



**Alınış tarihi (Received):** 15.05.2025

**Kabul tarihi (Accepted):** 04.11.2025

## **21. Yüzyıl Kimya Laboratuvarında Güvenlik Paradigması: Proaktif Stratejiler, Dijital Dönüşüm ve İnsan Odaklı Yaklaşımlar**

**Yakup BUDAK<sup>1,\*</sup>, Meliha Burcu GÜRDERE<sup>1</sup>, Mustafa CEYLAN<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, TÜRKİYE

\*Sorumlu yazar:ybudak74@hotmail.com

**ÖZET:** Bu derleme, 21. yüzyıl kimya laboratuvarlarında iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki paradigma değişimini ele almaktadır. Geleneksel reaktif yaklaşımların yerini alan proaktif stratejiler, dijital dönüşümün getirdiği yenilikler ve insan odaklı güvenlik kültürü uygulamaları merkeze alınmıştır. Makale, nanomalzemeler gibi yeni nesil tehlikelerden başlayarak, risk yönetimindeki evrimi, otomasyon ve akıllı laboratuvar teknolojilerini, giyilebilir sensörleri, yapay zeka destekli öngörücü güvenlik sistemlerini ve sanal/artırılmış gerçeklik tabanlı eğitimleri detaylı bir şekilde incelemektedir. Özellikle kimya öğrencilerinin ve genç araştırmacıların İSG bilincinin artırılması, müfredat entegrasyonu, insan faktörleri ve davranışsal güvenlik konuları vurgulanmaktadır. İSG'nin yeşil kimya ve sürdürülebilirlik prensipleriyle kesişimi, gelecekteki araştırma yönelimleri, teknolojik atılımlar ve politika önerileri de sunulmaktadır. Derleme, geleceğin kimyagerlerine güvenlik elçileri ve değişim liderleri olmaları yönünde bir çağrı yaparak, İSG alanındaki potansiyel kariyer fırsatlarına dikkat çekmektedir. Temel argüman, güçlü bir İSG çerçevesinin bilimsel inovasyonun temel bir katalizörü olduğu ve en güvenli laboratuvarın bilinçli, sorgulayan ve güvenliği bir yaşam biçimi olarak benimsemiş bireylerle mümkün olacağıdır.

**Anahtar Kelimeler** – Laboratuvar Güvenliği, Risk Yönetimi, Kimya Eğitimi, Akıllı Laboratuvar, Güvenlik Kültürü, Proaktif Güvenlik, Dijital Dönüşüm, İnsan Faktörleri

## **Safety Paradigm in 21st Century Chemistry Laboratories: Proactive Strategies, Digital Transformation, and Human-Centered Approaches**

**ABSTRACT:** This review addresses the paradigm shift in occupational health and safety (OHS) in 21st-century chemistry laboratories. Proactive strategies, innovations brought by digital transformation, and human-centered safety culture practices have replaced traditional reactive approaches. The article provides a detailed examination of the evolution of risk management, automation, innovative laboratory technologies, wearable sensors, AI-driven safety systems, and virtual/augmented reality-based training, starting with new-generation hazards such as nanomaterials. Particular emphasis is placed on raising OSH awareness among chemistry students and young researchers, curriculum integration, human factors, and behavioral safety issues. The intersection of OSH with green chemistry and sustainability principles, future research directions, technological advances, and policy recommendations is also presented. The review calls on future chemists to become safety ambassadors and change leaders, highlighting potential career opportunities in the field of OSH. The central argument is that a strong OSH framework is a fundamental catalyst for scientific innovation. The safest laboratory is one where individuals are conscious, inquisitive, and have adopted safety as a way of life.

**Keywords** – Laboratory Safety, Risk Management, Chemistry Education, Smart Laboratory, Safety Culture, Proactive Safety, Digital Transformation, Human Factors

## 1. Giriş: Güvenli Keşiflerin Temeli ve Geleceğin Kimyagerlerine Mesaj

### 1.1. Kimyanın İki Yüzü: İnovasyonun Kalbindeki Risk ve Sorumluluk

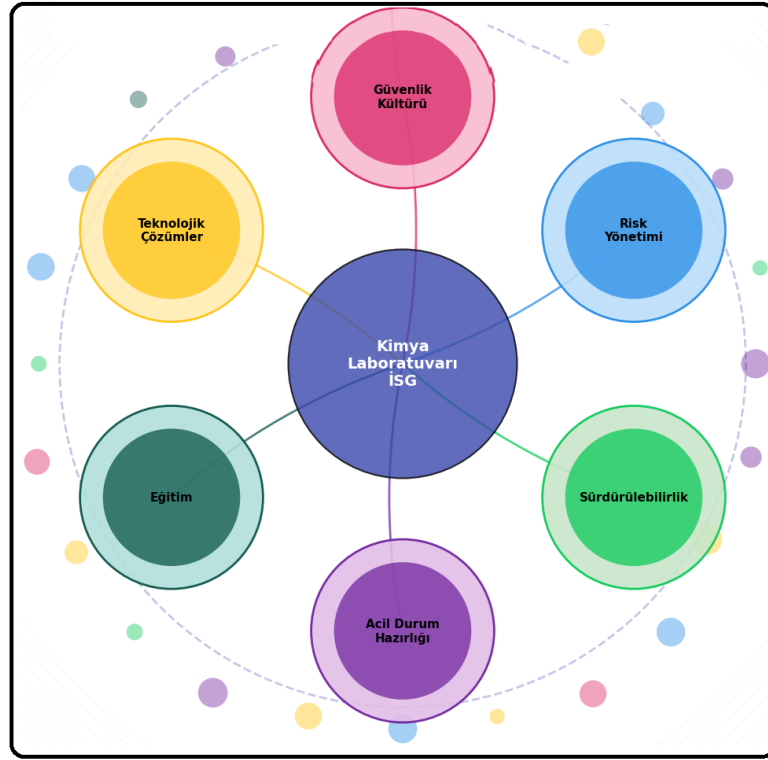
Kimya laboratuvarları, insanlığın karşılaştığı büyük zorluklara çözüm arayışında, yeni ilaçların keşfinden sürdürülebilir materyallerin geliştirilmesine kadar uzanan bilimsel atılımların ve teknolojik yeniliklerin kalbi konumundadır. Ancak bu inovasyon arayışı, doğası gereği çeşitli riskleri de beraberinde getirir. Kullanılan kimyasalların toksik, yanıcı, patlayıcı veya korozif özellikleri, yüksek enerjili prosesler ve karmaşık ekipmanlar, laboratuvar ortamını potansiyel tehlikelerle dolu bir alan haline getirebilir. Tarih boyunca, Marie Curie'nin radyoaktivite çalışmaları ve kişisel maruziyeti gibi örnekler, bilimsel ilerlemenin bazen ne denli büyük fedakarlıklar ve farkındalık eksiklikleri üzerinden şekillenebildiğini göstermiştir (Mould, 1993). Bu nedenle, 21. yüzyılda kimya alanında çalışacak her bireyin, özellikle de kariyerlerinin başındaki öğrencilerin ve genç araştırmacıların, inovasyonun heyecanıyla güvenlik sorumluluğunu dengeli bir şekilde taşıması hayati önem taşımaktadır.

### 1.2. Neden Bu Derleme? Literatürdeki Boşluk ve Özgün Yaklaşımımız

Mevcut iş sağlığı ve güvenliği (İSG) literatürü, genellikle kural setleri, standart operasyon prosedürleri (SOP'ler) ve kaza analizleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu derleme ise, bu temellerin ötesine geçerek, kimya laboratuvarlarında İSG'ye yönelik proaktif, öngörücü ve teknoloji entegreli bir güvenlik paradigmasını ele almayı amaçlamaktadır. Özgün yaklaşımımız, İSG'yi sadece uyulması gereken bir zorunluluklar listesi olarak sunmak yerine, özellikle geleceğin kimyagerleri olan öğrencilerin ve genç araştırmacıların güvenlik konularında eleştirel düşünme, problem çözme ve liderlik becerilerini geliştirmelerine odaklanmaktadır. Gelişen teknolojiler-nanomalzemelerin artan kullanımı (Nyström ve ark., 2012), sentetik biyoloji ile kimyanın kesiştiği alanlardaki yeni riskler ve yapay zeka destekli kimyasal sentez platformları İSG alanına yeni ve karmaşık boyutlar getirmektedir. Bu derleme, bu yeni boyutları da kapsayarak, literatürdeki boşluğu doldurmayı ve kimya laboratuvarlarında güvenli bir çalışma ortamının oluşturulması ve sürdürülmesine yönelik güncel ve ileriye dönük bir perspektif sunmayı hedeflemektedir.

