

Yeni Nesil Teknolojilerin İş Sağlığı ve Güvenliğine Entegrasyonu: Sanal Gerçeklik Simülasyonlarının MACBETH Yöntemi ile Analizi

Cihat ÖZTÜRK^{1,a}, Cansu DÖNER^{2,b}, Nurullah GÜLEÇ^{1,c}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Is Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Ankara, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-4092-3825; ^bORCID: 0000-0003-2260-0851; ^cORCID: 0000-0002-1244-2186

Makale Bilgileri

Geliş : 16.08.2025

Kabul : 30.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1767024

Sorumlu Yazar

Cihat ÖZTÜRK

cozturk@aybu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Sanal gerçeklik

Yeni nesil teknolojiler

İş sağlığı ve güvenliği

Küresel salgın

MACBETH yöntemi

Atf şekli: ÖZTÜRK, C., DÖNER, C., GÜLEÇ, N., (2026). Yeni Nesil Teknolojilerin İş Sağlığı ve Güvenliğine Entegrasyonu: Sanal Gerçeklik Simülasyonlarının MACBETH Yöntemi ile Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 371-387.

ÖZ

Dijital dönüşüm süreci ve pandemi sonrası koşullar, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) eğitimlerinde sanal gerçeklik (VR) tabanlı simülasyonları kritik bir yenilikçi alternatif haline getirmiştir. Bu çalışmada, VR tabanlı üç farklı İSG eğitim sistemi; teknik, ekonomik ve işlevsel boyutları kapsayan kriterler ışığında çok kriterli karar verme yöntemlerinden MACBETH kullanılarak analiz edilmiştir. Kapsamlı literatür taraması ve uzman görüşleriyle şekillenen değerlendirme süreci, performans ve işlevsellik odaklı kriterlerin seçimde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Maliyet dezavantajına karşın eğitim etkinliği, gerçeklik hissi ve kullanıcı etkileşimi açısından en güçlü olan immersif sistem en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır. Duyarlılık analizleri, kriter ağırlıklarındaki değişimlere rağmen alternatif sıralamasının değişmediğini ve modelin kararlı bir yapı sunduğunu kanıtlamıştır. Çalışma, İSG simülasyonlarının değerlendirilmesine yönelik sistematik bir metodoloji sunarak karar vericiler için yapılandırılmış bir seçim çerçevesi oluşturmaktadır.

Integration of Next-Generation Technologies into Occupational Health and Safety: Evaluation of Virtual Reality Simulations through the MACBETH Method

Article Info

Received : 16.08.2025

Accepted : 30.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1767024

Corresponding Author

Cihat ÖZTÜRK

cozturk@aybu.edu.tr

Keywords

Virtual reality

Next generation technologies

Occupational health and safety

Global epidemic

MACBETH method

How to cite: ÖZTÜRK, C., DÖNER, C., GÜLEÇ, N., (2026). Integration of Next-Generation Technologies into Occupational Health and Safety: Evaluation of Virtual Reality Simulations through the MACBETH Method. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 371-387.

ABSTRACT

The digital transformation process and post-pandemic conditions have established virtual reality (VR)-based simulations as a critical and innovative alternative in occupational health and safety (OHS) training. In this study, three different VR-based OHS training systems were analysed using MACBETH based on technical, economic, and functional criteria. The evaluation process, shaped by comprehensive literature reviews and expert opinions, revealed that performance and functionality-oriented criteria play a decisive role in the selection. According to the analysis results, the immersive system with the strongest training effectiveness, sense of realism, and user interaction emerged as the most suitable option despite its cost disadvantage. Sensitivity analyses demonstrated that the alternative ranking remained consistent despite changes in criteria weights, proving the model's stability. This study provides a systematic methodology for evaluating OHS simulations and offers a structured selection framework for decision-makers.

1. GİRİŞ

Tarihsel süreçte insanlık yüzyıllar boyunca bazen bir doğal afet, bazen bir savaş, bazen ise bir bulaşıcı salgın hastalık olarak kendini gösteren birçok zorluklarla karşı karşıya kalmıştır. 2019 yılının sonlarına doğru ilk kez Çin'in Wuhan şehrinde ortaya çıkan yeni tip koronavirüsün neden olduğu salgın hastalığa "2019 koronavirüs hastalığı (COVID-19)" adı verilmiştir. COVID-19 sağlık, eğitim, ekonomi ve sosyal hayat gibi alanları etkilemesinin yanı sıra çalışma dünyasının iç yapısını da derinden etkilemiştir. Ayrıca iş ve eğitim başta olmak üzere birçok yaşam alanında dijital dönüşümün hızlanmasına neden olmuştur [1]. Özellikle yöneticilerin iş dünyasının her alanında sürdürülebilirliğin devam etmesi için geleneksel stratejik düşüncelerinden vazgeçmelerine ve olası gelecek krizlere karşı da hazır oluşuklarını güçlendirmeye sevk etmiştir. Diğer bir taraftan bu süreçte çalışan sağlığını ve güvenliğini sağlamakla yükümlü olan işverenlerin, iş ortamında hastalığın yayılmasını sınırlandırmak için koruyucu ve önleyici tedbirler alması zorunlu hale gelmişti. Bu kapsamda birçok iş yeri çalışmalarına ara verirken bir kısım ise uzaktan/evden çalışma yöntemiyle ya da koruyucu tedbirlerle işine devam etmiştir [2].

Yaşanmakta olan COVID-19 salgını temel İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) uygulamalarını da etkilemiş ve dönüşüme zorlamıştır. Bu çerçevede İSG eğitimlerinin uzaktan erişim yoluyla verilmesi veya uzaktan eğitim yöntemlerinin uygulanamayacağı eğitimlerin de sosyal mesafe ve hijyen kuralları göz önünde bulundurularak minimum riskle yapılmasını mecburiyeti ortaya çıkarmıştır. Bu salgın süreci, iş dünyasının, çalışanların iş sağlığı ve güvenliğinin sağlıklı ve etkin şekilde gerçekleşmesi için yeni nesil teknolojilere yönelerek İSG alanında da dijital dönüşüme ayak uydurmaları gerekliliğini oluşturmuş.

Endüstri 4.0 olarak ifade edilen dördüncü sanayi devrimiyle beraber teknoloji ve bilişim sistemleri hızla gelişmekte ve insan yaşamını kolaylaştıran birçok yenilik ortaya çıkmaktadır. Yapay zekâ, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri, drone teknolojisi, otonom robotlar ve 5G gibi yeni nesil teknolojiler hayatımızın her alanına dâhil olmaktadır [3]. Bu teknolojiler ve iş yaşamına entegrasyonları sürdürülebilirlik açısından da büyük öneme sahiptir [4]. Endüstri 4.0 devrimi ile birlikte bu yüzyılda tüm toplumlarda dijital dönüşüm günlük yaşamın vazgeçilmezi olmuş ve yeni nesil işlevsel cihazlar kullanılarak yaşam kalitesini iyileştirme arayışları hızlanmıştır. Bugün özellikle yaşanan COVID-19 salgını ile birlikte değişime açık olan kurumlar İSG sistemlerinde de yeni nesil teknolojilere yönelmiştir. Birçok işletmede İSG sistemlerinin modernizasyonu sağlanmış, COVID-19 sonrası daha sağlıklı ve sürdürülebilir bir iş dünyası oluşturmak için önemli adımlar atılmıştır. Özellikle yeni nesil teknolojilerin İSG alanına entegre edilmesi sağlıklı ve güvenli bir ortam ile zaman ve maliyet tasarrufu sağlayarak iş kazası ve meslek hastalıkları riskini en aza indirmeyi hedeflemektedir [5]. Bu teknolojileri temel olarak oluşturulan İSG çözümleri daha etkin bir önleme sistemi oluştururken aynı zamanda iş ortamında etkili bir İSG kültürünün gelişmesine de katkı sağlamaktadır.

Bu bağlamda çalışmada, tarihsel süreçte insanlığı etkileyen biyolojik afetlere kısaca değinilmiş ve özellikle COVID-19 salgınının yaşam ve çalışma hayatı üzerindeki dönüştürücü etkisi ele alınmıştır. Salgınla birlikte hız kazanan dijitalleşme sürecinin, yalnızca üretim ve yönetim sistemlerini değil, aynı zamanda İSG uygulamalarını da yeniden şekillendirdiği görülmektedir. Bu dönüşüm çerçevesinde yeni nesil teknolojilerin İSG alanındaki rolü değerlendirilmiş; özellikle risk yönetimi, eğitim süreçleri ve önleyici uygulamalar bakımından sundukları potansiyel analiz edilmiştir. Bu kuramsal ve kavramsal çerçevede doğrultusunda çalışmanın uygulama aşamasında, VR tabanlı İSG simülasyonlarının sistematik biçimde değerlendirilmesi hedefiyle araştırmanın amacı, önemi, modeli ve sınırları ortaya konmuş; alternatiflerin karşılaştırılmasında Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden MACBETH yaklaşımı kullanılmıştır. Son bölümde ise elde edilen bulgular değerlendirilerek hem literatürel hem de yönetsel düzeyde çıkarımlar tartışılmıştır.

Özetle bu çalışmada, COVID-19 salgını ile birlikte hız kazanan dijital dönüşüm sürecinin İSG uygulamalarına yansımaları ele alınmış ve işletmelerde kullanılmaya başlanan yeni nesil teknolojik çözümler arasından sanal gerçeklik (VR) tabanlı simülasyonlar incelenmiştir. VR teknolojisi, çalışanlara tehlikesiz bir ortamda gerçekçi senaryoları deneyimleme imkânı sunması, risk algısını güçlendirmesi ve öğrenme kalıcılığını artırma potansiyeli nedeniyle İSG eğitimlerinde öne çıkan bir araç haline gelmiştir. Ancak farklı teknik ve işlevsel özelliklere sahip VR tabanlı sistemlerin hangi kriterler çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiği ve hangi alternatifin daha uygun olduğu konusu literatürde sınırlı ve sistematik olmayan bir biçimde ele alınmaktadır.

