

[74] Vacchetti L., Lepetit V., Fua P., Fusing Online and Offline Information for Stable 3D Tracking in Real-Time, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Wisconsin, USA, 16-22 Haziran 2003.

[75] Pupilli M., Calway A., Real-Time Camera Tracking Using Known 3D Models and a Particle Filter, *18th International Conference Pattern Recognition*, Hong Kong, 20-24 Ağustos 2006.

[76] Comport A., Marchand E., Chaumette F., A Real-Time Tracker for Markerless Augmented Reality, *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Tokyo, Japan, 7-10 October 2003.

[77] Reitmayr G., Drummond T. W., Going Out: Robust Model-Based Tracking for Outdoor Augmented Reality, *5th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Santa Barbara, USA, 22-25 Ekim 2006.

[78] Platonov J., Heibel H., Meier P., Grollmann B., A Mobile Markerless AR System for Maintenance and Repair, *5th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Santa Barbara, USA, 22-25 Ekim 2006.

[79] Harris C., Stephens M., A Combined Corner and Edge Detector, *Alvey Vision Conference*, Manchester, UK, 1-5 Eylül 1988.

[80] Lowe D. G., Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2), 91–110.

[81] Rosten E., Drummond T., Machine Learning for High-Speed Corner Detection, *European Conference on Computer Vision*, Graz, Austria, 7-13 Mayıs 2006.

[82] Lowe D.G., Object Recognition from Local Scale-Invariant Features, *International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, 20-25 Eylül 1999.

[83] Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L., SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, **110**(3), 346-359.

[84] Calonder M., Lepetit V., Strecha C., Fua P., BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features, *11th European Conference on Computer Vision*, Crete, Greece, 5-11 Eylül 2010.

[85] Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G., ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF, *IEEE International Conference on Computer Vision*, Barcelona, Spain, 6-13 Kasım 2011.

[86] Leutenegger S., Chli M., Siegwart R. Y., BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints, *IEEE International Conference on Computer Vision*, Barcelona, Spain, 6-13 Kasım 2011.

[87] Alahi A., Ortiz R., Vandergheynst P., FREAK: Fast Retina Keypoint, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Rhode Island, USA, 16-21 Haziran 2012.

[88] Davison A. J., Reid I. D., Molton N. D., Stasse O., MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, **29**(6) 1052-1067.

[89] Ho T. S., Fai Y. C., Ming E. S. L., Simultaneous Localization and Mapping Survey Based on Filtering Techniques, *10th Asian Control Conference*, Kota Kinabalu, Malaysia, 31 Mayıs - 3 Haziran 2015.

[90] Saputra M. R. U., Markham A., Trigoni N., Visual SLAM and Structure from Motion in Dynamic Environments: A Survey, *ACM Computing Surveys*, 2018, **51**(2), 1-36.

[91] Khairuddin A. R., Talib M. S., Haron H., Review on Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, Penang, Malaysia, 27-29 Kasım 2015.

[92] Craig A. B., *Understanding Augmented Reality: Concept and Applications*, 1st ed., Morgan Kaufmann, USA, 2013.

[93] Popper B., Apple Reportedly Acquires Metaio, An Augmented Reality Startup, The Verge, https://www.theverge.com/2015/5/28/8682505/apple-acquires-metaio-augmented-reality-startup/ (Ziyaret tarihi: 04 Temmuz 2018).

[94] Střelák D., Augmented Reality Tourist Guide, Yüksek Lisans Tezi, Masarykova Univerzita, Fakulta Informatiky, Brnoda, 2016.

[95] Amin D., Govilkar S., Comparative Study of Augmented Reality SDKs, *International Journal on Computational Science & Applications*, 2015, **5**(1), 11-26.

[96] Akgül M. K., Artırılmış Gerçeklik (AR) Uygulamalarındaki Gelişmeler Günlük Hayatta Kullanımı – II, Anahtar Dergisi, https://anahtar.sanayi.gov.tr/tr/news/artirilmis-gerceklik-ar-uygulamalarindaki-gelismeler-gunluk-hayatta-kullanimi-%E2%80%93-ii/1933/ (Ziyaret tarihi 02.12.2016).

[97] Bozyer Z., Augmented Reality in Sports: Today and Tomorrow, *International Journal of Science Culture and Sport*, 2015, **3**(4), 314-325.

[98] Chatzopoulos D., Bermejo C., Huang Z., Hui, P., Mobile Augmented Reality Survey: From Where We Are to Where We Go, *IEEE Access*, 2017, **5**, 6917-6950.

[99] Adhani N. I., Rambli, D. R. A., A Survey of Mobile Augmented Reality Applications, *1st International Conference on Future Trends in Computing and Communication Technologies*, Barcelona, Spain, 23-26 Ekim 2012.

[100] Lee G. A., Dünser A., Kim S., Billinghurst M., CityViewAR: A Mobile Outdoor AR Application for City Visualization, *11th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Atlanta, USA, 5-8 Kasım 2012.

[101] Königsberger vannucchi architects: augmented reality architecture, Designboom, https://www.designboom.com/technology/konigsberger-vannucchi-architects-augmented-reality-architecture/ (Ziyaret tarihi: 15 Ekim 2018).

[102] Discover the ready-made house of your dreams in augmented reality, Augment, https://www.augment.com/blog/discover-the-ready-made-house-of-your-dreams-in-augmented-reality/ (Ziyaret tarihi: 15 Ekim 2018).

[103] Billinghurst M., Kato H., Poupyrev I., The MagicBook: A Transitional AR Interface, *Computers & Graphics*, **25**(5), 745-753.

[104] Bazzaza M. W., Al Delail B., Zemerly M. J., Ng J. W., iARBook: An Immersive Augmented Reality System for Education. *2014 International Conference on Teaching, Assessment and Learning*, Wellington, New Zealand, 8-10 Aralık 2014.

[105] Akçayır M., Akçayır G., Pektaş H. M., Ocak M. A., Augmented Reality in Science Laboratories: The Effects Of Augmented Reality On University Students' Laboratory Skills and Attitudes Toward Science Laboratories, *Computers in Human Behavior*, 2016, **57**, 334-342.

[106] İbili E., Şahin S., Artırılmış Gerçeklik ile Interaktif 3D Geometri Kitabı Yazılımın Tasarımı ve Geliştirilmesi: ARGE3D, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2013, **13**, 1-8.

[107] Tomi A. B., Rambli D. R. A., An Interactive Mobile Augmented Reality Magical Playbook: Learning Number with The Thirsty Crow, *Procedia Computer Science*, 2013, **25,** 123-130.

