

Yapılarda Yüksekte Çalışma İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak İçin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekânın Entegrasyonu Modeli

Hüseyin ERYAMAN¹
Ertan AKÜN²

ÖZ

İnşaat sahasında gerçekleşen kazalar özellikle yükseklikten düşmeler hem ölümcül hem de ölümcül olmayan yaralanmaların önde gelen nedenidir. İnşaat sektöründe Yapı bilgi modelleri (YBM), Genişletilmiş Gerçeklik (GG) ve Yapay Zekâ (YZ) gibi dijital teknolojiler, yapım üretkenliğini, verimliliğini ve güvenliğini artırmak için değerli araçlar olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, yapım işlerinde yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekânın entegrasyonu modeli önerilmektedir. Teorik çerçeveye ilişkin olarak iş süreci modeli ve sistem uygulama model entegrasyonu gösterilmektedir. Önerilen modelin değerlendirilmesi, hipotezlerin güvenilirliğini, geçerliliğini ve katkısının test edilmesi için bir Yapısal Eşitlik Model geliştirilmiştir. Araştırma bulguları, önerilen modelde kullanılan teknolojilerin entegrasyonun iş güvenliği denetimine olan olumlu etkisini ve önemini doğrulamaktadır. Önerilen model yüksek lokasyonda çalışan ekiplerin iş güvenliği bilgilerini analitik yeteneklerle dijitalleştirir ve karar verme sürecini optimize eder.

Anahtar Kelimeler: Yüksekte çalışma, iş güvenliği denetimi, genişletilmiş gerçeklik, yapay zekâ, entegrasyon modeli.

ABSTRACT

An Integration Model to Facilitate Occupational Safety Inspection through Augmented Reality and Artificial Intelligence for Working at High Locations in Buildings

Accidents at the construction site, especially falls from height, are the leading cause of both fatal and non-fatal injuries. In the construction industry, digital technologies such as Building

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 3 Ağustos 2022 günü ulaşmıştır. 25 Nisan 2023 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Eylül 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1291960>

1 Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Haspolat, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti
eryamanhuseyin79@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-3021-6032>

2 Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Haspolat, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti
eakun@ciu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3021-6032>

information modeling (BIM), Extended Reality (XR) and Artificial Intelligence (AI) have been identified as valuable tools to increase construction productivity, efficiency and safety. In this research, an integration model to facilitate occupational safety inspection through augmented reality and artificial intelligence for working at high locations in buildings is proposed. The business process model and system application model integration are shown in relation to the theoretical framework. A Structural Equation Model was developed to evaluate the proposed model and test the reliability, validity and contribution of the hypotheses. Research findings confirm the positive effect and importance of integration of technologies used in the proposed model on occupational safety auditing. The proposed model digitizes the occupational safety information of teams working at high locations with analytical capabilities and optimizes the decision-making process.

Keywords: Occupational safety inspection, augmented reality, artificial intelligence, integration model.

1. GİRİŞ

Günümüzde, inşaat endüstrisi en tehlikeli yapım işlerini içeren sektörlerden biridir [1]. Aslında, inşaat sektörü dünya iş gücünün sadece yaklaşık %7'sini istihdam etmesine rağmen, ölümlerin %30-40'ından sorumludur. İstatistikler, inşaat güvenliğinin kalıcı bir küresel sorun olduğunu göstermektedir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD), Çalışma İstatistikleri Bürosundan (ÇİB) alınan nüfus sayımı verilerine göre 774 işçi inşaatta yaralanarak yaşamını yitirmiştir, bu da 2010 yılında tüm endüstrilerin %16,5'ini oluşturmaktadır. Ölüm oranı 100.000 tam zamanlı eşdeğer işçi başına 9.8'dir ve tüm endüstriler arasında en yüksek dördüncü sırada yer almaktadır. 1990 ve 2000 yıllarında, 26.000'den fazla ABD inşaat işçisi çalışırken yaşamını yitirmiştir. [2]. Bu ölümlerin %40'ı yüksekten düşme şeklindedir. Daha ileri araştırmalar, yetersiz, kaldırılmış veya düşmeye karşı koruma ekipmanının uygunsuz kullanımı bu düşüşlerin %30'undan fazlasına neden olmuştur [2]. Çin [3], Birleşik Krallık [1] ve Almanya [4] gibi diğer ülkelerle ilgili istatistikler, inşaat sektöründeki yüksek ölümlü kaza yüzdelerini doğrulamaktadır ve yüksekten düşmelerin en sık görülen sebeplerden biri olduğuna işaret etmektedir. Sonuç olarak inşaat sektörünün birçok inşaat firmasının benimsediği “sıfır kaza/yaralanma” vizyonundan uzak olduğu bir gerçektir [1].

İnşaat sektöründe, iş güvenliği konuları karmaşık sosyo-teknik sistemler olarak kabul edilebilir [6]. Paydaşlar arasında malzeme üretici firmaları, ana yükleniciler ve alt yükleniciler, tasarım personeli, proje ve şantiye yöneticileri vardır. Ayrıca, genellikle çalışan işçi yoğunluğunun, bitişik binaların ve tesislerin, karmaşık hava olaylarının meydana geldiği şantiyeler, çok dinamik bir çalışma ortamına neden olur. Başka bir deyişle, iş güvenliği durumu, bileşenleri öngörülemez doğrusal olmayan etkileşimlere maruz kalan bir sistemin acil bir özelliğidir [12]. Bir araştırmada [6], yazarlar [13] tarafından tanımlanan ve özellikle karmaşık sosyo-teknik sistemler düşünülerek geliştirilen iş güvenliği riski yönetimi çerçevesini varsayarak, bir kule vincin güvenlik sorunlarını sistemik bir sorun olarak incelemişler; sonucunda kule vinç güvenliğini etkileyen faktörlerin bir listesini belirlemişlerdir.

İnşaat sahasında gerçekleşen kazalar özellikle yükseklikten düşmeler hem ölümcül hem de ölümcül olmayan yaralanmaların önde gelen nedenidir [14]. Düşmeler, bir denge kaybının ve dengesizlikten kurtulamamanın neden olduğu duruş bozukluğuna bağlanabilir. İşgücü İstatistik Ofisi (BLS), 2017 yılında 887 ölümün düşmelere, kaymalara ve takımlara atfedildiğini ve toplam 227.760 ölümcül olmayan işyeri yaralanmasının düşmelerden kaynaklandığını bildirmiştir (düşük seviyeye düşme: 47.180; aynı seviyeden düşme: 142.770; kayma/takılma: 33.720) özellikle yüksek etki oranı ile inşaat (24.160 düşme) ve imalat (22.010 düşme) [14]. Mesleki popülasyonlarda bu kadar yüksek ölümcül ve ölümcül olmayan yaralanmalar rapor edildiğinde, ergonomik bir popülasyonda düşmeleri ve düşmeye bağlı yaralanmaları önlemek için yeni değerlendirme ve eğitim metodolojilerinin izlenmesine ihtiyaç vardır. Tehlikeli çalışma koşullarından kaynaklanan tehlikeler ve mesleki ve endüstriyel çalışma ortamında insan vücuduna uygulanan fiziksel talepler, mesleki düşme riskini artırmaktadır [15]. Ayrıca, duruş dengesinin değerlendirilmesi hem fizyolojik hem de bir bireye yerleştirilen biyomekanik streslerin dolaylı bir etkililik ölçüsüdür ve duruş kontrol sisteminin genel bir güvenlik durumunu nicelleştirir.

Görsel yüksekliğe dayanamama, görsel uyarıcının, duruşsal dengesizlik ve yüksekte düşme endişesine yol açan bir olay olarak tanımlanır [16]. Duruşsal dengesizlik, 5 m (16.4 ft.); [17] yüksekliklerde ve 20 m (65.6 ft.) yüksekliğe kadar artan bir dengesizlik ile rapor edilmiştir, ardından dengesizlik değişiklik olmayan bir duruma ulaşmaktadır [17]. Ayrıca, 20 (65.6 ft.), 50 (164 ft.) ve 100 m (328 ft.) irtifalarında duruşsal denge ve genel vücut sallanması etkilenmemiştir [17]. Öznel yükseklik dengesizliğinin yukarıya ve göze bakmadan bağımsız olduğu ancak göz-nesne mesafesine bağlı olduğu bildirilmiştir [17,18]. Daha sonra, 20 m'nin (65.6 ft.) üzerindeki yüksekliklerde, görsel ipuçları doygun hale geldiğinden ve yüksekliğe tepki olarak duruşsal denge göz-nesne mesafesinin büyüklüğünün bir fonksiyonu gibi görüldüğünden ve karmaşık koordineli ve sürekli geribildirim duruşsal kontrol sistemlerinden dolayı vücut sallanmasında hiçbir farklılık belirgin değildir [17].

Ölümlerin yüksek sayısı genellikle güvenlik planlaması ve proje yürütme süreçleri arasındaki ayrılma gibi çeşitli nedenler [2,5], örtük güvenlik sorunları ve hepsinden önemlisi inşaat projelerinin dinamik ve karmaşık yapısı ve sürekli değişim gerektiren güvenlik ihtiyaçlarıdır [5]. İnşaat güvenliği sorunları düzgün bir şekilde karmaşık sosyoteknik sistem [6] olarak tanımlanan, sadece en iyi uygulama yaklaşımını benimseyerek önceden tanımlanmış gibi üstesinden gelinemez. Tersine, bu tür sorunların cevapları acil uygulamalar olarak tanımlanabilir [7].

İnşaat sektörü genellikle doğası gereği yenilikçi teknolojileri benimsemeye yapılındırılmamış ve değişen ortamının zorlukları nedeniyle belirsiz olarak kabul edilir [1,8]. Bununla birlikte, birçok araştırma çalışması [9-11] Güvenlik yönetimi alanındaki Bilişim ve İletişim Teknolojilerine ilişkin uygulanan en son gelişmelerin proaktif olarak tehlikeli senaryolara yanıt verebileceğini ve reaktif güvenlik yönetiminden proaktif güvenlik yönetimine geçişi sağladığını göstermektedir.

Tasarım Yoluyla Önleme (TyÖ), yüksekte düşme çalışmalarının ana odak noktasıdır ve TyÖ araçlarının çoğu, planlama ve tasarım aşamalarının başlarında güvenlik tehlikelerini belirlemek için YBM teknolojisini kullanır. Gelişmiş TyÖ teknolojisi, yalnızca kural denetleme seçenekleri sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tasarımdaki değişiklikleri birleştirmek için mekanizmalar içerir. Bu araçlar tehlikeleri belirledikten sonra önleyici tedbirler önerebilir ve kontrol tedbirlerinin uygulanmasını izleyebilir. Zhang ve diğ. [2],

tasarımla ilgili düşme tehlikelerinin planlama sürecinin başlarında nasıl belirlenebileceğini ve ortadan kaldırılabilirliğini araştırmıştır. YBM için bir eklenti olarak otomatik bir güvenlik kuralı kontrol algoritması uygulanmış ve düşmeye karşı koruma sistemlerinin manuel ve otomatik güvenlik modellemesini karşılaştıran iki konut projesi üzerinde test edilmiştir. TyÖ araçlarının doğru kullanımı, tüm proje paydaşlarının, çalışanların güvenliğini artırmak için bina tasarımlarını optimize etmek üzere birlikte çalışmasına olanak tanır. YBM, bilgisayar tarafından oluşturulan algoritmalarla birlikte, Güvenli Tasarım (GT) elde etmek için bir binanın tasarımına veya inşaat programına dahil edilmiş düşme risklerini belirleyebilir. Yüksekten düşmeyi önlemek için fiziksel engellerin seçilmesi ve uygulanması, kurulum sırasında SD hedeflerine ulaşılmasını sağlamak için tasarımcıların odak noktasıdır [19].

Goh ve Guo [20], aktif düşmeye karşı koruma sistemlerinin tasarımını desteklemek amacıyla FPSWizard'ı web tabanlı bir sistem olarak önermiştir. Hibrit Vaka Tabanlı Akıl Yürütme (CBR) ve Kural Tabanlı Akıl Yürütme (RBR) temelli bu tür sistemlerin tasarımında ve seçiminde son kullanıcılara yardımcı olmak için çevrimiçi bilgiye dayalı bir sistem önerdiler. Diğer araştırmalar da avantajlara göre seçmenin uygun şekilde uygulanmasıyla (AGS) yalnız düşünce kavramlarını kullanmış [21] ve yüksek binalarda korkuluklar aracılığıyla önleyici tasarım için Sanal Ortam (SO) Teknolojisini kullanmıştır [22].

İnşaat sektöründe yüksek bina projelerinin inşası, faaliyetlerin benzersizliği ve doğasının yanı sıra çalışma ortamının karmaşıklığı ve iş güvenliği konularının hayati önem taşıması nedeniyle tehlikeli bir meslektir. İnşaat sektöründe yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarının artan sayısı ve olumsuz sonuçları nedeniyle, yüksekte çalışma standartları, ekipman, temizlik/düzen, çalışanlar, yönetim faaliyetleri ve eğitim/bilgilendirme çalışmalarına destek olacak yeni teknolojik yaklaşımların belirlenmesi ve uygulamaya konulması gerekmektedir. Bu yeni teknolojik yaklaşımlara örnek olarak Yapı Bilgi Modellemesi (YBM), Dijital İkiz (Dİ) gibi dijital teknolojiler, inşaat üretkenliğini, verimliliğini ve güvenliğini artırmak için değerli araçlar olarak tanımlanmıştır. Bu araştırma, YBM ve inşaat sektöründe fotogrametri, küresel konumlandırma sistemi (KKS), radyo frekansı ile tanımlama (RFT), sanal gerçeklik (SG), artırılmış gerçeklik, (AG), genişletilmiş gerçeklik (GG), Yapay Zekâ (YZ) ve insansız hava aracı (İHA) teknolojisi gibi gelişen dijital teknolojilerle entegre ederek yapım işlerinde yüksekte çalışmaya bağlı iş kazası risklerini azaltmayı amaçlamaktadır. İnşaat sektöründe yer alan paydaşlar ile görüşmeler ve anketler yapılarak ve nicel (sayısal) veri analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, araştırma bulgularının bir araya getirilerek bir araştırma çerçevesi geliştirilmesi hedeflenmektedir. Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarını azaltmak için YBM ve GG 'in YZ ve diğer dijital teknolojilerle entegrasyonunun önlemlerini ve gelecekteki ihtiyaçlarını ifade etmektedir. Çerçeve aynı zamanda sektör uygulayıcıları için etkili ve daha güvenli yapım işlerinde yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarını azaltmaya yönelik pratik kılavuzlar sunmayı amaçlamaktadır.