Bu doğrultuda çalışmada, kapsamlı literatür taraması ve alan uzmanlarının görüşleri birlikte değerlendirilerek VR tabanlı İSG simülasyonlarının seçiminde etkili olan temel kriterler belirlenmiştir. Belirlenen kriterler çerçevesinde alternatiflerin karşılaştırılması amacıyla ÇKKV yöntemlerinden MACBETH yaklaşımı uygulanmış ve en uygun simülasyon alternatifi sistematik bir karar modeli ile ortaya konmuştur. Böylece çalışma, VR tabanlı İSG eğitimlerinin yalnızca teknolojik bir yenilik olarak değil, çok boyutlu ve ölçülebilir bir karar problemi olarak ele alınmasına katkı sağlamaktadır. Tüm bu yönleriyle çalışma, dijitalleşme sürecinde İSG alanında teknoloji seçimine ilişkin karar vericilere yapılandırılmış bir değerlendirme çerçevesi sunmakta; aynı zamanda VR tabanlı eğitim sistemlerinin etkinliğinin analitik bir yaklaşımla incelenmesine literatüre katkı sağlamaktadır.

1.1. Sanal Gerçeklik ve İSG

Sanal gerçeklik, bilgisayar teknolojileri yardımıyla ortaya çıkan 360° sanal ortamlar sayesinde gerçek dünya algısını oluşturan bir teknolojidir [6]. Bu teknoloji gerçek yaşamda zor veya imkânsız olabilecek durumlarda çevresel ve vücut temelli ipuçlarının oluşturulmasına ve kontrolüne izin vermektedir [7]. Özel olarak tasarlanmış ürünler ile kullanıcılar simüle edilmiş ortamda ortaya çıkan görüntülerle etkileşim içerisine girmektedir.

Sanal gerçeklik teknolojisi, herhangi bir tehlike olmadan sanal güvenli ortamda aksiyonun bir parçası olma imkânı sunarken yazılımları, donanımları ve entegrasyon teknolojileri kullanarak insanlar ile sanal dünya arasında gerçek zamanlı bir iletişim kurduktan sonra insanların özelliklerine göre tepki verebilmektedir [8]. Benzersiz özellikleri ve esnekliği ile ortamların oluşturulmasına ve deneyimlenmesine olanak tanıyan bu teknoloji birçok alanda kullanım için olağanüstü bir potansiyele sahiptir. Özellikle bilgi teknolojisi, yapısal tasarım, askeri endüstri, biyomedikal, maden güvenliği ve eğitim yardımcıları teknolojisi sektörü gibi çeşitli endüstriyel sektörler bu teknolojiye yatırım yapmaktadır [9].

Sanal gerçekliğin kullanım alanlarından bir diğeri ise çalışan sağlığını ve güvenliğini korumaya yönelik oluşturulan çözümlerdir. İş ortamında tehlikeli hallerde tahliye durumları, güvenlik eğitimleri, teknolojik entegrasyonlu kişisel koruyucu donanımlar, ortam risk tespiti gibi alanlarda kullanılmaktadır. Sanal gerçeklik tabanlı güvenlik eğitimleri genellikle sıralı operasyonları, standart çalışma prosedürlerini ve kısa sürede emniyet riski değerlendirmesini öğretmeye odaklanmaktadır [10].

COVID-19 salgını sırasında ise sanal gerçeklik sanal öğrenme ve tıbbi kullanımların yanında iş dünyasında da kullanılmıştır. İnsanların evden çalışmayı kolaylaştırmak için VR araçları tasarlanmıştır [11]. İSG alanında kullanılan sanal gerçeklik teknolojisi ile ortaya çıkan simülasyonlar, çalışanlara olası bir iş kazası sonucu yaşayabilecekleri durumları daha önceden deneyimleme fırsatı sunmaktadır [12]. COVID-19 salgını ile birlikte İSG 4.0 dönemini başlatan işletmeler tarafından, İSG eğitimlerinin güvenilir ve sağlıklı bir ortamda gerçek dünyayı sanal olarak inşa eden bu simülasyonlar ile verilmesi dikkat çekmeye başlamıştır. Sanal gerçeklik tabanlı İSG uygulamaları çalışanların, zihinlerinde hissederek olası tehlikelerin sonuçlarını deneyimlemelerinin yanı sıra her türlü tehlikeden uzak ve hijyenik bir ortamda öğrendikleri bilgilerin daha kalıcı olmasını sağlayarak iş sağlığı ve güvenliği bilinçlerinin tam anlamıyla oluşmasına katkı sağlamaktadır.

1.2. Sanal Gerçekliğin İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerindeki Etkinliği

Çalışmanın bu bölümünde, 2000–2026 döneminde VR ve ilişkili sürükleyici teknolojilerin (AR/MR, 360° panorama, simülatörler) İSG eğitimlerindeki etkisini; öğrenme kalıcılığı, davranış değişikliği/transfer ve kaza oranları boyutlarında literatür göz önünde bulundurularak özetlemektedir. Literatür, özellikle 2013 sonrası ve HMD (Head-Mounted Display) yaygınlaşmasıyla 2018'den itibaren hızlanan deneysel çalışmalarla şekillenmiştir. Sistematik derleme ve meta-analiz bulguları, VR'ın bilgi kazanımı (Hedges $g \approx 0.64$; $p < 0.001$) ve daha belirgin biçimde bilgi kalıcılığı (Hedges $g \approx 0.838$; $p < 0.001$) açısından geleneksel yöntemlere kıyasla avantaj sağladığını göstermektedir; ancak yüksek heterojenlik ($I^2 \sim \%86-90$) sonuçların bağlama duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır [13]. Saha deneylerinde de benzer şekilde, hemen-sonra ölçümlerde fark sınırlı iken, birkaç hafta sonraki kalıcılık testlerinde VR lehine anlamlı sonuçlar raporlanmıştır ($\eta^2 \sim 0.12$) [14].

Davranış değişikliği ve transfer açısından kanıtlar daha karmaşıktır. Bazı randomize kontrollü çalışmalar VR'ın güvenlik motivasyonu ve öz-yeterlik üzerinde olumlu etkiler ürettiğini ve kısa dönemli öz-bildirim

performans göstergelerini iyileştirdiğini belirtirken [15], bazı uygulamalarda bilişsel kazanımların benzer olduğu ancak davranış ve güvenlik iklimi üzerinde anlamlı fark oluşmadığı görülmüştür [16]. Kaza/yaralanma oranlarını doğrudan düşürdüğüne ilişkin yüksek kalitede uzun dönemli kanıt ise sınırlıdır; çoğu çalışma bilgi testleri ve simülasyon performansına dayanmakta, gerçek olay oranlarını izleyen çalışmalar nadir kalmaktadır. Kurumsal vaka raporları potansiyel faydaya işaret etse de metodolojik açıdan nedensellik kanıtı üretmemektedir.

Sektörler arası nicel sentezler, VR'ın güvenlik eğitiminde ortalama olarak geleneksel yöntemlerden daha iyi performans gösterebildiğini; özellikle bilgi kalıcılığı boyutunda etkinin büyüdüğünü ortaya koymaktadır. Meta-analiz bulgularında bilgi kazanımı için Hedges $g=0.640$ ($p<0.001$) ve bilgi kalıcılığı için Hedges $g=0.838$ ($p<0.001$) raporlanmıştır; ancak her iki analizde de yüksek heterojenlik ($I^2 \approx \%85.6$ ve $\%89.5$) saptanmıştır. Bu durum, VR'ın etkisinin bağlam ve tasarım özelliklerine duyarlı olduğunu ve "VR her zaman daha etkilidir" şeklinde genelleme yapılamayacağını göstermektedir [13]. Ayrıca literatürde kalıcılık ölçümlerinin sınırlı sayıda çalışma tarafından ele alınması ve çoğunlukla 2-4 haftalık takiplerle sınırlı kalması, uzun vadeli davranış dönüşümünü değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır. İnşaat kazası güvenliği örneğinde de hemen-sonra ölçümlerde fark görülmezken, 4 hafta sonraki kalıcılık testinde VR lehine anlamlı sonuçlar ($p \approx 0.034$ ve $p \approx 0.029$; $\eta^2 \approx 0.118-0.126$) bildirilmiştir; bu da VR'ın özellikle hatırlama süreçlerinde avantaj sağlayabileceğini düşündürmektedir [14].

Bununla birlikte, VR'ın her koşulda üstün öğrenme çıktıları üretmediğine dair bulgular da mevcuttur. İmmersif VR ile yüksek kaliteli sunum temelli eğitimlerin karşılaştırıldığı çalışmalarda, bazı algısal farklılıklara rağmen öğrenme çıktılarında tutarlı bir üstünlük saptanmamış ve maliyet/karmaşıklık açısından VR'ın her durumda gerekçelendirilemeyeceği belirtilmiştir. Bu tür sonuçlar, karşılaştırma yapılan "geleneksel" yöntemin niteliğinin belirleyici olduğunu göstermektedir [17]. Ayrıca VR türleri arasında da farklılıklar vardır: 360° panoramalar daha gerçekçi algılansa da model tabanlı VR ortamlarında tehlike tanıma performansının daha yüksek olabildiği raporlanmıştır. Bu bulgular, İSG eğitiminde etkinliğin yalnızca gerçekçilik düzeyine değil; etkileşim, geri bildirim ve pedagojik tasarım unsurlarına da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır [18].

Davranış değişikliği, İSG eğitimlerinin nihai amacı olmakla birlikte ölçülmesi en zor çıktılarından biridir. Literatürde çalışmaların büyük kısmı kısa süreli bilgi testlerine ve öz-bildirim ölçeklerine dayanmakta; gerçek iş davranışı gözlemleri, güvenlik iklimi ve organizasyonel performans göstergeleri daha sınırlı raporlanmaktadır. Sistematik derlemeler de değerlendirme yaklaşımlarının oldukça heterojen olduğunu ve ölçüm araçlarında standartlaşmanın zayıf kaldığını vurgulamaktadır [19]. Bununla birlikte, randomize kontrollü çalışmalar VR'ın davranışa yakın çıktılar üzerindeki potansiyelini göstermektedir. Finlandiya'da inşaat sektöründe yürütülen rastgele kontrollü deneyde (RCT, N=119), VR tabanlı eğitimin sınıf temelli eğitime kıyasla güvenlik motivasyonu, öz-yeterlik ve sonuç beklentileri üzerinde daha güçlü etki yarattığı ve 1 ay takipte öz-bildirime dayalı güvenlik performansında daha büyük artış sağladığı bildirilmiştir. Ancak ölçümlerin öz-bildirim temelli olması ve takip süresinin kısa olması, kalıcı davranış değişimi konusunda temkinli yorum yapılmasını gerektirmektedir [15].

Yüksek riskli alanlarda elde edilen bulgular ise daha karmaşık bir tablo sunmaktadır. Almanya'da profesyonel çatı ustalarıyla yürütülen bir çalışmada (N=74), VR-ciddi oyun yaklaşımı ile sınıf temelli problem-odaklı eğitimin bilişsel ve tutumsal çıktılarda benzer iyileşmeler sağladığı; ancak davranış ve güvenlik iklimi üzerinde anlamlı fark yaratmadığı raporlanmıştır. Aynı çalışmada kültürel/bağlamsal faktörlerin çıktıları etkileyebileceği tartışılmıştır [16]. Kazı güvenliği örneğinde ise VR eğitiminin öz-yeterlik düzeylerinde anlamlı artış sağladığı (VR: pre $M \approx 21.42 \rightarrow$ post $M \approx 30.42$; $p < 0.001$) gösterilmiş; ancak bu ara değişkenlerin gerçek iş davranışına dönüşümünün uzun dönemli takip gerektirdiği belirtilmiştir [14]. Sağlık sektöründe işyeri şiddeti senaryolarına yönelik bir VR pilot çalışması (N=13) ise sistemin kullanıcılar tarafından ilgi çekici bulunduğunu ancak kullanılabilirlik açısından geliştirme gerektirdiğini ortaya koymuş; davranış ve yararlanma sonuçlarını değerlendiren uzun dönemli araştırmalara ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır [20].

İSG açısından temel soru, VR eğitiminin gerçek kazaları azaltıp azaltmadığıdır; ancak literatürde bu soruya doğrudan yanıt veren çalışmalar sınırlıdır. Bunun başlıca nedenleri, kaza/yaralanma olaylarının düşük sıklıkta gerçekleşmesi nedeniyle büyük örneklem ve uzun takip gereksinimi ile işletmelerde veri erişimi ve raporlama standardizasyonundaki güçlüklerdir. Sistematik derlemeler, uzun dönem kalıcılık ve transfer ölçümlerinin dahi sınırlı olduğunu; "lagging indicator" niteliğindeki kaza oranlarının ise çok daha nadir

değerlendirildiğini belirtmektedir [13]. Bu boşluk nedeniyle kaza oranı düşüşüne ilişkin iddialar çoğunlukla akademik deneylerden ziyade kurumsal vaka raporlarında yer almaktadır. Örneğin National Safety Council raporunda VR eğitiminin kayıp zamanlı yaralanma ve yakın-olay sayılarında azalma ile ilişkilendirildiği ifade edilse de metodolojik ayrıntıların sınırlı olması nedensel çıkarımı güçleştirmektedir [21].

Akademik çalışmalar genellikle doğrudan kaza oranları yerine ara performans göstergelerine (tehlike tanıma, senaryo içi karar verme, öz-yeterlik/motivasyon) odaklanmaktadır. Bu göstergeler kazaların belirleyicileriyle ilişkili olsa da bunlardan kaza oranına doğrusal bir geçiş varsayımı her zaman geçerli değildir; örneğin 360° panorama ortamlarında algılanan gerçekçiliğin artmasına rağmen tehlike tanıma performansının düşebildiği bildirilmiştir [18]. Kurumsal raporlar ise uygulanabilirlik ve hesap verebilirlik açısından değerli olmakla birlikte, çoğunlukla küçük ölçekli uygulamalara dayanmaktadır. Mississippi Department of Transportation ve Construction Skills Queensland raporları, VR'ın belirli öğrenme çıktılarında en az mevcut yöntemler kadar etkili olabileceğini belirtmekte; ancak uzun dönem etki ve gerçek olay oranlarının gelecekteki araştırma gündemi olduğunu vurgulamaktadır [22]. Sonuç olarak, VR'ın kazaları azaltma potansiyeli kuramsal olarak güçlü görünse de 2000–2026 literatüründe bu iddiayı büyük ölçekli ve uzun süreli saha verileriyle doğrudan test eden çalışmalar sınırlı kalmaktadır [13].

Literatürde VR temelli İSG eğitimlerine ilişkin kanıtların başlıca sınırlılıkları; uzun dönem kalıcılık ölçümlerinin azlığı, gerçek kaza/yaralanma oranlarının nadiren izlenmesi, örneklemelerin sıklıkla öğrenci/çırak gibi işgücüne benzer ancak tam temsil gücü olmayan gruplardan oluşması, ölçümlerin öz-bildirim ağırlıklı olması ve VR tasarımları ile ölçme araçlarının standartlaşmaması nedeniyle meta-analitik heterojenliğin yüksek seyretmesi olarak özetlenmektedir [13]. Uygulama tasarımı açısından ise literatür, kalıcılığı hedefleyen tekrar ve geri bildirim temelli yapıların önemine işaret etmekte; bazı çalışmalarda VR'ın avantajının hemen-sonra değil birkaç hafta sonraki ölçümlerde belirginleştiğini göstermektedir. Ayrıca kontrol grubunun niteliği sonuçları güçlü biçimde etkilemekte; VR'ın sıradan sınıf anlatımına üstünlüğü ile iyi tasarlanmış video/sunum temelli eğitime üstünlüğü aynı düzeyde olmayabilmektedir [14]. Gerçekçilik tek başına belirleyici değildir; 360° panorama ortamları daha gerçekçi algılansa da tehlike tanıma performansının etkileşim, görev yapısı ve geri bildirim gibi pedagojik unsurlara bağlı olduğu vurgulanmaktadır [18]. Davranış ve güvenlik iklimi üzerindeki etkinin ise VR'ın örgütsel süreçlere entegre edilmesiyle (ör. saha koçluğu, ustabaşı desteği, periyodik tazeleme) daha anlamlı hale gelebileceği ve bağlamsal faktörlerin sonucu etkileyebileceği belirtilmektedir [16].

2. YÖNTEM

2.1. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, VR tabanlı İSG eğitim simülasyonlarını karşılaştırarak en uygun simülasyon alternatifinin belirlenmesidir. İnceleme için alternatif olarak sanal gerçeklik tabanlı 3 eğitim simülasyonu ele alınmıştır. Niteliksel ve niceliksel olarak birçok değerlendirme kriterinin olması bu çalışmanın ÇKKV yöntemlerinden biri ile çözülmesini zorunlu hale getirmiştir.

2.2. Araştırmanın Önemi

Araştırmanın önemi, küresel salgınla ivme kazanan dijitalleşme ile İSG alanında teknolojinin incelenmesi ve bu alanda kullanılan sanal gerçeklik simülasyonlarının değerlendirilmesidir. Özellikle bu araştırma, yeni nesil İSG teknolojilerinin ele alındığı ve incelendiği çalışma sayısının az olmasından dolayı önem kazanmaktadır. Ayrıca bu çalışma, hem gelecekte yeni nesil İSG teknolojilerini temel alan akademik çalışmalarda hem de kuruluşların İSG alanında kullanılmak üzere yapacakları sanal gerçeklik tabanlı simülasyon yatırım seçimlerinde yol gösterici niteliktedir.

2.3. Araştırmanın Modeli

2.3.1. MACBETH Yöntemi

Bu çalışmada kullanılan, ÇKKV yöntemlerinden biri olan ve ikili kıyaslamalara dayanan MACBETH (Kategorik Bazlı Değerlendirme Tekniği ile Çekiciliği Ölçme) yöntemi, 1990'lı yıllarda Bana e Costa,

Vansnick ve De Corte tarafından geliştirilmiştir [23]. Diğer ÇKKV yöntemlerinden farklı olarak değerlendirme yaparken kantitatif değerler yerine kalitatif değerleri temel olarak karşılaştırma yapmaktadır [24]. Bir diğer ÇKKV yöntemi olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi %10 tutarsızlığa izin verirken tutarsızlığına izin vermeyen ve 7 kategorili ölçek kullanan MACBETH yönteminin temel avantajı yargıların teorik ve anlamsal tutarlılık kontroline olmasındır[25]. Problemlerin etkin ve hızlı bir şekilde çözülmesini sağlayan bu yöntem literatürde stratejik şehir planlama, teknoloji seçimi, kariyer seçimi, makine seçimi, teknik performans karşılaştırılması ve yatırım politikaları değerlendirilmesi gibi birçok farklı alanda kullanılmıştır [26].

MACBETH'in temel gücü, karar vericinin nicel puan vermek yerine alternatifler arasındaki “çekicilik farkını” anlamsal (kalitatif) yargılarla ifade etmesini sağlayarak bu yargılardan kardinal değer fonksiyonları ve ağırlıklar türetmesidir; bu yönüyle yöntem, ölçümü zor/öznel kalan kriterlerin baskın olduğu teknoloji ve süreç değerlendirmelerinde pratik bir çerçeve sunar [23]. Uygulama literatürü incelendiğinde MACBETH'in, özellikle seçim/sıralama problemlerinde farklı karar bağlamlarına uyarlandığı görülmektedir: örneğin tekstil sektöründe yeşil tedarikçi seçimi probleminde MACBETH yargıları Taguchi kayıp fonksiyonlarıyla bütünleştirilerek tedarikçilerin çevresel/operasyonel performansı çok kriterli biçimde karşılaştırılmıştır [27]; yine bir tekstil işletmesinde üretilecek ürün grubu seçimi probleminde MACBETH tabanlı yapı, bulanık MARCOS ile birleştirilerek alternatiflerin uzlaşmaya dayalı sıralanması gerçekleştirilmiştir [28]. Daha yüksek belirsizlik içeren sağlık tedarik zinciri bağlamında ise MACBETH, COVID-19 döneminde maske/yüz siperi gibi kritik ürünler için tedarikçi seçimini destekleyecek şekilde “fuzzy rough” temsillerle bütünsel olarak yöntemsel sağlamlık ve duyarlılık analizleriyle raporlanmıştır [29]. Operasyonel seviyede güvenlik boyutunun doğrudan kriterleştirildiği bir başka örnekte MACBETH kullanılarak, termik santrallerde denetim/rota önceliklendirme probleminde “iş sağlığı ve güvenliği” gibi kriterleri de içeren değer ağacı üzerinden alternatif rotaların öncelik sıralaması üretilmiştir [30]. VR özelinde MACBETH ile yapılmış doğrudan bir değerlendirme çalışmasına ilgili literatürde rastlanmamıştır; ancak yukarıdaki örnekler, VR eğitimlerinin değerlendirilmesinde karşılaşılan “deneyim kalitesi, algılanan gerçekçilik, kullanım kolaylığı, öğrenme aktarımı, güvenlik davranışı” gibi yoğun kalitatif boyutların MACBETH'in semantik kıyas mantığıyla tutarlı biçimde modellenebileceğine işaret eder [23].

