

KBRN Eğitimlerinde Kritik Ekipman Kullanım Hataları ve Operasyonel Risklerin Yönetimi: Entegre Bir Yaklaşım

Abdullah Özkan¹  • Ali Çobanoğlu¹ 

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, KBRN Anabilim Dalı, Hatay, Türkiye; abduallah.ozkan@iste.edu.tr, alicobanoglu32@gmail.com

✉ Corresponding Author: abduallah.ozkan@iste.edu.tr

Please cite this paper as follows:

Özkan, A., & Çobanoğlu, A. (2025). KBRN Eğitimlerinde Kritik Ekipman Kullanım Hataları ve Operasyonel Risklerin Yönetimi: Entegre Bir Yaklaşım. *Acta Natura et Scientia*, 6(2), 236-247. <https://doi.org/10.61326/actanatsci.v6i2.429>

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi

Geliş: 25.10.2025

Düzeltilme: 06.12.2025

Kabul: 09.12.2025

Çevrimiçi Yayınlanma: 12.12.2025

Anahtar Kelimeler:

KBRN eğitimi

İnsan faktörleri

Hata analizi

Ergonomi

Risk yönetimi

Karar destek sistemleri

Ö Z E T

Bu çalışma, kimyasal, biyolojik, radyolojik ve nükleer (KBRN) eğitimlerinde ortaya çıkan insan hatalarının nedenlerini çok katmanlı bir sistem yaklaşımıyla incelemekte ve bu hataların eğitimsel süreçlere entegrasyonunu sağlayan bütünlük bir değerlendirme modeli önermektedir. Çalışma aynı zamanda KBRN eğitimlerinde sıkça karşılaşılan ekipman kullanım hatalarının yalnızca teknik eksikliklerden değil, bilişsel yük, ergonomik kısıtlar, çevresel faktörler ve karar verme süreçlerindeki karmaşadan kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, insan faktörleri kuramlarını, ergonomik analiz yaklaşımlarını ve operasyonel risk yönetimi ilkelerini birleştirerek hataların kök nedenlerini açıklamaya odaklanmıştır. Kuramsal çerçeve çok katmanlı bariyer mantığına dayanan Swiss Cheese modeli, hata sınıflandırma sistematığı sunan HFACS ve insan-ekipman-çevre etkileşimini irdeleyen SHELL modelinin sentezine dayanmaktadır. Bu üç modelin bütüncül olarak uygulanması, KBRN eğitimlerinde güvenlik kültürünün geliştirilmesine, senaryo temelli öğrenme yöntemlerinin etkinliğinin artırılmasına ve kişisel koruyucu ekipman kullanımında ergonomik optimizasyonun sağlanmasına katkı sunmaktadır. Çalışma insan hatası kuramlarını KBRN eğitimleri bağlamına uyarlayan disiplinler arası bir entegrasyon modeli önermesiyle diğer çalışmalardan öne çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlar, model temelli eğitim tasarımının karar destek araçları ve standardize edilmiş iş akışlarıyla bütünlleştirildiğinde operasyonel güvenliğin ölçülebilir biçimde güçlendiğini göstermektedir.

Critical Equipment Errors and Operational Risk Management in CBRN Training: An Integrated Approach

ARTICLE INFO

Article History

Received: 25.10.2025

Revised: 06.12.2025

Accepted: 09.12.2025

Available online: 12.12.2025

Keywords:

CBRN training

Human factors

Error analysis

Ergonomics

Risk management

Decision support systems

ABSTRACT

This study investigates the causes of human error in chemical, biological, radiological, and nuclear (CBRN) training using a multilayered systems approach, and proposes an integrated assessment model that facilitates the integration of these errors into the training processes. The study also reveals that equipment usage errors commonly encountered in CBRN training are not solely due to technical deficiencies, but also arise from cognitive load, ergonomic constraints, environmental factors, and complexities in decision-making processes. Furthermore, it focuses on explaining the root causes of errors by integrating human factors theories, ergonomic analysis approaches, and principles of operational risk management. The theoretical framework is based on the synthesis of the Swiss Cheese model, which relies on the multi-layered barrier concept, the HFACS error classification system, and the SHELL model, which examines human-equipment-environment interactions. The holistic application of these three models contributes to the development of a safety culture in CBRN training, enhances the effectiveness of scenario-based learning methods, and facilitates ergonomic optimization in the use of personal protective equipment. The study stands out from others by proposing an interdisciplinary integration model that adapts human error theories to the context of CBRN training. The results indicate that when model-based training design is integrated with decision support tools and standardized workflows, operational safety is measurably strengthened.

GİRİŞ

Kimyasal, biyolojik, radyolojik ve nükleer (KBRN) tehditler hem doğal hem de insan kaynaklı olayların giderek karmaşıklaştığı günümüzde, güvenlik ve sağlık sistemleri için en yüksek düzeyde hazırlık gerektiren senaryolardır. KBRN olaylarının çok disiplinli yapısı, teknik bilgi birikimi kadar insan faktörleri, karar verme süreçleri ve örgütsel koordinasyonun da eğitim kapsamına dahil edilmesini zorunlu kılmaktadır (Qzih & Ahmad, 2024). Bu nedenle KBRN hazırlık düzeyinin yalnızca ekipman veya protokol temelli değil, aynı zamanda bilişsel, psikolojik ve kurumsal yeterliliklerin bütüncül bir birleşimi olarak ele alınması gerekmektedir (Farhat vd., 2024).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, KBRN olaylarına müdahalede en zayıf halkanın çoğunlukla teknik yetersizlik değil, insan kaynaklı hatalar olduğunu göstermektedir. Özellikle kişisel koruyucu donanım

(PPE) kullanımı, zaman baskısı altında karar verme, bilişsel yük ve ekip içi iletişim eksiklikleri hata olasılığını artırmaktadır (Giaume vd., 2024; Gkikas vd., 2025). Anderson & Boddington (2024) koruyucu ekipmanın ergonomik sınırlılıklarının klinik performans üzerinde bilişsel yük yarattığını belirtirken; Razak vd. (2023) uygun eğitim ve standardizasyonun bu olumsuz etkileri azaltılabileceğini vurgulamıştır. PPE kullanımına ilişkin fizyolojik ve psikolojik etkilerin yanı sıra, çevresel stresörler ve ekipman tasarımı arasındaki dengesizliklerin de hata riskini artırdığı görülmektedir (Son, 2023; Lucena vd., 2026).