Makalenin organizasyonu şöyledir. İkinci bölümünde İnşaat Sektöründe Yüksekte Çalışma, Kazalar ve Olası Etkenleri, Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıracak Dijital Teknolojilerin Önemi ve İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak için GG Teknolojileri Uygulamaları ve YZ Teknolojileri sunulacaktır ve literatürde mevcut araştırmalardaki eksiklikler ve hedefler vurgulanacaktır. Üçüncü bölümde Materyal ve Metoda ilişkin olarak Genel Araştırma Metodolojisi, İş Süreci Modeli Geliştirilmesi ve Yapılarda Yüksekte Çalışma İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak İçin GG ve YZ Entegrasyonu Modeli Geliştirilmesi gösterilecektir. Dördüncü bölümde Geliştirilen Modelin Değerlendirilmesine

ilişkin olarak Hipotezler, Örneklem, Veri Toplama, Ölçütler, Analiz ve sonuçlara ilişkin olarak Tanımlayıcı İstatistikler, Korelasyon Analizi, Faktör Analizi ve Güvenilirlik ve Yapısal Eşitlik Modeli (YEM) sunulacaktır. Beşinci bölümde Teorik Katkılar ve Yönetimsel Uygulamalar tartışılacaktır. Altıncı bölümde sonuç ve öneriler sunulacaktır.

2. TEORİK ÇERÇEVE

2.1. İnşaat Sektöründe Yüksekte Çalışma, Kazalar ve Olası Etkenleri

Günümüzde yüksek binalara olan talep sürekli olarak artmakta, bu da kaza ve ölüm oranlarının artmasına neden olmaktadır [23]. Birçok ülkede, yüksek binaların inşası, kazalardan dolayı yüksek riskli olduğu iyi bilinmektedir [24,25]. Kazalar sadece proje gecikmelerine ve kalıcı sakatlıklara [26] neden olmakla kalmaz, aynı zamanda çok büyük kişisel, sosyal ve finansal maliyetlere de neden olur [27,28]. İnşaat sektöründe kaza ve ölüm oranları diğer sektörlerle kıyasla hala daha yüksektir [29,30]. Avrupa'da kazaların yaklaşık %20'si inşaat sektöründe gerçekleşmektedir [31]. Benzer şekilde Malezya'da İş Sağlığı ve Güvenliği Dairesi (İSGD), 2019 yılında 7984 kaza vakasının kaydedildiğini ve bu rakamın önceki yıllara göre en fazla kaza vakası olduğu belirtilmiştir. Son birkaç on yılda inşaat sektöründe iş yerindeki yüksek sayıdaki olay ve yaralanmaları azaltmak için çok sayıda uygulama yapılmasına rağmen, iş güvenliği önemli bir endişe olmaya devam etmektedir [31]. Bilir ve Güranlı [32] yaptıkları çalışmada yüksekten düşmeyi, en sık görülen beş kazadan biri olarak belirtmektedir. Ayrıca çalışmada yüksekten düşmenin ilk sırada yer aldığını ve ölümlerin %59,3'ünü oluşturduğunu dile getirmişlerdir.

2.2. Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıracak Dijital Teknolojilerin Önemi

Modern inşaat yönetimi her zaman gelişmiş dijital teknolojileri benimsemekte ve buna bir örnek teknoloji de YBM'dir [33]. BIM, inşaat sektöründeki en bilgilendirici teknolojilerden biri olan dijital bir bilgi yönetim sistemi olarak hizmet vermektedir [34]. YBM'nin kullanılmasıyla inşaat projelerinin bilgileri ortak veri bilgi sistemi oluşturularak birçok amaca yönelik içeriklerin oluşturulmasına katkıda bulunur [35]. Ayrıca YPM, fotogrametri, KKS, coğrafi bilgi sistemi (GBS), RFT, AG ve SG, lazer tarama ve kare kod (KK) gibi farklı veri yakalama teknolojilerinden gelen verileri entegre etme ve bir proje hakkında çeşitli kapsamlı veri ve bilgiler üretmek için özellikle şantiye güvenliğinin iyileştirilmesi potansiyeline sahiptir [36,37]. Mimarlar ve mühendisler, modelleme yazılımını kullanarak, yalnızca parametrik ve nesne yönelimli özelliklere sahip olmakla kalmayıp aynı zamanda mevcut ve olası inşaat için gerekli bilgileri de sağlarlar [38][33]. Yüksek binalar açısından bakıldığında, YBM, inşaatta dijital bina modellerini kullanma potansiyelini gösteren bir güvenlik kuralı kontrol platformu ile entegre edilmiştir [39]. Ek olarak, İHA'lar, iş güvenliği yöneticilerinin şantiyeleri ziyaret etmek için gereken süreyi en aza indirmesini ve yüksek binalardaki risklerin tanımlanmasını ve denetlenmesini güçlendirmesini sağlayabilmektedir [40]. Dijital teknolojilerin potansiyel kullanımları, yüksek binalardaki iş güvenliği uygulamalarını önemli ölçüde iyileştirebilir. Dijital teknolojilerin desteğiyle, etkili bir şekilde iş birliği yapmak için işçiler ve yönetim personeli arasında inşaat bilgileri değiş tokuş edilebilir [41].

İş güvenliği performansı ve risk faktörlerini belirlemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır [42,43][37,38]; bununla birlikte, inşaat işçileri arasındaki yüksek ölüm oranları, geleceğe yönelik politika belirleyicileri için önemli bir küresel endişe olmaya devam etmektedir [44]. İnşaat güvenliği izleme ve denetimi için belirli dijital teknolojileri entegre etmek amacıyla yeni bir vaka çalışması veya prototip yapılmıştır [45]. Bununla birlikte, çok sınırlı sayıda ampirik çalışmalar, mevcut yaklaşımların veya çalışmaların temel olarak veri alışverişi için YBM tabanlı AG ve SG uygulamalarına ve vaka çalışmaları ve prototipler yoluyla geliştirilmiştir. Ayrıca inşaat güvenliği yönetimi için iş güvenliği performansına odaklanan diğer dijital teknolojilerle BIM entegre edilmiştir [46]. Ek olarak, inşaat güvenliği için kural kontrol platformunu oluşturmak amaçlı YBM tabanlı 4 boyutlu modelleme kullanılmıştır [47]. Benzer şekilde, makine öğrenimi (MÖ) tabanlı nesne algılama tekniği, inşaat güvenliği ve gözetimi için 3B nokta bulutlardan oluşturulan model ile ve bilgisayarlı görme yoluyla bir platform sunmuştur [48]. Ayrıca, çok sayıda araştırmacı, yüksek bina inşaat güvenliği alanına büyük katkılarda bulunmuştur, ancak bu konuda bazı sınırlamalar vardır. Örneğin, Manzoor ve diğ. [43] yüksek bina projelerinde kazalara neden olan güvenlik faktörlerini belirlemiş, ancak azaltıcı çözümler önerememişlerdir. Thinakaran ve diğ. [49], yüksek bina projelerinin güvenlik performansını etkileyen güvenlik unsurlarını belirlemiş, ancak azaltıcı önlemler önermemişlerdir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, inşaat güvenliğinin iyileştirilmesi için YBM'ni geliştirmekte olan diğer dijital teknolojilerle (AG, YZ) entegre ederek yüksek bina projelerinde kazaen güvenlik faktörlerini azaltmaktır.

İş güvenliği teknolojisi, yeterli güvenlik düzenlemelerinin yürürlükte olmasını sağlamak için bina teknolojisiyle aynı hızda ilerlemelidir. Modern inşaat ortamındaki belirsizliklerle başa çıkmak ve düşme tehlikelerinin ele alınmasında etkinliği artırmak için gelişmiş teknolojik yardımlar gereklidir. Newaz ve diğ. [50] şantiyelerde yüksekten düşme riskini ele alan teknolojilerin bir incelemesini ve değerlendirmesini gerçekleştirmiştir.

2.3. Yapım İşlerinde İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak İçin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Teknolojileri Uygulamaları

İnşaat sektöründe şantiyeler, dijital teknolojilerin Nesnelere İnterneti (Nİ) sensörü, İHA, 3B tarayıcı, YZ, AG v.b) yaygınlığının hızla artması nedeniyle akıllı çalışma ortamlarına dönüşmüştür. Şantiye analitiği, görselleştirme ve derin içgörüler oluşturmak amacıyla inşaat sahası verilerinin oluşturulması, toplanması, depolanması ve analizi ile ilgilenir. Toplanan veriler YBM'de modellenerek ve planlama ve iş güvenliği gibi tüm önemli alanlarda saha performansını optimize etmek için gelişmiş YZ teknikleri kullanılarak analiz edilebilir. Winge ve diğ. [51] işçi eylemleri, risk yönetimi, acil denetim, malzeme veya ekipmanın kullanılabilirliği, yerel tehlikeler, işçi yetenekleri ve proje yönetimini içeren inşaat kazalarına neden olan en yaygın yedi faktörü belirlemiştir. Bu faktörlerin tümü, özellikle robotik, bilgisayarlı görme, gelişmiş veri analitiği ve optimizasyon teknikleri gibi yapay zekâ teknolojileri kullanılarak diğer dijital teknolojilerle entegre edildiğinde çözülme potansiyeline sahiptir. Le ve diğ. [52] sağlık ve güvenlik eğitimi için yapay zeka ile bütünlük bir mobil tabanlı sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik teknolojilerini kullanan bir çerçeve geliştirmiştir. Kolar ve diğ. [53], iki boyutlu (2B) görüntülerde güvenlik korkuluğu tespiti için transfer öğrenimi ve derin evrimsel sinir ağlarını uygulamıştır. Otomatik ve akıllı şantiye denetimi elde etmek için yerelleştirme teknikleri ve görüntü işleme gibi algılama teknolojilerini kullanmışlardır. Fang ve diğ. [54], engelleyicilerin güvenliğini

artırmak için derin öğrenme destekli bilgisayarlı görü teknolojisini kullanan otomatik bir denetim yöntemi tanıtmıştır. Bir hava harekât senaryosu anlama modeli bu hedef inşaat işçileri grubu için yüksekte düşme riskini azaltmak için geliştirilmiştir. Yüksekte düşme tehlikelerinin önlenmesini iyileştirmeye yönelik başka bir çabada, (Rey-Merchán ve diğ. [55]) Bluetooth uygulamasını değerlendirmiştir. Şantiyelerdeki Bluetooth Düşük Enerji (BDE) izleme sistemleri ve BIM, radyo frekansı tanımlama ve küresel konumlandırma sistemi gibi teknolojilerin bir kombinasyonu kullanılarak (BDE) sınırlamalarının nasıl aşılabileceği tartışılmıştır.

Alizadehsalehi ve diğ. [56] inşaat sahasında bütünleşik bir YBM/İHA modelinin iş güvenliğinin yönetimindeki etkinliğini göstermiştir. Sidani ve diğ. [57] otomatik kural denetimi ve AG/SG'yi benimseyen YBM tabanlı bir güvenlik sisteminin genel çerçevesini geliştirmiştir Harichandran ve diğ. [58], dijital ikizlerden bilgi akışı yoluyla SG eğitim oyunlarını dinamik olarak güncellemek için kavramsal bir çerçeve önermektedir. Ogunseiju [59], işçilerin duruşları ve bunlara karşılık gelen dijital temsilleri arasında iki yönlü haritalama yoluyla kas-iskelet sistemi yaralanmalarını azaltmak için dijital bir ikiz çerçeve önermiştir. Kaarlea [60] saha dışı güvenlik eğitimi için dijital ikizler ve sanal gerçeklik ortamlarını geliştirmiştir. Choi [61], derin öğrenme ve dijital ikiz nesil kullanarak güvenlik bilincine sahip insan-robot işbirliği için entegre bir karma gerçeklik sistemi geliştirmiştir. Ramos-Hurdato [62] inşaat güvenliği denetimi için artırılmış gerçeklik aracının dağıtımı için bir öneri sunmuştur. Wu ve diğ. [63] DI, Derin Öğrenme (DÖ) ve Karışık Gerçeklik (KG) teknolojilerini yeni geliştirilmiş gerçek zamanlı görsel uyarı sistemine entegre ederek inşaat işçilerinin güvenlik durumlarını proaktif olarak belirlemelerini ve kazalardan kaçınmalarını sağlamayı amaçlamıştır. Wolf ve diğ. [64] inşaat güvenliği eğitimi ve öğretiminde kişiselleştirilmiş geri bildirim için artırılmış sanallıkta tehlike tanımayı araştırmıştır. Recal ve Demirel [65] ikili ve çok sınıflı iş kazası şiddetinin tahmininde makine öğrenimi yöntemlerinin karşılaştırılmasını yapmışlardır. Kazar ve Çomu [66], iskele ve kalıp faaliyetleri için sanal bir güvenlik eğitim aracı geliştirmiştir. Teizer ver diğ. [67] DI iş akışındaki üç temel adımı tanımlayan İnşaat Güvenliği için Dijital İkiz konseptini ana hatlarıyla belirtmiştir: (1) tehlike önleme için güvenli tasarım ve planlama, (2) proaktif tahmin ve uyarı için risk izleme ve kontrol ve (3) kişiselleştirilmiş veya proje tabanlı öğrenme için sürekli performans iyileştirme.

Tablo 1.'de yapım işlerinde iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için kullanılan dijital teknolojileri uygulamalarının bir özeti görülmektedir.