[108] Siemens Finds the Power of Interactive Print through Augment, Augment, https://www.augment.com/blog/siemens-finds-power-interactive-print-augment/ (Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2018).

[109] James H., 6 Great Examples of Mobile Integration, This is Retail, http://thisisretail.com.au/blog/6-great-examples-of-mobile-integration/ (Ziyaret tarihi: 18 Nisan 2018).

[110] Dasey D., Try before you buy: new IKEA place app makes home furnishing easier, IKEA, https://highlights.ikea.com/2017/ikea-place/ (Ziyaret tarihi: 18 Nisan 2018).

[111] Vlahakis V., Ioannidis M., Karigiannis J., Tsotros M., Gounaris M., Stricker D., Gleue T., Daehne P. Almeida L., Archeoguide: An Augmented Reality Guide for Archaeological Sites, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002 **22**(5), 52-60.

[112] Demir Ö. F., Karaarslan E., Augmented Reality Application for Smart Tourism: GökovAR, *6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair*, İstanbul, Turkey, 25-26 Nisan 2018.

[113] Zhang M., Museum of London Releases Augmented Reality App for Historical Photos, Petapixel, https://petapixel.com/2010/05/24/museum-of-london-releases-augmented-reality-app-for-historical-photos/ (Ziyaret tarihi: 19 Nisan 2018).

[114] Piekarski W., Thomas B. H., ARQuake-Modifications and Hardware for Outdoor Augmented Reality Gaming, *4th Australian Linux Conference*, Perth, Australia, 18-23 Ocak 2003.

[115] Anderson N., Steele J., O'Neill L. A., Harden L. A., Pokémon Go: Mobile App User Guides, *British Journal of Sports Media*, 2017, 51(20), 1505-1506.

[116] U.S. Naval Res. Lab, Information Management and Decision Architectures: Augmented Reality, https://www.nrl.navy.mil/itd/imda/research/5581/augmented-reality (Ziyaret tarihi: 04 Temmuz 2018).

[117] Livingston M. A., Rosenblum L. J., Brown D. G., Schmidt G. S., Julier S. J., Baillot Y., Maassel P., Military Applications of Augmented Reality, Editor: Burko G., *Handbook of Augmented Reality*, Springer, New York, 671-706, 2011.

[118] ARA, ARC4: Heads-up on-the-move augmented reality technology, https://www.ara.com/projects/arc4-heads-move-augmented-reality-technology (Ziyaret tarihi: 26 Kasım 2018).

[119] Corbett D. S., Dünser A., Clark A., An Interactive Augmented Reality System for Exposure Treatment. *11th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Atlanta, USA, 5-8 Kasım 2012.

[120] Sousa M., Vieira J., Medeiros D., Arsenio A., Jorge J., SleeveAR: Augmented Reality for Rehabilitation Using Realtime Feedback, *21st International Conference on Intelligent User Interfaces*, Sonoma, USA, 7-10 Mart 2016.

[121] Syberfeldt A., Holm M, Danielsson O., Support Systems on The Industrial Shop-Floors of the Future – Operators' Perspective on Augmented Reality, *Procedia CIRP*, 2016, **44**, 108-113.

[122] Pierdicca R., Frontoni E., Pollini R., Trani M., Verdini L., The Use of Augmented Reality Glasses for the Application in Industry 4.0. *4th International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*, Ugento, Italy, 12-15 Haziran 2017.

[123] Yuvana N., Uma P. L., Ramesh N. V. K., Developing Killer Apps for Industrial Augmented Reality, *Global Journal of Research in Engineering*, 2015, **14**(7), 15-17.

[124] Quandt M., Knoke B., Gorldt C., Freitag M., Thoben K. D., General Requirements for Industrial Augmented Reality Applications, *Procedia CIRP*, 2018, **72**(1), 1130-1135.

[125] Dini G, Mura M.D., Application of Augmented Reality Techniques in Through-Life Engineering Services, *Procedia CIRP*, 2015, **38**, 14-23.

[126] Nee A. Y., Ong S. K., Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, **46**(9), 15-26.

[127] Nee A. Y., Ong S. K., Chryssolouris G., Mourtzis D., Augmented Reality Applications in Design and Manufacturing, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, **61**(2), 657-679.

[128] Bottani E., Vignali G., Augmented Reality Technology in the Manufacturing Industry: A Review of the Last Decade, *IISE Transactions*, DOI:10.1080/24725854.2018.1493244.

[129] Palmarini R., Erkoyuncu J. A., Roy R., Torabmostaedi H., A Systematic Review of Augmented Reality Applications in Maintenance, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, **49**, 215-228.

[130] Wang X., Ong S. K., Nee A. Y., A comprehensive Survey of Augmented Reality Assembly Research, *Advances in Manufacturing*, 2016, **4**(1), 1-22.

[131] Del Amo I. F., Erkoyuncu J. A., Roy R., Palmarini R., Onoufriou D. (2018). A Systematic Review of Augmented Reality Content-Related Techniques for Knowledge Transfer in Maintenance Applications, *Computers in Industry*, 2018, **103**, 47-71.

[132] Radkowski R., Ingebrand J., HoloLens for Assembly Assistance-A Focus Group Report, *9th International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality*, Vancouver, Canada, 9-14 Temmuz 2017.

[133] Deshpande A., Kim I., The Effects of Augmented Reality on Improving Spatial Problem Solving for Object Assembly, *Advanced Engineering Informatics*, 2018, **38**, 760-775.

[134] Wijesooriya I., Wijewardana D., De Silva T., Gamage C., Demo Abstract: Enhanced Real-Time Machine Inspection with Mobile Augmented Reality for Maintenance and Repair, *IEEE/ACM Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation*, Pittsburgh, USA, 18-21 Nisan 2017.

[135] Espíndola D. B., Fumagalli L., Garetti M., Pereira C. E., Botelho S. S., Henriques R. V., A Model-Based Approach for Data Integration to Improve Maintenance Management by Mixed Reality, *Computers in Industry*, 2013, **64**(4), 376-391.

[136] Flatt H., Koch N., Röcker C., Günter A., Jasperneite J., A Context-Aware Assistance System for Maintenance Applications in Smart Factories Based on Augmented Reality and Indoor Localization. *IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, Luxembourg, 8-11 Eylül 2015.