### 1.3. Derlemenin Amacı, Kapsamı ve Yol Haritası

Bu derlemenin temel amacı, kimya laboratuvarlarında İSG konusunda mevcut en iyi uygulamaları, karşılaşılan zorlukları ve gelecekteki yenilikçi yaklaşımları eleştirel bir bakış açısıyla sentezleyerek, özellikle genç kimyagerlere yönelik kapsamlı bir rehber sunmaktır. Kapsamımız, akademik ve endüstriyel araştırma laboratuvarlarını, temel kimyasal, fiziksel, biyolojik (kimya ile kesişen alanlarda) ve ergonomik riskleri, risk yönetimi metodolojilerini, güvenlik kültürü oluşturma stratejilerini, acil durum hazırlığını, teknolojik yeniliklerin İSG'ye entegrasyonunu ve sürdürülebilirlik ile İSG ilişkisini içermektedir. Makale, öncelikle derleme metodolojisini açıklayacak, ardından ana tematik bölümler altında tehlike tanımlama, risk yönetimi, güvenlik kültürü, acil durum yönetimi ve sürdürülebilirlik konularını derinlemesine inceleyecektir. Daha sonra, literatürdeki ana akımlar, tartışmalı alanlar ve bilgi boşlukları eleştirel bir değerlendirmeye tabi tutulacak, son olarak da gelecek perspektifleri, araştırma önerileri ve politika tavsiyeleri sunulacak, bilimin vicdanı olarak güvenliğin önemi vurgulanacaktır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, modern bir kimya laboratuvarında İSG yönetimi, birbiriyle dinamik etkileşim halinde olan altı temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler, bütünsel bir güvenlik yaklaşımının temelini oluşturmaktadır.



**Şekil 1.** Modern Kimya Laboratuvarında İSG'nin Temel Prensipleri  
**Figure 1.** Basic Principles of ISG in Modern Chemistry Laboratories

## 2. Derleme Metodolojisi: Bilginin İzinde Sistematiik Bir Yaklaşım

Bu derleme makalesi, kimya laboratuvarlarında iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki güncel durumu, yenilikçi yaklaşımları ve gelecekteki eğilimleri analiz etmek amacıyla kapsamlı ve sistematiik bir literatür taramasına dayanmaktadır.

### 2.1. Literatür Tarama Stratejisi

Literatür taraması, Scopus, Web of Science, PubMed, ACS Publications, RSC Publishing, Wiley Online Library ve Google Scholar gibi başlıca bilimsel veritabanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarama sürecinde "chemistry laboratory safety," "chemical hazard management," "lab risk assessment," "emerging risks in chemistry labs," "nanomaterial safety," "laboratory automation safety," "safety culture in academia," "green chemistry and safety," "chemical lab incidents," "OHS in chemical research," "smart lab safety," "AI in lab safety," "human factors in laboratory safety" gibi anahtar kelimeler ve bunların çeşitli kombinasyonları kullanılmıştır. Tarama, özellikle son 10-15 yıl (yaklaşık 2009-2024) içerisinde yayınlanmış çalışmalara odaklanmakla birlikte, alandaki temel ve çığır açıcı kabul edilen daha eski yayınlar da teorik altyapıyı güçlendirmek amacıyla dâhil edilmiştir.

### 2.2. Dahil Etme ve Hariç Tutma Kriterleri

Dahil etme kriterleri arasında, çalışmaların hakemli dergilerde yayınlanmış araştırma makaleleri, kapsamlı derlemeler, önemli vaka analizleri, yenilikçi güvenlik teknolojilerini

veya yaklaşımlarını tanımlayan çalışmalar ve uluslararası İSG kuruluşlarının (örneğin ILO, WHO, OSHA, EU-OSHA) güncel raporları ve kılavuzları yer almıştır. Özellikle, Q1 ve Q2 gibi yüksek etki faktörlü dergilerde yayınlanmış, metodolojik sağlamlığı olan ve konuya yenilikçi bir bakış açısı getiren çalışmalara öncelik verilmiştir. Sadece mevcut düzenlemeleri listeleyen, eleştirel analiz veya yenilikçi bir yaklaşım sunmayan çalışmalar, hakemsiz yayınlar (konferans özetleri, editöre mektuplar vb. – önemli bir tartışma başlatmadıkça), çok spesifik ve dar kapsamlı vaka raporları (genellenebilir dersler içermiyorsa) ve güncelliğini yitirmiş bilgiler kapsam dışı bırakılmıştır. Toplanan literatür, tematik analiz yöntemiyle incelenerek, makalenin ana bölümlerini oluşturan temel kavramlar, eğilimler, zorluklar ve gelecekteki perspektifler belirlenmiştir.

### **3. Ana Tematik Bölümler: Güvenlik Biliminin Katmanları**

#### **3.1. Tehlike Ufukları: Klasik Risklerden Yeni Nesil Tehditlere**

Kimya laboratuvarları, doğası gereği çeşitli tehlikeleri barındırır. Bu tehlikeler, geleneksel olarak bilinen kimyasal, fiziksel ve biyolojik risklerin yanı sıra, teknolojik gelişmeler ve yeni araştırma alanlarının ortaya çıkmasıyla sürekli olarak evrilmekte ve çeşitlenmektedir.

##### **3.1.1. "Bildığımız Düşmanlar": Geleneksel Tehlikelerin Güncel Yansımaları ve Öğrenilen Dersler**

Yanıcılar, parlayıcılar, patlayıcılar, korozifler, toksikler ve reaktifler gibi klasik kimyasal tehlikeler, laboratuvar güvenliğinin temel odak noktalarından olmaya devam etmektedir. Ancak bu "bildığımız düşmanlar" dahi, yeni sentez yolları, ölçek büyütme çalışmaları veya beklenmedik reaksiyon koşulları altında farklı ve daha karmaşık risk profilleri sergileyebilir. Örneğin, Texas Tech Üniversitesi'nde 2010 yılında yaşanan ve bir öğrencinin ciddi şekilde yaralanmasına neden olan nikel hidrazin perklorat patlaması, reaktif kimyasallarla çalışmanın ve özellikle araştırma laboratuvarlarında ölçek büyütme süreçlerinin ne denli dikkatli bir risk değerlendirmesi gerektirdiğini acı bir şekilde ortaya koymuştur (CSB, 2011). Bu tür olaylar, güvenlik kurallarına ve prosedürlerine uymanın sadece bir formalite olmadığını, aksine hayati önem taşıdığını göstermektedir. Gelişmiş kimyasal envanter ve uyumsuzluk takip sistemleri (örneğin, ChemInventory, Vertere gibi ticari yazılımlar veya kurum içi geliştirilen sistemler), bu tür risklerin yönetiminde önemli bir araç haline gelmiştir.

##### **3.1.2. "Bilinmeyen Sular": Nanomalzemeler, Yüksek Etkili Bileşikler ve Sentez Kimyasının Yeni Riskleri**

Bilim ve teknolojiye ilerlemeler, laboratuvar ortamına yeni ve bazen de tam olarak anlaşılamamış riskler getirmektedir.

**Nanomalzemeler:** Benzersiz fizikokimyasal özellikleri nedeniyle birçok alanda devrim yaratan nanomalzemeler, aynı zamanda potansiyel toksisite, çevresel kalıcılık ve maruziyet yolları açısından yeni belirsizlikler sunmaktadır (Nyström ve ark., 2012). Özellikle inhalasyon ve dermal temas yoluyla maruziyet, uygun KKD (Kişisel Koruyucu Donanım) seçimi ve atık yönetimi konularında özel dikkat gerektirmektedir.

**Yüksek Etkili Aktif Farmasötik Bileşenler (HPAPIs) ve Araştırma Kimyasalları:** Özellikle farmasötik araştırmalarda ve yeni molekül sentezlerinde kullanılan HPAPI'ler ve henüz toksikolojik profilleri tam olarak bilinmeyen araştırma kimyasalları, çok düşük miktarlarda bile olsa maruziyet durumunda ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Bu tür

maddelerle çalışırken kapalı sistemler, özel havalandırma çözümleri ve sıkı kontaminasyon kontrolü elzemdir.