Tablo 1 - Yapım işlerinde iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için kullanılan dijital teknolojilerin bir literatür özeti

No	Başlık	Teknoloji/Metod	Referans
1	Tehlike tahmini için risk yayma sistemleri	Bulanık dinamik Bayes ağı Bilişsel güvenilirlik ve hata analizi yöntemi (BGHAY) ve karmaşık ağ teorisi.	Guo ve diğ. [68]; Liu ve diğ. [69]

		Karakter tabanlı ağlar ağı İnşaat kazası neden sistemi (İKNS) modeli	Liu ve diğ. [70] Zhang ve diğ. [71]
2	YBM kullanarak yapım modellerinin ve çizelgelerin otomatik güvenlik kuralı kontrolü	YBM	Abed ve diğ. [19]; da Rocha Leao ve diğ. [72] Kim ve diğ. [73]
3	Yapım Güvenliği risk faktörlerinin YBM'de entegrasyonu	YBM	Darko ve diğ. [74]
4	Konum ve duruş verisi füzyonunun kullanılması için proaktif işçi güvenlik riski değerlendirmesi	Veri füzyonu	Chen ve diğ. [75]
5	Değiştirilmiş Öğretme-Öğrenme-Tabanlı-Optimizasyon (ÖÖTO) algoritmasına dayalı risk tahmini ve kontrol sistemi	YZ	Liu ve diğ. [76]
6	İnsansız Hava Araçlarının (İHA) kullanılması, Otomatik Düşme Tehlikesi İzleme	İHA	Alizadehsalehi ve diğ. [56]
7	İnşaat işçilerinin tepkileri İzlemek için fizyolojik sensörlerin kullanılması	Sensör	Subedi ve diğ. [77]
8	Gelişmiş güvenlik alarmı ve izleme için görüntü işleme	Görüntü işleme	Wang [78]
9	Konum verilerine dayalı olarak işçilerin güvenliğini analiz etmek için sensör tabanlı izleme sistemi	Sensör	Park ve diğ. [79]
10	Giyilebilir teknoloji kullanan gerçek zamanlı düşmeye karşı koruma sistemleri	Giyilebilir teknoloji	Hayat ve Shan [80]
11	Düşmeye karşı koruma tasarımına yardımcı olmak için YBM tabanlı sanal simülasyon ve modelleme	YBM	Tekbas ve Guven [81]; Lu ve diğ. [82]
12	Düşmelerin önlenmesi için bir bilgi sisteminin ontoloji modeli	Ontoloji Modeli	Park ve Liu [83]
13	Güvenlik eğitimi için mobil tabanlı Sanal Gerçeklik (SG) ve Artırılmış Gerçeklik (AG) kullanma.	SG-AG	Shi ve diğ. [84]; Xu ve Zeng [85]
14	3B YBM Simülasyonu Kullanılarak İnşaat Şantiyesinde Güvenlik Eğitimi	YBM	Ahn ve diğ. [86]
15	İnşaat tehlikesi tanımlama eğitimi için SG tabanlı göz izleme teknolojisinin kullanılması	SG göz izleme	Chihming ve diğ. [87]
16	Düşmeyi önleme tedbirlerine ilişkin bilgisayar görüşü destekli denetim	Bilgisayar görüşü	Fang ve diğ. [88]
17	Yapay Zekâ (YZ) tekniklerini kullanarak Akıllı Kişisel Koruyucu Donanım geliştirme	YZ	Labeledz ve diğ. [89]

18	İkili ve çok sınıflı iş kazası şiddetinin tahmininde makine öğrenimi yöntemlerinin karşılaştırılması	MÖ	Recal ve Demirel [65]
19	İskele ve kalıp faaliyetleri için sanal bir güvenlik eğitim aracı	SG	Teizer ver dig. [67]
20	Bulanık kano modunu kullanarak iş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin etkinliklerine göre sınıflandırılması	YZ	Uzun ve Cebi, [90]

2.4. Literatürdeki Araştırma Eksiklikleri ve Hedefler

Görüntüye dayalı yöntemlerle ilgili olarak, yüksekte çalışma ile ilgili farklı senaryolarda iş güvenliği risklerini tanımlamak zordur. Dinamik 3B modelleme ile şantiyelerin tek başına bilgisayar görüntüleme teknikleri aracılığıyla gerçek zamanlı olarak yeniden yapılandırılması, bu aşamada hala zor bir görevdir ve bu, çalışanları mekânsal ilişkili tehlikeleri sezgisel olarak belirlemeye zorlar. Bu amaçla, bu çalışma izlenen nesnelere uzamsal konumunu YPM'in geometrik bilgilerine dayalı olarak belirleyebilen GG ve YZ'yi entegre eder. Bu entegrasyon sadece mekânsal bağlam bilgisi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda nesnelere arasındaki mekânsal ilişkiyi de elde eder. YBM modellerini girerek ve güncelleyerek, ilgili ortamda tehlikeler bulunabilir ve bu da tehlike tanımlamasının sağlamlığını artırır.

Yazarların bildiği kadarıyla, yüksekte çalışmaya ilişkin olarak saha çalışanları için ortam görüşlerinde gerçek zamanlı güvenlik bilgileri sağlamak için mekânsal bağlama duyarlı bir yöntem eksikliği vardır. Sonuç olarak, son yıllarda literatürde yapılan araştırmalar incelendiğinde, inşaat sektöründe yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma ve denetimi kolaylaştıracak YBM, Dİ, GG, YZ gibi dijital teknolojilerin entegrasyonu ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada, öngörülen araştırma soruları ve ortaya konulan problemlerin çözümüne yönelik sunulan model ile literatüre ve sektöre yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma ve denetimi kolaylaştırmaya yönelik katkılar sağlanması hedeflenmektedir.

Araştırma sorusu 1: Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma ve denetimi kolaylaştıracak hangi dijital teknolojiler uygulamaları mevcuttur?

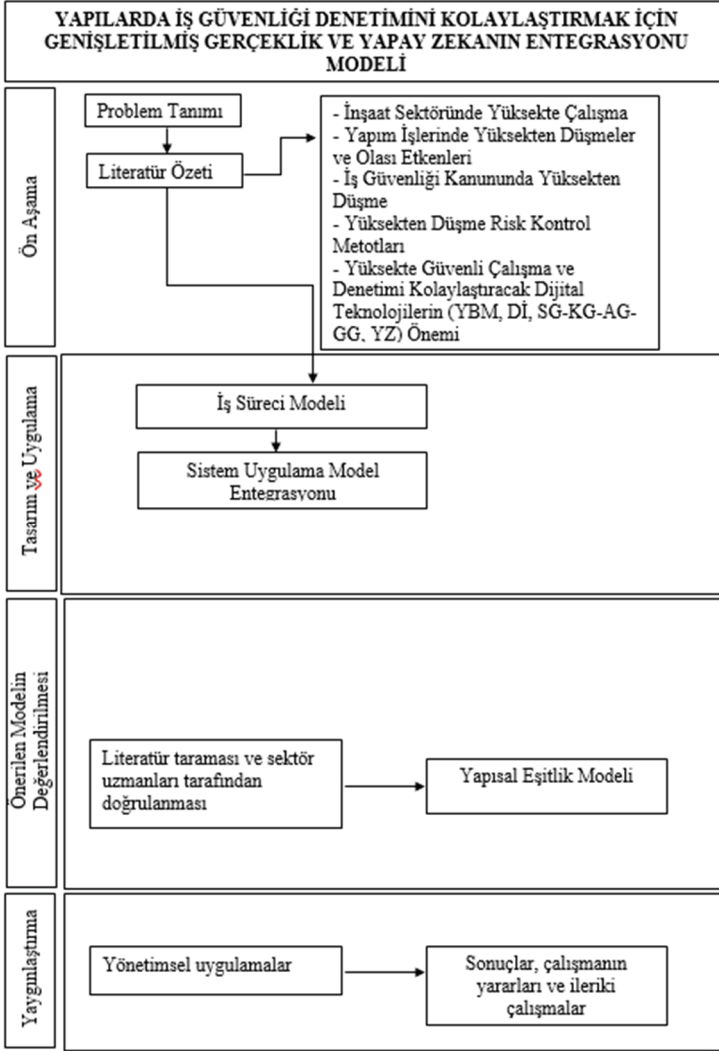
Araştırma sorusu 2: Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya ilişkin iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli nasıl geliştirilebilir?

Araştırma sorusu 3: Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya ilişkin iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için geliştirilen Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli İş Süreci Modelinin değerlendirilmesi nasıl gerçekleştirilebilir?

Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya ilişkin iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için GG ve YZ'nin entegrasyonu, sorunu çözebilir ve hem odak hem de ortam görüş kanalları aracılığıyla aynı mekânda çalışanlara ve ilgili yöneticilere görsel uyarılar sağlayabilir. Bu çalışmanın amacı, birden fazla dijital teknolojiyi entegre ederek yukarıda belirtilen araştırma boşluğunu kapatmaktır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde genel araştırma metodolojisi, iş süreci geliştirilmesi ve yapılarda iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için GG ve YZ entegrasyonu modeli geliştirilmesi konuları anlatılacaktır.



Şekil 1 - Araştırma metodolojisi

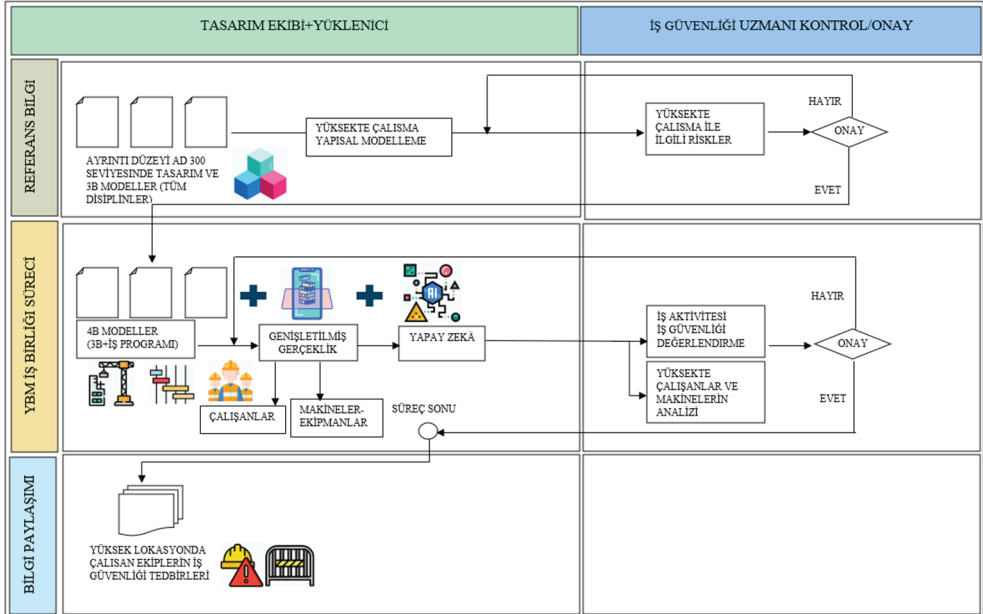
3.1. Genel Araştırma Metodolojisi

Genel araştırma metodolojisi Ön aşama, Tasarım ve uygulama, Önerilen modelin değerlendirilmesi ve son olarak da Yaygınlaştırma süreçlerini içerir. Şekil 1. Genel araştırma metodolojisi süreçlerini göstermektedir. Ön aşamada problem tanımı yapılarak literatür özeti

sunulmaktadır. Tasarım ve uygulama aşamasında iş süreci modeli ve sistem uygulama model entegrasyonu gösterilmektedir. Önerilen modelin değerlendirilmesi aşamasında literatür taramasının sektör uzmanları tarafından doğrulanması ve Yapısal Eşitlik Modelinin geliştirilmesi ele alınmaktadır. Yaygınlaştırma aşamasında yönetimsel uygulamalar, sonuçlar, çalışmanın yararları ve ileriki çalışmalar sunulmaktadır.

3.2. İş Süreci Modeli Geliştirilmesi

Yapım işlerinde yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için GG ve ZK'nın entegrasyonuna yönelik İş Süreci modeli geliştirilme süreci şu adımlardan oluşmaktadır. Literatürdeki çalışmalar ve araştırma eksikliklerinden derlenerek bir kavramsal çerçeve geliştirilmiştir. Kavramsal çerçevede planlanan iş süreçlerinin tanımlanması, iş akışlarının süreç hedefleri doğrultusunda optimizasyonu, durumsal ve mantıksal modellemenin belirlenmesi, izlenmesi ve iyileştirilmesi stratejik yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşıma göre de İş Sürecinin ana bileşenleri olan Referans Bilgileri, YBM İş Birliği Süreci ve Bilgi Paylaşımı oluşturulmuştur.



Şekil 2 - Yapım işlerinde Yüksekte Çalışma İş Güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonuna yönelik İş Süreci Modeli

İş Süreci Modeli geliştirilmesi referans bilgilerin oluşturulması ile başlar. Tasarım Ekibinin projeye ilişkin olarak AD 300 seviyesinde (Detaylı tasarım) 3B modelleri (tüm disiplinler) geliştirmeleri ve yüklenicinin de yüksekte çalışma ortamı (mekânsal özellikler ve mevcut şartlar, işçi ve ekipmanların durumu ile ilgili riskler v.b) yapısal modellemesini

gerçekleştirmesi ile bu risk bilgilerini içeren dokümanlar İş Güvenliği Uzmanının kontrolüne ve onayına sunulmaktadır. AD 300 seviyesinde (Detaylı tasarım) belirli unsurların, kesin miktar, boyut, şekil, konum ve yönelim ile tanımlandığı doğru modelleme mümkün olabilmektedir. Tüm bilgiler onaylandıktan sonra YBM İş Birliği süreci devreye girmektedir. 4B Modellerin geliştirilmesini (işçi ve makine-ekipmanların aktivitelerine ilişkin İş programları) takiben çalışanların ve makine-ekipmanların gerçek konumları ile çalışma ortamındaki etkileşimini gösteren GG modellerinin oluşturulması ve yüksekte çalışma ortamında oluşabilecek muhtemel risk faktörlerinin tahminini içeren YZ modülü entegrasyonu ile İş Güvenliği Uzmanı tarafından yüksekte çalışma iş güvenliği değerlendirilmesi yapılır. Bu değerlendirmede Yüksekte çalışma ile ilgili “Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği”, “Çalışma yapılacak zeminin eğimi”, “Çalışma yapılacak zeminin yapısı”, “Ekiplerin çalışma suresi” ve “Ortam şartları” (Bakınız Şekil 4., Tablo 2) gibi risk unsurları dikkate alınır. TyÖ’ye destek olarak 3B YBM modellerden yararlanarak, yüksekte düşme çalışmalarında muhtemel güvenlik tehlikeleri belirlenmiş olur. Bu değerlendirme uygun bulunursa yüksek lokasyonda çalışan ekiplerin ve iş güvenliği tedbirleri dokümantasyonu ilgili paydaşlarla paylaşılır. Şekil 2.’de Yapılarda Yüksekte Çalışma İş Güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonuna yönelik İş Süreci Modeli gösterilmektedir.