[137] Stanimirovic D., Damasky N., Webel S., Koriath D., Spillner A., Kurz D., A Mobile Augmented Reality System to Assist Auto Mechanics, *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Munich, Germany, 10-12 Eylül 2014.

[138] Masoni R., Ferrise F., Bordegoni M., Gattullo M., Uva A. E., Fiorentino M., Carrabba E., Di Donato M., Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 Through Augmented Reality, *Procedia Manufacturing*, 2017, **11,** 1296-1302.

[139] Funk M., Kosch T., Kettner R., Korn O., Schmidt A., Motioneap: An Overview of 4 Years of Combining Industrial Assembly with Augmented Reality for Industry 4.0, *16th International Conference on Knowledge Technologies and Data-Driven Business,* Graz, Austria, 18-19 Ekim 2016.

[140] Olwal A., Gustafsson J., Lindfors C., Spatial Augmented Reality on Industrial CNC-Machines, *SPIE 2008 Electronic Imaging*, San Jose, USA, 27-31 Ocak 2008.

[141] Booth A., Sutton A., Papaioannou D., *Systematic Approaches to A Successful Literature Review*, Sage Publications, Sheffield, 2016.

[142] Van Gelder L. M., Barnes A., Wheat J. S., Heller B. W., The Use of Biofeedback for Gait Retraining: A Mapping Review, Clinical Biomechanics, 2018, **59**, 159-166.

[143] Grant M. J., Booth A., A Typology of Reviews: An Analysis of 14 Review Types and Associated Methodologies, *Health Information & Libraries Journal*, 2009, **26**(2), 91-108.

[144] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman D. G., Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement, *PLoS Med*, 2009, **6**(7), 1-6.

[145] Henderson S. J., Feiner S. K., Augmented Reality in the Psychomotor Phase of a Procedural Task, *10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Basel, Switzerland, 26-29 Ekim 2011.

[146] Wu L. C., Lin I., Tsai M. H., Augmented Reality Instruction for Object Assembly Based on Markerless Tracking, 20th ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, Redmond, USA, 26-28 Şubat 2016.

[147] Wang Y., Zhang S., Wan B., He W., Bai X., Point Cloud and Visual Feature-Based Tracking Method for An Augmented Reality-Aided Mechanical Assembly System, *The International Journal of Advanced Manufacturing* Technology, 2018, **99**(9-12), 2341-2352.

[148] Radkowski R., Oliver J., Natural Feature Tracking Augmented Reality for On-Site Assembly Assistance Systems, *15th International Conference on Human-Computer Interaction,* Las Vegas, USA, 21-26 Temmuz 2013.

[149] Lima J. P., Roberto R., Simões F., Almeida M., Figueiredo L., Teixeira J. M., Teichrieb V., Markerless Tracking System for Augmented Reality in the Automotive Industry, *Expert Systems with Applications*, 2017, **82**, 100-114.

[150] Havard V., Baudry D., Savatier X., Jeanne B., Louis A., Mazari B., Augmented Industrial Maintenance (AIM): A Case Study for Evaluating and Comparing aith Paper and Video Media Supports, *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*, Otranto, Italy, 15-18 Haziran 2016.

[151] Fangyang S., Jun J., Xuejun L., Yue Q., Augmented Reality Aided Jet Engine Assembly and Disassembly Guidance System, *4th International Universal Communication Symposium*, Beijing, China, 18-19 Ekim 2010.

[152] Blattgerste J., Renner P., Strenge B., Pfeiffer T., In-Situ Instructions Exceed Side-by-Side Instructions in Augmented Reality Assisted Assembly, *11th PErvasive Technologies Related to Assistive Environments Conference*, Corfu, Greece, 26–29 Haziran 2018.

[153] Leutert F., Schilling K., Projector-based Augmented Reality for Telemaintenance Support, IFAC-PapersOnLine, 2018, **51**(11), 502-507.

[154] Funk M., Lischke L., Mayer S., Shirazi A. S., Schmidt A., Teach Me How! Interactive Assembly Instructions Using Demonstration and In-Situ Projection, Editörler: Huber J., Shilkrot R., Maes P., Nanayakkara S, *Assistive Augmentation*, Springer, Singapore, 49-73, 2018.

[155] Funk M., Bächler A., Bächler L., Korn O., Krieger C., Heidenreich T., Schmidt A., Comparing Projected In-Situ Feedback at The Manual Assembly Workplace with Impaired Workers, *8th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*, Corfu, Greece, 01-03 Temmuz 2015.

[156] Wang X., Ong S. K., Nee A. Y. C., Multi-modal Augmented-Reality Assembly Guidance Based on Bare-Hand Interface, *Advanced Engineering Informatics*, 2016, **30**(3), 406-421.

[157] Radkowski R., Herrema J., Oliver J., Augmented Reality-Based Manual Assembly Support with Visual Features for Different Degrees of Difficulty, *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2015, **31**(5), 337-349.

[158] Tullis T., Albert B., *Measuring the User Experience, Collecting, Analyzing and Presenting Usability Metrics*, 2nd Edition, Morgan Kaufmann, USA, 2013.

[159] Norman D., Jakob N., The Definition of User Experience (UX), Norman Nielsen Group, https://www.nngroup.com/articles/definition-user-experience/ (Ziyaret tarihi: 22 Ağustos 2016).

[160] Gonzalez M. S., A Comprehensive Human-Computer Interaction Model for Augmented Reality Systems, Doktora Tezi, Universidad de Deusto, Spain, 2015.

[161] Preece J., Rogers Y., Sharp H., Interfaces, Editörler: Preece J., Rogers Y., Sharp H., *Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction*, 3rd ed., John Wiley & Sons, UK, 2011.

[162] Oktay B., Folmer E., TextSL: A Screen Reader Accessible Interface for Second Life, *International Cross Disciplinary Conference on Web Accessibility*, Raleigh, USA, 26-27 Nisan 2010.

[163] Wadlow T. A., The Xerox Alto Computer, *BYTE Magazine*, 1981, **6**(9), 58-68.

[164] Johnson J., Roberts T. L., Verplank W., Smith D. C., Irby C. H., Beard M., Mackey K., The Xerox Star: A Retrospective, *Computer*, 1989, **22(**9), 11-26.

[165] Francese R., Passero I., Tortora G., Wiimote and Kinect: Gestural User Interfaces Add a Natural Third Dimension to HCI, *International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, Capri Island, Italy, 21-25 Mayıs 2012.