**Enerjetik Malzemeler ve Yeni Katalizörler:** Yeni nesil enerji depolama sistemleri, roket yakıtları veya yüksek performanslı patlayıcılar üzerine yapılan araştırmalarda kullanılan enerjetik malzemeler ile yeni geliştirilen reaktif katalizörler, sentez, karakterizasyon ve depolama aşamalarında öngörülemeyen reaktivite ve patlama riskleri taşıyabilir.

**"Yeşil" Ama "Sinsi" mi?:** Yeşil kimya prensipleriyle sentezlenen yeni bileşiklerin ve formülasyonların, her zaman daha güvenli olduğu varsayımı yanıltıcı olabilir. Yeni bir "yeşil" çözücünün veya reaktifin uzun vadeli sağlık etkileri veya çevresel kaderi tam olarak bilinmiyorsa, bu durum "yeşil ama sinsi" tehlikeler yaratabilir. Bu nedenle, her yeni kimyasalın kapsamlı bir risk değerlendirmesinden geçirilmesi gerekmektedir.

### 3.1.3. Görünmeyen Tehlikeler: Modern Laboratuvarda Fiziksel, Ergonomik ve Psikososyal Riskler

Kimyasal tehlikelerin yanı sıra, modern laboratuvar ortamı çeşitli fiziksel, ergonomik ve giderek daha fazla kabul gören psikososyal riskleri de barındırmaktadır.

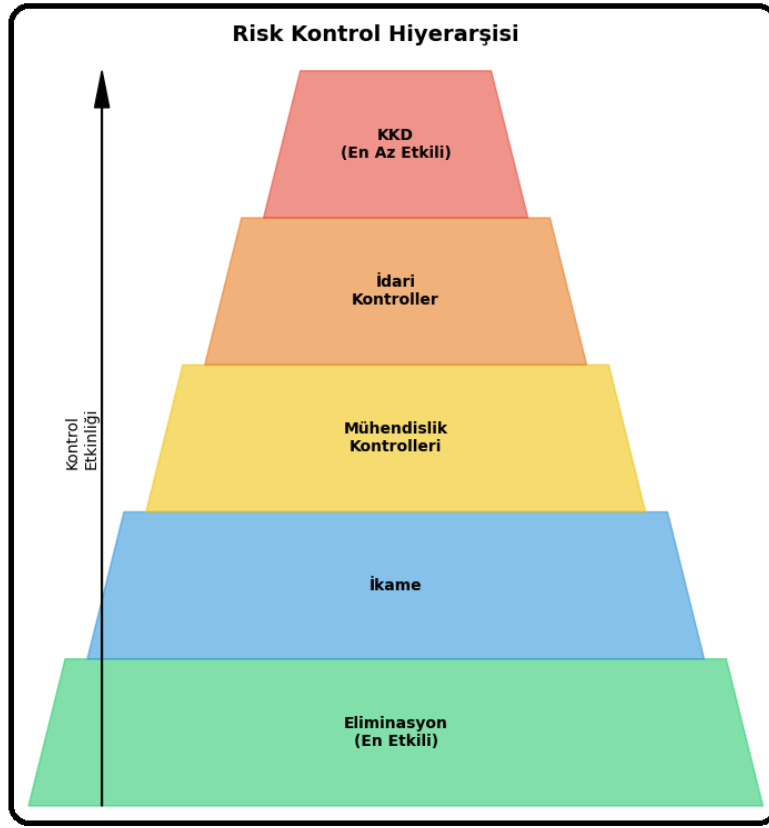
**Fiziksel Riskler:** Lazerler, yüksek manyetik alanlar, iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, yüksek basınçlı sistemler, kriyojenik sıvılar ve otomasyon ile robotik sistemlerin getirdiği yeni mekanik ve elektriksel riskler, dikkatli bir yönetim gerektirir.

**Ergonomik Riskler:** Uzun süreli pipetleme, mikroskop kullanımı, bilgisayar başında çalışma ve uygun olmayan duruş pozisyonları, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına ("laboratuvar boynu/beli," tekrarlayan zorlanma yaralanmaları) yol açabilir. Laboratuvar tasarımı ve iş istasyonlarının düzenlenmesinde ergonomik prensiplerin göz önünde bulundurulması önemlidir.

**Psikososyal Riskler:** Özellikle akademik araştırma ortamlarında yaygın olan yayın baskısı, fon bulma stresi, rekabet, uzun çalışma saatleri, iş güvencesizliği ve izolasyon gibi faktörler, tükenmişlik, anksiyete ve depresyon gibi psikososyal sorunlara neden olabilir (Guthrie ve ark., 2018). Bu durum, sadece bireyin refahını değil, aynı zamanda dikkat dağınıklığı ve hatalı karar verme yoluyla laboratuvar güvenliğini de olumsuz etkileyebilir. Bu risklerin tanınması ve destek mekanizmalarının oluşturulması, bütüncül bir İSG yaklaşımının parçasıdır.

### 3.2. Risk Yönetiminde Devrim: Tahminden Eyleme, Reaktiften Proaktif

Etkin bir İSG yönetiminin temel taşı olan risk değerlendirmesi ve kontrolü, reaktif (kaza sonrası müdahale) yaklaşımlardan, proaktif (önleyici) ve hatta öngörücü (potansiyel tehlikeleri önceden tahmin etme) modellere doğru evrilmektedir. Risk kontrol hiyerarşisi (Şekil 2), en etkili kontrol önlemlerinden (eliminasyon) en az etkili olanlara (KKD) doğru sistematik bir yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 2. Risk Değerlendirme ve Kontrol Hiyerarşisi Piramidi  
 Figure 2. Risk Assessment and Control Hierarchy Pyramid

### 3.2.1. Risk Değerlendirmesinin Evrimi: Statik Formlardan Dinamik ve Öngörücü Modellere

Geleneksel risk değerlendirmesi genellikle standart formların doldurulması ve periyodik güncellemelerle sınırlı kalırken, modern yaklaşımlar daha dinamik, sürekli ve veri odaklı olmayı hedefler.

**Hesaplamalı Toksikoloji ve *In Silico* Yöntemler:** Kantitatif Yapı-Aktivite İlişkileri (QSAR), okuma-karşısı (read-across) ve diğer *in silico* toksikoloji yöntemleri, özellikle yeni sentezlenen veya hakkında az veri bulunan kimyasalların potansiyel tehlikelerini (toksisite, kalıcılık, biyobirikim vb.) hızlı bir şekilde tahmin etme potansiyeli sunar (ECHA, 2023). Bu yöntemler, deney hayvanı kullanımını azaltmaya yardımcı olabilir ve erken aşama risk değerlendirmesine önemli girdiler sağlayabilir, ancak modellerin güvenilirliği ve uygulanabilirlik alanları dikkatle değerlendirilmelidir.

**Dinamik Risk Değerlendirmesi:** Laboratuvar koşullarındaki (örneğin, yeni bir ekipman, farklı bir prosedür, personel değişikliği) veya kimyasallarla ilgili yeni bilgilerdeki (örneğin, yeni bir toksisite verisi) her türlü değişikliğe duyarlı, sürekli güncellenen risk değerlendirme sistemleri önem kazanmaktadır.

**Kontrol Bantlama (Control Banding):** Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) ve kaynakları kısıtlı akademik laboratuvarlar için pratik bir risk değerlendirme

ve yönetim aracı olan kontrol bantlama, tehlike ve maruziyet potansiyeline dayalı olarak standartlaştırılmış kontrol önlemleri setleri önerir.

### 3.2.2. Kontrol Hiyerarşisi 2.0: İnovatif Çözümler ve Akıllı Uygulamalar

Klasik kontrol hiyerarşisi (Eliminasyon, İkame, Mühendislik Kontrolleri, İdari Kontroller, Kişisel Koruyucu Donanım - KKD) hala geçerliliğini korumakla birlikte, teknolojik gelişmeler bu hiyerarşinin her basamağında yenilikçi uygulamalara olanak tanımaktadır.

**Eliminasyon/İkame:** Sadece daha az tehlikeli bir kimyasala geçiş değil, aynı zamanda tehlikeli bir süreci veya adımı tamamen ortadan kaldıran süreç yoğunlaştırma (process intensification) veya akış kimyası (flow chemistry) gibi yenilikçi yaklaşımlar, doğası gereği daha güvenli (inherently safer design) sistemler sunar (Burange ve Osman, 2022).

**Mühendislik Kontrolleri:** Kendi kendini ayarlayan "akıllı" çeker ocaklar, kapalı sistem reaktörler, robotik numune hazırlama ve analiz sistemleri, tehlikeli maddelere maruziyeti kaynağında azaltır.