3.3. Yapılarda İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak İçin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli Geliştirilmesi

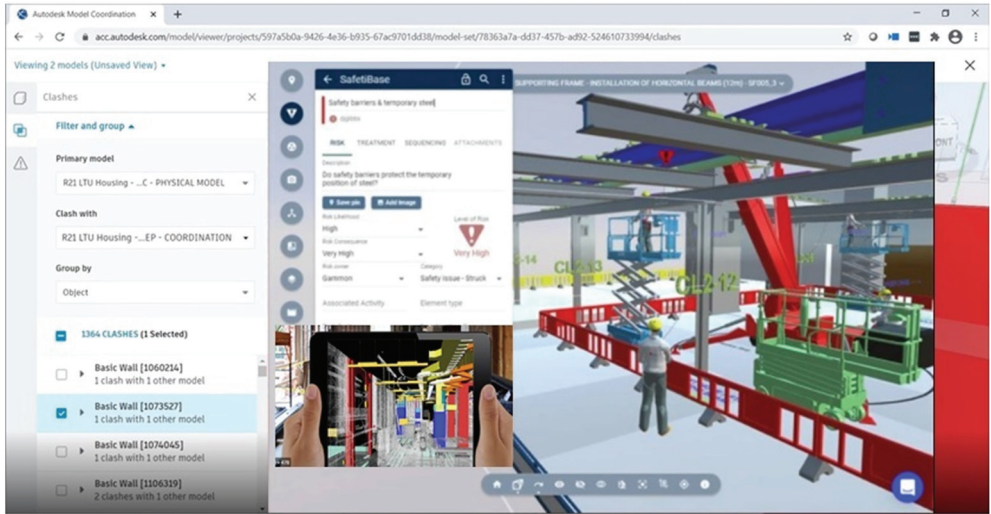
Literatürdeki çalışmalar ve araştırma eksikliklerinden derlenerek oluşturulan kavramsal çerçeve doğrultusunda geliştirilen ve yapım işlerinde yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştıran GG ve ZK'nın entegrasyonu uygulaması BIM Collaborate (YBM İş Birliği) yazılımı ortamında gerçekleştirilmiştir. YBM İş Birliği yazılımı, ortak bir platformda tüm disiplinlerin ve paydaşların bir araya gelerek iş süreçlerinin (tasarım, planlama, yapım yönetimi iş akışlarının) koordinasyonuna imkân tanımaktadır. Yüksekte çalışma iş güvenliği denetimi ile ilgili tanımlanan süreçlerin sıra ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Görsel (3B+4B) ve tabular bilgilerin kesin ve doğruluğunun sağlanması için onay mekanizması bu ortak platformda çalışmanın en önemli özelliğidir.

Geliştirilen modelin alınan önlemlerin etkinliğine ilişkin yüksekte düşme kazaları dahil olmak üzere “risk kontrol hiyerarşisi” çerçevesinde bir değerlendirme yapılarak aşağıda belirtilen sistematik bir yaklaşım benimsenmiştir:

- Tehlikenin ortadan kaldırılması (Örneğin, yüksekte elle taşıma işlerinin taşınabilir vinç mekanik araçlarla desteklenmesi, vb.)
- Riskin azaltılması (Örneğin, yüksekte çalışma sırasında işçilerin dikkatini dağıtacak unsurların minimize edilmesi vb.)
- İşçilerin tehlikeden uzak tutulması (Örneğin, yüksekte çalışma sırasında kişilerin riskli bölgelere girişine izin verilmemesi, vb.)
- Tehlikenin çembere alınması (Örneğin yüksek yerlere korkuluk yapılması vb.)
- Çalışanların maruziyetlerinin azaltılması (Örneğin bir kişinin 8 saat maruz kalması yerine 4 kişinin her birinin ikişer saat yüksekte çalışmaya maruz kalması, vb.)

- İş metodunun iyileştirilmesi (Örneğin yüksekte ölçme işlerinin dijital araçlarla yapılmasının artırılması, vb.)
- Kişisel Koruyucu Donanım Kullanımı (Örneğin baret, eldivenler, koruyucu gözlükler, koruyucu giysiler, emniyet kemeri, vb. kullanımı)

YBM' de geliştirilen 3B modeller (tüm disiplinler) ile süreç başlamaktadır. Yüksekte çalışma ortamını ve muhtemel risk tanımlama sürecini canlandırarak olan 4B modellerin geliştirilmesi ile tüm katılımcıların (tasarımcılar, planlamacılar, iş güvenliği denetim uzmanları) biraya geleceği ve bu modellerin güncel olarak paylaşılacağı bir Ortak Veri Ortamı oluşturulur. Yer ve zamandan bağımsız olarak bu modellere erişim ve muhtemel risk oluşumuna ilişkin iş güvenliği denetimini kolaylaştıracak uzaktan karar verme mümkün olabilmektedir. Ortak bir platformda ele alınan yüksekte çalışma risklerine ilişkin tüm veriler YZ modülünde islenerek kendi kendine öğrenen bir algoritma ile yüksek lokasyonda çalışan ekiplerin iş güvenliği tedbirleri oluşturulur ve karar vericilerin onayına sunulur. Şekil 3.'de Ortak Veri Ortamında İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli gösterilmektedir.

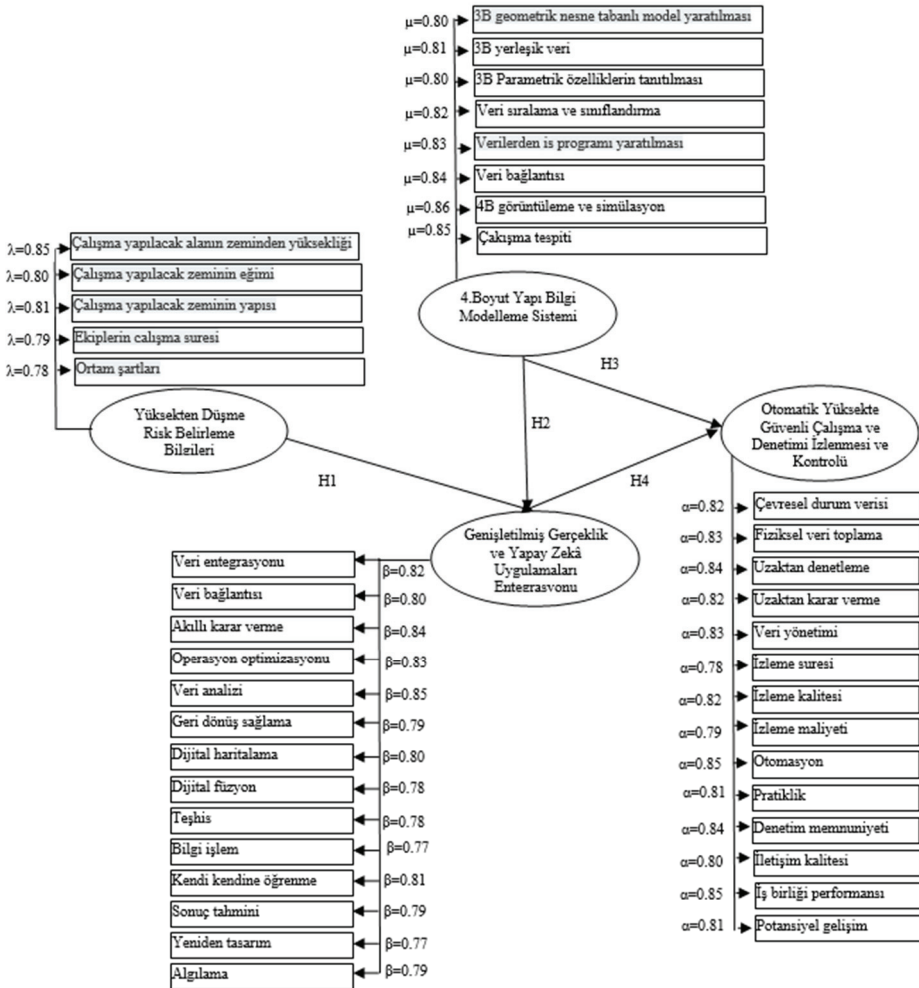


Şekil 3 - Ortak Veri Ortamında İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli

4. GELİŞTİRİLEN MODELİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Hipotezler

Kapsamlı literatür incelemesine, literatürdeki araştırma eksikliklere ve hedeflere, ve geliştirilen İş Süreci Modeli (İSM) şemasına dayalı olarak, bu çalışmadaki dört ana yön arasındaki hipotezlenirilmiş ilişkiler Yapısal Eşitlik Modeli (YEM) ile Şekil 4.'de gösterilmektedir: Yüksekten Düşme Risk Belirleme Bilgileri, 4.Boyut (İş planlaması) Yapı Bilgi Modelleme Sistemi, Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu, Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü. Geliştirilen kavramsal çerçeve (ISM) ile bağlantılı olarak oluşturulan YEM'deki değişkenler ve göstergeler sistematik olarak literatürdeki ilgili çalışmalardan (Bakınız Tablo 1.) yararlanılarak belirlenmiştir.



Şekil 4 - Hipotezlenirilmiş Yapısal Eşitlik Modeli

Aşağıdaki hipotezler, bu ilişkilerin teorik arka planı ile birlikte, yapısal ölçüleri ve diğer değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamayı amaçlamaktadır. Bu, aşağıdaki hipotezlerin geliştirilmesine yol açar:

- Hipotez 1 (H1): Yüksekten Düşme Risk Belirleme Bilgileri, Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonunun gerçekleştirilmesini ve simülasyonunu kolaylaştırır.
- Hipotez 2 (H2): 4.Boyut (İş planlaması) Yapı Bilgi Modelleme Sistemi, Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonunu geliştirir.
- Hipotez 3 (H3): 4.Boyut (İş planlaması) Yapı Bilgi Modelleme Sistemi Oluşturulması Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü performansını destekler.
- Hipotez 4 (H4): Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu simüle edilen verileri zenginleştirir ve Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü performansını güçlendirir.

4.2. Örneklem

Yukarıda açıklandığı gibi, araştırmanın doğasının bir önceki bölümde türetilen teorik modeli test etmek olduğu açıktır. Bu nedenle, pozitivist bir epistemolojik konum benimsenmiş ve daha spesifik olarak, ölçülen değişkenler arasındaki ilişkilerin derecesini belirlemeyi içeren bu araştırmanın hedeflerini karşılamak için en uygun olan nicel araştırma metodolojisi oluşturulmuştur. Daha fazla bilginin iletilmesine izin vermek ve araştırmacı ile katılımcılar arasında daha iyi bir etkileşimi desteklemek için bilgisayar destekli anket (CSAQ) yapılmıştır. Farklı coğrafi bölgelerde çalışan insanların farklı deneyimleri olduğundan, bu araştırmada farklı gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde çalışan uygulayıcıların görüşlerini toplamak amaçlanmıştır. Bu çalışmada, ABD, BAE, İsveç, Danimarka ve Kanada'da bulunan inşaat işleri, altyapı ve inşaat projeleri ile uğraşan müteahhitlik ve mühendislik danışmanlık şirketlerinde çalışan profesyonellerin görüşlerine başvurulmuştur. Anket kapsamında hedeflenen alanlar, inşaat yönetiminde en yoğun ve en aktif bölgeleri oluşturmaktadır. Örneklem sadece büyük şirketleri içermektedir. Şirketin büyüklüğünü, profesyonel personel sayısı, yıllık inşaat projelerinin sayısı ve ABD doları cinsinden proje bütçesi belirler. 100–200'den fazla çalışanı olan, yılda 10–25 proje yürüten ve değeri 5 milyon ABD dolarının üzerinde tipik bir proje inşa eden bir müteahhitlik şirketi büyük, 25-50'den fazla çalışanı olan bir mühendislik danışmanlık şirketi ise büyük olarak tanımlanır. Yılda 25–50 proje yürüten ve değeri 5 milyon ABD Doları'nın üzerinde olan tipik bir projeyi tasarlamak ve kontrol etmek büyük olarak tanımlanmaktadır.

4.3. Veri Toplama

Bu çalışmada kullanılan örnekleme yöntemi Snowball örneklemesidir. Bu örnekleme, olasılıklı olmayan örnekleme teknikleri sınıfına girer. Olasılıksız örnekleme planı, temsili bir örnekleme elde etmek için kullanılabilir ve yanıtlayıcıların tüm popülasyondan rastgele seçilmediği, daha çok araştırmaya katılmaya istekli olup olmadıklarına göre seçildiği

durumlarda uygun olduğu kabul edilmiştir. Olasılıksız örnekleme teknikleri, araştırmacıların rastgele seçim gerektirmeden daha büyük bir popülasyondan örnekler almasını içerir [91]. Ampirik veriler bir CSAQ anketi yoluyla toplanmıştır. Katılımcılara e-posta yoluyla gönderilen CSAQ anket bağlantısı, katılımcıların belirlenmiş bir web sitesine gittikleri ve anketi çevrimiçi olarak doldurdıkları bir web anketi içerir. CSAQ anketi, görüşmenin hızını yavaşlatarak yanıtlayanlara düşünmek için daha fazla zaman vererek daha doğru yanıtlar verir. En yüksek raporlama seviyeleri CSAQ anketi içindir [92]. Katılımcılarla temasların sayısı artmış, geri dönüş oranları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmakta, bu da anketin geçerliliğini artırmaktadır [93]. CSAQ anketi ABD, BAE, İsveç, Danimarka ve Kanada'daki müteahhitlik ve mühendislik danışmanlık şirketlerine uygulanacaktır. Anket uygulaması sırasında, araştırmaya katılmak için toplam 500 kişiyle iletişime geçilmiştir. Daha sonra araştırma hedefleri, araştırmanın kesinlikle bilimsel ve gizli olduğu ve anonimlerinin sağlandığı konusunda tam olarak bilgilendirilmişlerdir. Araştırmaya toplam 319 kişi katılmıştır. Bu da iletişim kurulan firmalardan %63'lik bir yanıt oranına tekabül etmektedir. Katılımcılardan, 1'den (kesinlikle katılmıyorum) 5'e (kesinlikle katılıyorum) kadar beşli Likert ölçeğine dayalı olarak her bir ifadeye katılma derecesini derecelendirmeleri istenmiştir. Anket araştırması için şirketlerdeki iletişim personeli, bu süreç ve teknolojilerle ilgili üst yönetim veya üst yönetim veya ilgili uzman kişilerdir ve bu nedenle, bu kişilerin bilgi düzeyinin geçerli yanıtlar üretmesi beklenmiştir. Katılımcılar Proje Müdürleri, Yapım Yöneticileri, İş Güvenliği Uzmanı, 4B planlamacıları ve YBM Yöneticileri olacaklar ve katılımcılar şirketlerinde bu resmi unvanlara sahiptirler. Tablo 2, dünyanın farklı bölgelerinden farklı mesleklere sahip ankete katılanların yüzdelerini göstermektedir.

Tablo 2 - Ankete katılanların bölgelere, geçmişe ve mesleklere göre dağılımı

Tecrübe (Yıl)	Ülke	Katılımcının Geçmişi ve Mesleği					Toplam
		Proje Müdürü (PM)	Yapım Yöneticisi (YM)	İş Güvenliği Uzmanı	4B Planlamacı	YBM Yöneticisi	
		19.43%	15.67%	18.80%	23.19%	22.88%	
>20 yıl	ABD	24	14	22	24	18	102
	BAE	10	12	10	8	15	55
	İsveç	12	10	9	14	14	59
	Danimarka	9	6	8	12	9	44
	Kanada	7	8	11	16	17	59
	<i>Toplam</i>	62	50	60	74	73	319

4.4. Ölçütler

Değişkenlerin ölçümü, değerlendirmenin doğruluğuna ve tutarlılığına olan güveni artıran, çoklu madde yöntemi uygulanarak oluşturulmuştur. Her madde "beşli Likert ölçeği" ile değerlendirilmiştir. Tablo 3, değişkenleri ölçmek için kullanılan tüm öğeleri göstermektedir.

Tablo 3 - Faktör analizi ve tutarlılık testi

Grup	Değişkenler	Faktör Yüklere	Cronbach α
Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri	Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği	0.81	0.79
	Çalışma yapılacak zeminin eğimi	0.79	
	Çalışma yapılacak zeminin yapısı	0.80	
	Ekiplerin çalışma süresi	0.78	
	Ortam şartları	0.77	
4.Boyut Yapı Bilgi Modelleme Sistemi	3B geometrik nesne tabanlı model yaratılması	0.79	0.80
	3B yerleşik veri	0.80	
	3B parametrik özelliklerin tanıtılması	0.79	
	Veri sıralama ve sınıflandırma	0.81	
	Verilerden is programı yaratılması	0.82	
	Veri bağlantısı	0.83	
	4B görüntüleme ve simülasyon	0.85	
	Çakışma tespiti	0.83	
Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	Veri entegrasyonu	0.82	0.81
	Veri bağlantısı	0.79	
	Akıllı karar verme	0.83	
	Operasyon optimizasyonu	0.82	
	Veri analizi	0.84	
	Geri dönüş sağlama	0.78	
	Dijital haritalama	0.79	
	Dijital füzyon	0.77	
	Teşhis	0.77	
	Bilgi işlem	0.76	
	Kendi kendine öğrenme	0.80	
	Sonuç tahmini	0.78	
	Yeniden tasarım	0.76	
Algılama	0.78		
Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	Çevresel durum verisi	0.81	0.82
	Fiziksel veri toplama	0.82	
	Uzaktan denetleme	0.84	
	Uzaktan karar verme	0.86	
	Veri yönetimi	0.82	
	İzleme süresi	0.77	
	İzleme kalitesi	0.81	
	İzleme maliyeti	0.78	
	Otomasyon	0.87	
	Pratiklik	0.85	
	Denetim memnuniyeti	0.83	
	İletişim kalitesi	0.79	
	İş birliği performansı	0.81	
	Potansiyel gelişim	0.80	

Sonuçlar, tüm faktörlerin (0,7–0,9) arasında değişen yükler olduğunu ve tüm Cronbach alfa değerlerinin (0,70'ten büyük) yeterli olduğunu göstermektedir. Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri beş farklı değişkenle ölçülmüştür: Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği, Çalışma yapılacak zeminin eğimi, Çalışma yapılacak zeminin yapısı, Ekiplerin çalışma süresi ve Ortam şartları. Ölçek yüksek geçerlilik ve güvenilirlik göstermiştir ($\alpha = 0.79$). 4B Yapı Bilgi Modellemesi (YBM), sekiz farklı değişkenle ölçülmüştür: 3B geometrik nesne tabanlı model yaratılması, 3B yerleşik veri, 3B parametrik özelliklerin tanıtılması, Veri sıralama ve sınıflandırma, Verilerden iş programı yaratılması, Veri bağlantısı, 4B görüntüleme ve simülasyon, Çakışma tespiti. Ölçek yüksek geçerlilik ve güvenilirlik göstermiştir ($\alpha = 0.80$). Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu 14 farklı değişkenle ölçülmüştür: Veri entegrasyonu, Veri bağlantısı, Akıllı karar verme, Operasyon optimizasyonu, Veri analizi, Geri dönüş sağlama, Dijital haritalama, Dijital fizyon, Teşhis, Bilgi işlem, Kendi kendine öğrenme, Sonuç tahmini, Yeniden tasarım ve Algılama. Ölçek yüksek geçerlilik ve güvenilirlik göstermiştir ($\alpha = 0.81$). Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü 14 farklı değişkenle ölçülmüştür: Çevresel durum verisi, Fiziksel veri toplama, Uzaktan denetleme, Uzaktan karar verme, Veri yönetimi, İzleme süresi, İzleme kalitesi, İzleme maliyeti, Otomasyon, Pratiklik, Denetim memnuniyeti, İletişim kalitesi, İş birliği performansı, ve Potansiyel gelişim. Ölçek yüksek geçerlilik ve güvenilirlik göstermiştir ($\alpha = 0.82$).

4.5. Analiz ve Sonuçlar

Öngörülen modeli (Sekil 3' de gösterilen) test etmek ve incelemek için Lineer Yapısal İlişkiler (LISREL) 8.8 istatistiksel yazılım paketi kullanılmıştır. İlk olarak “Tanımlayıcı istatistikler ve Pearson korelasyon katsayıları” hesaplanmış, ardından YEM analiz edilmiştir. YEM, yapısal bir teorinin bazı fenomenler üzerindeki etkisinin analizi için bir hipotez testi yaklaşımı benimseyen istatistiksel bir metodolojidir. YEM'in temel adımları, “teoriye dayalı bir modelin belirlenmesi, yapıların nasıl ölçüleceğinin belirlenmesi, veri toplanması ve genel model uyum istatistiklerini ve parametre tahminlerini içeren verilerin analizini” içerir. Bu analiz, gizli değişkenler ve gözlenen değişkenler arasında nedensel ilişkiler kurar.

Tablo 4 - Tanımlayıcı istatistikler ve Pearson Korelasyonanalizi

Değişkenler	Ortalama	SS	1	2	3	4
Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri	4.80	0.86	1.000			
4B Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Sistemi	4.81	0.87	0.643**	1.000		
Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	4.83	0.89	0.692**	0.724***	1.000	
Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	4.85	0.90	0.761***	0.778***	0.796***	1.000

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$, $n=319$

Model, gizil değişkenlerin veya varsayımsal yapıların nasıl gözlemlenen değişkenlere bağlı olduğunu veya bunlar tarafından nasıl gösterildiğini belirtir. Yapı modelinin geçerliliğini ve varsayılan nedensel ilişkilerin gerçek verilere uygunluğunu ve uyumluluğunu ölçmek için “Uygunluk İyiliği İndeksi (GFI)”, “Ayarlanmış Uyum İndeksi (AGFI)”, “Karşılaştırmalı Uyum İndeksi (CFI)”, “Normlanmış Uyum İndeksi (NFI)”, “Normsuz Uyum İndeksi (NNFI)” ve “Kök-Ortalama-Kare Yaklaşım Hatası (RMSEA)”, ve “Ki-kare”nin “Serbestlik Derecesi”ne (χ^2/df) oranı kullanılmıştır. “Uygunluk indeksleri, varsayılan modelin ampirik verilere uyup uymadığını değerlendirir, bu nedenle modelin geçerliliği ve güvenilirliğinin önemli göstergeleridir. Sekil 4. standartlaştırılmış yapısal katsayıları temsil eden bu çalışmada kullanılan varsayımsal modelin sonuçlarını göstermektedir. Değişkenlerin katsayılarının büyüklüğü, onların görelî önemini yansıtır.

4.5.1. Tanımlayıcı İstatistikler ve Korelasyon Analizi

Tablo 4, ilişkilerin anlamlılık düzeyini değerlendirmek amacıyla çalışma değişkenleri için ortalamaları ve standart sapmaları ve ayrıca faktörler arası korelasyon matrisini göstermektedir. Bu çalışmada test edilen bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri doğrulamak için Pearson korelasyon analizi kullanılmıştır. Tüm yapılar birbiriyle ilişkilidir ve “Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri”, “4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi”, “Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu” ve “Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü” üzerine odaklanır. Bir ilişkinin önemi bir “ ρ değeri” ile ifade edilebilir. “ ρ değeri < 0.05 olduğunda, iki derecelendirme grubu arasındaki ilişkinin anlamlı olduğu kabul edilir”. “Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri”, “4BYapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi”, “Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu” ve “Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü” değişkenlerini temsil eden faktörler arasında dikkate değer ve pozitif doğrusal ilişkilerin olduğu korelasyon matrisi inceleme noktalarıdır.

4.5.2. Faktör Analizi ve Güvenilirlik

Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri, 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi, Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu ve Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü değişkenlerindeki temel boyutları belirlemek için faktör analizi kullanılmıştır. Yapıların değişkenleri ampirik olarak doğrulanmış ve temel bileşen analizi yoluyla test edilmiştir. Tablo 3, sonuçların bir özetini göstermektedir. 0,5'ten büyük değerler kabul edilebilir olarak kabul edilir. “Çıkarılan faktörlerin her birinin güvenilirliği, Cronbach alfaları kullanılarak bu faktörlerin iç tutarlılık açısından kontrol edilmesiyle belirlenir”. “Cronbach's alpha (α), 0,7 değerinin minimum kabul edilebilir değer olduğu her bir faktör içindeki değişkenler arasındaki ortalama korelasyona dayanmaktadır”. Tablo 4, “Cronbach's alpha” değerlerinin incelenmesinin, yapılar için tüm α güvenilirlik katsayılarının kabul edilebilir düzeyde güvenilirliğe sahip olduğunu ortaya koyduğunu göstermektedir. “4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi”, “Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu”, “Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü” yapıları sırasıyla 0.80, 0.81, 0.82 değerleri ile en yüksek güvenilirlik katsayılarına α sahiptir. 0.87,0.86 ve 0.85 değerleri ile “Otomasyon”, “Uzaktan karar verme”, “Pratiklik” değişkenleri, ile “Uzaktan denetleme”, “Çakışma tespiti”, “Veri entegrasyonu”, “Fiziksel veri toplama” değişkenleri de 0.84, 0.83, 0.82 değerleri ile sırasıyla en yüksek faktör yüklerine sahiptir.

4.5.3. Yapısal Eşitlik Modeli

Son yıllarda, YEM, sosyal bilimlerde, doğrulayıcı faktör analizi ve yol analizini birleştirmenin desteği ile, çoklu gözlemlenen değişkenler tarafından ölçülen gizli bir yapıya izin veren, etkin bir analitik araç olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 4'te gösterilen hipotez modeli, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri göstermektedir. Model, “Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri”, “4B Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Sistemi”, “Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu” ve “Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü” arasındaki varsayımsal ilişkileri göstermektedir. Örneklem (n = 319) varsayımsal ilişkileri test etmek için kullanılmıştır. Öngörülen model, kabul edilebilir model uyumunu gösteren istatistikler kullanılarak test edilmiş ve “önemli bir Ki-kare istatistiğine” sahip olduğu gösterilmiştir ($\chi^2=167.46$, $df = 91$; $p < 0.01$).