[166] Abhang P. A., Gawali B. W., Mehrotra S. C., Brain–Computer Interface Systems and Their Applications, Editörler: Abhang P. A., Gawali B. W., Mehrotra S. C., *Introduction to EEG and Speech Based Emotion Recognition*, Academic Press, 165-177, 2016.

[167] Emotiv, Brain Computer Interface Technology, https://www.emotiv.com/emotiv-bci/ (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2018).

[168] NeuroSky, Brainwave Sensors for Everybody, http://www.neurosky.com (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2018).

[169] Makin S., Brain-Computer Interface Allows Speediest Typing to Date, Scientific American, https://www.scientificamerican.com/article/brain-computer-interface-allows-speediest-typing-to-date/ (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2018).

[170] Preece J., Rogers Y., Sharp H., Understanding and Conceptualizing Interaction, Editörler: Preece J., Rogers Y., Sharp H., *Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction*, 3rd ed., John Wiley & Sons, UK, 2011.

[171] Shneiderman B., Direct Manipulation: A Step Beyond Programming Languages, *Computer*, 1983, **8**, 57-69.

[172] Shneiderman B., We can Design Better User Interfaces: A Review of Human-Computer Interaction Styles, *Ergonomics*, 1988, **31**(5), 699-710.

[173] Weizenbaum J., ELIZA: A Computer Program for the Study of Natural Language Communication Between Man and Machine, *Communications of the ACM*, 1966, **9**(1), 36-45.

[174] Sherugar S., Budiu R., Direct Manipulation: Definition, Norman Nielsen Group, https://www.nngroup.com/articles/direct-manipulation/ (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[175] IGI Cave Systems, IGI, https://www.werigi.com/cave (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[176] Lindeman R. W., Noma H., A Classification Scheme for Multi-Sensory Augmented Reality, *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, California, USA, 5-7 Kasım 2007.

[177] Milgram P., Colquhoun H., A taxonomy of real and virtual world display integration, Editörler: Ohta Y., Tamura H., *Mixed Reality: Merging Real and Virtual Worlds*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1-26. 1999.

[178] Mackay W. E., Augmented Reality: Linking Real and Virtual Worlds: A New Paradigm for Interacting with Computers, *AVI 1998-The Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, Laquila, Italy, 24-27 Mayıs 1998.

[179] Normand J. M., Servières M., Moreau G., A New Typology of Augmented Reality Applications, *3rd Augmented Human International Conference,* Megève, France, 08-09 Mart 2012.

[180] Lee L. H., Hui P., Interaction Methods for Smart Glasses: A Survey, *IEEE Access,* 2018, **6**, 28712-28732.

[181] Wolf D., Dudley J. J., Kristensson P. O., Performance Envelopes of In-Air Direct and Smartwatch Indirect Control for Head-Mounted Augmented Reality, *25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces,* Reutlingen, Germany, 18-22 Mart 2018.

[182] Ham J., Hong J., Jang Y., Ko S. H., Woo W., Smart Wristband: Touch-and-Motion–Tracking Wearable 3D Input Device for Smart Glasses, *International Conference on Distributed, Ambient, and Pervasive Interactions*, Crete, Greece, 22-27 Haziran 2014.

[183] Serrano M., Ens B. M., Irani P. P., Exploring the Use of Hand-to-Face Input for Interacting with Head-Worn Displays. *SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems,* Toronto, Kanada, 26 Nisan – 1 Mayıs 2014.

[184] Datcu D., Lukosch S., Brazier F., On the Usability and Effectiveness of Different Interaction Types in Augmented Reality, *International Journal of Human-Computer Interaction,* 2015, **31**(3), 193-209.

[185] He Z., Chang T., Lu S., Ai H., Wang D., Zhou Q., Research on Human-Computer Interaction Technology of Wearable Devices Such as Augmented Reality Supporting Grid Work, *Procedia Computer Science,* 2017, **107**, 170-175.

[186] Wahl F., Freund M., Amft O., Using Smart Eyeglasses as a Wearable Game Controller, *ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and ACM International Symposium on Wearable Computers,* Osaka, Japan, 7-11 Eylül 2015.

[187] Blattgerste J., Renner P., Pfeiffer T., Advantages of Eye-Gaze Over Head-Gaze-Based Selection in Virtual and Augmented Reality Under Varying Field of Views, *Workshop on Communication by Gaze Interaction,* Warsaw, Poland, 14-17 Haziran 2018.

[188] Malkawi A. M., Srinivasan R. S., A New Paradigm for Human-Building Interaction: The Use of CFD and Augmented Reality, *Automation in Construction,* 2005, **14**(1), 71-84.

[189] Sugiura A., Toyoura M., Mao X., A Natural Click Interface for AR Systems with a Single Camera, *Graphics Interface 2014,* Montreal, Quebec, Canada, 07-09 Mayıs 2014.

[190] Martin-SanJose J. F., Juan M. C., Mollá R., Vivó R., (2017). Advanced Displays and Natural User Interfaces to Support Learning, *Interactive Learning Environments,* 2017, **25**(1), 17-34.

[191] Mahrin M. N. R., Strooper P., Carrington D., Selecting Usability Evaluation Methods for Software Process Descriptions, *16th Asia-Pacific Software Engineering Conference*, Penang, Malezya, 01-03 Aralık 2009.

[192] Çağıltay K., *İnsan Bilgisayar Etkileşimi ve Kullanılabilirlik Mühendisliği: Teoriden Pratiğe,* ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık. Ankara, 2011.

[193] Nielsen J., Molich R., Heuristic Evaluation of User Interfaces, *CHI'90 Conference on Human Factors in Computing*, Seattle, WA, USA, 01-05 Nisan 1990.

[194] Nielsen J., Enhancing the Explanatory Power of Usability Heuristics, *CHI'94 Conference on Human Factors in Computing*, Boston, Massachusetts, 24-28 Nisan 1994.

[195] Nielsen J., Heuristic evaluation. Editörler: Nielsen J., Mack R. L., *Usability Inspection Methods*, John Wiley & Sons, New York, 1994.

[196] Nielsen J., (1992, June). Finding Usability Problems Through Heuristic Evaluation, *CHI '92 Conference on Human Factors in Computing*, Monterey, USA, 03-07 Mayıs 1992.

[197] Baxter K., Courage C., Caine K., *Understanding Your Users: A Practical Guide to User Research Methods*, 2nd ed., Morgan Kaufmann, San Francisco, 2015.

[198] Shneiderman B., *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*, 3rd ed., Addison-Wesley, Reading, 1998.