**İdari Kontroller:** Dijital ve interaktif Standart Operasyon Prosedürleri (SOP'ler), artırılmış gerçeklik (AR) destekli bakım ve onarım talimatları, çevrimiçi eğitim modülleri ve dijital güvenlik yönetim sistemleri, idari kontrollerin etkinliğini artırır.

**KKD'de Yenilikler:** Kimyasal sızıntısını algılayan sensörlü eldivenler, nanomateryallere karşı etkinliği kanıtlanmış yeni nesil filtre malzemeleri içeren solunum koruyucular ve daha ergonomik tasarımı KKD'ler, son savunma hattını güçlendirir.

### 3.2.3. Kimyasal Envanter Yönetimi ve GHS: Dijitalleşme, Küresel Uyum ve "Etiketin Ötesi"

Etkin bir kimyasal envanter yönetimi, laboratuvarında hangi kimyasalların, ne miktarda, nerede ve ne durumda olduğunun bilinmesini sağlar. RFID ve barkod tabanlı sistemlerin ötesinde, yapay zeka destekli envanter yönetimi, kimyasalların son kullanma tarihlerinin takibi, uyumsuz kimyasalların bir arada depolanmasının engellenmesi, atık minimizasyonu ve acil durum müdahalesi için kritik bilgiler sunabilir. Kimyasalların Sınıflandırılması ve Etiketlenmesi için Küresel Uyum Sistemi (GHS), tehlike iletişiminde uluslararası bir standart sağlamayı amaçlasa da, küresel düzeyde tam ve doğru uygulanmasındaki zorluklar ve yanlış etiketlemenin potansiyel tehlikeleri devam etmektedir. Bu nedenle, etiket bilgilerinin ötesine geçerek, Güvenlik Bilgi Formlarının (SDS/GBF) dikkatle incelenmesi ve anlaşılması, tüm laboratuvar çalışanları için temel bir beceridir.

### 3.3. Güvenlik Kültürü İnşası: İnsanı Merkeze Alan, Dirençli ve Öğrenen Organizasyonlar

Teknik önlemler ve prosedürler ne kadar gelişmiş olursa olsun, güçlü bir güvenlik kültürü olmadan sürdürülebilir bir İSG başarısı elde etmek mümkün değildir. Güvenlik kültürü, bir organizasyondaki tüm bireylerin güvenliğe verdiği ortak değer, inanç, tutum ve davranış biçimlerini ifade eder (Flin ve ark., 2000). Güvenlik kültürünün temel unsurları (Şekil 3), birbirleriyle sürekli etkileşim halinde olan ve birbirini güçlendiren altı ana bileşenden oluşmaktadır



**Şekil 3.** Laboratuvar Güvenlik Kültürünün Temel Unsurları  
**Figure 3.** Fundamental Elements of Laboratory Safety Culture

### "Sıfır Kaza" Hedefinden "Sıfır Zarar" Vizyonuna: Psikolojik Güvenlik ve Proaktif Raporlama

UCLA Sheri Sangji vakası gibi trajik olaylar, akademik ortamlarda güvenlik kültüründeki eksikliklerin ne denli vahim sonuçlar doğurabileceğini göstermiştir. Bu bağlamda, "sıfır kaza" vizyonu, iş sağlığı ve güvenliği alanında önemli bir tartışma konusu olmuştur. Bu yaklaşım, tüm kazaların önlenabilir olduğu varsayımına dayanır ve güvenli çalışma ortamları yaratarak tüm kazaları önleme hedefini ve taahhüdünü ifade eder (Zwetsloot vd., 2017). Birçok kuruluş ve politika yapıcı "sıfır kaza" vizyonunu başarıyla uygulamış olsa da, çeşitli alanlardan çok sayıda saygın iş sağlığı ve güvenliği uzmanı, teoride ve pratikte kullanımına ve başarısına karşı çıkmaktadır (Ahamad vd., 2022).

"Sıfır Kaza Vizyonu" (ZAV) gibi stratejiler, özellikle inşaat, imalat ve ulaşım gibi yüksek riskli sektörlerde işçi ve halk güvenliğini sağlamak için zorlu ancak temel bir hedeftir (Mughal, 2023). Bu vizyon, 1960'lardan beri var olan "Sıfır Hata", "Sıfır Atık" ve "Sıfır Zarar" gibi benzer isimli stratejiler ailesindendir (European Agency for Safety and Health at Work, 2023). Ancak 'Sıfır Zarar', genellikle sadece fiziksel kazaları değil, aynı zamanda 'da



belirtilen psikososyal riskler ve uzun vadeli meslek hastalıkları gibi tüm potansiyel zararları kapsayarak 'Sıfır Kaza' vizyonundan daha geniş bir perspektif sunar. "Sıfır kaza" stratejisi, işyerindeki tüm kazaları, yaralanmaları ve olayları ortadan kaldırmayı amaçlayan bir güvenlik yaklaşımıdır. Akademik araştırma laboratuvarları, tehlikeli çalışma ortamlarına önemli bir örnektir. Son on yılda, Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa ve Çin'deki üniversitelerde güvenlik kültürü ve protokolleri hakkında artan endişeler dile getirilmiştir. Kimya laboratuvarları, operasyonlarının doğası gereği doğal risklerle karşı karşıyadır. Yanıcı, patlayıcı ve aşındırıcı kimyasallar gibi tehlikeler, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık koşullarıyla birleştiğinde önemli güvenlik zorlukları ortaya koymaktadır Laboratuvarlardaki kazaların nedenlerini bilimsel gerçeklerle destekleyerek anlamamız gerekmektedir (Wang vd., 2025). "Sıfır kaza" hedefine ulaşmada yaygın engeller arasında çalışanların rehabeti, eğitim eksikliği, kaynak kısıtlamaları, değişime direnç, yetersiz raporlama ve zayıf güvenlik kültürü bulunmaktadır (Mughal, 2023). Laboratuvar çalışanlarının gerçek hayattaki güvenlik olayları, prosedürel sapmalar ve uygunsuz tesis yönetimi örneklerini paylaştığı yayınlar, bu tür sorunlara yol açan boşlukları ve bunların nasıl çözüldüğünü anlamak için değerli bilgiler sunmaktadır (Safety Partners, Inc., 2025). Bu ortamda, çalışanlar ve öğrenciler, potansiyel tehlikeleri, "ramak kala" (near-miss) olaylarını ve güvenlik endişelerini çekinmeden rapor edebilirler (Safe science., 2014).

### **Geleceğin Güvenlik Elçileri: Kimya Eğitiminde İSG'nin Yeniden Tanımlanması**

Geleceğin kimyagerleri olan öğrencilerin, kariyerlerinin başından itibaren güçlü bir güvenlik bilinci ve kültürüyle donatılması kritik öneme sahiptir.

**Müfredat Entegrasyonu:** İSG, sadece ayrı bir "laboratuvar güvenliği" dersiyle sınırlı kalmamalı, tüm kimya müfredatına (organik, anorganik, analitik, fizikokimya vb.) ve laboratuvar uygulamalarına doğal bir şekilde entegre edilmelidir (American Chemical Society, 2023). Her deneyin planlama, yürütme ve değerlendirme aşamalarında güvenlik boyutu aktif olarak düşünülmelidir.

**Deneyimsel ve İnteraktif Öğrenme:** Sanal Gerçeklik (VR) ve Artırılmış Gerçeklik (AR) teknolojileri, öğrencilere yangın söndürme, kimyasal dökülmeye müdahale etme veya karmaşık ekipmanları kullanma gibi senaryoları risksiz bir ortamda deneyimleme imkanı sunar (Ismael ve Ark., 2024). Vaka temelli öğrenme, rol yapma ve güvenlik eğitiminde oyunlaştırma (gamification) teknikleri de öğrenmeyi daha ilgi çekici ve kalıcı hale getirebilir.

**Eleştirel Düşünme ve Problem Çözme:** Öğrenciler, sadece kuralları ezberlemek yerine, kuralların ardındaki mantığı anlamaya, potansiyel riskleri kendileri analiz etmeye ve daha güvenli çalışma yöntemleri geliştirmeye teşvik edilmelidir.

### **İnsan Faktörleri Mühendisliği: Yorgunluk, Stres, Bilişsel Yanılgılar ve "Acele Etme" Sendromu**

Laboratuvar kazalarının önemli bir kısmı, insan hatalarından veya daha doğru bir ifadeyle insan performansını etkileyen faktörlerden kaynaklanmaktadır (Reason, 2000). Şekil 3'te görüldüğü gibi bu kültür; **Liderlik Taahhüdü** ve **Çalışan Katılımı** ile başlar, **Risk Farkındalığı** ve **Açık İletişim** ile beslenir, **Öğrenme ve Gelişim** ile **Sürekli İyileştirme** mekanizmalarıyla sürdürülür. Bu bölümde, bu bileşenlerin kritik yönleri ele alınacaktır.

**Bilişsel Yanılgılar (Cognitive Biases):** "Onaylama yanlılığı" (kendi hipotezini destekleyen verilere odaklanma), "aşırı güven" (kendi yeteneklerini veya durumun güvenliğini abartma),

"elde mevcudluk yanılgısı" (akla ilk gelen veya en canlı örneklerle karar verme) gibi bilişsel kısa yollar, deneyimli araştırmacıları bile etkileyebilir ve hatalı güvenlik kararlarına yol açabilir (Jin ve Ark., 2025).

**Performans Etkileyen Faktörler:** Yüksek stres, yorgunluk, dikkat dağınıklığı, iş yükü, zaman baskısı ("acele etme sendromu"), iletişim eksiklikleri ve ekip çalışmasındaki sorunlar, güvenlik performansını olumsuz etkileyebilir. Özellikle akademik ortamlarda, yayın ve fon bulma baskısı bu faktörleri şiddetlendirebilir.

**Farkındalık ve Stratejiler:** Bu insan faktörleri konusunda farkındalık kazandırmak, bireylerin kendi çalışma alışkanlıklarını ve potansiyel yanılgılarını gözden geçirmelerini sağlamak, stres yönetimi teknikleri öğretmek, etkili iletişim ve ekip çalışmasını teşvik etmek, kontrol listeleri ve çift kontrol mekanizmaları gibi basit ama etkili stratejiler kullanmak önemlidir.

### 3.4. Acil Durum Yönetimi: Beklenmeyene Hazırlık ve Kriz Anında Dirençlilik

Tüm önleyici tedbirlere rağmen, laboratuvarlarda acil durumların yaşanma olasılığı her zaman mevcuttur. Etkin bir acil durum yönetimi planı, can kayıplarını, yaralanmaları, çevresel zararları ve maddi kayıpları en aza indirmede kritik rol oynar.

#### 3.4.1. "Ya Olursa?" Senaryoları: Yeni Nesil Laboratuvarlarda Karmaşık Acil Durum Planlaması

Acil durum planları, sadece yangın veya genel kimyasal dökülme gibi standart senaryoları değil, aynı zamanda nanomalzeme dökülmeleri, lityum-iyon pil yangınları (özellikle enerji depolama araştırmalarında), biyolojik ajanlarla kontamine kimyasal atıklar, siber saldırılar sonucu laboratuvar otomasyon sistemlerinin kontrolünün kaybedilmesi gibi spesifik ve karmaşık senaryoları da kapsamalıdır. Planlar, tahliye yollarını, acil durum ekipmanlarının (yangın söndürücüler, göz duşları, güvenlik duşları, dökülme kitleri) yerlerini ve kullanımını, ilk yardım prosedürlerini, iç ve dış iletişim protokollerini (laboratuvar dışı acil müdahale ekipleriyle koordinasyon) ve olay sonrası değerlendirme süreçlerini net bir şekilde tanımlamalıdır.

#### 3.4.2. Teknolojinin Kurtarıcı Rolü: Akıllı Sistemlerle Hızlı ve Etkili Müdahale

Teknoloji, acil durum hazırlığı ve müdahalesinde de önemli faydalar sunabilir.

**Otomatik Algılama ve Uyarı Sistemleri:** Gaz dedektörleri, duman dedektörleri ve diğer sensörler, tehlikeli bir durumu erken aşamada tespit ederek otomatik alarm sistemlerini (sesli, görsel) ve bildirimleri (mobil uygulamalar, e-posta) tetikleyebilir.

**Otomatik Müdahale Sistemleri:** Bazı durumlarda, tehlike algılandığında otomatik olarak gaz akışını kesen, havalandırmayı maksimuma çıkaran veya yangın söndürme sistemlerini devreye sokan mekanizmalar kurulabilir.

**Konum Belirleme ve İletişim:** Büyük laboratuvar komplekslerinde, acil durumlarda laboratuvar içindeki kişilerin konumunu belirleyen sistemler ve anlık acil durum bildirimleri ile talimatlar sağlayan mobil uygulamalar, tahliye ve kurtarma operasyonlarını kolaylaştırabilir.

**Robotik Müdahale:** Özellikle yüksek derecede tehlikeli ortamlara (örneğin, radyoaktif sızıntı, büyük toksik gaz salınımı) insan müdahalesinin riskli olduğu durumlarda, uzaktan kumandalı robotlar keşif, ölçüm ve hatta bazı müdahale görevleri için kullanılabilir.

### **3.5. Güvenlik ve Sürdürülebilirlik Kesişimi: Daha Yeşil Bir Kimya, Daha Güvenli Bir Gelecek**

İş sağlığı ve güvenliği, yeşil kimya ve sürdürülebilirlik prensipleriyle doğal bir sinerji içindedir. Daha güvenli kimyasallar ve süreçler tasarlamak, genellikle daha çevre dostu ve sürdürülebilir çözümlerle örtüşür.

#### **3.5.1. Yeşil Kimyanın 12 Prensibi: İSG İçin Doğal Bir Çerçeve**

Paul Anastas ve John Warner tarafından ortaya konan Yeşil Kimyanın 12 Prensibi (Anastas ve Warner, 1998), İSG'ye doğrudan katkı sağlayan birçok hedef içerir:

**Atık Önleme:** Atık oluşumunu kaynağında azaltmak, tehlikeli atıkların yönetimi ve bertarafıyla ilişkili riskleri de azaltır.

**Daha Az Tehlikeli Kimyasal Sentezler Tasarlamak:** İnsan sağlığı ve çevre için daha az toksik veya hiç toksik olmayan maddelerin kullanımı ve üretimi hedeflenir.

**Daha Güvenli Çözücüler ve Yardımcı Maddeler Kullanmak:** Tehlikeli çözücülerin ve ayırma ajanlarının kullanımını ortadan kaldırmak veya daha güvenli alternatiflerle değiştirmek.

**Enerji Verimliliği İçin Tasarım:** Enerji tüketimini azaltmak hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlar ve bazen yüksek enerji gerektiren tehlikeli proseslerden kaçınmaya yardımcı olur.

**Kaza Potansiyelini En Aza İndirecek Daha Güvenli Kimya İçin Tasarım:** Maddelerin fiziksel formunu (gaz yerine katı veya sıvı) veya kimyasal yapısını, patlama, yangın veya salınım gibi kaza risklerini azaltacak şekilde seçmek.

#### **3.5.2. Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi: Tehlikenin Kaynağında Azaltılması ve Güvenli Bertaraf**

Döngüsel ekonomi yaklaşımları, kaynakların daha verimli kullanılmasını, atıkların azaltılmasını ve malzemelerin yaşam döngüsü boyunca değerlerinin korunmasını hedefler. Bu, tehlikeli kimyasal atıkların miktarını azaltarak ve geri dönüşüm/yeniden kullanım stratejileriyle İSG üzerindeki olumlu etkiler yaratır. Tehlikeli atıkların güvenli bir şekilde toplanması, taşınması, arıtılması ve bertaraf edilmesi, İSG'nin kritik bir bileşenidir.

#### **3.5.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) Işığında Güvenlik: Kimyasal Süreçlerin Bütüncül Güvenlik Analizi**

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), bir ürünün veya sürecin hammaddeden başlayarak üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendiren bir metodolojidir. LCA, sadece çevresel etkileri değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği risklerini de (örneğin, toksik madde maruziyeti, kaza potansiyeli) içerecek şekilde genişletilebilir. Bu bütüncül bakış açısı, farklı kimyasal süreçler veya

ürünler arasında daha güvenli ve sürdürülebilir alternatiflerin seçilmesine yardımcı olabilir (Kümmerer ve Clark, 2020).

#### 4. Eleştirel Değerlendirme ve Sentez: Bilgi Okyanusunda Yön Bulmak

Kimya laboratuvarlarında İSG alanı, önemli ilerlemeler kaydetmekle birlikte, hala çözülmesi gereken birçok zorluk ve tartışmalı konu barındırmaktadır.

##### 4.1. Ana Akımlar ve Paradigma Değişimleri

Literatürdeki ana akımlar, reaktif yaklaşımlardan proaktif ve öngörücü güvenliğe doğru belirgin bir kayışı göstermektedir. Teknolojinin (otomasyon, sensörler, yapay zeka) İSG'deki rolü giderek artmakta, insan faktörleri ve güvenlik kültürüne yapılan vurgu güçlenmektedir. Ayrıca, İSG'nin sürdürülebilirlik ve yeşil kimya prensipleriyle entegrasyonu, daha bütüncül ve sorumlu bir bilim anlayışının yükselişine işaret etmektedir.

##### 4.2. Tartışmalı Arenalar ve Çözölemeyen İkilemler

**İnovasyon Hızı vs. Güvenlik Değerlendirmesi:** Özellikle nanoteknoloji, sentetik biyoloji gibi hızla gelişen alanlarda, yeni materyallerin ve süreçlerin potansiyel risklerinin tam olarak anlaşılması ve değerlendirilmesi, inovasyon hızına yetişmekte zorlanabilmektedir. "Ne kadar hızlı, ne kadar güvenli?" ikilemi, özellikle rekabetin yoğun olduğu araştırma ortamlarında önemli bir tartışma konusudur.

**Güvenlik Yatırımlarının "Maliyeti" vs. Kazaların "Bedeli":** Etkin İSG önlemleri önemli bir maliyet gerektirebilir. Özellikle kaynakları kısıtlı akademik kurumlarda, bu maliyetler bazen caydırıcı olabilmektedir. Ancak, bir kazanın yol açabileceği can kaybı, yaralanma, itibar kaybı, yasal sorumluluklar ve araştırma kesintileri göz önüne alındığında, güvenlik yatırımlarının aslında bir "maliyet" değil, bir "yatırım" olduğu anlaşılmalıdır.

**Akademik Özgürlük vs. Katı Güvenlik Kuralları:** Akademik araştırma ortamları, keşif ve yaratıcılığı teşvik eden bir esneklik gerektirir. Ancak bu esneklik, bazen katı güvenlik kurallarıyla çelişiyor gibi algılanabilir. Güvenlik prosedürlerinin, araştırmayı engellemeden riskleri etkin bir şekilde yönetebilecek şekilde tasarlanması ve uygulanması önemlidir.

**Küresel Standartların Harmonizasyonu:** Özellikle uluslararası işbirliklerinin ve öğrenci/araştırmacı hareketliliğinin arttığı günümüzde, farklı ülkelerdeki ve kurumlardaki İSG standartları ve uygulamaları arasında önemli farklılıklar bulunabilmektedir. Bu durum, küresel ölçekte bir harmonizasyon ihtiyacını gündeme getirmektedir.

##### 4.3. Bilgi Boşlukları ve Cevaplanmamış Sorular

**Düşük Dozda ve Karmaşık Karışımlara Kronik Maruziyet:** Birçok kimyasala aynı anda ve düşük dozlarda uzun süreli maruziyetin (kokteyl etkisi) insan sağlığı üzerindeki etkileri hala tam olarak anlaşılamamıştır.

**Yeni Nesil Materyaller İçin Pratik Risk Değerlendirme Araçları:** Özellikle nanomateriyaller ve diğer gelişmiş materyaller için, laboratuvar ortamında pratik olarak uygulanabilir, kantitatif ve valide edilmiş risk değerlendirme araçlarına ihtiyaç vardır.

**Güvenlik Kültürünün Etkin Ölçümü ve İyileştirilmesi:** Güvenlik kültürünün etkinliğini objektif olarak ölçmek ve farklı kurumlar arasında kıyaslama yapmaya olanak tanıyacak güvenilir ve evrensel metrikler geliştirmek önemli bir araştırma alanıdır.

**Yapay Zekanın İSG'deki Etik ve Güvenilirlik Sorunları:** Yapay zekanın İSG karar alma süreçlerindeki potansiyel yanlılıkları (bias), şeffaflık eksikliği ve siber güvenlik riskleri gibi etik ve güvenilirlik sorunları daha fazla araştırılmalıdır.

## 5. Gelecek Perspektifleri ve Öneriler: Daha Güvenli Yarınlar İçin Yol Haritası

Kimya laboratuvarlarında İSG alanı, sürekli bir evrim içindedir. Teknolojik yenilikler, değişen araştırma paradigmaları ve artan güvenlik bilinci, gelecekteki uygulamaları şekillendirecektir.

### 5.1. Yenilikçi Araştırma Yönelimleri (SMART Öneriler)

**Spesifik Soru:** Yeni sentezlenen nanomateryallerin ve karmaşık kimyasal karışımların uzun vadeli, düşük doz maruziyetlerinin insan sağlığı üzerindeki etkilerini belirlemek için hangi *in vitro* (örneğin, organ-on-a-chip) ve *in silico* (örneğin, gelişmiş QSAR) modeller daha güvenilir, hızlı ve maliyet etkin sonuçlar vermektedir?

**Metodoloji Önerisi:** Yüksek verimli tarama (HTS) platformları ile entegre edilmiş, insan hücrelerine dayalı üç boyutlu doku modelleri ve organ-on-a-chip sistemlerinin geliştirilmesi ve validasyonu; bu sistemlerden elde edilen verilerle eğitilmiş yapay zeka tabanlı QSAR ve toksikokinetik modellemelerin karşılaştırmalı analizleri (ECHA, 2023; Deng ve ark., 2023).

**Spesifik Soru:** Akademik kimya laboratuvarlarında güvenlik kültürünün olgunluk seviyesini objektif olarak ölçebilecek ve farklı kurumlar arasında kıyaslama yapmaya olanak tanıyacak, kültürel farklılıklara duyarlı, standartlaştırılmış ve valide edilmiş bir metrik veya araç seti nasıl geliştirilebilir?

**Metodoloji Önerisi:** Çok aşamalı bir yaklaşımla; öncelikle mevcut güvenlik kültürü modelleri ve ölçüm araçlarının kapsamlı bir literatür taraması ve eleştirel analizi; ardından Delphi yöntemi ile uluslararası uzman görüşlerinin alınarak temel göstergelerin belirlenmesi; bu göstergelere dayalı bir anket veya gözlem aracının geliştirilmesi ve farklı coğrafi bölgelerdeki ve büyüklüklerdeki akademik kurumlarda pilot uygulamalarla psikometrik özelliklerinin (geçerlilik, güvenilirlik) test edilmesi (Flin ve ark., 2000; Cooper, 2000).

**Spesifik Soru:** Yapay zeka destekli risk tahmin sistemlerinin, özellikle karmaşık ve daha önce karşılaşılmamış kimyasal reaksiyonlar veya operasyonel senaryolar için doğruluğu, güvenilirliği ve genellenebilirliği nasıl artırılabilir ve bu sistemlerin potansiyel yanlılıkları (bias) nasıl etkin bir şekilde tespit edilip minimize edilebilir?

**Metodoloji Önerisi:** Daha geniş, çeşitli ve yüksek kaliteli reaksiyon veri setleri üzerinde eğitilmiş federatif öğrenme ve transfer öğrenme yaklaşımlarının kullanılması; açıklanabilir yapay zeka (XAI) tekniklerinin (örneğin, LIME, SHAP) entegrasyonu ile model kararlarının şeffaflaştırılması; ve sistemlerin performansını sürekli izleyen ve potansiyel yanlılıkları (örneğin, belirli kimyasal sınıflarına veya laboratuvar türlerine karşı) tespit eden algoritmik denetim mekanizmalarının geliştirilmesi. (Adadi ve Berrada 2018)

## 5.2. Teknolojik Atılımlar ve Akıllı Laboratuvarlar



**Şekil 4.** Modern Laboratuvarda Teknolojik Entegrasyon ve Güvenlik Sistemleri

*Figure 4. Technological Integration and Safety Systems in the Modern Laboratory*

**Gelişmiş Sensörler ve Nesnelerin İnterneti (IoT):** Daha seçici, hassas, dayanıklı, minyatürleşmiş ve düşük maliyetli giyilebilir kimyasal sensörlerin (Lee ve ark., 2023) ve laboratuvar ortamını (hava kalitesi, sıcaklık, basınç, sızıntılar) sürekli izleyen IoT ağlarının (Burange, ve ark., 2022) yaygınlaşması beklenmektedir. Şekil 4'te gösterildiği gibi, modern bir laboratuvar da teknolojik sistemler, merkezi bir kontrol sistemi etrafında entegre edilmiş çeşitli alt sistemlerden oluşmaktadır

**Etik/Uygulanabilirlik:** Toplanan büyük miktardaki verinin güvenliği, çalışan gizliliği ve veri sahipliği konularında net politikalar ve güçlü siber güvenlik önlemleri geliştirilmelidir. Küçük ölçekli laboratuvarlar için maliyet etkin, kolay kurulabilir ve bakımı yapılabilir sistemlere ihtiyaç vardır.

**Robotik, Otomasyon ve Cobotlar:** Tehlikeli görevlerin tam otomasyonu ve insanlarla güvenli bir şekilde işbirliği yapabilen robotların (cobotlar) (Bogue, 2012) kullanımı artacaktır. Örneğin, farmasötik endüstrisinde yüksek etkili aktif farmasötik bileşenlerin (HPAPI'ler) [68] tartım ve seyreltme işlemleri, maruziyeti sıfıra indirmek amacıyla tamamen robotik kapalı sistemler içinde yürütülmektedir; bu da mühendislik kontrollerinin [95] geldiği en üst seviyelerden birini temsil etmektedir.

**Etik/Uygulanabilirlik:** Otomasyonun iş gücü üzerindeki etkileri, robotların güvenli etkileşimi için standartlar, acil durumlarda insan müdahalesinin nasıl sağlanacağı ve bu sistemlerin bakım ve onarım maliyetleri gibi konular ele alınmalıdır.

**Yapay Zeka (AI) Destekli İSG Yönetim Platformları:** Risk değerlendirmesi, güvenlik eğitimi, olay raporlama ve analizi, acil durum müdahale planlaması gibi süreçleri entegre

eden, yapay zeka ile kişiselleştirilmiş öneriler ve öngörüler sunan platformlar geliştirilecektir (Maheronnaghsh, ve ark., 2023). Örneğin, bazı büyük ölçekli endüstriyel Ar-Ge laboratuvarları, giyilebilir sensörlerden gelen verileri (örn. uçucu organik bileşik maruziyeti) ve video analizini birleştiren yapay zeka platformlarını pilot olarak kullanmaya başlamıştır. Bu sistemler, bir çalışanın çeker ocak dışında tehlikeli bir kimyasalla çalıştığını veya yorgunluk belirtileri gösterdiğini tespit ederek gerçek zamanlı uyarılar üretebilmektedir.

**Etik/Uygulanabilirlik:** Algoritmaların şeffaflığı ve açıklanabilirliği (XAI), karar verme süreçlerindeki potansiyel yanlılıklar (Mittelstadt ve ark., 2016), bu sistemlere aşırı güvenmenin riskleri ve veri yönetimi dikkatle değerlendirilmelidir.

### 5.3. Politika, Uygulama ve Eğitimde Dönüşüm Önerileri

**Eğitimde Devrim:** İSG eğitiminin, kimya lisans ve lisansüstü müfredatlarında temel bir yetkinlik alanı olarak, teorik derslerin yanı sıra zorunlu, uygulamalı, senaryo tabanlı ve simülasyon destekli (VR/AR) modüllerle güçlendirilmesi; öğrencilerin risk değerlendirmesi, tehlike analizi ve güvenlik liderliği konularında aktif rol almalarının teşvik edilmesi.

**Akademik Laboratuvarlar İçin Standartlar:** Akademik araştırma laboratuvarları için, endüstriyel standartlardan esinlenen ancak akademik ortamın özgün ihtiyaçlarını dikkate alan, uluslararası düzeyde kabul görmüş minimum güvenlik standartları, denetim mekanizmaları ve performans göstergelerinin geliştirilmesi için ulusal ve uluslararası kuruluşlar arasında işbirliği yapılması.

**Proaktif Kültürün Teşviki:** Kurumlarda, "ramak kala" olaylarının ve güvenlik endişelerinin cezalandırılma korkusu olmadan rapor edilmesini teşvik eden, öğrenen ve sürekli iyileşmeyi hedefleyen bir güvenlik kültürünün yerleştirilmesi; güvenlik performansının bireysel ve kurumsal değerlendirme kriterlerine dahil edilmesi.

**Yeşil ve Güvenli Kimya Entegrasyonu:** "Yeşil Kimya" ve "Sürdürülebilir Kimya" prensiplerinin, İSG ile entegre bir şekilde laboratuvar pratiğine, araştırma projelerine ve ders içeriklerine daha güçlü bir şekilde dahil edilmesinin teşvik edilmesi; bu konuda iyi uygulama örneklerinin ve kaynakların yaygınlaştırılması.

### 5.4. Geleceğin Kimyagerlerine Çağrı ve Kariyer Fırsatları

Sevgili öğrenciler ve genç araştırmacılar, kimya laboratuvarlarında güvenlik sadece bir dizi kurala uymak değil, aynı zamanda bilimsel bir sorgulama, sürekli bir öğrenme, etik bir sorumluluk ve proaktif bir liderlik alanıdır.

**Aktif Katılım ve Sorgulama:** Laboratuvarınızdaki güvenlik prosedürlerini sadece uygulamakla kalmayın, aynı zamanda sorgulayın, daha iyi ve daha güvenli yollar arayın. İyileştirme önerileri sunun, "ramak kala" olaylarını ve potansiyel tehlikeleri rapor etmekten çekinmeyin. Güvenlik toplantılarına aktif katılım ve güvenlik kültürünün canlı bir parçası olun.

**Liderlik Rolü Üstlenin:** Deneyim kazandıkça, daha az deneyimli meslektaşlarınıza ve öğrencilere örnek olun, onlara rehberlik edin ve mentorluk yapın. Güvenlik, herkesin sorumluluğundadır, ancak liderlik örnek olmakla ve sorumluluk almakla başlar.

**Kariyer Fırsatlarını Keşfedin:** İSG alanı, kimya bilgisine sahip profesyoneller için de çeşitli ve giderek artan kariyer fırsatları sunmaktadır. Endüstride "Kimyasal Güvenlik Uzmanı", "Proses Güvenliği Mühendisi", "Endüstriyel Hijyenist", "REACH/CLP/GHS Uzmanı" gibi pozisyonların yanı sıra, akademik kurumlarda "Laboratuvar Güvenlik Yöneticisi/Sorumlusu", İSG araştırmacısı veya danışman olarak çalışma imkanları bulunmaktadır. Ayrıca, yenilikçi güvenlik teknolojileri (örneğin, akıllı sensörler, VR/AR eğitim modülleri, AI tabanlı risk analiz yazılımları) geliştiren start-up'lar kurma veya bu tür şirketlerde Ar-Ge ve ürün geliştirme pozisyonlarında yer alma gibi girişimcilik fırsatları da mevcuttur. Güvenlik bilgisi ve bilinci, hangi kimya alanında uzmanlaşırsanız uzmanlaşın, sizi daha yetkin, daha sorumlu ve iş piyasasında daha aranan bir profesyonel yapacaktır. Örneğin, sürdürülebilir ve doğası gereği daha güvenli kimyasallar tasarlayan bir Ar-Ge kimyageri, yeşil kimya prensiplerini İSG ile birleştiren bir proses geliştirme uzmanı veya laboratuvarlar için akıllı güvenlik çözümleri üreten bir teknoloji girişimcisi olabilirsiniz. Bu alan, kimya bilginizi insan ve çevre sağlığına doğrudan ve anlamlı bir katkı sağlayacak şekilde kullanma fırsatı sunar.

## 6. Sonuç: Bilimin Vicdanı Olarak Güvenlik

Kimya laboratuvarlarında iş sağlığı ve güvenliği, sürekli dikkat, adaptasyon ve gelişim gerektiren dinamik ve çok boyutlu bir alandır. Bu derlemede vurgulandığı üzere, 21. yüzyılın getirdiği yeni riskler, teknolojik olanaklar ve artan toplumsal beklentiler, geleneksel güvenlik anlayışlarının ötesine geçerek proaktif, öngörücü, teknoloji entegreli ve insan odaklı bir güvenlik paradigmasını zorunlu kılmaktadır. Tehlike tanımlama ve risk değerlendirme süreçlerinin evrimi, otomasyon ve akıllı laboratuvar teknolojilerinin sunduğu fırsatlar, giyilebilir sensörler ve yapay zeka destekli sistemlerin potansiyeli, laboratuvar güvenliğini yeni bir seviyeye taşıma vaadi sunmaktadır. Ancak bu teknolojik gelişmelerin etik boyutları, uygulanabilirlik zorlukları ve maliyet etkinlikleri de dikkatle değerlendirilmelidir.

Güçlü bir güvenlik kültürünün inşası, sadece kurallar ve prosedürlerle değil, aynı zamanda liderlik taahhüdü, tüm çalışanların ve özellikle öğrencilerin aktif katılımı, açık iletişim, sürekli eğitim ve öğrenen bir organizasyon yapısıyla mümkündür. İnsan faktörlerinin ve davranışsal güvenliğin önemi, İSG'nin sadece teknik bir konu olmadığını, aynı zamanda psikolojik, sosyal ve örgütsel boyutları da içerdiğini bir kez daha göstermektedir. Kimya eğitiminde İSG'nin müfredata derinlemesine ve anlamlı bir şekilde entegrasyonu, geleceğin kimyagerlerinin güvenlik bilinci yüksek, sorumlu ve lider bireyler olarak yetişmesinde kritik bir rol oynayacaktır.

Sonuç olarak, güçlü bir iş sağlığı ve güvenliği çerçevesi, bilimsel inovasyonun ve keşfin önünde bir engel değil, tam aksine bunların sürdürülebilir, sorumlu ve etki odaklı bir şekilde gerçekleştirilmesinin temel bir katalizörüdür. En güvenli laboratuvar, sadece en gelişmiş ekipmana veya en kapsamlı prosedürlere sahip olan değil, aynı zamanda en bilinçli, en sorgulayan, en işbirlikçi ve güvenliği bir yaşam biçimi olarak benimsemiş zihinlere sahip olmalıdır. Böylece, 21. yüzyıl kimyagerleri, Marie Curie gibi öncülerin yapmak zorunda kaldığı fedakarlıkları yapmak zorunda kalmadan, bilimin sınırlarını güvenle zorlayabilirler. Geleceğin kimyasını şekillendirirken, güvenliği de birlikte, bilimin vicdanı olarak şekillendirmek, tüm paydaşların ortak ve vazgeçilmez sorumluluğundadır.



## 7. Kaynaklar

- Adadi, A., & Berrada, M. (2018). Peeking Inside the Black-Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI). *IEEE Access*, 6, 52138-52160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870079>
- Ahamad, M. R., Kushwaha, K. P. S., & Kundu, S. (2022). Systematic Literature Review on Variables Impacting Organization's Zero Accident Vision (ZAV) Implementation. *Sustainability*, 14(13), 7523. MDPI. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/13/7523>
- American Chemical Society, Committee on Chemical Safety. (2023). *Safety in Academic Chemistry Laboratories* (9th ed.). ACS. <https://www.acs.org>
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press.
- Bogue, R. (2012). Robots in the laboratory: a review of applications. *Industrial Robot*, 39(2), 113-119. <https://doi.org/10.1108/01439911211203382>
- Burange, A. S., Osman, S. M., & Luque, R. (2023). The future of MXenes. *Chemistry of Materials*, 35(35), 8767-8770. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c02491>
- Chemical Safety Board (CSB). (2011). Texas Tech University Chemistry Lab Explosion (Case Study No. 2010-05-I-TX). U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. <https://www.csb.gov/>
- Cooper, M. D. (2000). Towards a model of safety culture. *Safety Science*, 36(2), 111-136. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00035-7)
- Deng, S., Li, C., Cao, J., Cui, Z., Du, J., Fu, Z., Yang, H., & Chen, P. (2023). Organ-on-a-chip meets artificial intelligence in drug evaluation. *Theranostics*, 13(13), 4526-4558. <https://doi.org/10.7150/thno.87266>
- ECHA (European Chemicals Agency). (2023). Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment - Chapter R.7a: Endpoint specific guidance (Version 7.0). European Chemicals Agency.
- European Agency for Safety and Health at Work. (2023, July 25). The role of Vision Zero and related occupational safety & health strategies, interventions, and tools in reducing EU work related fatalities, accidents and ill health. OSHwiki. <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/role-vision-zero-and-related-occupational-safety-health-strategies-interventions-and-tools>
- Flin, R., Mearns, K., O'Connor, P., & Bryden, R. (2000). Measuring safety climate: identifying the common features. *Safety Science*, 34(1-3), 177-192. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00037-3)
- Guthrie, S., Lichten, C. A., van Belle, J., Ball, S., Knack, A., & Hofman, J. (2018). Understanding mental health in the research environment: A Rapid Evidence Assessment. RAND Corporation. <https://doi.org/10.7249/RR2022>
- Hou, W., Zhang, Y., Huang, F., Xu, H., et al. (2024). Nanomole-scale medical chemistry and bioconjugation-compatible bioinspired selenium–nitrogen exchange (SeNEx) click chemistry. *Angewandte Chemie*, 136(15). <https://doi.org/10.1002/ange.202318534>
- Ismael, M., McCall, R., McGee, F., Belkacem, I., Stefan, M., Baixauli, J., & Arl, D. (2024). Acceptance of augmented reality in laboratory safety training: Methodology and an evaluation study. *Frontiers in Virtual Reality*, 5. <https://doi.org/10.3389/frvir.2024.1322543>
- Jin, X., Zhang, H., & Wang, X. (2025). Kimyasal İlgili Akademik Laboratuvarların Emniyet ve Güvenlik Risk Yönetimindeki Önyargılar. *Laboratories*, 2(2), 11. <https://doi.org/10.3390/laboratories2020011>
- Kemsley, J. (2015). Learning from UCLA. *Chemical & Engineering News*, 93(6), 29-34. <https://doi.org/10.1021/cen-09306-cover>
- Kümmerer, K., & Clark, J. H. (2020). Sustainability and circular economy in the chemistry curriculum. *Green Chemistry*, 22(18), 5917-5920. <https://doi.org/10.1126/science.aba4979>
- Lee, S., Kim, J., Kim, D., Lee, G., et al. (2024). Wearable volatile organic compound sensors for plant health monitoring. *Advanced Sustainable Systems*.
- Maheronnaghsh, S., Zolfagharnasab, H., Gorgich, M., & Duarte, J. (2023). Machine learning in occupational safety and health: A systematic review. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 7(1), 14-32. [https://doi.org/10.24840/2184-0954\\_007-001\\_001586](https://doi.org/10.24840/2184-0954_007-001_001586)
- Mittelstadt, B. D., Allo, P., Taddeo, M., Wachter, S., & Floridi, L. (2016). The ethics of algorithms: Mapping the debate. *Big Data & Society*, 3(2), 2053951716679679. <https://doi.org/10.1177/2053951716666516>
- Mould, R. F. (1993). *A century of X-rays and radioactivity in medicine: With emphasis on photographic records of the early years* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315136271>
- Mughal, B. (2023, October 1). Zero Accidents: 10 Steps To Achieve This Goal At Workplace. HSE Blog. <https://www.hseblog.com/zero-accidents/>
- National Research Council, Committee on Prudent Practices in the Laboratory. (2014). *Safe science: Promoting a culture of safety in academic chemical research*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18874>
- Nyström, A. M., & Fadeel, B. (2012). Safety assessment of nanomaterials: Implications for nanomedicine. *Journal of Controlled Release*, 161(2), 403-408. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.01.027>

- Reason, J. (2000). Human error: models and management. *BMJ*, 320(7237), 768-770. <https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768>
- Safety Partners, Inc. (2025). Incidents, Accidents, and Near Misses in Laboratory Research (Vol. 9). Safety Partners, Inc. [https://www.safetypartnersinc.com/wpcontent/uploads/2025/01/IANM\\_Publication\\_Vol\\_9\\_DIGITAL.pdf](https://www.safetypartnersinc.com/wpcontent/uploads/2025/01/IANM_Publication_Vol_9_DIGITAL.pdf)
- Wang, W., Su, Y., Cao, H., & Li, D. (2025). Enhancing Chemical Laboratory Safety with Hazards Risks Mitigation and Strategic Actions. *Laboratories*, 2(1), 5. <https://doi.org/10.3390/laboratories2010005>
- Zwetsloot, G., Kines, P., Ruotsala, R., Drupsteen, L., & Bezemer, R. (2017). Zero Accident Vision based strategies in organisations: Innovative perspectives. NIVA. [https://niva.org/app/uploads/Zwetsloot\\_Kines-et-al-Vision-Zero-Perspectives-SafSci2017.pdf](https://niva.org/app/uploads/Zwetsloot_Kines-et-al-Vision-Zero-Perspectives-SafSci2017.pdf)