MACBETH yönteminin adımları şu şekilde özetlenebilir [31]:

Adım 1: Tanımlanan değerlendirme kriterleri bir değer ağacı şeklinde ifade edilir.

Adım 2: Performans düzeyleri tanımlanır. Üst referans değerleri (100) ve alt referans değerleri (0) belirlenir.

Adım 3: Alternatifler ve kriterler soldan sağa ve yukarıdan aşağı önem düzeylerine göre karşılaştırma matrisine sıralanır ve karar vericiler tarafından Çizelge 1’de verilen ölçeğe göre karşılaştırmalar yapılır.

Çizelge 1. MACBETH yöntemi semantik ölçeği

Semantik ölçek	Eşdeğer sayısal ölçek (negatif etkili ölçekler)	Eşdeğer sayısal ölçek (pozitif etkili ölçekler)
Nötr	6	0
Çok zayıf	5	1
Zayıf	4	2
Orta	3	3
Güçlü	2	4
Çok güçlü	1	5
Aşırı	0	6

Adım 4: İkili karşılaştırmalar ile elde edilen yargıların tutarlılığı kontrol edilir.

Adım 5: Alternatiflerin her bir kritere göre performansları belirlenir.

Adım 6: Kriterler soldan sağa ve yukarıdan aşağı önem düzeylerine göre sıralanır.

Adım 7: Elde edilen yargıların tutarlılığı kontrol edilir.

Adım 8: MACBETH tablosundan alternatifler sıralanır.

2.3.1.1. Çekicilik Değerlerinin Elde Edilmesi İçin Kalitatif Performans Seviyelerinin Değerlendirilmesi

Performans seviyelerini ölçmek için, Çizelge 2' de gösterildiği gibi bir matris düzenlenir [32]. Burada a kriterinin A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 performans seviyeleri olsun. A_1 , 'iyi' seviyeyi A_5 , 'nötr' seviyeyi gösterirken önem derecelerinin azalan sıraya göre A_1, A_4, A_2, A_3, A_5 olduğunu varsayalım. Performans seviyeleri ile MACBETH skorlarına çevrilir ve $v(A_1) = 100$ ve $v(A_5) = 0$ değerlerini alır. Önem sıralaması ise $v(A_1) > v(A_4) > v(A_2) > v(A_3) > v(A_5)$ şeklinde gösterilmektedir. Daha sonra bir seviyenin diğerine göre performans gücü karar verici tarafından matrise girilir. (0: sıfır, 1: çok zayıf, 2: zayıf, 3: orta, 4: güçlü, 5: çok güçlü ve 6: aşırı ve performans gücü sağlamazsa=pozitif)

Karar verici A_1 , 'in performansını A_2 , 'ye tercih eder ise tercih seviyesi

$$A_1 > hA_2, \quad h \in \{0,1,2, \dots, 6\} \quad (1)$$

$$v(A_1) - v(A_2) = h\alpha \quad (2)$$

(α : $v(A_1)$ ve $v(A_2) \in [0,100]$ değerini sağlayan katsayıdır.

Çizelge 2. MACBETH semantik ölçeği ile karşılaştırılması

Performans seviyesi	A_1	A_4	A_2	A_3	A_5
A_1	-	zayıf	pozitif	pozitif	pozitif
A_4		-	zayıf	pozitif	pozitif
A_2			-	orta	pozitif
A_3				-	çok zayıf
A_5 (nötr)					-

$$v(A_1) - v(A_4) = 2\alpha$$

$$v(A_4) - v(A_3) = 2\alpha$$

$$v(A_3) - v(A_2) = 3\alpha$$

$$v(A_2) - v(A_5) = \alpha$$

Eşitlik sistemi üzerindeki işlemler sonucunda $\alpha = \frac{100}{8}$ ve $v(A_4) = 75$, $v(A_3) = 50$, $v(A_2) = 12.5$ olarak bulunur.

2.3.1.2. Çekicilik Değerlerinin Elde Edilmesi İçin Kantitatif Performans Seviyelerinin Değerlendirilmesi

x_{ij} , j 'inci kriter için i 'inci alternatifin performans ölçümü ve $v(x_{ij})$ ise x_{ij} için dönüştürülmüş sayısal MACBETH ölçütüdür. j kriteri için, x_j^+ üst referans seviyesini gösterirken, x_j^0 alt referans seviyesini göstermektedir. $v(x_j^+) = 100$ ve $v(x_j^0) = 0$ şeklindedir.

Herhangi bir ara performans ölçüsü x_{ij} için ise MACBETH puanı Eşitlik 3 ile elde edilir.

$$(x_{ij}) = v(x_j^0) + \frac{(x_{ij} - x_j^0)}{(x_j^+ - x_j^0)} [v(x_j^+) - v(x_j^0)] \quad (3)$$

Bir alternatifin genel puanını bulmak için Eşitlik 4 ve 5 kullanılır [33,34].

$$V(x_i) = \sum_{j=1}^n w_j (v_j) \quad (4)$$

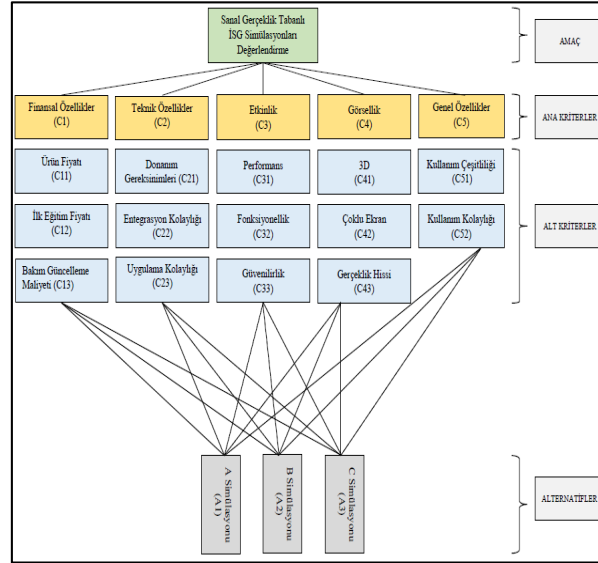
$$\sum_{j=1}^n w_j = 1, \quad w_j > 0 \quad ve \quad \begin{cases} v_j(x_j^+) = 100 \\ v_j(x_j^0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

(w_j j 'inci kriterin ağırlığı)

3. UYGULAMA

3.1. Araştırmanın Önemi

Uygulamanın ilk aşamasında hem literatür taranarak hem de uzman görüşleri alınarak en önemli 5 ana kriter ve 14 alt kriter belirlenmiş ve Şekil 1’ de gösterilmiştir. Bunun yanında, sektör içerisinde araştırma yapılarak firmalar tarafından tercih edilebilecek 3 alternatif simülasyon belirlenmiştir. Tüm analizler 4 uzmanın görüşleri alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacına uygun bir şekilde 3 farklı sanal gerçeklik tabanlı simülasyon ÇKKV yöntemi olan MACBETH ile karşılaştırılmış ve kriterler bazında değerlendirilmeler yapılmıştır.



Şekil 1. Sanal gerçeklik tabanlı simülasyonların seçimi için kriter ve alternatiflerin hiyerarşik yapısı

Karşılaştırma matrislerinin oluşturulması ve MACBETH yargılarının belirlenmesi sürecinde hem uygulama pratiğini hem de teknik ve akademik perspektifi temsil edecek şekilde farklı uzmanlık alanlarından dört karar verici sürece dâhil edilmiştir. KV1, yedi yıllık saha deneyimine sahip, çeşitli sektörlerde firmalara İSG danışmanlığı sunan B sınıfı İSG uzmanıdır. Bu uzman, özellikle risk değerlendirme, saha denetimi, eğitim programlarının uygulanması ve çalışan davranışlarının gözlemlenmesi konularında aktif rol almakta olup, VR tabanlı eğitim alternatiflerini uygulama gerçekliği ve mevzuata uyum açısından değerlendirmiştir. KV2, iş güvenliği odaklı dijital çözümler ve simülasyon tabanlı yazılım geliştirme alanında beş yıllık deneyime sahip bir yazılım mühendisidir. Bu uzman, alternatifleri teknik altyapı, sistem entegrasyonu, kullanıcı arayüzü tasarımı, veri analitiği ve geri bildirim mekanizmalarının uygulanabilirliği bakımından analiz etmiştir. KV3, üniversitede İSG bölümü öğrencilerine ders veren ve altı yıllık akademik deneyime sahip bir öğretim elemanıdır. Bu karar verici, alternatifleri pedagojik tasarım, öğrenme çıktıları, bilişsel yük, ölçme-değerlendirme yapısı ve uzun dönemli öğrenme kalıcılığı açısından değerlendirmiştir. KV4 ise hizmet sektöründe beş yıllık deneyime sahip C sınıfı İSG uzmanıdır ve özellikle çalışan profili, eğitim erişilebilirliği, maliyet-etkinlik ve operasyonel uygulanabilirlik boyutlarını ön plana alarak değerlendirme yapmıştır. Bu çok disiplinli ve farklı deneyim düzeylerini temsil eden uzman profili sayesinde, alternatiflerin yalnızca teknik performans açısından değil; pedagojik, operasyonel ve saha uygulanabilirliği boyutlarıyla bütüncül biçimde analiz edilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan değerlendirme kriterleri, iki aşamalı bir süreç sonucunda belirlenmiştir. İlk aşamada VR tabanlı iş sağlığı ve güvenliği İSG eğitimlerine ilişkin güncel literatür sistematik biçimde incelenmiş; ikinci aşamada ise alan uzmanlarının görüşleri alınarak literatürde öne çıkan boyutlar uygulama bağlamında yeniden yapılandırılmıştır. Literatür incelemesinde VR eğitimlerinin etkinliğinin çoğunlukla bilgi kazanımı ve öğrenme kalıcılığı, eğitim transferi, etkileşim ve immersiyon düzeyi, gerçeklik/telepresence algısı, kullanıcı deneyimi ve memnuniyet, ile performans çıktıları (hata oranı, tepki süresi, görev tamamlama başarısı) gibi kriterler üzerinden değerlendirildiği görülmüştür [13,35,36].