[199] Tognazzini B., First Principles of Interaction Design, asktog.com, http://www.asktog.com/basics/firstPrinciples.html (Ziyaret tarihi: 03 Ekim 2018).

[200] Harley A., UX Expert Reviews, Norman Nielsen Group, https://www.nngroup.com/articles/ux-expert-reviews/ (Ziyaret tarihi: 03 Ekim 2018).

[201] Nielsen J., Severity Ratings for Usability Problems, Norman Nielsen Group, https://www.nngroup.com/articles/how-to-rate-the-severity-of-usability-problems/ (Ziyaret tarihi: 03 Ekim 2018).

[202] Wharton C., Rieman J., Lewis C., Polson P., The Cognitive Walkthrough Method: A Practitioner's Guide, Editörler: Nielsen J., Mack R.L., *Usability Inspection Methods*, John Wiley & Sons, New York, 1994.

[203] Preece J., Rogers Y., Sharp H., Evaluation: Inspections, Analytics, and Models, Editörler: Preece J., Rogers Y., Sharp H., Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction, 3rd ed., John Wiley & Sons, UK, 2011.

[204] Rosenbaum S., Usability Evaluations Versus Usability Testing: When and Why?, *IEEE Transactions on Professional Communication*, 1989, **32**(4), 210-216.

[205] Alshamari M., Mayhew P., Task design: Its Impact on Usability Testing, *The Third International Conference on Internet and Web Applications and Services*, Athens, Greece, 8-13 Haziran 2008.

[206] Holzinger A., Usability engineering methods for software developers, *Communications of the ACM*, 2005, **48**(1), 71-74.

[207] Malkawi A. M., Srinivasan R. S., A New paradigm for Human-Building Interaction: The Use of CFD and Augmented Reality, *Automation in Construction*, 2005, **14**(1), 71-84.

[208] Manuri F., Piumatti G., A Preliminary Study of a Hybrid User Interface for Augmented Reality Applications, *7th International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment*, Torino, Italy, 10-12 Haziran 2015.

[209] Blattgerste J., Renner P., Pfeiffer T., Advantages of Eye-Gaze Over Head-Gaze-Based Selection in Virtual and Augmented Reality Under Varying Field of Views, *Workshop on Communication by Gaze Interaction*, Warsaw, Poland 14-17 Haziran 2018.

[210] Abate A. F., Acampora G., Ricciardi S., An Interactive Virtual Guide for The AR Based Visit of Archaeological Sites, *Journal of Visual Languages & Computing*, 2011, **22**(6), 415-425.

[211] Sasaki H., Kuroda T., Manabe Y., Chihara K., Augmented Reality Based Input Interface for Wearable Computers, *International Conference on Virtual Worlds*, Paris, France, 5-7 Haziran 2000.

[212] Rehman U., Cao S., Augmented-Reality-Based Indoor Navigation: A Comparative Analysis of Handheld Devices Versus Google Glass, *IEEE Trans. Human-Machine Systems*, 2017, **47**(1), 140-151.

[213] Mori S., Ikeda S., Plopski A., Sandor C., (2018, March). BrightView: Increasing Perceived Brightness of Optical See-Through Head-Mounted Displays Through Unnoticeable Incident Light Reduction, *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces*, Reutlingen, 18-22 Mart 2018.

[214] Schipper C., Brinkman B., Caption Placement on an Augmented Reality Head Worn Device, *19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Baltimore, USA, 29 Ekim - 01 Kasım 2017.

[215] Benko H., Ishak E. W., Feiner S., Cross-Dimensional Gestural Interaction Techniques for Hybrid Immersive Environments, *IEEE Virtual Reality Conference*, Bonn, Germany, 12-16 Mart 2005.

[216] Werrlich S., Nguyen P. A., Daniel A. D., Yanez C. E. F., Lorber C., Notni G., Design Recommendations for HMD-based Assembly Training Tasks, *SmartObjects part of HCI 18*, Montreal, Canada, 21-26 Nisan 2018.

[217] Gruenefeld U., Lange D., Hammer L., Boll S., Heuten W., FlyingARrow: Pointing Towards Out-of-View Objects on Augmented Reality Devices, *7th ACM International Symposium on Pervasive Displays*, Munich, Germany, 6-8 Haziran 2018.

[218] Memo A., Zanuttigh P., Head-mounted Gesture Controlled Interface for Human-Computer Interaction, *Multimedia Tools and Applications*, 2018, **77**(1), 27-53.

[219] Gale N., Mirza-Babaei P., Pedersen I., Heuristic Guidelines for Wearable Augmented Reality Applications, *The Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, London, United Kingdom, 05-07 Ekim 2015.

[220] Kim S., Nussbaum M. A., Gabbard J. L., Influences of Augmented Reality Head-Worn Display Type and User Interface Design on Performance and Usability in Simulated Warehouse Order Picking, *Applied Ergonomics*, 2019, **74**, 186-193.

[221] Ng L. X., Wang Z. B., Ong S. K., Nee A. Y. C., Integrated Product Design and Assembly Planning in An Augmented Reality Environment, *Assembly Automation*, 2013, **33**(4), 345-359.

[222] Gattullo M., Uva A. E., Fiorentino M., Gabbard J. L., Legibility in Industrial AR: Text Style, Color Coding, and Illuminance, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2015, **35**(2), 52-61.

[223] Heidemann G., Bax I., Bekel H., Multimodal Interaction in An Augmented Reality Scenario, *6th International Conference on Multimodal Interfaces*, State College, USA, 14-15 Ekim 2004.

[224] Datcu D., Lukosch S., Brazier F., On the Usability and Effectiveness of Different Interaction Types in Augmented Reality, *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2015, **31**(3), 193-209.

[225] Renkewitz H., Kinder V., Brandt M., Alexander T., Optimal Font Size for Head-Mounted-Displays in Outdoor Applications, *12th International Conference Information Visualisation*, London, UK, 9-11 Temmuz 2008.

[226] Hincapié-Ramos J. D., Ivanchuk L., Sridharan S. K., Irani, P., Smartcolor: Real-Time Color Correction and Contrast for Optical See-Through Head-Mounted Displays, *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Munich, Germany, 10-12 Eylül 2014.

[227] Cheng H. Y., Chiang C. W., The Discussion of Interactive Outdoor Guidance and Appliance on Smart Glasses from the Aspect of Human Computer Interaction: Taking Dihua Street for Example, *International Conference on Human-Computer Interaction*, Vancouver, Canada, 09-14 Temmuz 2017.