Eğitim sistemleri açısından bakıldığında, mevcut KBRN müfredatlarının büyük bölümü bilgi aktarımına dayalı olup senaryo temelli uygulamalarda ise sınırlı kalmaktadır. Oysa güncel literatür, etkili KBRN eğitimlerinin bilişsel yük yönetimi, stres toleransı, ergonomi ve örgütsel öğrenme unsurlarını birlikte ele

alması gerektiğini göstermektedir (Razak vd., 2023; Farhat vd., 2024). Bu çerçevede, Bogdan-Ioan vd. (2024) ve Rimpler-Schmid vd. (2021) Avrupa'daki KBRN hazırlık politikalarının hala operasyonel standartlarla entegre bir eğitim paradigmasından yoksun olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca Malizia vd. (2025) tarafından önerilen "exosome" tabanlı bütüncül risk değerlendirme yaklaşımı, KBRN tehditlerinin yalnızca çevresel maruziyet açısından değil aynı zamanda bireysel ve kurumsal dayanıklılık düzeyleri açısından da analiz edilmesi gerektiğini öne sürmektedir.

Son dönemde teknolojik yenilikler KBRN eğitimlerinde bilişsel ve davranışsal yetkinliklerin geliştirilmesi için yeni olanaklar sunmaktadır. Sanal gerçeklik (VR) ve karma gerçeklik (XR) uygulamaları, riskli senaryoların güvenli ortamda tekrarını sağlayarak öğrenme sürecini güçlendirmektedir (Regal vd., 2023; Hancko vd., 2025). Benzer biçimde, makine öğrenmesi ve yapay zeka tabanlı karar destek sistemleri, eğitim sırasında risk farkındalığını artırmakta ve müdahale hatalarını önleyebilmektedir (Kegyes vd., 2024; Nemeth vd., 2024). Bu sistemlerin etkin biçimde kullanımı, eğitimin bireysel performans ölçümleriyle ilişkilendirilmesine ve karar süreçlerinin veri temelli olarak optimize edilmesine katkı sağlamaktadır.

İnsan faktörlerinin eğitim ve operasyonel süreçlere sistematik biçimde entegre edilmemesi halinde teknolojik çözümler tek başına kalıcı güvenlik artışı sağlamamaktadır (Nazari vd., 2023). Güncel araştırmalar, özellikle stres altında karar verme, durum farkındalığı, iletişim ve ekip koordinasyonu gibi bilişsel değişkenlerin KBRN görev başarısında belirleyici olduğunu göstermektedir (Giaume vd., 2024; Bearman vd., 2025). Dolayısıyla, KBRN eğitimlerinde insan performansını etkileyen psikolojik ve ergonomik faktörlerin modellenmesi hem bireysel öğrenme çıktılarının hem de kurumsal hazırlık kapasitesinin artırılmasında kritik rol oynamaktadır.

Bu çalışma, literatürdeki teknik odaklı KBRN eğitim yaklaşımlarını aşarak, insan faktörleri, ergonomi ve sistem güvenliği arasındaki ilişkiyi açıklayan bütüncül bir değerlendirme modeli önermektedir. Çalışma aynı zamanda Swiss Cheese, HFACS ve SHELL modellerini

KBRN eğitim bağlamında birleştirerek hataları yalnızca bireysel performans sorunları değil sistemsel etkileşimlerin çıktısı olarak ele almaktadır. Böylelikle, eğitimlerin tasarımında risk yönetimi, örgütsel öğrenme ve insan–donanım etkileşimi gibi unsurların ölçülebilir biçimde bütünleştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, bu çalışma KBRN eğitimlerinde güvenlik kültürünün güçlendirilmesine ve sürdürülebilir bir hata önleme sistematığının geliştirilmesine kuramsal zemin sunmaktadır.

KURAMSAL ÇERÇEVE VE MODEL YAKLAŞIMI

KBRN olayları, doğaları gereği çok disiplinli bilgi, yüksek stres altında karar verme ve karmaşık insan–teknoloji etkileşimlerinin eşzamanlı yönetimini gerektirmektedir. Bu nedenle eğitim süreçlerinin yalnızca prosedür aktarımına değil hataların bilişsel, örgütsel ve çevresel kökenlerini açıklayan kuramsal modellere dayanması zorunludur. Literatürde, insan hatasını anlamak ve önlemek amacıyla geliştirilmiş çeşitli sistem yaklaşımları bulunmakla birlikte, KBRN bağlamına en uygun modeller arasında Swiss Cheese modeli, HFACS (Human Factors Analysis and Classification System) ve SHELL (Software, Hardware, Environment, Liveware and Liveware) modeli öne çıkmaktadır (Reason, 2000; Woodcock, 2013). Bu modellerin bütünleştirilmesi, hataları bireysel yetersizlikten ziyade sistemsel etkileşimlerin sonucu olarak ele alan bütüncül bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. KBRN eğitimlerinde en sık kullanılan bu üç modelin temel özellikleri, avantajları ve sınırlılıkları Tablo 1'de özetlenerek karşılaştırılmıştır.

Swiss Cheese modeli sistemsel bariyerlerdeki zafiyetlerin hata zincirine dönüşümünü açıklarken (Reason, 2000); HFACS modeli insan hatalarını kurumsal, operasyonel ve bireysel düzeyde çok katmanlı biçimde analiz etmektedir (Woodcock, 2013; Razak vd., 2023). SHELL modeli ise insan–donanım–çevre etkileşimini merkeze alarak ergonomik dengesizlikleri değerlendirmektedir (Anderson & Boddington, 2024). Üç model birlikte ele alındığında, KBRN eğitimlerinin yalnızca teknik yeterlik değil, aynı zamanda sistemsel dayanıklılık ve bilişsel farkındalık temelleri üzerine kurulması gerektiği dikkat çekmektedir.