Özellikle meta-analitik bulgular, VR'ın geleneksel eğitim yöntemlerine kıyasla bilgi kalıcılığı ve öğrenme çıktıları açısından anlamlı üstünlük sağlayabildiğini ortaya koymaktadır [13]. Benzer şekilde, VR ortamlarında telepresence ve etkileşim düzeyinin eğitim transferi ve risk algısı üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır [35]. Bunun yanında, kullanıcı deneyimi ve sistem kullanılabilirliği gibi insani-teknik etkileşim boyutlarının da eğitim etkinliği ile doğrudan ilişkili olduğu raporlanmıştır [37]. Bu literatür bulguları doğrultusunda oluşturulan ön kriter seti, İSG alanında saha deneyimine ve teknik uzmanlığa sahip karar vericilerle yapılan yapılandırılmış görüşmelerle değerlendirilmiş; uygulama gerçekliği, mevzuata uygunluk, teknik entegrasyon kolaylığı ve maliyet-etkinlik gibi bağlamsal boyutlar uzman katkısıyla netleştirilmiştir. Böylece kriterler hem teorik temele hem de pratik uygulama perspektifine dayandırılarak, VR tabanlı İSG eğitim alternatiflerinin çok boyutlu ve dengeli biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayacak şekilde son hâline getirilmiştir.

MACBETH analizi kapsamında değerlendirilmek üzere literatürde İSG eğitimlerinde en sık karşılaşılan ve farklı etkileşim düzeylerini temsil eden üç sanal gerçeklik tabanlı eğitim alternatifi tanımlanmıştır. Birinci alternatif (A1), tam immersif, etkileşimli ve gerçek zamanlı geri bildirim mekanizmasına sahip VR tabanlı İSG eğitim sistemidir. Bu alternatifte başlık tipi gözlük, kontrolörler ve vücut takip sensörleri kullanılarak senaryo tabanlı, modelleme içeren üç boyutlu interaktif ortamlar oluşturulmakta; tehlike tanıma, kişisel koruyucu donanım kullanımı ve ergonomi gibi modüller performansla dayalı ölçüm mekanizmaları (bilgi kazanımı, davranışsal tepki ve hata oranı) ile değerlendirilmektedir. İkinci alternatif (A2), 360° panoramik gerçek saha görüntülerine dayanan yarı-immersif VR eğitimidir. Bu yapı, gerçek ortam algısını güçlendirmekle birlikte etkileşim düzeyi navigasyon ve bakış yönlendirme ile sınırlıdır; geri bildirim çoğunlukla eğitim sonu değerlendirme ve test modülleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Üçüncü alternatif (A3) ise masaüstü ortamda çalışan, non-immersive VR ya da gelişmiş e-öğrenme destekli simülasyon sistemidir. Bu alternatif bilgisayar ekranı üzerinden üç boyutlu senaryolar sunmakta, kullanıcı etkileşimi mouse ve klavye ile sınırlı kalmakta ve ölçüm süreci ağırlıklı olarak test ve quiz temelli değerlendirmelere dayanmaktadır. Bu üç alternatif, immersiyon düzeyi, etkileşim yoğunluğu, geri bildirim yapısı ve performans ölçüm kapasitesi bakımından kademeli bir yapı oluşturarak çalışmanın çok kriterli değerlendirme çerçevesinde karşılaştırılabilir, teorik olarak temellendirilmiş ve uygulamada karşılığı bulunan seçenekler üzerinden yürütülmesini sağlamaktadır.

3.2. Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu çalışmanın en temel sınırlılıklarından biri, VR tabanlı İSG simülasyon alternatiflerinin piyasa ölçeğinde henüz sınırlı sayıda olmasıdır. Özellikle yerli geliştiricilerin teknik ve pedagojik özelliklere ilişkin detaylı verileri paylaşma konusunda çekimser davranmaları, alternatiflerin kapsamlı ve karşılaştırılabilir veri setleri üzerinden değerlendirilmesini güçleştirmiştir. Bu durum, alternatif evreninin tam anlamıyla temsil edici bir yapıya ulaşmasını engellemiş ve karar modeli kapsamında değerlendirilen seçeneklerin sayısını sınırlamıştır. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, çalışmada analiz edilen alternatifler çerçevesinde geçerlidir; daha geniş bir alternatif seti ile farklı sonuçlar ortaya çıkma olasılığı bulunmaktadır.

İkinci önemli sınırlılık, İSG alanında dijitalleşme ve VR tabanlı eğitim uygulamalarının Türkiye bağlamında görece yeni bir gelişim sürecinde olmasıdır. Bu durum hem pazar olgunluğunun düşük olmasına hem de karar vericilerin deneyim birikiminin sınırlı kalmasına neden olmuştur. Karar vericilerin değerlendirmeleri bireysel deneyimlerden ziyade ortak tartışma ve grup konsensüsü üzerinden şekillenmiştir. Grup temelli karar alma yaklaşımı, kolektif değerlendirme avantajı sağlamakla birlikte bireysel yargı farklılıklarının modellenmesini sınırlamıştır. Gelecek çalışmalarda bireysel MACBETH matrislerinin ayrı ayrı oluşturulması ve sonuçların karşılaştırılması, karar tutarlılığı ve yargı farklılıklarının analizi açısından daha derin bir metodolojik katkı sağlayabilir.

Bir diğer sınırlılık, yeni nesil İSG teknolojilerine ilişkin akademik literatürün özellikle yerel bağlamda henüz gelişim aşamasında olmasıdır. Bu durum kriter belirleme sürecinde literatür tabanlı referans çeşitliliğini daraltmış ve uzman görüşlerinin görece daha belirleyici olmasına yol açmıştır. Her ne kadar kriterler sistematik literatür incelemesi ve uzman görüşlerinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulmuş olsa da alanın hızla gelişiyor olması kriter yapısının zaman içerisinde güncellenmesini gerekli kılabılır.

Çalışmada kullanılan model statik bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Oysa VR tabanlı sistemler teknolojik olarak hızlı evrim geçiren yapılardır. Donanım, yazılım ve kullanıcı deneyimi boyutlarındaki

gelişmeler alternatiflerin performans profillerini kısa sürede değiştirebilir. Bu nedenle sonuçlar, çalışmanın gerçekleştirildiği dönem ve mevcut teknolojik olgunluk düzeyi bağlamında değerlendirilmelidir.

3.3. Metodolojinin Uygulanması

Bu aşamada anket formları online olarak karar vericilere iletilerek elde edilen veriler ile MACBETH yöntemi adımları sırasıyla uygulanmıştır.

Çizelge 3. Ana kriterlerin sayısallaştırılmış MACBETH semantik ölçeğine göre ağırlıklandırılması

	C3	C1	C2	C5	C4	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C3	0	1	2	3	4	5	100	0,333
C1		0	1	2	3	4	80	0,267
C2			0	3	4	3	60	0,200
C5				0	1	2	40	0,133
C4					0	1	20	0,067
Nötr						0	0	0

Yapılan hesaplamalar sonucunda Çizelge 3'te 0,333 ağırlığı ile etkinlik (C3) kriteri en önemli ana kriter olurken 0,067 ağırlığı ile görsellik (C4) kriteri en az öneme sahip kriter olmuştur. Özellikle etkinlik kriterinin simülatörün performansını, fonksiyonelliğini ve güvenilirliğini kapsaması karar vericilerin bu yönde seçimini etkilemiştir.

Çizelge 4. Finansal özellikler ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C11	C13	C12	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C11	0	1	3	5	100	0,500
C13		0	3	4	80	0,400
C12			0	2	20	0,100
Nötr				0	0	0

Çizelge 4' te finansal özellikler ana kriterinin yer alan ürün fiyatı (C11), ilk eğitim fiyatı (C12) ve bakım-güncelleme maliyeti (C13) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda ürün fiyatı 0,500 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,400 ve 0,100 ile bakım-güncelleme maliyetinin ve ilk eğitim fiyatı alt kriterleri gelmiştir.

Çizelge 5. Teknik özellikler ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C22	C21	C23	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C22	0	2	3	5	100	0,417
C21		0	2	4	80	0,333
C23			0	3	60	0,250
Nötr				0	0	0

Çizelge 5' te teknik özellikler ana kriterinin yer alan donanım gereksinimleri (C21), entegrasyon kolaylığı (C22) ve uygulama kolaylığı (C23) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda entegrasyon kolaylığı 0,417 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,333 ve 0,250 ile donanım gereksinimleri ve uygulama kolaylığı alt kriterleri gelmiştir.

Çizelge 6. Etkinlik ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C31	C32	C33	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C31	0	1	3	4	100	0,444
C32		0	2	3	75	0,333
C33			0	2	50	0,222
Nötr				0	0	0

Çizelge 6' da etkinlik ana kriterinin altında yer alan performans (C31), fonksiyonellik (C32) ve güvenilirlik (C33) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda performans 0,444 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,333 ve 0,222 ile fonksiyonellik ve güvenilirlik alt kriterleri gelmiştir.

Çizelge 7. Görsellik ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C43	C41	C42	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C43	0	2	3	4	100	0,500
C41		0	2	3	75	0,375
C42			0	1	25	0,125
Nötr				0	0	0

Çizelge 7’ de görsellik ana kriterinin altında yer alan 3D (C41), çoklu ekran (C42) ve gerçeklik hissi (C43) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda gerçeklik hissi 0,500 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,375 ve 0,125 ile 3D ve çoklu ekran alt kriterleri gelmiştir.

Çizelge 8. Genel özellikler ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C51	C52	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C51	0	2	4	100	0,571
C52		0	3	75	0,429
Nötr			0	0	0

Çizelge 8’ de genel özellik ana kriterinin altında yer alan kullanım çeşitliliği (C51), ve kullanım kolaylığı (C52) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda kullanım çeşitliliği 0,571 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,429 ile kullanım kolaylığı alt kriteri gelmiştir.

Devamında ise tüm ana kriter ve alt kriterlerin değerlendirilmesinin ardından her bir alternatifin belirlenen kriterler çerçevesinde performans skorları MACBETH semantik ölçeğine göre hesaplanmıştır.

Çizelge 9’da her bir kriterin etki yönü belirlenerek fayda kriteri için +, zarar kriteri ise – işaretleri ile ifade edilmiş ve semantik ölçeklere karşılık gelen sayısal değerler ile sayısallaştırılmıştır.

Çizelge 9. Alternatiflerin sayısallaştırılmış MACBETH skorları ve etki yönleri

Etki yönü		A1	A2	A3
-	C11	1	3	2
-	C12	3	5	4
-	C13	1	4	3
-	C21	4	3	3
+	C22	5	1	2
+	C23	3	4	2
+	C31	6	3	4
+	C32	4	2	3
+	C33	3	1	2
+	C41	4	3	4
+	C42	4	1	3
+	C43	5	1	4
+	C51	4	2	3
+	C52	3	1	2

Alt ve üst sınırlar göz önünde bulundurularak denklem 3 kullanılarak tüm alternatiflerin skorları hesaplanmış ve Çizelge 10’ da gösterilmiştir.

Çizelge 10. Her bir alternatifin kriterler çerçevesinde MACBETH skorları

	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52
A1	0	0	0	100	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100
A2	100	100	100	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
A3	50	50	66,7	0	25	0	33,3	50	50	100	66,7	75	50	50

Ana kriter ağırlıkları ile alt kriter ağırlıklarının çarpılması ile kriterlerin global ağırlıklarının hesaplanması ve Çizelge 11’ de gösterilmiştir.

Çizelge 11. Alt kriterlere ait global ağırlık değerleri

	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52
Ağırlıklar	0,133	0,027	0,107	0,067	0,083	0,05	0,148	0,111	0,074	0,025	0,008	0,033	0,076	0,057

Kriterlerin global ağırlıkları incelendiğinde en yüksek ağırlığa sahip performans kriteridir. Ürün fiyatı, fonksiyonellik ve bakım-güncelleme maliyeti ise diğer öne çıkan kriterler olmuştur. Özellikle tasarlanan simülatörlerde performans ve fonksiyonelliğin yüksek düzeyde olması kendisine yüklenmiş olan işlevi her açıdan tam anlamıyla yerine getirebilme kabiliyeti ve beklenen hedefe ulaşma gücünün etkinliği ile ilgilidir. Beklenen yüksek etkinliğin yanında simülator tercihlerinde fiyat performans düzeyinin de denge içerisinde olması oldukça önemlidir. Çoklu ekran kriteri ise en az etkiye sahip kriter olarak gözükmektedir. Bu alt kriter simülator tercihlerinde önemli yere sahip olsa da diğer kriterlerle değerlendirildiğinde daha az etkili olduğu görülmüştür.

En son aşamada ise her bir alternatifin toplam skoru hesaplanmıştır. Alternatiflerin her bir kriter çerçevesinde aldığı MACBETH skorları kriterlerin hesaplanan ağırlıkları ile çarpılarak toplam skorlar elde edilmiş ve Çizelge 12’de gösterilmiştir.

Çizelge 12. Alternatiflerin toplam değerlendirme skorları

	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52	Toplam skor	Sıralama
A1	0	0	0	6,7	8,3	2,5	14,8	11,1	7,4	2,5	0,8	3,3	7,6	5,7	70,8	1
A2	13,3	2,7	10,7	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	31,7	3
A3	6,7	1,3	7,1	0	2,1	0	4,9	5,6	5,6	2,5	1,7	2,5	1,3	1,3	42,4	2

Yapılan MACBETH analizi sonucunda alternatiflerin skor sıralaması $A1 > A3 > A2$ şeklinde gerçekleşmiştir. A1 alternatifinin belirlenen kriterler çerçevesinde ilk sırada yer alması, özellikle çalışmada en yüksek ağırlığa sahip olan performans kriteri bakımından diğer alternatiflere kıyasla daha üstün bir teknik ve pedagojik altyapıya sahip olmasıyla açıklanabilir. Tam immersif yapı sayesinde senaryoların gerçek iş akışına uygun biçimde modellenmesi, kullanıcıya sistem içerisinde eş zamanlı hareket serbestliği tanınması ve bu hareketlerin analiz edilebilmesi, yüksek gerçeklik hissi ve üç boyutlu ortamın süreçleri daha anlaşılır kılması A1’in tercih edilme düzeyini artırmaktadır. Ayrıca canlandırma (animasyon-temelli) eğitim modülü ile kullanıcıların kendilerini senaryo içinde deneyimlemeleri, yalnızca bilişsel değil davranışsal öğrenme çıktılarının da desteklenmesine imkân vermektedir. Serbestlik modunda kullanıcıya riskli durumları keşfetme olanağı sunulurken, değerlendirme modunda belirlenen görevlerin yerine getirilmesi istenmekte ve sistem tarafından performans analizi yapılabilmektedir. Bu yapı, gerçek zamanlı geri bildirim mekanizması ile birleştiğinde öğrenme kalıcılığı, tehlike tanıma başarısı ve hata azaltma kapasitesi bakımından güçlü bir avantaj üretmektedir.

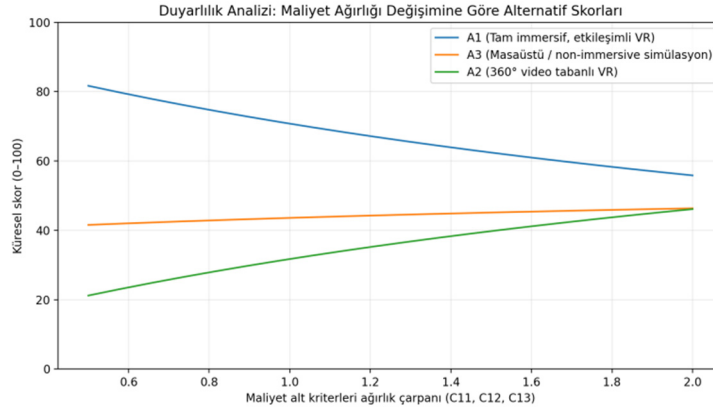
A3 alternatifinin ikinci sırada yer alması ise immersiyon düzeyi daha düşük olmakla birlikte yapılandırılmış senaryolar ve ölçme-değerlendirme modülleri sayesinde belirli bir performans standardını koruyabilmesinden kaynaklanmaktadır. Masaüstü ortamda çalışan bu sistem, teknik karmaşıklık ve maliyet açısından daha erişilebilir olmakla birlikte etkileşim derinliği ve davranışsal transfer kapasitesi bakımından A1’in gerisinde kalmaktadır. Buna karşılık A2 alternatifinin üçüncü sırada yer alması, 360° panoramik gerçek saha görüntüleri ile yüksek algısal gerçekçilik sunmasına rağmen etkileşim ve anlık geri bildirim mekanizmalarının sınırlı olmasıyla ilişkilidir. Navigasyon ve bakış yönlendirme temelli yarı-immersif yapı, kullanıcının aktif karar verme ve uygulama performansını ölçme kapasitesini kısıtlamakta; geri bildirim çoğunlukla eğitim sonu değerlendirme şeklinde sunulması performans kriteri altında daha düşük puan almasına neden olmaktadır. Dolayısıyla elde edilen sıralama, immersiyon seviyesi tek başına belirleyici olmaktan ziyade; etkileşim yoğunluğu, görev temelli değerlendirme yapısı, geri bildirim mekanizması ve performans çıktıları ile bütünlük teknik tasarımın toplam etkisini yansıtmaktadır.

3.4. Duyarlılık Analizi

Çalışmada elde edilen sıralamanın ağırlık değişimlerine karşı ne ölçüde kararlı olduğunu incelemek amacıyla ek bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Özellikle “Maliyet” kriterinin ağırlığının artırılması durumunda sıralamanın değişip değişmeyeceğinin test edilmesi ekseninde kurgulanmıştır. Çünkü maliyet ve diğer özelliklerin ödünleşimi önem arz etmektedir. Modelde maliyet ana kriteri C11, C12 ve C13 alt kriterleri ile temsil edildiğinden, bu üç alt kriterin ağırlıkları birlikte oransal olarak artırılmış ve her

senaryoda toplam ağırlık 1 olacak şekilde yeniden normalize edilmiştir. Böylece maliyetin karar sürecindeki görece önemi sistematik olarak artırılmış, diğer kriterlerin görece etkisi ise eş zamanlı olarak azaltılmıştır.

Şekil 2’de görüldüğü üzere, elde edilen sonuçlar, maliyet ağırlıkları 0.5 kat ile 2 kat arasında değiştirildiğinde A1 alternatifinin tüm senaryolarda en yüksek küresel skora sahip olduğunu göstermektedir. Başlangıç ağırlıkları altında A1 açık ara birinci konumdayken, maliyet ağırlıklarının iki katına çıkarıldığı en uç senaryoda dahi A1’in küresel skoru azalsa da birinciliğini koruduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, A1 alternatifinin teknik altyapı, performans, etkileşim ve pedagojik etkinlik gibi maliyet dışı kriterlerdeki güçlü performansının, maliyet kriterine verilen önemin artmasına rağmen genel üstünlüğünü sürdürmesini sağladığını göstermektedir.



Şekil 2. Maliyet kriteri ağırlığındaki değişimin alternatiflerin küresel skorlarına etkisi

Bununla birlikte, maliyet ağırlıklarının artışı A2 ve A3 alternatiflerinin küresel skorlarını yükseltmiştir. Bunun temel nedeni, bu alternatiflerin maliyet alt kriterlerinde A1’e kıyasla daha yüksek skorlar elde etmiş olmalarıdır. Özellikle A2’nin maliyet açısından avantajlı yapısı, maliyet kriterinin ağırlığı arttıkça küresel performansının belirgin biçimde yükselmesine neden olmuştur. Ancak bu artış, analiz edilen aralıkta sıralama değişimine yol açmamıştır. A3 ile A2 arasındaki farkın daraldığı gözlemlense de, A1’in birinci sıradaki konumu korunmuştur.

Bu bulgular, geliştirilen karar modelinin maliyet kriterindeki makul düzeydeki değişimlere karşı görece dayanıklı (robust) olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, maliyetin karar sürecindeki önemi artırıldığında dahi model, teknik ve pedagojik üstünlüğü yüksek olan tam immersif A1 alternatifini en uygun seçenek olarak belirlemeye devam etmektedir. Bu durum, A1’in yalnızca belirli bir ağırlık konfigürasyonu altında değil, geniş bir ağırlık aralığında da üstünlüğünü koruduğunu ortaya koymaktadır. Maliyet kriterine ek olarak ağırlık değişimlerine karşı kararlılığını daha kapsamlı biçimde test etmek amacıyla performans (C31, C32, C33) ve kullanılabilirlik/kullanıcı deneyimi (C41, C42, C43) alt kriterleri için de ayrı duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Her iki analizde ilgili alt kriterlerin ağırlıkları 0.5–2.0 çarpan aralığında oransal olarak değiştirilmiş ve her senaryoda toplam ağırlık 1 olacak şekilde yeniden normalize edilmiştir. Performans alt kriterlerinin ağırlığı artırıldığında A1 alternatifinin küresel skorunun belirgin biçimde yükseldiği, A2’nin skorunun azaldığı ve A3’ün sınırlı değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni A1’in performans alt kriterlerinde maksimum değerlere sahip olmasıdır. Benzer şekilde kullanılabilirlik alt kriterlerinin ağırlığı artırıldığında A3’ün küresel skorunda artış görülmüş, ancak bu artış A1’in birinciliğini değiştirecek düzeye ulaşmamıştır. Her iki senaryoda da alternatif sıralaması (A1 > A3 > A2) korunmuş, herhangi bir sıralama tersine dönüş oluşmamıştır. Bu bulgular, karar modelinin yalnızca maliyet kriterine değil, performans ve kullanılabilirlik gibi temel boyutlardaki ağırlık değişimlerine karşı da yüksek düzeyde kararlı olduğunu ve A1 alternatifinin geniş bir ağırlık dağılımı aralığında üstünlüğünü sürdürdüğünü göstermektedir.

Sonuç olarak gerçekleştirilen duyarlılık analizi, çalışmada elde edilen A1 > A3 > A2 sıralamasının tesadüfi bir ağırlık dağılımına bağlı olmadığını, tüm kriter ağırlıklarındaki değişimlere karşı kararlı bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bu analiz, modelin güvenilirliğini artırmakta ve karar vericilere farklı öncelikli senaryoları altında dahi sonuçların tutarlılığını değerlendirme imkânı sunmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Elde edilen bulgular, sanal gerçeklik tabanlı İSG eğitimlerinde teknik performans, immersif etki ve işlevsellik boyutlarının karar sürecinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, VR'nin risk algısı, öğrenme çıktıları ve eğitim etkinliği üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koyan güncel çalışmalarla paralellik göstermektedir [13,17,19]. Özellikle immersif sistemlerin geleneksel sunum veya masaüstü tabanlı çözümlere kıyasla daha yüksek öğrenme kazanımı ve risk farkındalığı oluşturduğunu belirten deneysel ve meta-analitik çalışmalar, bu çalışmada performans kriterinin yüksek ağırlık almasını desteklemektedir [13,17].

Benzer şekilde, telepresence ve gerçeklik hissini eğitim etkinliği üzerindeki rolünü vurgulayan araştırmalar [34], VR'nin yalnızca bir görselleştirme aracı değil, davranışsal çıktıları etkileyen bir eğitim platformu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda immersif ve etkileşim düzeyi yüksek alternatifin üst sırada yer alması, literatürde VR'nin güvenlik eğitimi bağlamında sunduğu deneysel öğrenme avantajları ile uyumludur [14,19]. Ayrıca VR'nin kullanıcı deneyimi ve eğitim memnuniyeti üzerindeki etkileri de etkinliğin yalnızca teknik değil pedagojik bir boyut taşıdığını göstermektedir [35,36].

Öte yandan, maliyet kriterinin yüksek ağırlığa sahip olmasına rağmen sıralamayı belirleyici düzeyde değiştirmemesi, literatürde de vurgulanan “etkinlik odaklı teknoloji seçimi” yaklaşımı ile örtüşmektedir. Özellikle İSG bağlamında teknolojik yatırımların uzun vadeli güvenlik performansı ile ilişkilendirildiği çalışmalar [38], dijitalleşmenin yalnızca ekonomik değil aynı zamanda koruyucu ve önleyici bir yatırım olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, VR tabanlı çözümlerin maliyet dezavantajına rağmen tercih edilebilirliğini göstermektedir.

Pandemi sonrası dijital dönüşüm sürecinde İSG uygulamalarında teknolojik entegrasyonun hızlandığını ortaya koyan çalışmalar [39,40], VR gibi ileri dijital araçların İSG sistemlerine entegrasyonunun stratejik önemini vurgulamaktadır. Endüstri 4.0 ve dijitalleşmenin İSG boyutuna odaklanan araştırmalar da [5,38], yeni nesil teknolojilerin güvenlik performansını artırma potansiyeline dikkat çekmektedir. Bu çalışmada performans ve işlevsellik kriterlerinin ön plana çıkması, söz konusu literatürel eğilim ile tutarlıdır. Elde edilen sıralama VR'nin immersif yapısı, risk algısını güçlendirmesi, senaryo tabanlı etkileşim sunması ve öğrenme kalıcılığını desteklemesi gibi literatürde kanıtlanmış avantajları ile teorik olarak da temellendirilebilmektedir [13,17,35,37]. Bu yönüyle çalışma, mevcut literatürde ortaya konan VR etkinliği bulgularını ÇKKV çerçevesinde doğrulayan ve yönetsel karar sürecine sistematik bir yapı kazandıran bir katkı sunmaktadır.

Benzer şekilde literatürde VR tabanlı güvenlik eğitimlerinin çok kriterli karar verme yaklaşımları ile değerlendirildiği çalışmalar da mevcuttur. Örneğin depo ortamlarında VR güvenlik eğitimi ve denetim sistemlerinin değerlendirilmesinde AHP yönteminin kullanıldığı bir çalışmada, immersif etkileşim, senaryo gerçekçiliği ve kullanıcı deneyimi gibi faktörlerin en yüksek önceliğe sahip olduğu ortaya konmuştur [35]. Söz konusu çalışma, VR temelli güvenlik eğitimlerinde teknik performans ve gerçeklik hissini karar sürecinde belirleyici olduğunu göstermekte; bu yönüyle mevcut çalışmada performans ve işlevsellik kriterlerinin ön plana çıkması ile örtüşmektedir. Yöntemsel açıdan AHP ve MACBETH farklı matematiksel temellere dayanmakla birlikte, her iki yaklaşımda da uzman yargılarının yapılandırılmış biçimde nicel önceliklere dönüştürülmesi söz konusudur. Bu durum, çalışmamızda elde edilen sıralamanın yalnızca seçilen yönteme özgü bir sonuç olmadığını; aksine VR'nin immersif ve performans odaklı özelliklerinin farklı çok kriterli karar verme tekniklerinde de benzer biçimde ön plana çıktığını göstermektedir. Dolayısıyla elde edilen bulgular, literatürde AHP gibi alternatif ÇKKV yaklaşımları ile ulaşılan sonuçlarla metodolojik düzeyde tutarlılık sergilemekte ve VR tabanlı İSG eğitimlerinin seçiminde etkinlik ve gerçekçilik boyutlarının belirleyici rolünü güçlendirmektedir.

5. SONUÇ

Sanayileşme ve gelişen teknolojiyle birlikte iş kazaları ve meslek hastalıklarının azaltılması gerekliliği daha kritik hale gelmiş; özellikle COVID-19 süreci işletmelerin İSG sistemlerini yeniden yapılandırmalarını zorunlu kılmıştır. Dijitalleşmenin hız kazandığı bu dönemde VR tabanlı simülasyonlar, tehlikesiz bir ortamda gerçekçi deneyim sunmaları nedeniyle İSG uygulamalarında öne çıkmaktadır. Bu çalışmada VR tabanlı İSG simülasyonları, literatür ve uzman görüşleri doğrultusunda belirlenen 5 ana ve 14 alt kriter çerçevesinde MACBETH yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre performans (0,148), ürün fiyatı (0,133) ve fonksiyonellik (0,111) en yüksek ağırlığa sahip kriterler olarak belirlenmiştir. Çoklu ekran (0,008) ve 3D (0,025) kriterleri ise görece daha düşük etki düzeyine sahip bulunmuştur. Alternatifler arasında A1 (70,833) birinci, A3 (42,41) ikinci ve A2 (31,667) üçüncü sırada yer almıştır. Ancak bu sıralama yalnızca sayısal üstünlüğü değil, kriter-temelli yapısal farklılıkları da yansıtmaktadır.

A1 alternatifinin birinci sırada yer almasının temel nedeni, özellikle performans, fonksiyonellik ve gerçeklik hissi ile ilişkili kriterlerde yüksek puanlar elde etmesidir. Tam immersif yapısı, senaryo tabanlı etkileşim imkânı, anlık geri bildirim mekanizması ve kullanıcıya hareket serbestliği tanınması, eğitim etkinliği ve öğrenme kalıcılığı açısından belirleyici olmuştur. Her ne kadar maliyet kriterinde A1 görece dezavantajlı bir konumda bulunsada performans ve fonksiyonellik boyutlarındaki üstünlüğü maliyet dezavantajını telafi etmiş ve toplam küresel skorun en yüksek olmasını sağlamıştır. Bu durum, karar modelinde teknik ve pedagojik etkinliğin maliyet faktörüne kıyasla daha baskın bir rol oynadığını göstermektedir.

A3 alternatifi ise maliyet açısından daha dengeli bir yapı sunmasına rağmen immersif deneyim ve performans kriterlerinde A1 seviyesine ulaşamamış; bu nedenle ikinci sırada yer almıştır. A2 alternatifi ise özellikle performans ve etkileşim düzeyi bakımından düşük puanlar aldığı için maliyet avantajına rağmen son sırada konumlanmıştır. Dolayısıyla sonuçlar, VR tabanlı İSG eğitimlerinde yalnızca ekonomik boyutun değil, eğitim etkinliği ve gerçeklik düzeyinin de belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Araştırmada alternatif olarak ülkemiz sınırları içerisinde geliştirilen simülasyonların tercih edilmesi ve ilgili firmaların araştırmaya katılım konusundaki sınırlı geri dönüşleri alternatif evrenini daraltmıştır. Ayrıca VR tabanlı sistemlerin ülkemizde nispeten yeni bir teknoloji olması nedeniyle karar vericiler değerlendirmeleri grup halinde gerçekleştirmiştir. Gelecek çalışmalarda alternatif sayısının artırılması, farklı sektörlerden uygulama örneklerinin dahil edilmesi ve bireysel karar verici değerlendirmelerinin karşılaştırılması modelin genellenabilirliğini artıracaktır.

Sonuç olarak çalışma, VR tabanlı İSG simülasyonlarının çok kriterli karar verme yaklaşımıyla sistematik biçimde değerlendirilmesine katkı sunmakta ve özellikle yüksek gerçeklik hissi, etkileşim düzeyi ve performans çıktıları sağlayan sistemlerin maliyet dezavantajına rağmen daha uygun tercih olarak öne çıkabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, VR tabanlı İSG yatırımı planlayan işletmeler için karar sürecinde yol gösterici niteliktedir. Bu doğrultuda, kullanılan MACBETH tabanlı yaklaşımın gelecekte yalnızca İSG eğitimleriyle sınırlı kalmayıp, uzaktan eğitim sistemlerinde VR tabanlı öğrenme araçlarının değerlendirilmesine yönelik olarak genişletilmesi mümkündür [41]. Özellikle etkileşim düzeyi, kullanıcı deneyimi, erişilebilirlik ve teknik altyapı gibi kriterler dikkate alınarak farklı eğitim senaryoları için uygun VR çözümlerinin belirlenmesi, modelin genellenabilirliğini ve uygulama alanını artıracaktır.

6. KAYNAKLAR

1. Kır, S. (2022). A real-time location system design for production facilities working under COVID-19 pandemic precautions. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 6(1), 34-42.
2. Ng, W.T. (2021). COVID-19: Protection of workers at the workplace in singapore. *Safety and Health at Work*, 12(1), 133-135.
3. Erik, A. ve Kuvvetli, Y. (2021). Üretim işletmelerinin Endüstri 4.0 entegrasyonunun veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 637-647.
4. Ozturk, C. & Gulec, N. (2025). Leveraging IoT, big data, and AI for sustainable supply chains: A strategic analysis with ISM, MICMAC, and GREY-DEMATEL. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems*, 550-557. Cham: Springer Nature Switzerland.
5. Leso, V., Fontana, L. & Iavicoli, I. (2018). The occupational health and safety dimension of Industry 4.0. *La Medicina Del Lavoro*, 109(5), 327.
6. Yamamoto, G.T., Özgeldi, M. & Altun, D. (2018). Instructional developments and progress for open and equal access for learning. *Open and Equal Access for Learning in School Management*, 117, 143.
7. Creem-Regehr, S.H., Stefanucci, J.K. & Bodenheimer, B. (2023). Perceiving distance in virtual reality: theoretical insights from contemporary technologies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 378(1869), 20210456.

8. Gandhi, R.D. & Patel, D.S. (2018). Virtual reality—opportunities and challenges. *Virtual Reality*, 5(01), 2714-2724.
9. Lele, A. (2013). Virtual reality and its military utility. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 4(1), 17-26.
10. Ji, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Gao, Y., Cao, Y. & Yang, S.-H. (2023). Integrating diminished quality of life with virtual reality for occupational health and safety training. *Safety Science*, 158, 105999.
11. Ball, C., Huang, K.-T. & Francis, J. (2021). Virtual reality adoption during the COVID-19 pandemic: A uses and gratifications perspective. *Telematics and Informatics*, 65, 101728.
12. Suri, P. A., Syahputra, M.E., Amany, A.S.H. & Djafar, A. (2023). Systematic literature review: The use of virtual reality as a learning media. *Procedia Computer Science*, 216, 245-251.
13. Scorgie, D., Feng, Z., Paes, D., Parisi, F., Yiu, T.W. & Lovreglio, R. (2024). Virtual reality for safety training: A systematic literature review and meta-analysis. *Safety Science*, 171, 106372.
14. Feng, Z., Lovreglio, R., Yiu, T.W., Acosta, D.M., Sun, B. & Li, N. (2024). Immersive virtual reality training for excavation safety and hazard identification. *Smart and Sustainable Built Environment*, 13(4), 883-907.
15. Nykänen, M., Puro, V., Tiikkaja, M., Kannisto, H., Lantto, E., Simpura, F., ... & Teperi, A.M. (2020). Implementing and evaluating novel safety training methods for construction sector workers: Results of a randomized controlled trial. *Journal of Safety Research*, 75, 205-221.
16. Rey-Becerra, E., Barrero, L. H., Ellegast, R. & Kluge, A. (2026). VR-or lecture-based training? The role of culture in safety training outcomes. *Applied Ergonomics*, 130, 104626.
17. Leder, J., Horlitz, T., Puschmann, P., Wittstock, V. & Schütz, A. (2019). Comparing immersive virtual reality and powerpoint as methods for delivering safety training: Impacts on risk perception, learning, and decision making. *Safety Science*, 111, 271-286.
18. Eiris, R., Gheisari, M. & Esmaeili, B. (2020). Desktop-based safety training using 360-degree panorama and static virtual reality techniques: A comparative experimental study. *Automation in Construction*, 109, 102969.
19. Stefan, H., Mortimer, M. & Horan, B. (2023). Evaluating the effectiveness of virtual reality for safety-relevant training: a systematic review. *Virtual Reality*, 27(4), 2839-2869.
20. Jackson, D.I., Wongphothiphan, T., Luna, J., Maa, T., Fristad, M.A., Huang, Y., ... & Sezgin, E. (2025). Virtual reality for workplace violence training of health care workers: Pilot mixed methods usability study. *JMIR Serious Games*, 13, e70817.
21. National Safety Council. (2021). *Virtual reality and augmented reality for hazardous work training* (Work To Zero 2020). https://www.nsc.org/worktozero_ Erişim tarihi: 04.02.2026.
22. Wang, J., Howard, I.L., Ma, J. & Gugssa, M. (2024). *Mississippi DOT virtual reality safety training study (FHWA/MDOT-RD-25-327)*. Mississippi Department of Transportation.
23. e Costa, C.A.B. & Vansnick, J.-C. (1994). MACBETH-An interactive path towards the construction of cardinal value functions. *International Transactions in Operational Research*, 1(4), 489-500.
24. Genç, T., Kabak, M., Köse, E. ve Yılmaz, Z. (2015). Bireysel emeklilik sistemi seçimi problemine ilişkin MACBETH yaklaşımı. *Istanbul University Econometrics and Statistics E-Journal*, 22, 47-65.
25. Kundakçı, N. (2019). An integrated method using MACBETH and EDAS methods for evaluating steam boiler alternatives. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 26(1-2), 27-34.
26. Akay, M. ve Kundakçı, N. (2021). ÇKKV ve tamsayı programlama yöntemleri ile bir üretim işletmesinde uzaktan çalışma modelinin oluşturulması. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 24(2), 548-568.
27. Gören, H. G. & Şenocak, A.A. (2018). Macbeth based Taguchi loss functions approach for green supplier selection: a case study in textile industry. *Textile and Apparel*, 28(2), 90-97.
28. Ercan, E. ve Kundakçı, N. (2022). MACBETH tabanlı bulanık MARCOS yöntemi ile bir tekstil işletmesi için ürün grubu seçimi. *Pamukkale Üniversitesi İşletme Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 381-396.
29. Pamucar, D., Torkayesh, A.E. & Biswas, S. (2023). Supplier selection in healthcare supply chain management during the COVID-19 pandemic: a novel fuzzy rough decision-making approach. *Annals of Operations Research*, 328(1), 977-1019.
30. Moraes, C.C.D.F., Pinheiro, P.R., Rolim, I.G., Costa, J.L.D.S., Junior, M.D.S.E. & Andrade, S.J.M.D. (2021). Using the multi-criteria model for optimization of operational routes of thermal power plants. *Energies*, 14(12), 3682.
31. Cevizci, D.K. ve Kayacan, O. (2019). Bir konfeksiyon işletmesinde MACBETH ve TOPSIS yöntemleri ile tedarikçi seçimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(62), 331-344.

32. Ercan, E. ve Kundakçı, N. (2017). Bir tekstil işletmesi için desen programı seçiminde ARAS ve OCRA yöntemlerinin karşılaştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(1), 83-105.
33. Ayçin, E. (2019). Kurumsal kaynak planlama (KKP) sistemlerinin seçiminde MACBETH ve MABAC yöntemlerinin bütünlük olarak kullanılması. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 33(2), 533-552
34. Öztürk, C. ve Öztürk, H. (2025). Küresel salgın (COVID-19) sürecinde kargo çalışanlarının İSG açısından maruz kaldığı risklerin Macbeth yöntemi ile değerlendirilmesi. *Journal of Turkish Operations Management*, 9(2), 361-381.
35. Yoo, J.W., Park, J.S. & Park, H.J. (2023). Understanding VR-based construction safety training effectiveness: The role of telepresence, risk perception, and training satisfaction. *Applied Sciences*, 13(2), 1135.
36. Tusher, H.M., Mallam, S. & Nazir, S. (2024). A systematic review of virtual reality features for skill training. *Technology, Knowledge and Learning*, 29(2), 843-878.
37. Pribadi, A.P., Rahman, Y.M.R. & Silalahi, C.D.A.B. (2024). Analysis of the effectiveness and user experience of employing virtual reality to enhance the efficacy of occupational safety and health learning for electrical workers and graduate students. *Heliyon*, 10(15), e34918.
38. Arana-Landín, G., Laskurain-Iturbe, I., Iturrate, M. & Landeta-Manzano, B. (2023). Assessing the influence of Industry 4.0 technologies on occupational health and safety. *Heliyon*, 9(3), e13720
39. Amankwah-Amoah, J., Khan, Z., Wood, G. & Knight, G. (2021). COVID-19 and digitalization: The great acceleration. *Journal of Business Research*, 136, 602-611.
40. Karaboğa, T. ve Karaboğa, H.A. (2021). Covid-19 pandemisinin işletmelerin dijital dönüşümüne etkisinin bibliyometrik bir incelemesi. *Ekonomi İşletme ve Maliye Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 100-114.
41. Gülerüz, S.S., Özen, N.S. ve Ege, F. (2022). Uzaktan eğitim araçlarının değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1039-1046.