[228] Kerr S. J., Rice M. D., Teo Y., Wan M., Cheong Y. L., Ng J., Wren D., Wearable Mobile Augmented Reality: Evaluating Outdoor User Experience, *10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*, Hong Kong, China, December 11-12 Aralık 2011.

[229] Michalos G., Karagiannis P., Makris S., Tokçalar Ö., Chryssolouris G., (2016). Augmented Reality (AR) Applications for Supporting Human-Robot Interactive Cooperation, *Procedia CIRP*, 2016, **41**, 370-375.

[230] Rentzos L., Papanastasiou S., Papakostas N., Chryssolouris G., Augmented Reality for Human-Based Assembly: Using Product and Process Semantics, *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, **46**(15), 98-101.

[231] Neges M., Koch C. (2016). Augmented reality supported work instructions for onsite facility maintenance.

[232] Rice M., Tay H. H., Ng J., Selvaraj S. K., Lim C., Wu E., Extraction, Rendering and Augmented Interaction in the Wire Assembly of Commercial Aircraft, *IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, Chengdu, China,15-18 Aralık 2016.

[233] Dünser A., Grasset R., Seichter H., Billinghurst M., *Applying HCI Principles to AR Systems Design*, HIT Lab, 2007.

[234] Dünser A., Billinghurst M., Evaluating Augmented Reality Systems, Editör: Burko G., *Handbook of Augmented Reality*, Springer, New York, 289-307, 2011.

[235] Dima E., Determining UI Design Principles for Google Glass and Other Over-Eye Interactive Device Applications, Independent Degree Project, Mid Sweeden University, Sundsvall, 2013.

[236] Ko S. M., Chang W. S., Ji Y. G., Usability Principles for Augmented Reality Applications in a Smartphone Environment, *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2013, **29**(8), 501-515.

[237] Endsley T. C., Sprehn K. A., Brill R. M., Ryan K. J., Vincent E. C., Martin J. M., Augmented Reality Design Heuristics: Designing for Dynamic Interactions, *61st Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society*, Austin, TX, USA, 09-13 Ekim 2017.

[238] Stanney K. M., Mollaghasemi M., Reeves L., Breaux R., Graeber D. A., Usability Engineering of Virtual Environments (VES): Identifying Multiple Criteria that Drive Effective VE System Design, *International Journal of Human-Computer Studies*, 2003, **58**(4), 447-481.

[239] Atkinson B. F. W., Bennett T. O., Bahr G. S., Nelson M. W., Development of a Multiple Heuristics Evaluation Table (MHET) to Support Software Development and Usability Analysis, *International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction*, Beijing, China, 22-27 Temmuz 2007.

[240] Ganapathy S., Design Guidelines for Mobile Augmented Reality: User Experience, Editörler: Huang W., Alem L., Livingston M.A., *Human Factors in Augmented Reality Environments*, Springer, New York, 165–180, 2013.

[241] Kalalahti J., Developing Usability Evaluation Heuristics for Augmented Reality Applications, Yüksek Lisans Tezi, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2015.

[242] Hart S. G. Staveland L. E., Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, Editörler: Hancock P. A., Meshkati N., *Human Mental Workload*, North Holland Press, Amsterdam, 1988.

[243] Lewis J. R., IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaires: Psychometric Evaluation and Instructions for Use, *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1995, **7**(1), 57-78.

[244] Lund A. M., Measuring Usability with the USE Questionnaire, *Usability Interface*, 2001, **8**(2), 3-6.

[245] Albert W., Tullis T., *Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics*, 2nd ed., Morgan Kaufmann, Newnes, 2013.

[246] Öztuna D., Elhan A. H., Tüccar E., Investigation of Four Different Normality Tests in Terms of Type 1 Error Rate and Power Under Different Distributions, *Turkish Journal of Medical Sciences*, 2006, **36**(3), 171-176.

[247] Nielsen J., How Many Test Users in a Usability Study?, Nielsen Norman Group, https://www.nngroup.com/articles/how-many-test-users/ (Ziyaret tarihi: 06 Ocak 2019)

EKLER

Ek-A

Anket Soruları	-3	-2	-1	0	1	2	3
1. Genel olarak benim için deneyi tamamlamak kolaydı.							
2. Sistemi biraz kullandıktan sonra daha pratik/iyi kullanmaya başladım.							
3. Sistemi tekrar kullandığımda hiç zorlanmayacağımı düşünüyorum.							
4. Yapılan görevler yeni bilgiler (donanım bileşenleri) edinmemi sağladı							
5. Artık destek olmadan aynı görevleri (donanımlarının montajı) yapabilirim.							
6. Sistem sayesinde deney görevlerinde daha verimli olduğumu düşünüyorum.							
7. Sistem sayesinde deney görevlerini daha kolay bir şekilde tamamladım.							
8. Sistemin bana zaman kazandırdığını düşünüyorum.							
9. Sistemin desteği olmadan görevleri tamamlamam mümkün değildi.							
10. Sistemin minimum adımda görevleri tamamlamamı sağladığını düşünüyorum.							
11. Sistemi kullanmak ve kontrol etmek kolaydı.							
12. Sistemin hataları nasıl düzelteceğim konusundaki yönlendirmeleri açıktı.							
13. Sistemi kullanırken hata yaptığımda, hatayı düzeltmekte zorlanmadım.							
14. Sistemin sağladığı görsel ve sesli bilgilere ihtiyacım halinde ulaşmak kolaydı.							
15. Sistemin sağladığı görsel öğelerin/şekillerin yoğunluğu (azlığı/çokluğu) ideal miktardaydı.							
16. Sistem tarafından sağlanan sesli yönlendirmelerin/bilgilerin yoğunluğu (azlığı/çokluğu) ideal miktardaydı.							
17. Sistem tarafından sağlanan bilgileri/yönlendirmeleri anlamak kolaydı.							
18. Sistemin sağladığı sesli yönlendirmelerin görevleri tamamlamama etkisi/katkısı oldu.							
19. Sistemin sağladığı görsel öğelerin/şekillerin görevleri tamamlamama etkisi oldu.							
20. Etkileşim kurmak için sağlanan sesli yönlendirmeler gayet net ve açıktı.							
21. Etkileşim kurmak için arayüze eklenen görsel şekiller gayet net ve açıktı.							
22. Sistemin bir yazılımda olması gereken her türlü özelliği içerdiğini düşünüyorum.							
23. Sistemi kullanırken hiçbir zaman kontrolümü kaybetmedim. İhtiyacım halinde sistem bana hangi adımda olduğumu daima gösterdi.							
24. Sistemin gerektiğinde esneklik sağlayan bir kullanıcı arayüzü sağladığını düşünüyorum.							
25. Sistem ile etkileşime geçmek için ellerimi neredeyse kullanmam gerekmedi (touchpad, tuşa basma,vb.)							
26. Ekranda oluşan sanal AG görüntüler/şekiller, gerçek dünya nesneleri ile örtüşüyordu, tutarlıydı.							
27. Sanal AG görüntüler/şekiller kolayca fark edilebiliyordu. Bulanık, çok küçük, titrek vs. değildi.							
28. Oluşan AG görüntüler/şekiller, bekletmeden yeterince hızlı bir şekilde ekrana yansıdı.							
29. Ortam aydınlatması, arka plan, parlaklık, yansıma, ışık miktarı vb. nedenler AG deneyiminin kalitesini etkilemedi.							
30. Ekranda oluşan AG görüntüleri/şekilleri oldukça açık ve anlaşılırdı.							
31. Gözlükte oluşan AG görüntüler/şekiller ile etkileşime geçmek kolaydı.							
32. Ekranda oluşan sanal AG görüntüler/şekiller stabildi, yok olmuyordu.							
33. Ekranda oluşan sanal AG görüntüleri/şekilleri anlamak zihinsel olarak yorucu değildi, bilişsel bir yük yaratmadı.							
34. AG gözlüğü ergonomik bir tasarıma sahipti, kullanımı kolaydı, çok fazla zorlanmadım.							
35. AG gözlüğü nedeniyle herhangi bir sağlık sorunu (baş ağrısı, göz yorgunluğu, mide bulantısı, baş dönmesi, vb.) yaşamadım.							
36. Sistemin kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayan, işlevsel ve görsel olarak iyi tasarlanmış bir kullanıcı arayüzü olduğunu düşünüyorum.							
37. Sistemi kullanırken kendimi rahat hissettim, rahatsız edici bir deneyim yaşamadım.							
38. Deney esnasında sıkılmadım, eğlendim.							
39. Sistemin işleyişi ve düzeni beni tatmin etti.							
40. Artırılmış Gerçeklik teknolojisini beğendim. Hayatımda daha fazla görmek isterim.							