Table 1. Comparison of human factors models used in CBRN training**Tablo 1.** KBRN eğitimlerinde kullanılan insan faktörü modellerinin karşılaştırması

Model	Odak Noktası	Avantaj	Sınırlılık	Temel Kaynak(lar)
Swiss Cheese	Sistem hataları ve bariyer zafiyetleri	Sistemsal analiz sağlaması	İnsan faktörünü dolaylı ele alması	Reason (2000)
HFACS	İnsan hatalarının çok katmanlı nedenleri	Kurumsal-bireysel hata ilişkisini açıklaması	Veri gereksiniminin yüksek olması	Woodcock (2013), Razak vd. (2023)
SHELL	İnsan-donanım-çevre etkileşimi	Ergonomik analiz ve farkındalık sağlaması	Sübjektif değerlendirme riski	Anderson & Boddington (2024)

Swiss Cheese Modeli

Reason (2000) tarafından geliştirilen Swiss Cheese modeli (çok katmanlı bariyer mantığı), güvenlik sistemlerinde birbiri ardına dizilmiş savunma katmanlarının her birinde potansiyel zafiyetlerin bulunabileceği varsayımına dayanmaktadır. Bu katmanlardaki “deliklerin” zaman içinde hizalanması, hataların zincirleme biçimde ilerlemesine neden olmaktadır (Reason, 2000). Modelin KBRN eğitimleri bağlamına uyarlanması, hata oluşumunun yalnızca bireysel düzeyde değil, eğitim müfredatı, ekipman kullanımı, çevresel stresörler ve organizasyonel yönetim gibi çoklu düzlemlerde gerçekleştiğini göstermektedir.

Kişisel koruyucu ekipman (PPE) kullanımı sırasında yaşanan hatalar, ekipman ergonomisi, yetersiz uygulamalı eğitim ve yüksek bilişsel yükün bir araya gelmesiyle ortaya çıkabilir. Anderson & Boddington (2024) PPE'nin klinik ve operasyonel performans üzerindeki bilişsel yükü artırdığını, bunun da hata oranlarını yükseltebildiğini belirtmiştir. Benzer biçimde, Lucena vd. (2026) saha koşullarında koruyucu giysi kullanımının fiziksel performansı sınırladığını ancak uygun eğitim ve standardizasyonla bu etkinin azaltılabileceğini göstermiştir.

Bu bağlamda Swiss Cheese modeli, eğitim programlarının yalnızca içerik değil süreç güvenliği odaklı biçimde yapılandırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Modelin KBRN eğitimlerinde kullanımı, hata kaynaklarını yalnızca bireysel dikkatsizlikle sınırlamadan, örgütsel ve sistemsal

düzeyde kök nedenleri tanımlamaya imkan vermektedir (Razak vd., 2023; Farhat vd., 2024).

Şekil 1 örgütsel karar hatalarından bireysel davranışlara kadar uzanan çok katmanlı bir hata zincirini temsil etmektedir. Her bir katmandaki “bariyer”, sistemdeki savunma mekanizmasını simgelemektedir. Bu savunmalardan bir veya birkaçının başarısız olması, hataların ilerlemesine ve nihai olarak kazaya neden olmaktadır.



Figure 1. Turkish adaptation of the Swiss Cheese model (Adapted from Reason (2000)).

Şekil 1. Swiss Cheese modelinin Türkçe uyarlaması (Reason (2000)'den uyarlanmıştır).

HFACS Modeli

HFACS modeli (Human Factors Analysis and Classification System: İnsan Faktörleri Analiz ve Sınıflandırma Sistemi), insan hatalarının nedenlerini dört düzeyde incelemektedir: (i) doğrudan hatalar, (ii) koşullu etkenler, (iii) denetim eksiklikleri ve (iv) örgütsel etkiler (Li vd., 2008; Diller vd., 2014). Bu yaklaşım, KBRN eğitimlerinde karşılaşılan sorunların yalnızca uygulayıcı düzeyinde değil, sistemin planlama ve yönetim boyutlarında da ortaya çıkabileceğini göstermektedir.

Nazari vd. (2023) tarafından yapılan karşılaştırmalı analiz, KBRN sağlık müdahale ekiplerinin etkinliğinin; görev tanımlarının netliği, liderlik yapısının tutarlılığı ve iletişim zincirinin açıklığıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla HFACS, hataları bireysel beceriksizlik yerine sistemsel eksikliklerin çıktısı olarak ele almaktadır. Gkikas vd. (2025), operasyonel risk değerlendirme süreçlerinde insan faktörlerine odaklanmanın güvenlik ve performansta sürdürülebilir iyileşmeler sağladığını bildirmiştir. Benzer bir mantığın KBRN operasyonel eğitimlerinde de uygulanmasının kalıntı riskin (residual risk) azaltılmasına katkı sunabileceği düşünülmektedir.

HFACS'ın KBRN eğitimlerine entegrasyonu, hataların sistematik biçimde sınıflandırılmasını, kök nedenlerin izlenmesini ve örgütsel düzeyde geri besleme mekanizmalarının kurulmasını kolaylaştıracaktır. Böylece eğitim yöneticileri, hangi aşamada ve hangi düzeyde müdahale edilmesi gerektiğini daha açık biçimde görebilecektir (Bogdan-Ioan vd., 2024; Bearman vd., 2025).

HFACS modeli, insan hatalarını dört hiyerarşik düzeyde analiz etmektedir: (i) örgütsel etkenler, (ii) güvensiz gözetim, (iii) ön koşullar ve (iv) güvensiz davranışlar. Katmanlar arasındaki nedensel ilişkiler, hataların sistematik biçimde birikerek olay veya kaza noktasına ulaşmasını açıklamaktadır. Bu çerçevede HFACS, KBRN eğitim programlarında “hata nerede oluştu?” sorusundan ziyade “bu hatayı hangi sistem bileşeni doğurdu?” sorusuna odaklanarak, öğrenen bir organizasyon yapısının oluşumuna katkı sağlamaktadır. Böylece eğitim süreçleri yalnızca bilgi aktarımı değil aynı zamanda risk farkındalığı, karar

kalitesi ve örgütsel adaptasyonun birlikte geliştirildiği dinamik bir öğrenme döngüsüne dönüşmektedir.



Figure 2. Turkish adaptation of the HFACS model (based on Wiegmann & Shappell (2001)).

Şekil 2. HFACS modelinin Türkçe uyarlaması (Wiegmann & Shappell (2001) temel alınarak hazırlanmıştır).

SHELL Modeli

SHELL modeli (Software–Hardware–Environment–Liveware–Liveware: Yazılım–Donanım–Çevre–İnsan–İnsan Etkileşimi), insan performansını belirleyen beş temel bileşenin etkileşimini açıklamaktadır: (i) yazılım (prosedürler ve talimatlar), (ii) donanım (ekipman), (iii) çevre (fiziksel ve örgütsel koşullar), (iv) birey (canlı unsur) ve (v) kişiler arası ilişkiler (Anderson & Boddington, 2024). Model, bu bileşenler arasındaki dengenin bozulmasının hata olasılığını artırdığını; özellikle KBRN eğitimlerinde ekipman tasarımı, prosedürel karmaşıklık, çevresel stresörler ve ekip içi iletişim arasındaki uyumsuzlukların sistem güvenliği üzerinde kritik etkiler yarattığını göstermektedir.