4.5.3.1. Uyum İyiliği Testi

Model yapıları (hipotezler) ile modelin uyum iyiliği arasındaki ilişkileri test etmeye yardımcı olan yol analizlerini gerçekleştirmek için SEM teknikleri kullanılmıştır. Sonuçlar, ilgili yapılar üzerindeki tüm standartlaştırılmış yüklemelerin 0,5'ten ($p < 0.001$) büyük olduğunu göstermiştir. Modelin genel uyumu anlamlı olmuştur ($\chi^2 = 167.46$ ile $df = 91$; $p < 0.01$). Elde edilen uyum iyiliği istatistikleri, karşılaştırmalı uyum indeksi (CFI) = 0.929, GFI = 0.916, AGFI = 0.911, NFI = 0.921, NNFI = 0.920 ve ortalama karekök yaklaşıklık hatasının (RMSEA) = 0.063 olduğunu ortaya koymuştur. Farklı testlerin kullanılmasının nedeni, genel olarak, indekslerin büyük çoğunluğu iyi bir uyum gösteriyorsa, muhtemelen iyi bir uyum olduğundandır. GFI, AGFI, CFI, NFI ve NNFI'nin sonuçları 0.90 eşik değerini aşmıştır ve varsayılan model iyi bir uyum ortaya koymuştur. 3'ün altındaki serbestlik derecelerine dayalı model uyum istatistiklerinin oranı, yeterli bir model uyumunu göstermektedir ($\chi^2/df = 1.840$). Şekil 4'teki varsayımsal model bu nedenle verilere çok yakın olarak sınıflandırılabilir. Tablo 5, varsayılan model için uyum iyiliği ölçümlerinin sonuçlarını listelemektedir. Genel uyum iyiliği ölçümlerinin tümü, varsayımsal model için çok uygun uygunluk yargılarını göstermektedir.

Tablo 5 - Varsayılan model için genel uyum iyiliği ölçümleri

İstatistik	Uygunluk Kriterleri	Değerler	Uygunluk Kararı
χ^2	$p < 0.01$	167.46 ($p = 0.000 < 0.01$)	Evet
RMSEA	< 0.08 (< 0.05 is mükemmel ve < 0.08 iyi)	0.063	Evet (İyi)
GFI	> 0.90	0.916	Evet
AGFI	> 0.90	0.911	Evet
NFI	> 0.90	0.921	Evet
NNFI	> 0.90	0.920	Evet
CFI	> 0.90	0.929	Evet
χ^2 / df	< 2.00	1.840	Evet

4.5.3.2. Hipotez Testi

1'den 4'e kadar olan Hipotezleri test etmek için "LISREL 8.8" yazılımı kullanılmıştır. Varsayımsal modelde, Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri ile Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu (H1), 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi ile Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu (H2), 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi ile Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü (H3), Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu ve Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü(H4) ilişkileri tahmin edilmiştir. İlişkilere ilişkin hipotezler "ilişkili t istatistiklerine" dayalı olarak test edilmiştir. 1.65, 1.98 veya 2.576'yı aşan "t değerleri" sırasıyla 0.05 ve 0.01 seviyelerinde anlamlı kabul edilmiştir. Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri, 4B Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Sistemi ve Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu, Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü önemli ölçüde ve olumlu bir şekilde etkilenmiştir ($\rho < 0.05$) (H1 = 0,81, t değeri = 4,69, H2 = 0,82, t değeri = 4,70 değerleriyle) , H3 = 0,83, t değeri = 4,75 ve sırasıyla H4 = 0,84, t değeri = 4,78). Böylece 1'den 4'e kadar olan Hipotezler desteklenmiştir.

Tablo 6 - Yapısal eşitlik modeli için parametre tahminleri

Varsayımsal model	Parameter katsayısı	t- değeri
<i>Model ilişkileri</i>		
H1: Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri → Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	0.81**	4.69
H2: 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi →Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	0.82**	4.70
H3:4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi → Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	0.83***	4.75
H4: Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu→Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	0.84***	4.78
Fit Indices: $\chi^2=167.46$, $df= 91$, $\chi^2/df=1.840$ GFI=0.916, CFI=0.929, AGFI=0.911, NFI=0.921, NNFI=0.920, RMSEA=0.063 ** $\rho < 0.05$, and *** $\rho < 0.01$.		

Tablo 6. varsayılan modelin parametre tahminlerinin sonuçlarını listeler. Standartlaştırılmış parametre tahminleri göz önüne alındığında, sonuçlar dört hipotezli ilişkinin anlamlı ve kabul edilmiş olarak sınıflandırıldığını göstermektedir. Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu-Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü" 0,84 parametre katsayısı ile en yüksek öneme sahiptir ve Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamalarının Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolüne katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır. "4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi-Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü" 0,83 yol katsayısı ile ikinci en yüksek öneme sahiptir ve 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sisteminin

Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolünü geliştirmek için bir teşvik sağladığını ortaya koymaktadır. Tablo 7, değişkenlerin “standartlaştırılmış yapısal katsayılarını”, Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri, 4B Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Sistemi, Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu, Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü ve göreceli önemini yansıtan büyüklükleri temsil eden ilişkilerini listeler. “4B görüntüleme ve simülasyon”, “Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği”, “Çakışma tespiti”, “Otomasyon”, “Akıllı karar verme”, “Uzaktan denetleme”, ve “Denetim memnuniyeti” değişkenleri 0.86, 0.85, 0.85, 0.85, 0.84, 0.84, ve 0.84 değerleri sırasıyla en yüksek faktör yüküne sahiptir. En önemlisi, yapısal modeldeki yüksek parametre katsayı değerleri ampirik modelleme çalışmasını doğrulamaktadır.

Tablo 7 - Parametreler ve ilişkileri

Değişkenler	Göstergeler	Parametre	Standartlaştırılmış yapısal katsayı
Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri	Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği	λ	0.85
	Çalışma yapılacak zeminin eğimi	λ	0.80
	Çalışma yapılacak zeminin yapısı	λ	0.81
	Ekiplerin çalışma süresi	λ	0.79
	Ortam şartları	λ	0.78
4.Boyut Yapı Bilgi Modelleme Sistemi	3B geometrik nesne tabanlı model yaratılması	μ	0.80
	3B yerleşik veri	μ	0.81
	3B parametrik özelliklerin tanıtılması	μ	0.80
	Veri sıralama ve sınıflandırma	μ	0.82
	Verilerden is programı yaratılması	μ	0.83
	Veri bağlantısı	μ	0.84
	4B görüntüleme ve simülasyon	μ	0.86
Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	Çakışma tespiti	μ	0.85
	Veri entegrasyonu	β	0.82
	Veri bağlantısı	β	0.80
	Akıllı karar verme	β	0.78
	Operasyon optimizasyonu	β	0.83
	Veri analizi	β	0.85
	Geri dönüş sağlama	β	0.79
	Dijital haritalama	β	0.80
	Dijital füzyon	β	0.78
	Teşhis	β	0.78
	Bilgi işlem	β	0.77
	Kendi kendine öğrenme	β	0.81
	Sonuç tahmini	β	0.79
	Yeniden tasarım	β	0.77
Algılama	β	0.79	

Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	Çevresel durum verisi	α	0.82
	Fiziksel veri toplama	α	0.83
	Uzaktan denetleme	α	0.84
	Uzaktan karar verme	α	0.82
	Veri yönetimi	α	0.83
	İzleme süresi	α	0.78
	İzleme kalitesi	α	0.82
	İzleme maliyeti	α	0.79
	Otomasyon	α	0.85
	Pratiklik	α	0.81
	Denetim memnuniyeti	α	0.84
	İletişim kalitesi	α	0.80
	İş birliği performansı	α	0.85
	Potansiyel gelişim	α	0.81

Hipotez 1: Yüksekten düşme risk belirleme bilgilerinin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonunu kolaylaştırdığını öne sürer. Şekil 4'te gösterildiği gibi varsayılan modeldeki ilişkileri tanımlayan 0.81'lik katsayısı istatistiksel olarak pozitif ve önemlidir. H1, Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği, Çalışma yapılacak zeminin eğimi, Çalışma yapılacak zeminin yapısı, Ekiplerin çalışma süresi ve Ortam şartlarının Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamalarına veri teşkil ederek görselleştirme, modelleme ve kendi kendine öğrenme yoluyla riskleri tahmin etmeye yönelik olarak kullanılması ve analizi ile entegrasyon süreci önemli ölçüde iyileştirilebilir.

Hipotez 2: 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sisteminin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonunu geliştirdiğini öne sürer. Şekil 4'te gösterildiği gibi varsayılan modeldeki ilişkileri tanımlayan 0.82'lik katsayısı istatistiksel olarak pozitif ve önemlidir. Bu, denetlenecek işin planlandığı gibi üst düzey birçok boyutlu (nB) ve genişletilmiş gerçeklik modeli mevcut olduğunda, modele dahil edilen önceki verilerden otomatik ilerleme izleme için yararlanılabileceğini ve kendi kendine öğrenme yoluyla muhtemel oluşabilecek risklerin tahmin edilebildiğini önermektedir. Geliştirilen 4B modelin doğru bilgiye doğru zamanda ve kesin yerde erişim sağladığı seviye, karar verme ve bir projenin başlangıcında oluşturulmuş risk planına göre önceden tanımlanmış parametrelere uygun olarak yürütülmesini sağlaması açısından çok önemlidir. Planlandığı gibi yüksekte çalışma ortamında oluşabilecek muhtemel risk bilgilerin gösterebilmek için iletişim ve raporlama yöntemlerini kolaylaştıran tutarlı bir platform sağlamaktadır.

Hipotez 3: 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sisteminin Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolüne katkı koyduğunu varsaymaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, varsayılan modeldeki ilişkileri tanımlayan 0.83'lük katsayısı istatistiksel olarak pozitif ve önemlidir. Bu, dijital yapım işleri modelini vurgulayan ve genişletilmiş gerçeklik modeliyle entegre olan 4B YBM'de yüksekte güvenli çalışma denetimi izlenmesi ve kontrolüne, değişiklikleri senkronize etmeye ve proje ilerledikçe varlıkların değişen gerçekliği ile onları güncel tutmaya yardımcı olduğunu önermektedir. Genişletilmiş gerçeklik modelleri, YBM sistemlerine önemli bir analitik avantaj sunmaktadır. Çeşitli kaynaklardan gelen verileri

toplayarak ve bunları bir nB modeliyle birleştirerek, yapım ekibi üyeleri her bir bileşene önemli erişim bilgileri elde edebilecektir. Genişletilmiş gerçeklik yeteneklerinin yardımıyla, 4B YBM modelleri, temsil ettikleri fiziksel varlıkların otomatik olarak güncellenen temsilleri "canlı" hale getirmek üzere geliştirilmiştir. 4B YBM, genişletilmiş gerçeklik modellerinin gerektireceği bilgilerin çoğunu içeren bir nB sanal proje modeli oluşturmaktadır.

Hipotez 4: Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu simüle edilen verileri zenginleştirdiğini ve Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü performansını güçlendirdiğini varsaymaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, varsayılan modeldeki ilişkileri tanımlayan 0.84'lik katsayı istatistiksel olarak pozitif ve önemlidir. Bu, Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamalarının Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü için mükemmel bir araç oluşturmasını önermektedir. Lazer tarayıcı, dijital kamera ve/veya senyörlerden alınan gerçek zamanlı veriler dahil edilerek, gerçek çalışma koşullarına dayalı gerçek zamanlı yüksekte güvenli çalışma denetimi analizi gerçekleştirilebilir. Genişletilmiş Gerçeklik Uygulamaları, inşaat projeleri bileşenlerinin/sistemlerinin standartlaştırılmış bir semantik temsiliyi kolaylaştıran prosedürler, teknolojiler ve veri şemaları sağlarken, Yapay Zekâ, otomatikleştirilmiş inşaat projesi yüksekte güvenli çalışma denetimi için veri akışlarından yararlanarak karmaşık yönetim ve optimizasyon sürecinin daha bütünsel süreç odaklı bir karakterizasyonunu sağlar ve muhtemel risk oluşturan aktiviteler hakkında tahminde bulunur. Bu sistem, proje paydaşlarına otomatik yüksekte güvenli çalışma denetimi izlenmesi ve kontrolünü kolaylaştırarak üstün performans sağlar.

5. TARTIŞMA VE UYGULAMALAR

5.1. Teorik Katkılar

Kazaları önlemeye yönelik mevcut önlemler, toplu koruma kapsamında bile tek başına yeterli görülmemektedir. Bu bağlamda şantiyede iş sağlığı ve güvenliği risklerini azaltmanın en önemli yolunun risk değerlendirme ekipleri tarafından işyerinin kendi koşullarının değerlendirilmesi ve koruma tedbirlerinin belirlenmesinde ortak akıl oluşturulmasından geçtiğini söylemek mümkündür [94]. Emniyet kemerleri gibi geleneksel yöntemler öncelikle risk etkilerini azaltmada faydalı olsa da, yüksekten düşme olaylarının mevcut kayıtları, çağdaş dinamik bir çalışma ortamında çeşitli düşme tehlikeleriyle baş etmede geleneksel yöntemlerin yeterli olmadığını göstermektedir [95]. Modern inşaat ortamındaki belirsizliklerle başa çıkmak için, düşme sorununu ele almadaki etkinliği artırmak için gelişmiş teknolojik yardımlara ihtiyaç vardır. Yeni teknolojilerin doğru kullanımı, bu tür yöntemlerin uygulanmasını kolaylaştırabilir ve yüksekten düşme risklerinin başarılı bir şekilde tahmin edilme şansını artırabilir [96]. Son teknolojiler, şantiyelerde çalışma durumlarının değerlendirilmesine ve tahminde bulunulmasına katkıda bulunabilir. Uygulayıcıların kritik riskleri ortaya çıkmadan önce planlama aşamasında erken dahil etmelerine izin verir. Modern teknolojilerin uygulanması şantiyelerde düşme tehlikelerinin etkin yönetimine yönelik (1) sınırlı proje bütçesi dikkate alınarak donanım ve yazılım tedarikinin yüksek maliyeti, (2) inşaat personelinin yüksekten düşme tespit teknolojisinin nasıl kullanılacağı konusunda eğitmek için zaman ve bütçe ayrılması [97] ve (3) giyilebilir aygıtları kullanırken çalışanların çevikliğinin azalması [54] gibi zorluklarla ilişkilidir. Yeni

teknolojilerin uygulanmasıyla ilgili maliyetlere ve sınırlamalara rağmen, otomatik tahmin ve düşme tehlikelerinin kontrolüne proaktif bir yaklaşım getirebilmektedirler [98].

Yüksekten düşme risk tahmini, tehlikelerden kaçınmaya yönelik uygun kontrol önlemlerinin uygulanması ile zamanında önlemeyi sağlamaktadır. Bilgisayar destekli önleyici tasarım gibi gelişmiş teknolojiler, bu süreci kolaylaştırmaya ve yüksekten düşme risklerini azaltmak için gerekli değişiklikleri uygulamaya yardımcı olur. Örneğin, görselleştirme ve simülasyon teknolojileri, tasarımcıları inşaat aşamasında olası düşme tehlikelerini değerlendirme konusunda desteklemek için kapsamlı bir araç takımı sağlamaktadır [99]. Çeşitli tehlikeleri belirlemek, ilişkili riskleri değerlendirmek ve kontrolleri etkin bir şekilde takip etmek için platformlar ve yazılımlar geliştirilmiştir. Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) ve ilgili araçlardaki son gelişmeler, otomatik düşme tehlikeleri değerlendirmesine olanak tanır ve uygun önleyici tedbirlerin geliştirilmesine yardımcı olur. Algoritmalar, düşmeyle ilgili olası güvenlik risklerini belirlemek için bina modellerini ve çizelgelerini otomatik olarak analiz eder [51]. Araştırmacılar, iş güvenliği risklerini BIM'de değerlendirmek ve risk azaltma stratejileri önermek için 4B YBM'i kullanmaktadırlar. 4B YBM, riskli çalışma bölgelerinde planlanmış farklı görevlerin üstlenme risklerini görselleştirmek için proje planlama süreci boyunca yardımcı olur. İş güvenliği risklerinin gerçek zamanlı izlenmesi, yüksekten düşme kazaları riski altında olan çalışanları alarmla geçirmeye yardımcı olur. Gerçek zamanlı izleme, olası riskler ortaya çıkmadan ve çalışanları etkilemeden önce tespit etmek için gereklidir. Alizadehsalehi ve dig. [56], tehlikeli durumları tahmin etmek ve düşme önleme mekanizmalarını tetiklemek için YBM ve IHA'na dayalı hibrit bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, yüksekten düşme riskleri için uygun azaltma stratejilerini benimsemeye tasarım ve inşaat aşamaları arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir.

5.2. Yönetimsel Uygulamalar

Tablo 8.'de yönetimsel uygulamalara örnek olarak otomatik yüksekte güvenli çalışma denetimi izlenmesi ve kontrolü sürecinde genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekâ uygulamaları entegrasyonunun gerçekleştirilmesine yönelik 4.Boyut Yapı Bilgi Modelleme Sisteminin oluşturulması, ilgili gereksinimler ve beklenen yararlar gösterilmektedir. Yapımda görev alan ilgili yöneticiler ve uzmanlar, İş Güvenliği Uzmanı, 4B Planlamacı, ve YBM Yöneticisi, iş programında planlanan işlere ilişkin olarak iş güvenliği yönetimi kapsamında sahada 3B lazer tarama teknolojisi kullanılarak fiziksel veri toplama aşamasından başlayarak, 3B nokta bulutu (mimari) oluşturulması ve 3B-4B modellerinin yaratılması, sonrasında IoT şebeke ağı aracılığı ile yapılan aktivitelere ilişkin iş güvenliği bilgilerinin kolay bilgi paylaşımı gibi yararlar elde etme imkânına sahiptirler. SG/AG/GG araçları ve yazılımları kullanılarak uzaktan denetleme amaçlı 4B modeller yardımıyla yüksekte çalışma ortamının canlı görüntüye (çalışan ekiplerin) entegrasyonu sağlanır ve otomatik çalışma ortamı iş güvenliği risk tespiti gerçekleştirilmiş olur. Süreçlerin otomasyonu sağlanarak 4B-GG modeli oluşturulur ve veri entegrasyonu gerçekleştirilir. Otomatik GG modeli oluşturulması ile otomatik GG çalışma ortamı iş güvenliği risk görüntüleme sağlanmış olur. Böylelikle uzaktan karar vermeye destek olacak olan AI algoritma ile GG modeli ve YZ yazılımı kullanılarak verilerin analizi yapılır. Bunun sonucunda entegre 4B-GG modeli öğrenmesi ve iterasyonu gerçekleştirilerek muhtemel kaza erken uyarı imkânı sağlanmış olur.

Tablo 8 - Yapılarda yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonu örnek süreç, gereksinimler ve yararları

Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	4.Boyut Yapı Bilgi Modelleme Sistemi	Gereksinimler	Süreç	Yararlar
Fiziksel veri toplama	3B lazer tarama	3B Nokta Bulutu (Mimari)	Nİ ağı	3B-4B modellerinin yaratılması	İş güvenliği bilgilerinin kolay bilgi paylaşımı
Uzaktan denetleme	SG/AG/GG araçları	4B modeli	SG/AG/GG yazılımı	4B Yüksekte çalışma ortamının canlı görüntüye (çalışan ekiplerin) entegrasyonu	Otomatik çalışma ortamı iş güvenliği risk tespiti
Otomasyon	Veri Entegrasyonu	4B-GG modeli	GG uygulaması	Otomatik GG modeli oluşturma	Otomatik GG çalışma ortamı iş güvenliği risk görüntüleme
Uzaktan karar verme	Veri analizi	YZ algoritma ile GG modeli ve verileri	YZ yazılımı	Entegre 4B-GG modeli öğrenmesi ve iterasyonu	Muhtemel kaza erken uyarı imkânı

5.3. Sınırlamalar ve İleriki Araştırmalar

Bu çalışma, gelecekteki araştırmalar için başlıca fırsatlar sunan sınırlamalara sahiptir. İlk ve en büyük sınırlılık, anket için kullanılan örneklemin sınırlı sayıda olmasıdır. İkincisi, sadece yönetsel bakış açısına odaklanmak ve diğer paydaşların görüşlerini dikkate almamak da yapım işleri güvenliği doğası gereği sınırlıdır. Üçüncüsü, gerçekleştirilen ankette yapılarda yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonuna ilişkin olarak sınırlı sayıda faktör değerlendirilmiştir. Son olarak, bu araştırmanın örneklemini inşaat sektöründe teknolojik olarak gelişmiş ülkelerin (ABD, BAE, İsveç, Danimarka, Kanada) firmalarında çalışan yöneticiler oluşturmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bulguların daha geniş bağlamlarda daha fazla doğrulanması için farklı kıtalardaki ülkelerde çalışan küresel yöneticileri içermelidir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yapım işlerinde yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekânın entegrasyonu modeli önerilmektedir. Teorik çerçeveye ilişkin olarak iş süreci modeli ve sistem uygulama model entegrasyonu

gösterilmektedir. Önerilen modelin değerlendirilmesi, hipotezlerin güvenilirliğini, geçerliliğini ve katkısının test edilmesi için bir Yapısal Eşitlik Model geliştirilmiştir. Araştırma bulguları, önerilen modelde kullanılan teknolojilerin entegrasyonun iş güvenliği denetimine olan olumlu etkisini ve önemini doğrulamaktadır. Önerilen model yüksek lokasyonda çalışan ekiplerin iş güvenliği bilgilerini analitik yeteneklerle dijitalleştirir ve karar verme sürecini optimize eder. Yüksekten düşme riskleri tahmini açısından, yapılan çalışmaların çoğunluğu, yüksekten düşme risklerinin yönetimini geliştirmek için gerçek zamanlı algılama ve izleme mekanizmalarını dikkate almıştır. Yüksekten düşme önleme çalışmaları, özellikle YBM kapasitelerinden yararlanarak tasarım yoluyla otomatik önlemeyi (TyÖ) vurgulamaktadır. Ayrıca, yüksekten düşme risk azaltma konusundaki araştırmaların, inşaat işçilerinin uygun şekilde korunmasını sağlamak için bilgisayar destekli kullanımına giderek daha fazla odaklanmak durumundadır.

Bu araştırma gelecekteki yapılarda yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonu ve iş güvenliği konusunda otomatik olarak uzaktan karar vermeye destek olacak çalışmalar için bir yol haritası sağlayabilir.

Kaynaklar

- [1] Zhou, Z., Goh, Y.M. and Li, Q., Overview and analysis of safety management studies in the construction industry. *Safety Science*, 72:337–350, 2015.
- [2] Zhang, S., Teizer, J., Lee, J., Eastman, C.M., Venugopal, M. Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. *Automation in Construction*, 29:183–195, 2013.
- [3] Guo, H., Yu, Y., Skitmore, M. Visualization technology-based construction safety management: A review. *Automation in Construction*, 73:135–144, 2017.
- [4] Melzner J, Zhang S, Teizer J, Bargstädt H.J. A case study on automated safety compliance checking to assist fall protection design and planning in building information models. *Construction Management and Economics*, 31(6):661–674, 2013.
- [5] Zhang S, Sulankivi K, Kiviniemi M, Romo I, Eastman CM, Teizer J. BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning. *Safety Science*, 72:31–45, 2015.
- [6] Zhou, W., Zhao, T., Liu, W., & Tang, J. Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective. *Safety Science*, 109(June):95–108, 2018.
- [7] Snowden, D. J., & Boone, M. E. A Leader's Framework for Decision Making -Harvard Business Review. *Harvard Business Review*, pages 1–8, 2007.
- [8] Zhou Z, Irizarry J, Li Q. Applying advanced technology to improve safety management in the construction industry: a literature review. *Construction Management and Economics*, 31(6):606–622, 2013.
- [9] Kiani, A., Salman, A., Riaz, Z. (2014). Real-time environmental monitoring, visualization and notification system for construction H&S management. *Journal of Information Technology in Construction*, 19 (September 2013):72–91, 2014.

- [10] Hammad, A., Setayeshgar, S., Zhang, C., Asen, Y. Automatic generation of dynamic virtual fences as part of BIM-based prevention program for construction safety. Proceedings – Winter Simulation Conference, (December), 2012.
- [11] Park, C.S., Kim, H.J. A framework for construction safety management and visualization system. *Automation in Construction*, 33:95–103, 2013.
- [12] Nancy Leveson, N. A new accident model for engineering safer systems. *Safety Science*, 42(4):237–270, 2004.
- [13] Rasmussen, J. Risk management in a dynamic society: A modelling problem. *Safety Science*, 27(2-3):183–213, 1997.
- [14] Bureau of Labor Statistics. (2017). Survey of occupational injuries and illnesses chart data. <https://www.bls.gov/iif/soii-chart-data-2017.htm>
- [15] Kincl, L. D., Bhattacharya, A., Succop, P. A., Clark, C. S. Postural sway measurements: A potential safety monitoring technique for workers wearing personal protective equipment. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 17(4), 256–266, 2002.
- [16] Huppert, D., Grill, E., Brandt, T. Down on heights? One in three has visual height intolerance. *Journal of Neurology*, 260(2), 597–604, 2013.
- [17] Salassa, J. R., Zapala, D. A. Love and fear of heights: The pathophysiology and psychology of height imbalance. *Wilderness & Environmental Medicine*, 20(4), 378–382, 2009.
- [18] Brandt, T., Arnold, F., Bles, W., & Kapteyn, T. S. The mechanism of physiological height vertigo: I. Theoretical approach and psychophysics. *Acta Oto-Laryngologica*, 89(3–6), 513–523, 1980.
- [19] Abed, H.R., Hatem, W.A., Jasim, N.A. Adopting BIM technology in fall prevention plans. *Civil Eng. J.* 5 (10), 2270–2281, 2019.
- [20] Goh, Y.M., Guo, B.H.W., FPSWizard: A web-based CBR-RBR system for supporting the design of active fall protection systems. *Autom. Constr.* 85, 40–50, 2018.
- [21] Karakhan, A., Gambatese, J., Rajendran, S., Application of choosing by advantages decision-making system to select fall-protection measures. In: Proc. 24th Ann.Conf of the Int'l. Group for Lean Construction, Boston, MA, USA, pp. 33–42, 2016.
- [22] Jokkaw, N., Sutecharuwat, P., Weerawetwat, P., Measurement of Construction Workers' Feeling by Virtual Environment (VE) Technology for Guardrail Design in High-Rise Building Construction Projects. *Eng. J.* 21 (5), 161–177, 2017.
- [23] Abd Rahman, N., Goh, K.C., Goh, H.H., Omar, M.F., Toh, T.C., Zin, M., Asuhaimi, A., MohdJaini, Z., Yunus, R., Rahmat, S.N. Accidents preventive practice for high-rise construction. In Proceedings of the MATEC Web of Conferences, Cape Town, SouthAfrica, 1–3 February 2016; EDP Sciences: Les Ulis, France, Volume 47, pp. 1–6.2016.
- [24] Im, H.-J.; Kwon, Y.-J.; Kim, S.-G.; Kim, Y.-K.; Ju, Y.-S.; Lee, H.-P. The characteristics of fatal occupational injuries in Korea's construction industry, 1997–2004. *Saf. Sci.*, 47, 1159–1162, 2009.