Ek-B

Tablo Ek-B. Güncellenmiş sezgisel değerlendirme kriterleri.

	Açıklama	[48]	[195]	[233]	[236]	[237]	[239]	[240]	[241]
Öğrenme ve Kullanım Kolaylığı									
LU-1. Tutarlı Tasarım ve Yazılım Standartları	Arayüz, kullanıcıların her gün karşılaştıkları standart yazılım tasarım argümanlarını içermelidir. (Örn: Kapat: X işareti; Kırmızı Renk: Uyarı/Dikkat, vb.) Tasarım içerisinde aynı işlevi yerine getiren bileşenler aynı renk ve şekillerle tasarlanarak tutarlılık sağlanmalıdır.		X	X	X		X		
LU-2. Etkileşim Çeşitliliği	AR yazılımlarının kullanım amaçlarına göre ellerin serbest olup olmama durumu değişebileceğinden, farklı etkileşim yöntemleri tasarıma dahil edilmelidir. (touchpad, hareket algılama, sesli kontrol, göz takibi, vb.)		X	X	X	X	X	X	X
LU-3. Kullanıcı Kontrolü ve Özgürlük	Kullanıcılar sistem üzerinde tam olarak kontrol sahibi olduğunu hissetmelidir. İhtiyaç duyması halinde gerçekleştirdiği son işlemleri tekrarlayabilmeli ve yazılımı özgürce kullanabilmelidir.		X		X		X		
LU-4. Hataları Önleme ve Düzeltme	Arayüz tasarımı, hataların oluşmasını önleyecek şekilde yapılmalı, hatalar oluşmadan engellenmelidir. Hataların oluşması halinde ise sistem kullanıcıyı uyarmalı ve hataların düzeltilebilmesi için yönlendirmelidir.		X	X	X		X	X	
LU-5. Yardım ve Destek	Yazılımın kullanımı esnasında kullanıcıların sistemin işleyişine dair bilgiye ihtiyaç duyması ihtimaline karşın yardım sunulmalıdır.		X		X		X		
LU-6. Eşzamanlı Geri Bildirim	Arayüz, kullanıcıları sürekli ve kesintisiz bir biçimde sistemin anlık durumunu bildirmelidir. Kullanıcılar verdikleri bir komutun sistemdeki karşılığını ve sonucunu hemen görebilmeli, süreci takip edebilmelidir. Haptik etkileşimlere/tepkilere yer verilmelidir.	X	X	X	X	X	X	X	
LU-7. AG Ekran Sınırlarının Belirtilmesi	Kullanıcıların ekran dışında Sanal AG nesnelerini aramamaları için akıllı gözlüklerde yerleşik olan ekranların sınırları yazılımda belirtilmelidir. (oyunlarda farenin yerini belirten imleçler, vb.)	**Kullanıcı Testleri sonrasında önerilmiştir.**							
Arayüz Tasarımı ve Etkileşim									
DI-1. Minimal Görsel Tasarım	Kullanıcıların gerçekten ihtiyaç duyacağı bileşenler tasarıma dahil edilmelidir. Bilginin sunumu mümkün olan en az öğe kullanılarak yapılmalı, benzer bileşenler gruplandırılarak bir başlık, menü, düğme altında toplanarak arayüz bileşen yoğunluğu azaltılmalıdır. Ayrıca bileşenler gerçek dünyayı görmeyi engellemeyecek şekilde konumlandırılmalıdır. Arayüz bileşenleri ve sanal nesneler gereksinim/ihtiyaç halinde ortaya çıkmalıdır.	X	X				X	X	

Tablo Ek-B. (Devam) Güncellenmiş sezgisel değerlendirme kriterleri.