Son (2023), kişisel koruyucu donanım (PPE) uyumsuzluğunun görev performansını ve dayanıklılığı azalttığını belirtirken; Altan vd. (2022) kişisel donanımın ergonomik tasarımının polis eğitimlerinde denge ve hareket kabiliyeti üzerinde belirleyici rol oynadığını saptamıştır. Benzer biçimde,

Son (2023) afet yönetimi operasyonlarında ergonomik sınırlılıkların ve bilişsel yükün insan performansını önemli ölçüde etkilediğini vurgulamıştır.

SHELL modeli, bu tür bulguları açıklamak için uygun bir çerçeve sunmaktadır. Modelin KBRN eğitimine uygulanması, hem teknik (donanım tasarımı, PPE uyumu) hem de insani (iletişim, koordinasyon, çevresel adaptasyon) faktörlerin eşzamanlı değerlendirilmesini sağlamaktadır (Altan vd., 2022; Son, 2023; Lee, 2025; Lucena vd., 2026). Bu bütüncül bakış, eğitim programlarının yalnızca teknik yeterliliğe değil, insan-sistem etkileşiminin kalitesine odaklanmasına olanak tanımaktadır.

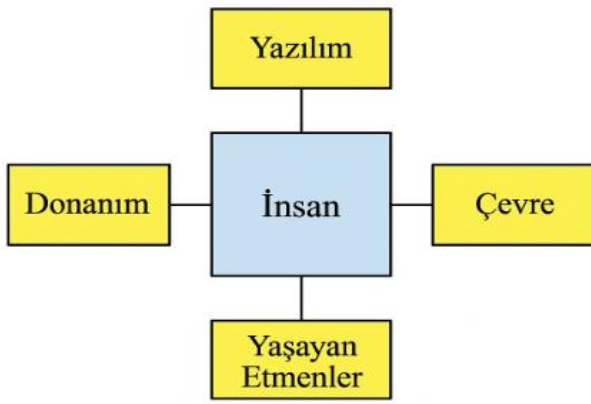


Figure 3. SHELL Model (Adapted from Hawkins (1993))

Şekil 3. SHELL Modeli (Hawkins (1993)'ten uyarlanmıştır)

SHELL modeli, insanı sistemin merkezine yerleştirerek yazılım, donanım, çevre ve diğer insan bileşenleri arasındaki etkileşimleri tanımlamaktadır. Model ayrıca insan performansını etkileyen ergonomik, çevresel ve psikososyal faktörlerin bütüncül biçimde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda SHELL modeli, KBRN eğitim sistemlerinde insan faktörleriyle ilişkili hataların kökenlerini anlamada ve eğitim tasarımlarını insan-merkezli güvenlik kültürü doğrultusunda yeniden yapılandırmada kuramsal bir temel sunmaktadır.

Modellerin Bütünleştirilmesi (Bütüncül KBRN Eğitim Yaklaşımı)

Swiss Cheese, HFACS ve SHELL modelleri, birbirini tamamlayan üç kuramsal düzlemde hata

dinamiklerini açıklamaktadır. Bu üçlü yaklaşımın bütünleştirilmesi, KBRN eğitimlerinde insan, teknoloji ve örgüt etkileşimini tekil bir çerçevede analiz etmeyi mümkün kılmaktadır.

Swiss Cheese modeli, hataların savunma bariyerlerini aşarak kazaya dönüşüm sürecini sistem düzeyinde tanımlamaktadır. HFACS modeli, bu süreçteki neden-sonuç ilişkilerini hiyerarşik bir yapı içinde sınıflandırarak, hataların yalnızca bireysel değil kurumsal kökenlerini de ortaya koymaktadır. SHELL modeli ise insanın sistem içindeki konumunu, kullandığı donanım, yazılım, çevre koşulları ve diğer bireylerle olan etkileşimleriyle birlikte analiz etmektedir (Hawkins, 1993; Reason, 2000).

Bu bütüncül yapı, KBRN eğitimlerinin yalnızca bilgi aktarımı odaklı değil aynı zamanda davranışsal adaptasyon, bilişsel yük yönetimi ve sistem güvenliği farkındalığı boyutlarını içeren çok katmanlı bir öğrenme süreci olarak tasarlanmasını sağlamaktadır. Böylece eğitim müfredatları, insan hatalarını azaltmanın ötesinde, örgütsel öğrenme, iletişim zinciri yönetimi ve operasyonel koordinasyon gibi üst düzey performans bileşenlerini de güçlendirmektedir (Razak vd., 2023; Bearman vd., 2025).

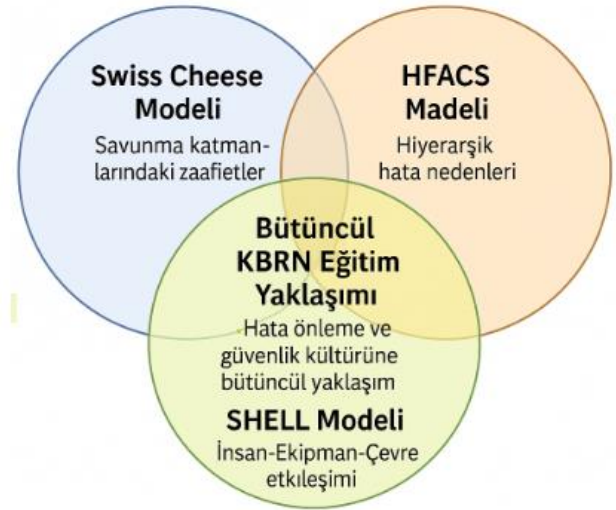


Figure 4. Holistic CBRN training approach: Swiss Cheese–HFACS–SHELL integration

Şekil 4. Bütüncül KBRN eğitim yaklaşımı: Swiss Cheese–HFACS–SHELL entegrasyonu

Şekil 4 üç modelin etkileşimini temsil etmektedir. Swiss Cheese modeli sistemdeki bariyer zayıflıklarını, HFACS modeli hataların hiyerarşik nedenlerini, SHELL modeli ise insan-ekipman-çevre etkileşimini

göstermektedir. Bu üç bileşenin birleşimi, KBRN eğitimlerinde bütüncül bir hata önleme ve güvenlik kültürü yaklaşımı oluşturmaktadır. Bu entegrasyon, KBRN eğitimlerinde kullanılan geleneksel teknik öğretim modellerinden farklı olarak, insan faktörleri temelli risk değerlendirme ve örgütsel geri bildirim mekanizmalarını eğitim tasarımına doğrudan entegre etmektedir. Aynı zamanda dijital teknolojilerin (örneğin yapay zeka destekli karar sistemleri ve sanal gerçeklik tabanlı simülasyonlar) kullanımıyla öğrenme ortamlarının dinamik olarak izlenmesine olanak tanımaktadır (Kegyes vd., 2024; Malizia vd., 2025).

Bu çalışmada önerilen bütüncül model yaklaşımı KBRN eğitimlerinde güvenlik kültürünün sürdürülebilir biçimde güçlendirilmesi, hataların sistematik olarak izlenmesi ve insan performansının ölçülebilir biçimde optimize edilmesi için kuramsal ve pratik bir çerçeve sunmaktadır. Bu yapı, gelecekteki KBRN eğitim müfredatlarının yeniden yapılandırılmasında referans bir model olarak değerlendirilebilir.

Kuramsal entegrasyonun temel amacı, insan hatasını bireysel başarısızlık değil öğrenilebilir bir sistem çıktısı olarak değerlendirmektir (Shabani vd., 2024). KBRN eğitimlerinde bu anlayış, güvenlik yönetiminden eğitim stratejilerine kadar tüm süreçlerin yeniden yapılandırılmasına zemin hazırlamaktadır. Modelin çok katmanlı yapısı, insan faktörlerinin ölçülebilir hale getirilmesini, hataların önleyici biçimde analiz edilmesini ve gelecekteki eğitim politikalarına sistematik veri sağlamayı mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşımla geliştirilen eğitimler, yalnızca bilgi aktarımını değil güvenli davranışın içselleştirilmesini de hedefleyen dinamik bir öğrenme ortamı yaratmaktadır. Swiss Cheese, HFACS ve SHELL modellerinin bütünleşik biçimde uygulanması KBRN eğitimlerinde hata analizine dayalı kalite güvencesi sistemlerinin geliştirilmesine ve insan merkezli güvenlik kültürünün yerleşmesine bilimsel temel sağlamaktadır.

TARTIŞMA

KBRN eğitimleri, yüksek riskli ortamlarda görev yapan personelin yalnızca teknik becerilerini değil

aynı zamanda stres altında karar verme, ekip içi koordinasyon ve durumsal farkındalık gibi bilişsel yetkinliklerini geliştirmeyi hedefleyen çok katmanlı süreçlerdir. Bu süreçlerin başarısı, eğitimin içeriğinden ziyade insan-sistem etkileşimini ne ölçüde doğru biçimde modelleyebildiğine bağlıdır (Farhat vd., 2024). Özellikle insan faktörlerinin, operasyonel performansın hem belirleyicisi hem de sınırlayıcısı olduğu gösterilmiştir (Giaume vd., 2024). Bu bağlamda, literatürde tanımlanan üç temel kuramsal modelin (Swiss Cheese, HFACS ve SHELL) birlikte yorumlanması, KBRN eğitimlerinde hata oluşum mekanizmalarının çok düzeyli analizine olanak tanımaktadır (Hawkins, 1993; Reason, 2000; Wiegmann & Shappell, 2001).

Swiss Cheese modeli, hataların çok katmanlı savunma sistemleri içindeki zayıf halkalar aracılığıyla zincirleme biçimde ilerleyebileceğini göstermektedir. Ancak bu model, hataların neden bu zayıflıkların oluştuğuna dair kök nedenleri açıklamakta sınırlıdır. Bu noktada HFACS modeli, bireysel davranışlardan örgütsel süreçlere kadar uzanan bir nedensellik zincirini tanımlayarak eğitim ortamlarında ortaya çıkan hataların sistemsel kökenlerini analiz etmeye olanak tanımaktadır. Böylece, KBRN eğitimlerinde hataların sınıflandırılmasında Swiss Cheese modelinin ardından HFACS modelinin kullanılması bütüncül bir değerlendirme sağlamaktadır.

KBRN eğitimlerinin başarısızlık nedenleri çoğunlukla bireysel hatalarla açıklanmakta; ancak HFACS modeline göre bu hatalar, denetim eksiklikleri, yetersiz kaynak tahsisi, iletişim sorunları ve örgütsel kültür gibi üst düzey faktörlerin sonucudur (Wiegmann & Shappell, 2001). Nazari vd. (2023) saha düzeyinde karşılaşılan hataların büyük bölümünün açık görev tanımları ve liderlik yapısı eksikliğinden kaynaklandığını göstermektedir. Bu durum, eğitim süreçlerinin yalnızca uygulayıcı odaklı değil sistemsel olarak tasarlanması gerektiğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, SHELL modeli insan-ekipman-çevre etkileşimini merkeze alarak ergonomik uygunluk ve psikolojik dayanıklılığın performans üzerindeki etkilerini açıklamaktadır (Hawkins, 1993). Anderson & Boddington (2024) ile Son (2023) kişisel koruyucu ekipman kullanımının bilişsel yük ve hareket kısıtlaması yarattığını; bu

nedenle hataların çoğu zaman çevresel stresörlerle ilişkili olduğunu belirtmiştir. Gkikas vd. (2025) kişisel koruyucu ekipman kullanımında fizyolojik yükün önceden öngörülebilmesi için geliştirdikleri modellerin eğitim planlamasında performans tahmini amacıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlar, SHELL modelinin eğitim tasarımı ergonomik ve bilişsel bileşenleri dengelemede etkili bir araç olduğunu kanıtlar niteliktedir.

Swiss Cheese modeli, hataların sistemin çoklu bariyerleri arasındaki boşluklardan sızma eğilimini açıklayarak eğitim sürecinin yalnızca bireysel değil yapısal zayıflıklarını da görünür kılmaktadır (Reason, 2000). Özellikle KBRN gibi karmaşık görevlerde bariyerlerin yalnızca teknik önlemlerle değil davranışsal ve örgütsel katmanlarla da desteklenmesi gereklidir (Malizia vd., 2025). Rimpler-Schmid vd. (2021) Avrupa Birliği KBRN hazırlık politikalarının çoğunda sistemsel güvenlik katmanlarının eksik tanımlandığını, bu nedenle riskin yalnızca bireysel düzeyde değerlendirildiğini vurgulamıştır. Bu eksiklik, eğitimlerin risk analizinden ziyade prosedür tekrarına indirgenmesine yol açmaktadır. Swiss Cheese modelinin KBRN bağlamında uygulanması, bu eğilimi kırarak hataları önleyici bir öğrenme kültürü geliştirmeye katkı sağlamaktadır. Son yıllarda, teknolojik yeniliklerin bu kuramsal yaklaşımlarla bütünleştirilmesi KBRN eğitimlerinde önemli fırsatlar yaratmıştır. Güncel literatürde KBRN eğitiminde kullanılan teknolojik yaklaşımlar Tablo 2’de özetlenmiştir.

Regal vd. (2023) VR tabanlı eğitim çalışmalarının senaryo tekrarının bilişsel yükü azalttığını ve hata farkındalığını artırdığını belirtmiştir. Benzer biçimde, Kegyes vd. (2024) makine öğrenmesi tabanlı karar destek sistemlerinin KBRN koruma görevlerinde riski azaltabileceğini bildirmiştir. Bu bulgular, KBRN önleme ve koruma misyonları için karar destek modeliyle uyumludur (Nemeth vd., 2024). Sistem, eğitim sırasında toplanan sensör verilerini kullanarak bilişsel yük ve karar karmaşıklığı arasında denge kurmayı amaçlamaktadır. Hancko vd. (2025) ise VR, AR ve XR sistemlerinin KBRN eğitimlerinde psikolojik stresin ölçülmesinde ve dayanıklılık geliştirilmesinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, dijital teknolojilerin yalnızca simülasyon değil aynı zamanda insan performansını izleme ve optimize etme araçları olarak işlev görebileceğini göstermektedir.

KBRN eğitimlerinin etkinliği aynı zamanda güvenlik kültürünün kurumsallaşma düzeyiyle de ilişkilidir. Abari vd. (2024) örgütsel güvenlik kültürünün, acil durum eğitimlerinin sürdürülebilirliği ve standardizasyonu için temel belirleyici olduğunu ileri sürmüştür. Benzer biçimde, Farhat vd. (2024) afet yönetimi perspektifinden inceledikleri KBRN hazırlık sistemlerinde, eğitim stratejilerinin çoğunun kısa dönemli ve reaktif olduğunu; uzun vadeli davranış değişikliğine odaklanmadığını saptamıştır. Bu bağlamda önerilen entegre KBRN eğitim modeli, sadece bireysel performans geliştirmeyi değil, örgütsel düzeyde öğrenen bir güvenlik kültürünün inşasını hedeflemektedir.

Table 2. Technological approaches used in CBRN education in current literature

Tablo 2. Güncel literatürde KBRN eğitiminde kullanılan teknolojik yaklaşımlar

Teknoloji	Kullanım Alanı	Uygulama Örneği	Temel Kaynak(lar)
Sanal Gerçeklik (VR)	Senaryo temelli eğitim	Gerçek zamanlı simülasyon	Regal vd. (2023)
Artırılmış Gerçeklik (AR/XR)	Psikolojik stres ölçümü	Karma ortam dayanıklılığı	Hancko vd. (2025)
Makine Öğrenmesi	Karar destek sistemi	Risk öngörüsü ve hata analizi	Kegyes vd. (2024)
Yapay Zeka Sensörleri	Fizyolojik veri takibi	Bilişsel yük ölçümü	Gkikas vd. (2025)
Exoskeleton Sistemleri	Fiziksel destek ve ergonomi	Performans artırımı	Schubert & Weidner (2025)

Çalışmada tespit edilen bulgular, KBRN eğitimlerinin geleceğinde üç temel yönelime işaret etmektedir:

- (i) İnsan faktörlerinin ölçülebilir hale getirilmesi,
- (ii) Teknoloji destekli öğrenme ortamlarının kurumsal sistemlerle bütünleştirilmesi,
- (iii) Risk yönetimi ve ergonominin eğitim müfredatının çekirdeğine yerleştirilmesi.

Bu çerçevede, Swiss Cheese, HFACS ve SHELL modellerinin entegrasyonu yalnızca teorik bir sentez değil aynı zamanda sahada uygulanabilir bir değerlendirme aracı olarak önerilmektedir. Entegre yaklaşım, hem insan performansına dayalı risk azaltımını mümkün kılmakta hem de karar destek sistemleriyle bütünleştiğinde sürdürülebilir güvenlik kültürünün temellerini güçlendirmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, KBRN eğitimlerinde insan faktörlerinin ergonomik koşulların ve sistemsel etkileşimlerin bütüncül biçimde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Literatür ve model analizleri, hata oluşumunun yalnızca bireysel yetersizliklerle açıklanamayacağını; organizasyonel süreçler, çevresel koşullar ve teknolojik faktörlerin de belirleyici rol oynadığını göstermektedir (Nazari vd., 2023; Farhat vd., 2024). Özellikle Swiss Cheese, HFACS ve SHELL modellerinin bütünleştirilmesiyle geliştirilen entegre KBRN eğitim modeli, hata analizini çok düzeyli bir yapı içinde ele alarak sistem güvenliğini insan performansının ayrılmaz bir parçası haline getirmiştir.

Araştırma sonuçları, KBRN eğitimlerinin etkililiğinin yalnızca bilgi aktarımı veya prosedürel tekrarlarla sınırlı kalmaması gerektiğini; bunun yerine bilişsel yük yönetimi, karar destek mekanizmaları ve ergonomik optimizasyonun birlikte ele alınmasının zorunlu olduğunu göstermektedir (Son, 2023; Anderson & Boddington, 2024). Özellikle PPE kullanımına ilişkin ergonomik zorluklar, görev süresince artan fiziksel ve bilişsel yük nedeniyle operasyonel hataların temel kaynağı haline gelebilmektedir (Gkikas vd., 2025; Lucena vd., 2026). Eğitim süreçlerinde bu faktörlerin ölçülebilir biçimde

izlenmesi, performans düşüşlerinin erken tespit edilmesini ve önleyici müdahalelerin uygulanmasını kolaylaştıracaktır.

Çalışmanın bir diğer önemli bulgusu, teknolojik araçların KBRN eğitimlerinde yalnızca simülasyon değil aynı zamanda ölçme-değerlendirme ve geribildirim sistemi olarak kullanılabileceğini ortaya koymasındır. Sanal gerçeklik (VR) ve karma gerçeklik (XR) uygulamaları, eğitimi güvenli bir laboratuvar ortamına dönüştürürken; makine öğrenmesi ve karar destek sistemleri, performans verilerinin nesnel biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır (Regal vd., 2023; Kegyes vd., 2024; Nemeth vd., 2024). Bu teknolojilerin, SHELL modelinde tanımlanan insan-donanım etkileşimi boyutuna entegre edilmesi hem bireysel öğrenme hızını artırmakta hem de hataların kök neden analizini kolaylaştırmaktadır.

KBRN eğitimlerinde sistem güvenliği kadar örgütsel güvenlik kültürünün güçlendirilmesi de gerekmektedir. HFACS ve Swiss Cheese modelleri, hataların önlenmesinde yalnızca bireylerin değil kurumların da sorumluluk taşıdığını vurgulamaktadır (Zavila, 2025). Bu nedenle kurumların standart operasyon prosedürlerini, liderlik yapısını ve iletişim zincirini açık biçimde tanımlaması, eğitim çıktılarının sürekliliği için kritik önem taşımaktadır (Rimpler-Schmid vd., 2021; Abari vd., 2024). Eğitim programları, yalnızca olay tepkisi değil aynı zamanda öğrenen organizasyon yapısının inşası amacıyla tasarlanmalıdır.

Sonuç olarak, bu çalışma KBRN eğitimlerinde disiplinler arası bir yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır. İnsan faktörleri, ergonomi, psikoloji ve sistem mühendisliği temelli modellerin entegrasyonu, gelecekte KBRN hazırlık stratejilerinin bilimsel temelini oluşturacaktır. Bu çerçevede üç temel öneri geliştirilebilir:

- *Model temelli eğitim sistemleri:* Swiss Cheese, HFACS ve SHELL modelleri entegre edilerek hata önleme odaklı ve davranış temelli müfredatlar geliştirilmelidir.
- *Veri temelli karar destek araçları:* Yapay zeka tabanlı izleme ve analiz sistemleri, eğitim performansını nesnel biçimde

değerlendirmek için etkin biçimde kullanılmalıdır.

- *Sürdürülebilir güvenlik kültürü*: Eğitimler, bireysel becerilerin ötesinde, kurumsal öğrenme kapasitesini ve davranışsal güvenliği kalıcı biçimde güçlendirmelidir.

Bu bütüncül yaklaşım, KBRN eğitimlerinin yalnızca reaktif değil öngörülü ve dayanıklı sistemlere dönüşmesine katkı sağlayacaktır. Böylelikle gelecekteki KBRN olaylarına müdahalelerde hem bireysel hem de kurumsal düzeyde daha yüksek bir hazırlık ve güvenlik standardı oluşturulabilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında bilimsel bilgi ve tecrübeleriyle bize rehberlik eden, araştırma sürecinin her aşamasında değerli katkılarını esirgemeyen İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü KBRN Anabilim Dalı'nın değerli akademik ve idari personeline şükranlarımızı sunarız. Bu süreçte doğrudan ya da dolaylı olarak katkı sağlayan tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederiz.

Etik Standartlara Uygunluk

Yazar Katkısı

AÖ: Kavramsallaştırma, Gözetim ve denetim, Yöntem geliştirme, Doğrulama, Biçimsel analiz, Veri küratörlüğü

AÇ: Araştırma, Materyal sağlama, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak hazırlama, Yazma – inceleme ve düzenleme

Tüm yazarlar makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Etik Onay

Yazarlar bu çalışma için resmi etik kurul onayının gerekli olmadığını bildirmektedir.

Finansal Destek

Yazarlar bu çalışma için herhangi bir finansal destek almadıklarını bildirmektedir.

Veri Kullanılabilirliği

Yazarlar bu çalışmanın bulgularını destekleyen verilerin makale içinde mevcut olduğunu onaylamaktadır.

Yapay Zeka Açıklaması

Bu makalenin yazım ve revizyon sürecinde, yalnızca dilbilgisi kontrolü, biçimsel düzenleme ve kaynak doğrulama amaçlarıyla yapay zeka destekli metin denetim araçlarından (örneğin ChatGPT) yararlanılmıştır. Bilimsel içerik, yorumlama, sonuç ve öneriler tamamen yazarlar tarafından geliştirilmiştir. Yapay zeka araçları, veri üretimi, literatür analizi veya özgün bulgu oluşturma süreçlerinde kullanılmamıştır.

KAYNAKLAR

- Abari, J. B., Cortez, R. O. F., & Sario, J. A. (2024). Safety culture of approved training organizations: Basis for an emergency response plan manual. *SIBATIK Journal: Jurnal Ilmiah Bidang Sosial, Ekonomi, Budaya, Teknologi, dan Pendidikan*, 3(7), 817–918.
- Altan, B., Güner, S., Alsamarei, A., Demir, D. K., Düzgün, H. Ş., Erkayaoğlu, M., & Surer, E. (2022). Developing serious games for CBRN-e training in mixed reality, virtual reality, and computer-based environments. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77, 103022. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103022>
- Anderson, T., & Boddington, C. (2024). A mixed methods descriptive literature review assessing the effects of CBRN personal protective equipment on human factors and clinical skills. *Journal of High Threat & Austere Medicine*, 6(2), 2–10.
- Bearman, C., Hayes, P., Kuhn, M., Penney, G., McLennan, J., Butler, P., & Flin, R. (2025). *The current state and future needs of decision making: Knowledge, practice, tools and training options. Technical Report*. Natural Hazards Research Australia (NHRA) Report No.44.2025. Natural Hazards Research Australia.

- Bogdan-Ioan, V., Min, P., Valentin-Teodor, A., & Alexandru Octavian, P. (2024). Scientific and evidence-based support in emergency preparedness and resilience strengthening, under volatility and uncertainty. In F. C. Cirstoiu, V. Juc, C. Pop, P. Min & C. Barna (Eds.), *Medical Response strategy in case of radiation emergency caused by the war in Ukraine*. NATO 2023. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics (pp 139–149). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2266-5_14
- Diller, T., Helmrich, G., Dunning, S., Cox, S., Buchanan, A., & Shappel, S. (2014). The Human Factors Analysis Classification System (HFACS) applied to health care. *American Journal of Medical Quality*, 29(3), 181–190. <https://doi.org/10.1177/1062860613491623>
- Farhat, H., Alinier, G., Chaabna, K., El Aifa, K., Abougalala, W., Loughton, J., & Ben Dhiab, M. (2024). Preparedness and emergency response strategies for chemical, biological, radiological and nuclear emergencies in disaster management: A qualitative systematic review. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 32(3), e12592. <https://doi.org/10.1111/1468-5973.12592>
- Giaume, L., Le Roy, B., Daniel, Y., Lauga Cami, H., Jost, D., Travers, S., & Trousselard, M. (2024). Psychological, cognitive, and physiological impact of hazards casualties' trainings on first responders: The example of a chemical and radiological training. An exploratory study. *Frontiers in Psychology*, 15, 1336701. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1336701>
- Gkikas, G. K., Papangelis, G., Mantzios, K., Ioannou, L. G., & Flouris, A. D. (2025). Validation and enhancement of two predictive models evaluating physiological strain during physical work while wearing personal protective equipment. *Industrial Health*, 2025-0088. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2025-0088>
- Hancko, D., Majlingova, A., & Kačíková, D. (2025). Integrating virtual reality, augmented reality, mixed reality, extended reality, and simulation-based systems into fire and rescue service training: Current practices and future directions. *Fire*, 8(6), 228. <https://doi.org/10.3390/fire8060228>
- Hawkins, F. H. (1993). *Human factors in flight* (Edited by H. W. Orlady) (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781351218580>
- Kegyes, T., Süle, Z., & Abonyi, J. (2024). Machine learning-based decision support framework for CBRN protection. *Heliyon*, 10(4), e25946. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25946>
- Lee, H. (2025). Integration of wearable sensing and human recognition functions in smart safety workwear: Enhancing worker protection in construction sites. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 37(3), 604-625. <https://doi.org/10.1108/IJCST-01-2025-0019>
- Li, W. C., Harris, D., & Yu, C. S. (2008). Routes to failure: Analysis of 41 civil aviation accidents from the Republic of China using the human factors analysis and classification system. *Accident Analysis & Prevention*, 40(2), 426-434. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.07.011>
- Lucena, R., Almeida, N., & Simões, P. (2026). Physiological impact of personal protective equipment in distinct thermal environments. In O. Gervasi, B. Murgante, C. Garau, Y. Karaca, M. N. F. Lago, F. Scorza & A. C. Braga (Eds.), *Computational science and its applications – ICCSA 2025 Workshops. ICCSA 2025. Lecture Notes in Computer Science, vol 15888*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97596-7_7
- Malizia, A., McGovern, J., Sarigiannis, D., Karakitsios, S., Anastas, P. T., Ludovici, G. M., Manenti, G., & Vasiliou, V. (2025). Integrating the exposome framework in CBRNe risk assessment: A holistic approach to chemical, biological, radiological, nuclear, and explosive threats. *The European Physical Journal Plus*, 140, 1103. <https://doi.org/10.1140/epip/s13360-025-07030-4>

- Nazari, S., Sharififar, S., Marzaleh, M. A., Zargar, S., Azarmi, S., & Shahrestanaki, Y. A. (2023). Structural elements and requirements in forming prehospital health response teams in response to chemical, biological, radiation, and nuclear incidents (CBRN): A comparative review study. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 17, e300. <https://doi.org/10.1017/dmp.2022.259>
- Nemeth, C., Sedehi, J., Rule, G., Di Pietrantonio, J., Laufersweiler, D., Keeney, N., & Clark, R. (2024). Decision support for CBRN avoid and protect missions. *Cognition, Technology & Work*, 26, 375–384. <https://doi.org/10.1007/s10111-024-00767-5>
- Qzih, E. S., & Ahmad, M. M. (2024). Hospital-based preparedness measures for CBRNE disasters: A systematic review. *Environmental Health Insights*, 18, 1-12. <https://doi.org/10.1177/11786302241288859>
- Razak, S., Hignett, S., Barnes, J., & Hancox, G. (2023). The standardization of the emergency department response to chemical, biological, radiological, and nuclear (CBRN) events: Human factors/ergonomics approach. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 17, e487. <https://doi.org/10.1017/dmp.2023.148>
- Reason, J. (2000). Human error: Models and management. *BMJ*, 320(7237), 768–770. <https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768>
- Regal, G., Pretolesi, D., Schrom-Feiertag, H., Puthenkalam, J., Migliorini, M., De Maio, E., Scarrone, F., Nadalin, M., Guarneri, M., Xerri, G. P., Di Giovanni, D., Tessari, P., Genna, F., D'Angelo, A., & Murtinger, M. (2023). Challenges in virtual reality training for CBRN events. *Multimodal Technologies and Interaction*, 7(9), 88. <https://doi.org/10.3390/mti7090088>
- Rimpler-Schmid, A., Trapp, R., Leonard, S., Kaunert, C., Dubucq, Y., Lefebvre, C., & Mohn, H. (2021). *EU preparedness and responses to chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) threats*. Policy Department for External Relations Directorate General for External Policies of the Union. Retrieved on March 8, 2024, from [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EXPO_STU\(2021\)653645](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EXPO_STU(2021)653645)
- Schubert, T., & Weidner, R. (2025). Physical support of soldiers during CBRN scenarios with exoskeletons. *Applied Sciences*, 15(19), 10763. <https://doi.org/10.3390/app151910763>
- Shabani, T., Jerie, S., & Shabani, T. (2024). A comprehensive review of the Swiss cheese model in risk management. *Safety in Extreme Environments*, 6, 43–57. <https://doi.org/10.1007/s42797-023-00091-7>
- Son, C. (2023). Disaster ergonomics: A human factors approach to address escalating challenges from disasters. *Cognition, Technology & Work*, 25, 325–344. <https://doi.org/10.1007/s10111-023-00736-4>
- Wiegmann, D. A., & Shappell, S. A. (2001). Human error analysis of commercial aviation accidents: Application of the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS). *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 72(11), 1006–1016.
- Woodcock, W., & Au, Z. (2013). Human factors issues in the management of emergency response at high hazard installations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(3), 547–557. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.07.002>
- Zavila, O. (2025). Human factors analysis and classification system-positive experience (HFACS-PE): New approaches to aviation accident and incident investigation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 94, 105578. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105578>