- [25] Rubio-Romero, J.C.; Gámez, M.C.R.; Carrillo-Castrillo, J.A. Analysis of the safety conditions of scaffolding on construction sites. *Saf. Sci.*, 55, 160–164, 2013
- [26] Hu, K.; Rahmandad, H., Smith-Jackson, T, Winchester, W. Factors influencing the risk of falls in the construction industry: A review of the evidence. *Constr. Manag. Econ.*, 29, 397–416, 2011.
- [27] Forteza, F.J.; Carretero-Gomez, J.M.; Sese, A. Occupational risks, accidents on sites and economic performance of construction firms. *Saf. Sci.* 2017, 94, 61–76.
- [28] Feng, Y.; Zhang, S.; Wu, P. Factors influencing workplace accident costs of building projects. *Saf. Sci.*, 72, 97–104, 2015.
- [29] Zhou, Z.; Goh, Y.M.; Li, Q. Overview and analysis of safety management studies in the construction industry. *Saf. Sci.*, 72, 337–350, 2015.
- [30] Amiri, M.; Ardeshir, A.; Zarandi, M.H.F. Fuzzy probabilistic expert system for occupational hazard assessment in construction. *Saf. Sci.*, 93, 16–28, 2017.
- [31] Andersen, L.P.; Nørdam, L.; Joensson, T.; Kines, P.; Nielsen, K.J. Social identity, safety climate and self-reported accidents among construction workers. *Constr. Manag. Econ.*, 36, 22–31, 2018
- [32] Bilir, S., Gürcanlı, G.E. (2018). A method for determination of accident probability in construction industry. *Teknik Dergi*, 29(4), 8537-8561.
- [33] Mistikoglu, G.; Gerek, I.H.; Erdis, E.; Usmen, P.E.M.; Cakan, H.; Kazan, E.E. Decision tree analysis of construction fall accidents involving roofers. *Expert Syst. Appl.*, 42, 2256–2263, 2015.
- [34] Volk, R.; Stengel, J.; Schultmann, F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Autom. Constr.*, 38, 109–127. 2014.
- [35] Scheffer, M.; Mattern, H.; König, M. BIM Project Management. In *Building Information Modeling*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 235–249, 2018.
- [36] Akinlolu, M.; Haupt, T.C.; Edwards, D.J.; Simpeh, F. A bibliometric review of the status and emerging research trends in construction safety management technologies. *Int. J. Constr. Manag.*, 1–13, 2020.
- [37] Manzoor, B.; Othman, I.; Durdyev, S.; Ismail, S.; Wahab, M.H. Influence of Artificial Intelligence in Civil Engineering toward Sustainable Development-A Systematic Literature Review. *Appl. Syst. Innov.*, 4, 52, 2021.
- [38] Alizadehsalehi, S.; Yitmen, I. The impact of field data capturing technologies on automated construction project progress monitoring. *Procedia Eng.* 2016, 161, 97–103.
- [39] Melzner, J.; Teizer, J.; Zhang, S.; Bargstaedt, H.-J. Object-oriented safety planning of building construction by using Building Information Modeling. *Bauingenieur*, 88, 471–479, 2013.
- [40] Martinez, J.G.; Gheisari, M.; Alarcón, L.F. UAV integration in current construction safety planning and monitoring processes: Case study of a high-rise building construction project in Chile. *J. Manag. Eng.*, 36, 5020005, 2020.

- [41] Skibniewski, M.J. Research trends in information technology applications in construction safety engineering and management. *Front. Eng. Manag.* 2015, 1, 246–259.
- [42] Bhagwat, K.; Delhi, V.S.K. Review of construction safety performance measurement methods and practices: A science mapping approach. *Int. J. Constr. Manag.*, 1–15,2021.
- [43] Manzoor, B.; Othman, I.; Manzoor, M. Evaluating the critical safety factors causing accidents in high-rise building projects. *Ain Shams Eng. J.* 2021.
- [44] Sunindijo, R.Y.; Zou, P.X.W. Political skill for developing construction safety climate. *J. Constr. Eng. Manag.* 2012, 138, 605–612.
- [45] Xu, Q.; Chong, H.-Y.; Liao, P.-C. Collaborative information integration for construction safety monitoring. *Autom. Constr.*, 102, 120–134, 2019.
- [46] Getuli, V.; Capone, P.; Bruttini, A.; Isaac, S. BIM-based immersive Virtual Reality for construction workspace planning: A safety-oriented approach. *Autom. Constr.*, 114, 103160,2020.
- [47] Ji, Y.; Leite, F. Automated tower crane planning: Leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking. *Autom. Constr.*, 93, 78–90,2018.
- [48] Braun, A.; Tuttas, S.; Borrmann, A.; Stilla, U. Improving progress monitoring by fusing point clouds, semantic data and computer vision. *Autom. Constr.*, 116, 103210, 2020.
- [49] Thinakaran, V.; Othman, I. Factors of Safety Misconduct Affecting Safety Performance of Tall Building Construction Site. In *Proceedings of the International Conference on Civil, Offshore and Environmental Engineering, Kuching, Malaysia, 13–15 June 2021*; Springer: Singapore, pp. 620–630, 2021.
- [50] Newaz, M. T., Ershadi, M., Carothers, L., Jefferies, M., & Davis, P. A review and assessment of technologies for addressing the risk of falling from height on construction sites. *Safety science*, 147, 105618, 2022.
- [51] Winge, S., Albrechtsen, E., Mostue, B. A. Causal factors and connections in construction accidents. *Safety science*, 112, 130-141, 2019.
- [52] Le, Q.T.; Pedro, A.; Park, C.S. A Social Virtual Reality Based Construction Safety Education System for Experiential Learning. *J. Intell. Robot. Syst.*, 79, 487–506,2015.
- [53] Kolar, Z.; Chen, H.; Luo, X. Transfer learning and deep convolutional neural networks for safety guardrail detection in 2D images. *Autom. Constr.*, 89, 58–70, 2018.
- [54] Fang, Q.; Li, H.; Luo, X.; Ding, L.; Luo, H.; Li, C. Computer vision aided inspection on falling prevention measures for steeple jacks in an aerial environment. *Autom. Constr.*, 93, 148–164,2018.
- [55] Rey-Merchán, M. D. C., Gómez-de-Gabriel, J. M., Fernández-Madrigal, J. A., & López-Arquillos, A. Improving the prevention of fall from height on construction sites through the combination of technologies. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 28(1), 590-599, 2022.

- [56] Alizadehsalehi, S., Yitmen, I., Celik, T., & Ardit, D. (2020). The effectiveness of an integrated BIM/UAV model in managing safety on construction sites. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 26(4), 829-844.
- [57] Sidani, A., Martins, J. P., & Soeiro, A. BIM approaches for enhanced health and safety status in construction-protocol for a systematic review: Protocol. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 6(1), 1-8, (2022).
- [58] Harichandran, A., Johansen, K. W., Jacobsen, E. L., & Teizer, J. A conceptual framework for construction safety training using dynamic virtual reality games and digital twins. In ISARC. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Vol. 38, pp. 621-628, IAARC Publications, 2021.
- [59] Ogunseiju, O. R., Olayiwola, J., Akanmu, A. A., Nnaji, C. Digital twin-driven framework for improving self-management of ergonomic risks. *Smart and Sustainable Built Environment*, 10(3), 403-419, 2021.
- [60] Kaarlela, T., Pieskä, S., Pitkääho, T. Digital twin and virtual reality for safety training. In 2020 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom) (pp. 000115-000120). IEEE, 2020.
- [61] Choi, S. H., Park, K. B., Roh, D. H., Lee, J. Y., Mohammed, M., Ghasemi, Y., & Jeong, H. An integrated mixed reality system for safety-aware human-robot collaboration using deep learning and digital twin generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102258, 2022.
- [62] Ramos-Hurtado, J.; Muñoz-La Rivera, F.; Mora-Serrano, J.; Deraemaeker, A.; Valero, I. Proposal for the Deployment of an Augmented Reality Tool for Construction Safety Inspection. *Buildings*, 12(4), 500, 2022.
- [63] Wu, S., Hou, L., Zhang, G. K., & Chen, H. Real-time mixed reality-based visual warning for construction workforce safety. *Automation in Construction*, 139, 104252, 2022.
- [64] Wolf, M., Teizer, J., Wolf, B., Bükrü, S., & Solberg, A. Investigating hazard recognition in augmented virtuality for personalized feedback in construction safety education and training. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101469, 2022.
- [65] Recal, F., Demirel, T. Comparison of machine learning methods in predicting binary and multi-class occupational accident severity. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(6), 10981-10998, 2021.
- [66] Kazar, G., Comu, S. Developing a virtual safety training tool for scaffolding and formwork activities. *Teknik Dergi*, 33(2), 11729-11748, 2022.
- [67] Teizer, J., Johansen, K. W., & Schultz, C. The Concept of Digital Twin for Construction Safety. In *Construction Research Congress 2022*, pp. 1156-1165, 2022.
- [68] Guo, X., Ji, J., Khan, F., Ding, L., Tong, Q., A novel fuzzy dynamic Bayesian network for dynamic risk assessment and uncertainty propagation quantification in uncertainty environment. *Saf. Sci.* 141, 105285, 2021.

- [69] Liu, M., Tang, P., Liao, P.-C., Xu, L., Propagation mechanics from workplace hazards to human errors with dissipative structure theory. *Saf. Sci.* 126, 104661, 2020.
- [70] Liu, M., Xu, L., Liao, P.-C., Character-based hazard warning mechanics: A network of networks approach. *Adv. Eng. Inf.* 47, 101240, 2021.
- [71] Zhang, W., Zhu, S., Zhang, X., Zhao, T., Identification of critical causes of construction accidents in China using a model based on system thinking and case analysis. *Saf. Sci.* 121, 606–618, 2020.
- [72] Da Rocha Leao, B.B., Barkokebas Jr, B., Barkok'ebas, B., Zlatar, T., Risk management of falls from height by using the bim platform: a systematic review. *Int. J. Develop. Res.* 9 (11), 31267–31273, 2019.
- [73] Kim, Y., Jung, H., Koo, B., Kim, J., Kim, T., Nam, Y., Detection of pre-impact falls from heights using an inertial measurement unit sensor. *Sensors* 20 (18), 5388, 2020.
- [74] Darko, A., Chan, A.P., Yang, Y., Tetteh, M.O., Building information modeling (BIM)-based modular integrated construction risk management–Critical survey and future needs. *Comput. Ind.* 123, 103327, 2020.
- [75] Chen, H., Luo, X., Zheng, Z., Ke, J., A proactive workers' safety risk evaluation framework based on position and posture data fusion. *Autom. Constr.* 98, 275–288, 2019.
- [76] Liu, H., He, Y., Hu, Q., Guo, J., Luo, L. Risk management system and intelligent decision-making for prefabricated building project under deep learning modified teaching-learning-based optimization. *PLoS ONE* 15 (7), e0235980, 2020.
- [77] Subedi, S., Pradhananga, N., Ergun, H., Monitoring Physiological Reactions of Construction Workers in Virtual Environment: Feasibility Study Using Noninvasive Affective Sensors. *J. Legal Affairs Dispute Resolut. Eng. Construct.* 13 (3), 04521016, 2021.
- [78] Wang, Q., Automatic checks from 3D point cloud data for safety regulation compliance for scaffold work platforms. *Autom. Constr.* 104, 38–51, 2019.
- [79] Park, J., Cho, Y.K., Khodabandelu, A., Sensor-based safety performance assessment of individual construction workers. *Sensors* 18 (11), 3897, 2018.
- [80] Hayat, A., Shan, M. Fall Detection System for Labour Safety. In: 2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST) IEEE, pp. 1–4, 2018.
- [81] Tekbas, G., Guven, G. BIM-based automated safety review for fall prevention. In: Ofluoglu, S., Isikdag, U., Ozener, O.O. (Eds.) 1st Eurasian BIM Forum, EBF 2019. Springer, pp. 80–90, 2020.
- [82] Lu, Y., Gong, P., Tang, Y., Sun, S., Li, Q., BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. *Autom. Constr.* 124, 103553, 2021.

- [83] Park, H., Liu, R., 2020. Improving for construction safety design: Ontology model of a knowledge system for the prevention of falls. In: Construction Research Congress 2020: Safety, Workforce, and Education American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 463–471, 2020.
- [84] Shi, Y., Du, J., Ahn, C.R., Ragan, E., Impact assessment of reinforced learning methods on construction workers' fall risk behavior using virtual reality. *Autom. Constr.* 104, 197–214, 2019.
- [85] Xu, Z., Zheng, N., Incorporating virtual reality technology in safety training solution for construction site of urban cities. *Sustainability (Switzerland)* 13 (1), 1–19, 2021.
- [86] Ahn, S., Kim, T., Park, Y.J., Kim, J.M., Improving Effectiveness of Safety Training at Construction Worksite Using 3D BIM Simulation. *Adv. Civil Eng.* 2020, 2020.
- [87] Chihming, W., Zexin, J., Yuxin, L., Songqing, H. & Zhongwei, Y. Investigation on the eye-tracking technology in hazard identification of building construction engineering. In: 2nd IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics, ICACEH 2020 Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 32–35, 2020.
- [88] Fang, W., Ding, L., Luo, H., Love, P.E., Falls from heights: A computer vision-based approach for safety harness detection. *Autom. Constr.* 91, 53–61, 2018.
- [89] Łabędź, P., Skabek, K., Ozimek, P., Nytko, M., 2021. Histogram Adjustment of Images for Improving Photogrammetric Reconstruction. *Sensors* 21 (14), 4654.
- [90] Uzun, I. M., & Cebi, S. (2020). A novel approach for classification of occupational health and safety measures based on their effectiveness by using fuzzy kano model. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(1), 589-600.
- [91] Wolf, C., Joye, D., Smith, T. W., & Fu, Y.-c. *The SAGE handbook of survey methodology*: Sage, 2016.
- [92] Bowling, A. Mode of questionnaire administration can have serious effects on data quality. *Journal of public health*, 27(3), 281-291, 2005.
- [93] Stern, M. J., Bilgen, I., & Dillman, D. A. The state of survey methodology: Challenges, dilemmas, and new frontiers in the era of the tailored design. *Field Methods*, 26(3), 284-301, 2014.
- [94] Zhang, W., Zhu, S., Zhang, X., Zhao, T., 2020. Identification of critical causes of construction accidents in China using a model based on system thinking and case analysis. *Saf. Sci.* 121, 606–618.
- [95] Zuluaga, C.M., Albert, A., Winkel, M.A., Improving safety, efficiency, and productivity: evaluation of fall protection systems for bridge work using wearable technology and utility analysis. *J. Construct. Eng. Manage.* 146 (2), 04019107, 2020.
- [96] Begic, H.; Galic, M. A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings*, 11, 337, 2021.

- [97] Kitagawa, K., Taguchi, Y., Wada, C., & Toya, N. Step Length Estimation Based on Arm Accelerations for Wearable Fall Prevention Systems. *International Journal of Applied*, 13(2), 2020.
- [98] Liu, P., Xie, M., Bian, J., Li, H., Song, L., A hybrid PSO–SVM model based on safety risk prediction for the design process in metro station construction. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17 (5), 1714, 2020.
- [99] Zhou, Y., Yang, Y., Yang, J.-B., Barriers to BIM implementation strategies in China. *Eng., Construct. Arch. Manage.* 26 (3), 554–574, 2019.