	Açıklama	[48]	[195]	[233]	[236]	[237]	[239]	[240]	[241]
DI-2. Minimal Bilişsel Yük	Sistemin kullanımı kolaylaştırılmalı, görevler adım adım kullanıcılara sunularak akılda tutmak için çaba harcanması engellenmelidir. Sunulan bilgiler akılda kalıcı olması için kısa ve öz olmalı, gereksiz detaylardan arındırılmalıdır.	X	X	X	X	X	X	X	
DI-3. Arayüz - Çevre Uyumu	Arayüz tasarımı yapılırken, AG sistemlerinin dinamik oluşu, mekân bağımsız olma durumu dikkate alınmalıdır. Tasarım ortam, çevre koşullarının değişebileceği göz önünde bulundurularak farklı kontrast, renk, parlaklık, boyut kriterleri dikkate alınarak yapılmalıdır.	X			X	X	X	X	X
DI-4. Dünyaya Uyum ve Metaforlar	Tasarımda gerçek dünya ile uyumlu arayüz bileşenleri kullanılmalıdır. Yazılım kullanıcının dilinden konuşmalı, sistem ile etkileşim kurmak için gerçek dünyada kullanılan etkileşim yöntemlerinden, metaforlardan faydalanılmalıdır. (Örn: sistem mesajlarını belirtmek için mektup resmini, uyarılarda "!" işaretini kullanmak.		X		X	X	X		
DI-5. Donanım - Yazılım Uyumu	Kullanılan AG donanımı, tasarlanacak yazılımın gereksinimlerini karşılayacak seviyede olmalıdır. Gerçek dünya görüntüsünün detaylı olarak kullanılacağı bir yazılımda kameranın çözünürlüğü, konum bilgisinin gerektiği bir yazılımda ise GPS modülünün kapasitesi ihtiyaçları karşılayabilmelidir.			X		X	X		
	Cihaz Ergonomisi ve Konfor								
EC-1. Mobilite ve Taşınabilirlik	Dinamik olan AG yazılımlarından üst düzeyde yararlanabilmek için kullanım donanımların taşınabilirliği yüksek olmalıdır. Kullanıcılar yazılımın çalıştırıldığı aygıtı/cihazı zorlanmadan hareket ettirebilmeli, yerini değiştirebilmelidir.								X
EC-2. Ergonomik Tasarım, Kişiselleştirme	AG cihazları/aygıtları kolay kullanım için ergonomik bir tasarıma sahip olmalıdır. Kullanıcılar cihazları/aygıtları kendi ihtiyaçları (antropometrik özellikleri) doğrultusunda ayarlayarak kişiselleştirebilmelidir. (Örn: akıllı gözlük ekranlarının gözler arası mesafeye göre ayarlanabilmeleri, farklı kafa ölçülerine göre uyarlanabilmeleri, vb.)	X			X	X			X
EC-3. Kullanıcı Tatmini	Tasarlanan arayüz kullanıcıyı eğlendirmeli, sıkmamalı ve yazılımı kullanmaktan duyduğu tatmin düzeyini artırmalıdır. Sistemin arayüzü oyunlaştırılmalıdır. Sistem, kullanıcıların her adımında başarma hissi uyandırmalıdır.			X	X				
EC-4. Kullanıcı Sağlığı ve Güvenliği	Hem AG aygıtı/cihazı hem de tasarlanan arayüz kullanıcının sağlığını ve güvenliğin tehdit etmemeli, kullanıcıya fiziksel olarak hasar verecek şekilde tasarlanmamalıdır. Kullanım süresine dikkat edilmelidir. (Örn: göz yorgunluğu, baş ağrısı, mide bulantısı, yaralanma, vb.)								X

Tablo Ek-B. (Devam) Güncellenmiş sezgisel değerlendirme kriterleri.

	Açıklama	[48]	[195]	[233]	[236]	[237]	[239]	[240]	[241]
Artırılmış Gerçeklik ve Sanal Nesneler									
AR-1. Sanal Nesnelerin Sunumu	Sanal nesneler birbirlerini veya gerçek dünya nesnelerini engellemeyecek şekilde sunulmalıdır. Çok fazla sanal nesne aynı anda sunulmamalıdır. Sanal nesnelerin ne olduklarını, neden oluşturuldukları anlaşılır olmalı, aktif nesneler animasyon, vs. desteklenmelidir.	**X**			**X**	**X**		**X**	**X**
AR-2. Sanal Nesnelerin Görünürlüğü	Sanal nesneler gerçek ortama uygun olmalı, renk, boyut, çözünürlük, vb. özellikleri yeterli olmalıdır. Sanal nesneler diğer sanal veya gerçek nesnelerle karıştırılmayacak şekilde yerleştirilmelidir.	**X**		**X**	**X**	**X**		**X**	**X**
AR-3. Sanal Nesnelerin Sağlamlığı	Sanal nesneleri görmek, takip etmek çok zor olmamalıdır. Titreme, kaybolma, yerini tayin edememe gibi sorunlar mümkün olduğu kadar azaltılmalıdır. Sanal nesneler kullanıcının hareketine ve bakış açısına göre otomatik olarak ayarlanmalıdır. Harekete rağmen, nesne, kayıtlı olduğu fiziksel nesne veya nokta ile ilişkili kalmalıdır.	**X**			**X**	**X**			**X**
AR-4. Sanal Nesneler ile Gerçek Dünya İlişkisi	Sanal nesneler AG deneyimini artıracak şekilde doğal ve inandırıcı ve diğer nesnelerle sürekli dinamik bir ilişki içerisinde olmalıdır. Her bir sanal nesne bütün parça içerisindeki uzaklık, açı, konum, vb. kriterleri dikkate alınarak sunulmalıdır.	**X**						**X**	**X**

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Bozyer, Z., Augmented Reality in Sports: Today and Tomorrow, *International Journal of Science Culture and Sport*, **3**(12), 314-325, 2015.

Bozyer Z., Onay Durdu, P., Heuristic Evaluation of a MMORPG: Guild Wars 2, *Communications in Computer and Information Science*, **435,** 9-14, 2014.

Bozyer Z., Fığlalı, A., Alkan, A., Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Probleminin Çözümü için Önce Grupla Sonra Rotala Merkezli Sezgisel Algoritma Önerisi, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, **7**(2), 29-37, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Zafer Bozyer 1983'de Kayseri'de doğdu. Lise öğrenimini Aksaray Şehit Hamza Gümüşsoy Fen Lisesi'nde tamamladı. 2002 yılında girdiği Gaziantep Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisansını 2013 yılında "Araç Rotalama Probleminin Çözümüne Yönelik Bir Model Önerisi" başlıklı tez alışması ile tamamladı. Aynı yıl içerisinde Kocaeli Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Artırılmış Gerçeklik, İnsan bilgisayar etkileşimi, bilişim sistemleri alanlarında yayınları bulunan Bozyer, 2010-2016 yılları arasında Bartın Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü'nde çalıştı. Ayrıca, 2016 yılında itibaren İskenderun Teknik Üniversitesi Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir.