

Laboratuvar Güvenilirlik Analizinde SPAR-H Yaklaşımı: Toprak Azot Analizi Örneği

Nurgül ZENGİN¹  Ertuğrul AYYILDIZ^{1,2*} 

¹Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering, Trabzon, Turkey

²Hamad Bin Khalifa University, College of Science and Engineering, Engineering Management and Decision Sciences, Doha, Qatar

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/01/2025
Düzeltilme: 14/05/2025
Kabul: 07/07/2025

Anahtar Kelimeler

Spar-h
İnsan güvenilirlik
analizi Toprak azot
analizi
İş sağlığı ve güvenliği

Article Info

Research article
Received: 22/01/2025
Revision: 14/05/2025
Accepted: 07/07/2025

Keywords

SPAR-H
Human reliability
analysis
Soil nitrogen analysis
Occupational health
and safety

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada Toprak azot analizi için SPAR-H yöntemi kullanılmıştır. Tüm görevler tanımlanarak performans şekillendiren faktör seviyeleri belirlenmiştir. Ardından nihai insan hata olasılığı SPAR-H yöntemine göre hesaplanmıştır. Hata olasılığı yüksek görevler için önlemler belirlenmiştir. / In this study, SPAR-H method was used for soil nitrogen analysis. The SPAR-H method, a human reliability analysis method, was used. All tasks were defined, and the levels of factors shaping performance were determined. The final probability of human error was then calculated using the SPAR-H method. Precautions were identified for tasks with high error probability.



Şekil A: Toprak azot analizi / Figure A: Soil nitrogen analysis

Önemli noktalar (Highlights)

- Laboratuvar ortamındaki toprak azot analizinde SPAR-H yöntemi ile insan hata olasılığı doğru bir şekilde hesaplanmıştır. / The probability of human error was accurately calculated using the SPAR-H method in laboratory soil nitrogen analysis.
- Çalışmanın daha etkin bir sonuç vermesi için performans şekillendiren faktörlere zihinsel yorgunluk eklenebileceği önerilmiştir. / It has been suggested that mental fatigue can be added to the performance-shaping factors to give more effective results.
- Çalışma iş kazalarına yönelik önlem niteliği taşımaktadır. / The study, it is a precaution against work accidents.

Amaç (Aim): Çalışmanın amacı laboratuvar koşulları için SPAR-H yöntemi ile insan hata olasılığının belirlenmesidir. / The aim of the study is to determine the probability of human error using the SPAR-H method under laboratory conditions.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma SPAR-H yöntemi ile Toprak azot analizi sürecini analiz edip insan hata olasılığını hesaplaması yönüyle özgün bir nitelik taşımaktadır. / This study is original in that it analyzes the soil nitrogen analysis process using the SPAR-H method and calculates the probability of human error.

Bulgular (Results): En yüksek hata olasılığı, 0,72 ile "Destilasyon Ünitesi" aşamasında belirlenmiştir. Bunu, 0,67 hata olasılığıyla "Eleme İşlemi" izlemektedir. Bu bulgular, bu adımların kimyasal reaksiyonlar ve ekipman kullanımı bakımından daha karmaşık olması nedeniyle hata riskini artırdığını göstermektedir. / The highest probability of error was found in the "Distillation Unit" stage, at 0.72. This was followed by the "Sieving Process" with a probability of error of 0.67. These findings suggest that these steps increase the risk of error due to the greater complexity of chemical reactions and equipment use.

Sonuç (Conclusion): Laboratuvar kazalarının önlenmesine yönelik iyileştirme çalışmalarında düzenli eğitim ve tecrübe kazanımının önemi, hem bu çalışma hem de literatürdeki benzer araştırmalar tarafından bir kez daha doğrulanmıştır. / The importance of regular training and experience in improvement efforts to prevent laboratory accidents has been confirmed once again by both this study and similar studies in the literature.



Laboratuvar Güvenilirlik Analizinde SPAR-H Yaklaşımı: Toprak Azot Analizi Örneği

Nurgül ZENGİN¹ Ertuğrul AYYILDIZ^{1,2*}

¹Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering, Trabzon, Turkey

²Hamad Bin Khalifa University, College of Science and Engineering, Engineering Management and Decision Sciences, Doha, Qatar

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/01/2025
Düzeltilme: 14/05/2025
Kabul: 07/07/2025

Anahtar Kelimeler

SPAR-h
İnsan güvenilirlik analizi
Toprak azot analizi
İş sağlığı ve güvenliği

Öz

Bu çalışma, Trabzon Orman Bölge Müdürlüğü laboratuvarında yürütülen toprak azot analizi sürecinde insan hata olasılıklarını SPAR-H yöntemiyle incelemektedir. HRA yaklaşımının laboratuvar kazalarına uygulanması, prosedürlerin ve ekipmanların yanı sıra personelin deneyim ve eğitim düzeyi gibi faktörlerin de önemini ortaya koymuştur. Analiz adımlarında öncelikle tüm görevler tanımlanmış, ardından Performans Şekillendiren Faktörlerin (PSF) seviyeleri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, en yüksek hata olasılığının distilasyon ünitesinde (0,72) gözlemlendiğini ve bunu eleme aşamasının (0,67) izlediğini göstermektedir. Destilasyon ünitesinde sıcak numuneyle çalışma ve kapasite eksikliği, eleme aşamasında ise yoğun tozun oluşturduğu sağlık riskleri sürecin kritik noktalarıdır. Bu riskleri azaltmak amacıyla kapasite artışı, koruyucu ekipman kullanımı ve ek eğitim programları önerilmiştir. Ayrıca analiz sırasında zihinsel yorgunluk gibi faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışma, SPAR-H yönteminin laboratuvar ortamlarında uygulanabilirliğini kanıtlamakta ve yüksek riskli endüstriler dışında da etkinliğinin altını çizmektedir. Elde edilen bulgular, iş güvenliği, verimlilik ve laboratuvar kazalarının önlenmesi konularında önemli veriler sunarak gelecekte yapılacak benzer araştırmalara yol göstermektedir.

Laboratory Reliability Analysis Using the SPAR-H Approach: A Case Study on Soil Nitrogen Analysis

Article Info

Research article
Received: 22/01/2025
Revision: 14/05/2025
Accepted: 07/07/2025

Keywords

SPAR-H
Human reliability analysis
Soil nitrogen analysis
Occupational health and safety

Abstract

This study examines the probability of human error in the soil nitrogen analysis process conducted in the Trabzon Forest Regional Directorate's laboratory through the SPAR-H method. Applying the HRA approach to laboratory incidents highlights the significance of procedural guidelines, equipment, and factors such as personnel experience and training. In the analysis steps, all tasks were initially defined, followed by the determination of Performance Shaping Factor (PSF) levels. The findings reveal that the highest error probability was observed in the distillation unit (0.72), followed by the sieving stage (0.67). Working with hot samples and limited capacity in the distillation unit, as well as the heavy dust encountered during sieving, were identified as critical points in the process. In order to mitigate these risks, capacity enhancements, the use of protective equipment, and additional training programs were recommended. Moreover, the importance of considering mental fatigue during the analysis was emphasized. This study demonstrates the applicability of the SPAR-H method in laboratory settings and underlines its effectiveness beyond high-risk industries. The results provide valuable insights into occupational safety, efficiency, and laboratory accident prevention, offering a foundation for future research in similar domains.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsan güvenilirlik analizi (HRA), insanların risk durumuna katkısını değerlendirebilmek amacıyla farklı nitel ve nicel değerlendirmelerden

yararlanmaktadır. HRA, insan hatası olasılığını tanımlamak, modellemek ve ölçmekle ilgilenir [1].

Sanayi devriminden sonra meydana gelen kazalarda başlangıçta teknik kaynaklı sorunlar üzerinde yoğunlaşıldığı görülmektedir. İlerleyen dönemlerde

ise odak noktası insan kaynaklı hatalara kaymış ve bu tür hataların çok ciddi sonuçlar doğurduğu ortaya konmuştur. Uzmanlar, insan performansını ölçmeye

ve performansı etkileyen etmenleri belirlemeye ağırlık vermiştir. Bu çabaların sonucunda, insan hatası olasılığını hesaplamak amacıyla çok sayıda yöntem geliştirilmiştir [2]. Başarılı bir risk analizinin amaçlarından biri, olumsuz aktivitelerin gerçekleşmesinden kaçınmaktır [3].

İnsan güvenilirlik analizi yöntemleri arasındaki farklar doğrultusunda üç nesilden oluşan bir sınıflandırma yapılmıştır: birinci nesil 1975'ten 1990'a, ikinci nesil 1990'dan 2005'e, üçüncü nesil ise 2005'ten günümüze kadar devam etmektedir.

Bir operasyonda tanımlanmış alt görevlerin insan hatası olasılıklarına yoğunlaşanlar, birinci nesil yöntem olarak bilinmektedir. Bu yöntemler günümüzde de birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaya devam etmektedir. İkinci nesil yöntemler, Performansı Şekillendiren Faktörleri (PŞF'ler) tanımlarken çalışanın bilişsel süreçlerine ağırlık vermektedir. Üçüncü nesil yöntemler ise bu faktörler arasındaki etkileşimlerin ayrıntılarını açıklamaya odaklanmaktadır [4]. Literatürde yer alan bazı yöntemler Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. İnsan güvenilirlik analizi yöntemleri (Human reliability analysis methods)

Yöntem	Geliştiren	Faaliyet Alanı
AIPA (Accident Investigation And Progression Analysis)	Raabe, 1974 [5]	Nükleer
THERP (Technique For Human Error Rate Prediction)	Swain ve Guttman, 1983 [6]	Nükleer
SLIM (Success Likelihood Index Method)	Embrey, 1983 [7]	Nükleer
HEART (Human Error Assessment And Reduction Technique)	Williams, 1985 [8]	Nükleer
SHERPA (Systematic Human Error Reduction And Prediction Approach)	Embrey, 1986 [9]	Genel
CREAM (Cognitive Reliability And Error Analysis Method)	Hollnagel, 1998 [10]	Nükleer
ATHEANA (A Technique For Human Error Analysis)	Cooper vd., 1996 [11]	Nükleer
SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk Human Reliability Analysis)	Nuclear Regulatory Commission (NRC), 1999 [12]	Nükleer

Kaza, beklenmedik bir zamanda ve beklenmedik bir şekilde, tedbirsizlik, ihmal, bilgisizlik veya dikkatsizlik gibi faktörler sonucunda insana, çevreye, hayvana veya eşyalara zarar veren; yaralanmalara, can ya da mal kaybına yol açabilen olay olarak tanımlanmaktadır [13]. Kaza sıklığına yönelik yapılan çalışmalarda, kimyasal üretimle ilişkili sektörlerin en yüksek kaza oranına sahip olduğu ifade edilmektedir [14]. İnsan faktörünün olduğu her ortam gibi laboratuvarlar da kaza riski yüksek alanlar arasında yer almaktadır.

Laboratuvar kazaları denildiğinde en yaygın olarak akla gelen durumlar; kesik, kanama, yanık, göze ya da ağza yabancı madde girmesi, ayrıca cilt veya solunum yoluyla zehirlenme biçiminde özetlenebilir [15]. Bu çalışmada, Trabzon Orman Bölge Müdürlüğü laboratuvarında sık gerçekleştirilen toprak azot analiz sürecindeki insan

hata olasılıkları SPAR-H yöntemiyle değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, laboratuvar süreçlerinde insan hatasına neden olan performans şekillendiren faktörleri belirleyerek laboratuvar güvenliği ve iş verimliliğini artırmaya yönelik öneriler geliştirmektir.

Bu çalışmada SPAR-H yönteminin laboratuvar ortamlarındaki uygulanabilirliğini araştırmak amacıyla sistematik bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması, şeffaf ve tekrarlanabilir bir yaklaşım olan PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) metodolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Scopus veri tabanında 2024 yılına kadar yayınlanmış olan makaleler, belirlenen anahtar kelimeler ve kombinasyonları kullanılarak taranmıştır. Tablo 2' de sorgu sonuçları özetlenmiştir

Tablo 2. Scopus veri tabanında Literatür taraması için kullanılan araştırma terimleri (Search terms used for literature search in Scopus database)

Aranan Anahtar Kelimeler	Bulunan Makale Sayısı
SPAR-H	176
SPAR-H AND "risk assessment"	99
"human reliability" AND "laboratory accidents"	2
SPAR-H" AND "laboratory accidents"	1

Taramada belirlenen toplam 278 makaleden, erişilebilirlik kriterleri doğrultusunda değerlendirmeye alınabilen 40 makale, ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda SPAR-H yönteminin ağırlıklı olarak nükleer enerji, denizcilik ve petrol sektörleri gibi yüksek riskli

alanlarda kullanıldığı, laboratuvar ortamları üzerine yapılan çalışmaların ise oldukça sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu sınırlı sayıdaki çalışmadan öne çıkanlar ve uygulama alanları Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Önemli çalışmaların özeti (Summary of key studies)

Yazar	Yıl	Metod	Uygulama Alanı
Omidvari vd. [16]	2015	AHP	Üniversite laboratuvarı
Eyvazlou vd. [17]	2019	SPAR-H	Jeneratör tesisi
Zhan vd. [18]	2019	SPAR-H	Metro hattı kapı operasyonu
Taylor vd. [19]	2020	SPAR-H	Petrol endüstrisi
Liu vd. [20]	2021	SPAR-H	Nükleer santraller
Zhang vd. [21]	2022	SPAR-H, Bayes Ağı	Deniz taşımacılığı
Ahn vd. [22]	2022	SPAR-H	Gemilerde insan hatası
Ma vd. [23]	2022	Bulanık Küme ve Bayes Ağı	Laboratuvar yangını ve patlamaları
Lu[24]	2023	İstatistiksel analiz ve grafik	Üniversite laboratuvarı
Elidolu vd. [25]	2023	SPAR-H	Deniz taşımacılığı
He vd. [26]	2024	SPAR-H ve CREAM	Üniversite laboratuvarı risk ataması
Si ve Niu [27]	2024	SPAR-H, DEMATEL, ANP	İnşaat kuleleri
Liu vd. [28]	2025	SPAR-H	Nükleer santraller

SPAR-H yöntemi; sistematik yapısı, farklı görev türlerine uyarlanabilirliği ve performans şekillendiren faktörleri dikkate alması nedeniyle tercih edilmiştir. Literatürde çoğunlukla yüksek riskli sektörlerde kullanılan bu yöntemin, laboratuvar gibi daha küçük ölçekli ancak yüksek risk taşıyan ortamlarda uygulanabilirliğinin araştırılması çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. Toprak azot tayini süreci ise hem kimyasal hem de fiziksel etkileşimlerin yoğun olduğu, aynı zamanda sık tekrarlanan bir analiz türü olması nedeniyle seçilmiştir. Süreç boyunca maruz kalınan sıcaklık, kimyasal buharlar, toz ve ergonomik zorlanmalar; insan hatasının meydana gelme olasılığını artırmakta ve laboratuvar güvenliğini doğrudan etkilemektedir.

Trabzon'da Orman Bölge Müdürlüğü laboratuvarında yürütülen uygulamada toprak azot analizi örneği ele alınmıştır. Laboratuvarlarda toprak verimliliğini saptayabilmek için içindeki element miktarlarının belirlenmesi önemlidir. Azot tayini, laboratuvar ortamında sıklıkla

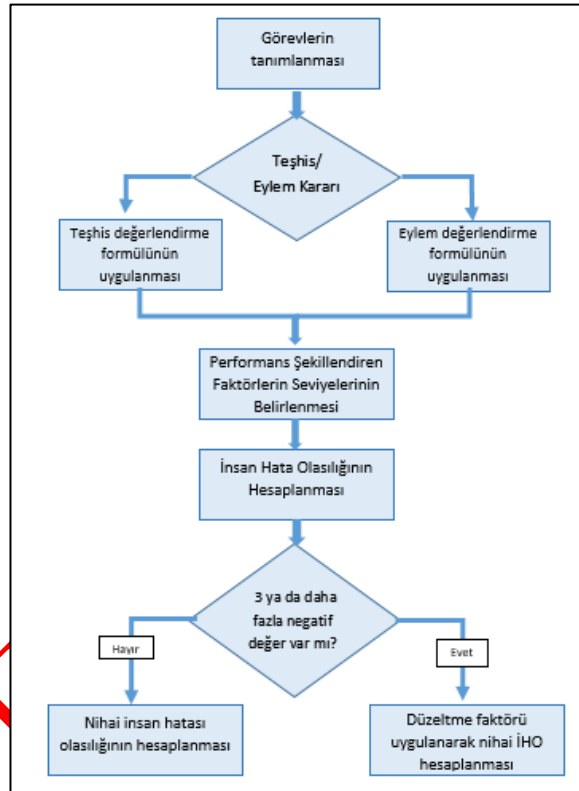
gerçekleştirilen bir işlem olduğu için insan hata olasılığının tespitinde bu süreç tercih edilmiştir.

Laboratuvar ortamlarında meydana gelen kazalar, kimyasalların doğrudan insan sağlığı, çevre ve iş güvenliği üzerinde hızlı ve önemli etkiler oluşturmaya neden olmaktadır. Türkiye'deki çalışmaların büyük bölümü nükleer, denizcilik, havacılık gibi alanlara yoğunlaşırken, laboratuvar kazalarına ilişkin insan güvenilirlik analizi araştırmalarının sınırlı olması dikkat çekmektedir. Bu eksikliği giderebilmek ve laboratuvarlarda gerçekleştirilen işlemlerde insan faktörünün kritik rolünü ayrıntılı biçimde ortaya koymak amacıyla söz konusu laboratuvarın toprak azot tayini sürecinde SPAR-H yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların, laboratuvar kazalarının azalmasına ve performans şekillendiren faktörlerin iyileştirilmesine katkıda bulunması hedeflenmektedir.

1. SPAR-H

SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis) tekniği, ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC) tarafından 1994 yılında ilk kez tanıtılmış ve 1999 yılında son haline getirilmiştir. Bu yöntem, insan güvenilirliği açısından bir tesisteki görevler için hata olasılığını, nominal hata oranını, PŞF ve görevler arasındaki hata bağımlılığını hesaplamaya odaklanmaktadır [29]. SPAR-H tekniği, geleneksel olarak nükleer enerji santralleri gibi yüksek riskli sektörlerde uygulanmasına rağmen, sağlık, ulaştırma ve endüstriyel tesisler gibi farklı alanlarda da kullanılmaktadır.

SPAR-H yönteminin geliştirilmesinde, ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu tarafından hazırlanan NUREG serisi raporlarından yararlanılmıştır. Bu raporlar, insan faktörü mühendisliğine ilişkin çerçeveyi oluşturmakla birlikte, insan hatası olasılığının (Human Error Probability - HEP) hesaplanmasında kullanılacak çarpanların standartlaştırılmasına büyük katkı sağlamıştır [12]. SPAR-H yönteminin genel akış şeması ve adımları Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. SPAR-H yöntemi akış diyagramı (SPAR-H method flow diagram)

Adım 1. Görevlerin Tanımlanması: Değerlendirmeye alınacak süreç veya operasyon içerisindeki tüm adımlar belirlenir. Görevlerin doğru ve eksiksiz biçimde ortaya konması, yöntem uygulamasında güvenilir sonuçlar elde edebilmek için önem taşımaktadır.

Adım 2. Görevlerin Eylem mi Teşhis mi Olduğuna Karar Verilmesi: SPAR-H yöntemi, görevleri genel olarak “eylem” ve “teşhis” olarak iki ayrı kategoride ele alır. Eylem, fiziksel bir müdahale veya işlemi ifade ederken, teşhis görevleri karar alma, durum değerlendirme ve bilişsel işlem ağırlıklı faaliyetleri kapsamaktadır.

Adım 3. PŞF Seviyelendirilmesi: Tablo 4’te gösterilen PŞF’ler, SPAR-H yöntemine göre

standart olarak sekiz başlık altında toplanır [29]. Her bir faktörün insan performansını nasıl etkileyeceği, olumlu ya da olumsuz seviyelerle değerlendirilir.

- Kullanılabilir Zaman: İlgili görevi tamamlamak için gerekli zaman, operatörün fiilen sahip olduğu süre ile karşılaştırılır. Zaman baskısı arttıkça hata olasılığı yükselir.
- Stres Faktörü: Aşırı ısı, gürültü, yetersiz havalandırma, kimyasal maruziyet gibi çevresel veya psikolojik stres kaynaklarıdır.
- Karmaşıklık: Görevin ne derece zor olduğunu ve birden fazla alt adım, cihaz

veya prosedür gerektirip gerektirmediğini yansıtır.

- Tecrübe ve Eğitim: Operatörün önceki deneyimleri, aldığı eğitimlerin niteliği ve miktarı dikkate alınır. Eğitim alınmış olsa dahi pratik yetersizlik varsa bu PŞF olumsuz şekilde seviyelendirilir.
- Prosedür: Tanımlanan görev için resmi bir işleyiş dokümanının varlığını ve kullanımını ifade eder. Prosedür eksikliği veya güncel olmaması, hata olasılığını artırır.
- Ergonomi: İşin insana uyumu ve insan-makine arayüzleriyle ilişkilidir.

Ekipmanların uygun tasarımı, yazılımların kullanıcı dostu olması gibi unsurlar bu faktör altında değerlendirilir.

- Göreve Uygunluk: Operatörün fiziksel ve zihinsel yeterliliğinin yapılan iş için uygunluğunu yansıtır. Yorgunluk, hastalık veya dikkat dağınıklığı gibi durumlar olumsuz etkilere yol açabilir.
- İş Süreçleri: Çalışanlar arasındaki iletişim, planlama, yönetim desteği gibi iş yapış şekillerinin bütünüdür. Planlama hataları, eksik iletişim veya yetersiz koordinasyon, hata olasılığını artıracak etkenlerdir.

Tablo 4. Teşhisler için PŞF seviyeleri (PSF levels for diagnoses)

PŞFler	PŞF Seviyeleri	Teşhis için Çarpan
Kullanılabilir Zaman	Yetersiz Zaman	100
	Yaklaşık yeterli zaman ($\approx 2/3$ x nominal)	10
	İdeal Zaman	1
	Ekstra Zaman (yarım saat 1 saat)	1
	Aşırı Zaman > 2 katı kadar	0.1
Stres	Aşırı	5
	Yüksek	2
	Nominal	1
	Yetersiz Bilgi	1
Karmaşıklık	Yüksek Karmaşıklık	5
	Orta Derecede	2
	Nominal	1
	Belirgin adımlar	0,1
	Yetersiz Bilgi	1
Tecrübe/Eğitim	Düşük	10
	Nominal	1
	Yüksek	0,5
	Yetersiz Bilgi	1
Prosedürler	Mevcut değil	50
	Eksik	20
	Mevcut ancak zayıf	5
	Nominal	1
	Mevcut ve yeterli	0,5
	Yetersiz Bilgi	1

Adım 4. İnsan Hata Olasılığının Hesaplanması: SPAR-H yönteminde insan hata olasılığı (HEP), Eşitlik (1) yardımıyla belirlenir. Her bir hata türü için nominal hata olasılığı (NHEP), teşhis görevleri için 0,01 ve eylem görevleri için 0,001 olarak varsayılmıştır. PŞF'ler nominalden (çarpan 1)

olumlu veya olumsuz değer aralıklarına göre güncellenir.

$$HEP = (Eylem / Teşhis Görevi Çarpanı) \times \left(\prod_{i=1}^8 P_{\text{PŞF}_i} \right) \quad (1)$$

Adım 5. Negatif Etkili Çarpanların Değerlendirilmesi: Üç veya daha fazla negatif etkili çarpan söz konusu olduğunda, Eşitlik (2) ile nihai insan hata olasılığı yeniden hesaplanır. Bu sayede birden çok olumsuz faktörün aynı anda devreye girmesi durumunda hata olasılığının aşırı yükselmesi veya azımsanması engellenir.

$$\text{İnsan Hata Olasılığı} = \frac{(\text{NİHO} \times \text{PŞF}_{\text{bileşen}})}{(\text{NİHO}(\text{PŞF}_{\text{bileşen}} - 1) + 1)} \quad (2)$$

Burada **NİHO**, nominal insan hata olasılığını, **PŞF_{bileşen}** ise olumsuz etkiyi artıran faktörlerin

2. UYGULAMA (APPLICATION)

Bu bölümde, Trabzon'da Orman Bölge Müdürlüğü'nün laboratuvarında gerçekleştirilen uygulama adımları ve elde edilen bulgular ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Toprak azot analizi, pek çok laboratuvar da verimliliği belirlemek ve tarımsal kararları desteklemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Topraktaki element içeriklerinin bilinmesi hem verimi artırıcı tedbirlerin alınmasını hem de analiz sürecinde kimyasal materyallerle etkileşime giren personelin güvenliğinin sağlanmasını önemli hale getirmektedir. Bu çalışmada insan hata olasılığının tespit edilebilmesi için SPAR-H yönteminin sistematik adımları uygulanmış ve "azot tayini" süreci üzerinde durulmuştur. Sıklıkla yürütülen bir işlem olması ve kimyasal etkileşimlerin çeşitli riskler doğurabilmesi nedeniyle bu analiz süreci, çalışmanın amaçlarına uygun bir vaka sunmaktadır.

Trabzon'da Orman Bölge Müdürlüğüne ait laboratuvar, araştırma ve analiz faaliyetlerini yürütmek üzere gerekli teknik donanımına sahiptir. Özellikle toprak örneklerinde azot, fosfor, potasyum gibi makro ve mikro besinlerin tayini yoğun olarak yapılmaktadır. Toprak azot analizi, laboratuvar da en sık tekrarlanan süreçlerden biri olduğu için insan kaynaklı hataların ortaya çıkma ihtimali açısından değerli bir uygulama alanı oluşturmaktadır. Bu süreçte, farklı kimyasal reaktiflerin kullanılması, yüksek ısıya maruz kalma ve otomatik cihazların işletilmesi gibi çeşitli adımlar söz konusudur.

bileşkesini temsil eder [12]. SPAR-H yöntemi, kullanılabilir zaman ve prosedür yeterliliği gibi değişkenleri standart çarpanlar aracılığıyla ele alması nedeniyle uygulama kolaylığı sunar. Bununla birlikte, faktörler arasındaki etkileşimler veya kuruluşun kurumsal yapısı gibi daha karmaşık değişkenlerin analizinde ek değerlendirmeler gerekebilir [12]. Bu doğrultuda, SPAR-H hem nitel hem de nicel bilgilerle desteklendiğinde etkinliğini artıran bir yöntemdir ve süreç iyileştirme çalışmalarında yol gösterici bir araç olarak değerlendirilmektedir.

SPAR-H yönteminin temel yaklaşımında öncelikle tüm görevler tanımlanır ve her görevin hangi tip eylem ya da teşhis işlevine sahip olduğu belirlenir. Daha sonra Performans Şekillendiren Faktörlerin (PŞF) seviyeleri tespit edilerek insan hata olasılığı (İHO) nominal değer üzerinden hesaplanır. Bu çalışma kapsamında, azot tayini sürecinde aşağıdaki aşamalar dikkate alınarak analiz gerçekleştirilmiştir:

- I. Toprağın Hazırlanması: Azot analizi yapılacak olan toprak örnekleri laboratuvara ulaştıktan sonra kuruması için bekletilir. İşlemler hava kurusu toprak üzerinden yapılır.
- II. Toprağın Elekten Geçirilmesi: Kurumuş toprak 2 mm'lik elekten geçirilerek incelenmiş hale getirilir. Analiz için elekten geçen ince kısım kullanılır.
- III. Nem Ölçümü: Yaklaşık 2–10 gram hava kurusu toprak örneğinin nemi ölçülür. Böylece kuruma derecesi ve geriye kalan nem oranı belirlenir.
- IV. Yakma İşlemi: Toprak numunesi, 10 ml sülfürik asit ve 3 gr azot ile bakır sülfat eklenerek yakma ünitesinde yakılır. Tepkime tamamlandıktan sonra tüp, soğuması için bekletilir. Yakma ünitesi Şekil 2'de görselleştirilmiştir.



Şekil 2. Yakma ünitesi (Combustion unit)

- V. Destilasyon Cihaz Bağlantısı: Azot tayini için kullanılan destilasyon ünitesi, bir bilgisayara bağlanarak sonuçların alınacağı program çalışır hale getirilir. Bu aşamada yazılımın kurulu ve güncel olması önem taşır.
- VI. Destilasyon Ünitesi (bkz. Şekil 3): Yakma işlemi tamamlanan ve soğuyan tüp, cihazın sol bölümüne yerleştirilir. Sağda bulunan tüpte ise %2'lik borik asit bulunur. İlk olarak borik asidin pH'ı ölçülür. Cihaz,

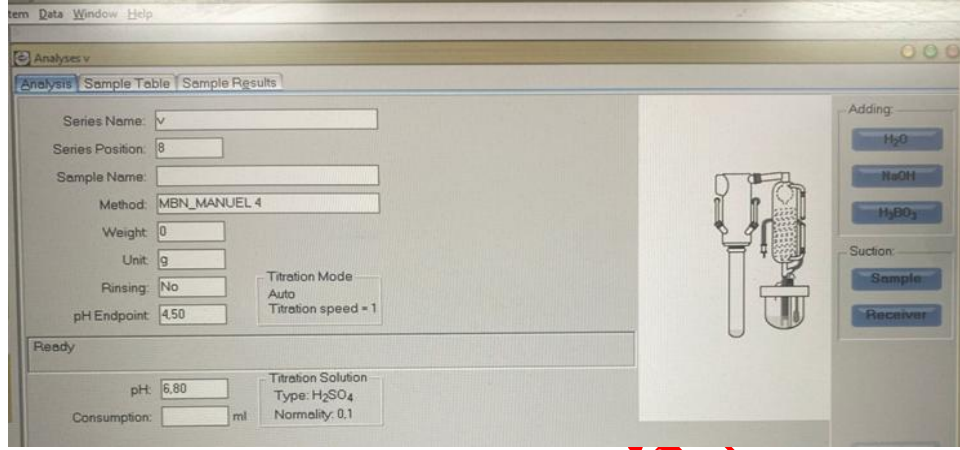
sodyum hidroksiti (NaOH) karışıma dahil ederek kimyasal tepkime oluşturur. Açığa çıkan buhar, borik asit bulunan tüpe yönlendirilir. Sıvı geldikçe pH değişir ve titrasyon devam eder. İşlem, pH değeri ilk ölçülen seviyeye gelinceye kadar sürdürülür. Sürecin sonunda azot değeri, bilgisayar ekranındaki sonuç bölümünde görüntülenir.



Şekil 3. Destilasyon ünitesi (Distillation unit)

VII. Atık Depolama: Tam otomatik cihazlarda analiz bittiğinde atık madde, makineye bağlı hortumlar aracılığıyla özel bir toplama kabına aktarılır. Bu aşamada herhangi bir sorun ortaya çıkarsa sistem

kendiliğinden işlemi durdurur. Analiz sona erdiğinde Şekil 4'te görülen VOPEDST Manager programı üzerinden azot tayini sonuçlarına ulaşılır.



Şekil 4. VOPEDST manager programı toplam azot tayini sonuç ekranı (VOPEDST manager program total nitrogen determination result screen)

Bu aşamalar tamamlandığında, SPAR-H yönteminin ilk adımı olan “görev tanımlama” süreci sonuçlanmış olur. Analizin devamında, her görev için sekiz faktörün seviyesi belirlenir. Tablo 5 seviyeleri göstermektedir. PŞF’lerden herhangi

biri nominal düzeyde ise hesaplamaya eklenmesi gerekmez. Bu çalışmada en yüksek seviye, “Ergonomi” ve “Prosedür” faktörlerinde, özellikle eleme aşamasında görülmüştür.

Tablo 5. Performans şekillendiren faktör seviyeleri (Performance shaping factor levels)

Görevler/ Faktörler	Hazırlık	Elek	Nem Ölçümü	Yakma Ünitesi	Cihazın Bağlanması	Destilasyon Ünitesi	Atık Depolama
Kullanılabilir zaman	10	1	0,1	10	1	10	1
Stres	1	2	1	5	2	5	1
Karmaşıklık	1	2	5	2	2	1	1
Tecrübe ve eğitim	1	1	10	10	10	10	10
Prosedür	1	20	1	1	0,5	0,5	1
Ergonomi	1	50	1	1	1	10	1
Görev Uygunluk	1	5	1	5	1	5	1
İş süreçleri	1	1	1	0,8	1	2	1
Kullanılabilir zaman	10	1	0,1	10	1	10	1

Her görev için Eşitlik (1) kullanılarak insan hata olasılıkları hesaplanmıştır.

Hazırlık için $\dot{I}HO = 10 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,01 = 0,10$ nihai insan hata olasılığıdır.

Elek için $\dot{I}HO = 1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 20 \cdot 50 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 0,01 = 200$ Bu görev için performans faktör değerlerinde 1den büyük 5 değer vardır. Bu durumda Eşitlik (2)

kullanılır. $\dot{N}IHO = (0,01 \cdot 200) / (0,01 \cdot (200 - 1) + 1) = 0,67$ dir.

Nem Ölçümü için $\dot{I}HO = 0,1 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,01 = 0,05$ nihai insan hata olasılığıdır.

Yakma Ünitesi için $\dot{I}HO = 10 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 0,8 \cdot 0,01 = 40$ tır. 5 adet 1 den

büyük değer olduğundan Eşitlik 2 kullanılmalıdır. $NİHO = (0,01*40) / (0,01*(40-1)+1)=0,29$ dur.

“Destilasyon Ünitesi” aşamalarında ise Eşitlik (2) yardımıyla nihai insan hata olasılıkları yeniden değerlendirilmiştir.

Üç veya daha fazla negatif yönlü seviye bulunan “Elek”, “Yakma Ünitesi”, “Cihazın Bağlanması” ve

3. BULGULAR (RESULTS)

SPAR-H yöntemiyle yürütülen hesaplamalar sonucunda, tüm görevlerin nihai insan hata olasılıkları Tablo 6’te özetlenmiştir.

Tablo 6. Nihai insan hata olasılığı (Ultimate probability of human error)

No	Görevler	İnsan Hata Olasılığı
1	Hazırlık	0,10
2	Elek	0,67
3	Nem Ölçümü	0,05
4	Yakma Ünitesi	0,29
5	Cihazın Bağlanması	0,00
6	Destilasyon Ünitesi	0,72
7	Atık Depolama	0,10

En yüksek hata olasılığı, 0,72 ile “Destilasyon Ünitesi” aşamasında belirlenmiştir. Bunu, 0,67 hata olasılığıyla “Eleme İşlemi” izlemektedir. Bu bulgular, bu adımların kimyasal reaksiyonlar ve ekipman kullanımı bakımından daha karmaşık olması nedeniyle hata riskini artırdığını göstermektedir. Analiz sonrasında, insan hata olasılığı yüksek görevler için laboratuvar şefiyle yapılan fikir alışverişinde çeşitli önleyici tedbirler gündeme getirilmiştir. Bu tedbirler arasında, ergonomik şartların iyileştirilmesi, prosedürlerin güncellenmesi ve çalışanların bu konularda düzenli biçimde eğitime tabi tutulması bulunmaktadır. Analiz sonuçlarının iş güvenliği, verimlilik ve çevresel riskleri azaltma açısından önemli çıkarımlar sağladığı düşünülmektedir. Özellikle laboratuvar ortamındaki yüksek risk faktörlerini dikkate alan iyileştirme çalışmaları, uzun vadede hem iş gücü kayıplarını hem de laboratuvar kazalarını en aza indirebilecektir.

Toplam azot analizi sürecine yönelik insan güvenilirlik analizi sonuçları, özellikle destilasyon ünitesi ve eleme aşamasında hata olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir. Destilasyon ünitesinde tüp çıkartma işlemi sırasında tüpün ısınması ve kimyasal sıvı sıçrama riski, hem güvenlik ekipmanlarının kullanımını hem de sistemin ergonomisini ön plana çıkarmaktadır. Kalın eldiven ve koruyucu gözlük kullanılmasının

zorunlu tutulması, bu riskleri önemli ölçüde azaltacaktır. Cihazı kullanacak tüm personelin bu süreçlerde deneyim kazanabilmesi için düzenli eğitime tabi tutulması önerilmektedir. Ayrıca çalışma sırasında tespit edilen en büyük verimlilik sorunlarından biri, yakma ünitesinin 20 tüplük kapasitesine karşın mevcut destilasyon ünitesinin yalnızca 1 tüp kapasiteli olmasıdır (Şekil 5). Bu durum, zaman yetersizliğine ve verimsiz iş akışına neden olmaktadır. Kapasite artışıyla, kullanılabilir zaman faktörünün olumsuz etkisi azaltılabilecektir.

Elekleme aşamasında yaşanan yoğun toz çıkışı, personelin solunum yolları üzerinde doğrudan olumsuz etki göstermektedir. Geçmişte bu aşamada rahatsızlık yaşayan bir çalışanın işten ayrıldığı bilgisi, söz konusu riskin ciddiyetini artırmaktadır. Dolayısıyla solunum yollarında hassasiyet (alerjik astım, KOAH vb.) bulunan kişilerin bu göreve uygun olmadığını belirtmek gerekmektedir. Yüz maskesi kullanımı ve gerekirse aspirasyon sistemi eklenmesi, çalışma koşullarını iyileştirmeye yardımcı olacaktır.

Türkiye’de laboratuvar kazalarına yönelik yapılan risk analizlerinde SPAR-H yönteminin kullanıldığı çalışmalara rastlanmamıştır. Bu nedenle mevcut çalışma, laboratuvar ortamında SPAR-H uygulaması açısından özgün bir niteliğe sahiptir. Uluslararası literatürde ise SPAR-H ve laboratuvar

anahtar kelimeleri Scopus veri tabanında aratıldığında, yöntemin laboratuvar ortamlarında sınırlı olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu kapsamda He vd. tarafından Çin’de bir üniversite laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmada, SPAR-H ve CREAM yöntemleri kullanılarak insan güvenilirliği analizi yapılmıştır [30]. Çalışmada, güvenlik eğitimlerinin düzenli verilmesi, uygulamalı eğitimlerin sağlanması ve eğitim içeriğinin sürekli güncellenmesi gerektiği belirtilmiş, laboratuvar kazalarının en önemli

nedenlerinden birinin deneyim ve eğitim eksikliği olduğu vurgulanmıştır. Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürdeki bu bulgu ile tutarlılık göstermektedir. Özellikle hata olasılığının en yüksek olduğu görevlerde, deneyim ve eğitimin belirleyici faktörler arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, literatürdeki bulguları desteklemekte ve laboratuvar ortamında insan hatalarının azaltılmasında eğitim ve deneyimin kritik önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Laboratuvar ortamlarında yapılan çalışmaların doğası gereği kimyasal, fiziksel ve ergonomik risk faktörlerinin bir arada bulunması, insan hatası olasılığını artıran önemli bir etkidir. Bu çalışmada, Trabzon Orman Bölge Müdürlüğüne ait laboratuvarda yürütülen toprak azot analizi süreci SPAR-H yöntemiyle ele alınarak görev bazlı insan hata olasılıkları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle destilasyon ünitesi ile toprağın elekten geçirilmesi adımlarında hata riskinin yüksek olduğunu göstermiştir. Destilasyon ünitesinde sıcak numuneyle çalışma ve kimyasal sıçrama tehlikesi, eleme aşamasında ise yüksek miktarda toz oluşumu personel sağlığı ve laboratuvar güvenliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Çalışmada ortaya konan bulgular, bazı görev adımlarının gelişmiş teknolojik ekipman ve koruyucu ekipmanlarla desteklenmesi gerektiğini göstermektedir. Destilasyon ünitesinin tek tüplü yapısı, iş akışını verimsiz hale getirdiği gibi zaman baskısını da artırmaktadır. Bu sorunun çözümü için çok tüplü destilasyon ünitelerinin kullanılması önerilmiştir. Ayrıca toz çıkaran işlemlerde solunum koruyucu maskelerin zorunlu hale getirilmesi, hassas solunum yolu rahatsızlığı bulunan çalışanların eleme aşamasından uzak tutulması gibi önlemler, kaza ve sağlık risklerini önemli ölçüde azaltabilecektir.

SPAR-H yöntemi, nükleer ve yüksek riskli endüstriyel ortamlarda yaygın olarak kullanılsa da bu çalışma, laboratuvar uygulamalarında da yöntemin geçerliliğini ve pratikliğini ortaya koymuştur. Toplam azot analizi gibi sıklıkla tekrarlanan ve çeşitli kimyasalların bir arada kullanıldığı süreçlerde, insan faktörünün etkili biçimde değerlendirilmesi mümkündür. Bu kapsamda, Performans Şekillendiren Faktörler arasına “zihinsel yorgunluk” gibi ek unsurların dahil edilmesi, laboratuvar ortamlarının çoklu ve yoğun iş yükü altında ortaya çıkabilecek riskleri

daha gerçekçi bir şekilde yansıtmaya yardımcı olacaktır.

Sonuç olarak, laboratuvar kazalarının önlenmesine yönelik iyileştirme çalışmalarında düzenli eğitim ve tecrübe kazanımının önemi, hem bu çalışma hem de literatürdeki benzer araştırmalar tarafından bir kez daha doğrulanmıştır. Laboratuvar çalışanlarının karşılaşabileceği risklerin tespit edilmesi, mevcut prosedürlerin güncellenmesi, ergonomik düzenlemelerin yapılması ve uygun kişisel koruyucu donanımların kullanılması, insan kaynaklı hataları önemli ölçüde azaltabilmektedir. Bu bakımdan SPAR-H yöntemi, laboratuvar güvenliğini artırma ve süreç verimliliğini iyileştirme amacı taşıyan araştırmacılar ve yöneticiler için yol gösterici bir araç niteliği taşımaktadır. Bu çalışma yalnızca bir laboratuvar ortamındaki tek bir analiz süreci üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Mevcut durumda, laboratuvar süreçlerinde geçmişe dönük insan hatası kayıtlarının sistematik olarak tutulmaması nedeniyle, bu çalışmada SPAR-H yöntemi kullanılarak hesaplanan hata olasılıkları, gerçek hata verileriyle karşılaştırılamamıştır. Bu durum, analizlerin doğrulanmasını ve elde edilen sonuçların geçerliliğinin tam olarak gösterilmesini sınırlamaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, laboratuvar süreçlerinde meydana gelen insan hatalarının kayıtlarının sistematik bir biçimde tutulması önerilmektedir. Bu sayede, SPAR-H yöntemiyle hesaplanan teorik hata olasılıkları ile gerçek hata verileri karşılaştırılarak yöntemin etkinliği ve doğruluğu daha net biçimde ortaya konabilir. Bu tür bir veri toplama ve analiz uygulamasının, laboratuvar güvenliğini artırmada ve hata azaltıcı önlemlerin etkinliğini değerlendirmede kritik bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

Farklı laboratuvarlarda da aynı süreç için veya farklı analiz türlerine yönelik benzer SPAR-H

uygulamaları yapılarak yöntemin güvenilirliği artırılabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, SPAR-H yöntemine ek olarak farklı insan güvenilirliği analiz yöntemlerinin (örneğin CREAM, HEART) de uygulanması, yöntemler arası karşılaştırmalı analiz yapılmasına olanak

tanıyabilir. Bu çalışmada PŞF sabit değerler üzerinden değerlendirilmiştir. İleride yapılacak araştırmalarda, bulanık mantık, çok kriterli karar verme yöntemleri gibi yaklaşımlarla uzman görüşleri daha esnek biçimde modellenebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Nurgül ZENGİN: Laboratuvarında ilgili verileri toplamış, uygulamayı yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She collected the relevant data in the laboratory, implemented the application, and analyzed the results. She completed the writing of the article.

Ertuğrul AYYILDIZ: Laboratuvarında ilgili verileri toplamış, uygulamayı yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He collected the relevant data in the laboratory, implemented the application, and analyzed the results. He completed the writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C. D. Griffith and S. Mahadevan, "Inclusion of fatigue effects in human reliability analysis," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 96, no. 11, 2011, doi: 10.1016/j.res.2011.06.005.
- [2] E. Uflaz, S. I. Sezer, E. Akyuz, O. Arslan, and R. E. Kurt, "A human reliability analysis for ship to ship LNG bunkering process under D-S evidence fusion HEART approach," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 80, 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2022.104887.
- [3] S. A. Yıldız and Y. Arslan, "Risk Factors Identification and Estimation for Glass Fiber Reinforced Concrete Production Sector T1 - Cam Elyaf Takviyeli Beton Üretim Sektöründe Risk Faktörlerinin Belirlenmesi ve Tahmini," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 5, no. 4, pp. 215–221, 2017, doi: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.345755.
- [4] E. Yalçın, G. A. Çiftçioğlu, and B. Güzel, "Human reliability analysis methods," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 30, no. 2, pp. 282–292, 2024.
- [5] P. H. Raabe, "Constant failure rate of redundant repairable hardware," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 96, no. 3, 1974, doi: 10.1115/1.3445789.
- [6] E. N. Corlett, "Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications," *Appl. Ergon.*, vol. 12, no. 1, p. 36, 1981, doi: 10.1016/0003-6870(81)90094-6.
- [7] D. E. Embrey, P. Humphreys, E. A. Rosa, B. Kirwan, and K. Rea, "SLIM-MAUD: an approach to assessing human error probabilities using structured expert judgment Volume II Detailed analysis of the technical issues," 1984. [Online]. Available: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:16061396
- [8] J. C. Williams, "HEART - A PROPOSED METHOD FOR ACHIEVING HIGH RELIABILITY IN PROCESS OPERATION BY MEANS OF HUMAN FACTORS ENGINEERING TECHNOLOGY.," 1985. doi: 10.1080/09617353.2015.11691046.
- [9] D. E. Embrey, "SHERPA: A systematic human error reduction and prediction

- approach,” in *Proceedings of the international topical meeting on advances in human factors in nuclear power systems*, 1986.
- [10] E. Hollnagel, *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. 1998. doi: 10.1016/b978-0-08-042848-2.x5000-3.
- [11] S. E. Cooper, J. Wreathall, C. Thompson, M. Drouin, and D. Bley, “Knowledge-base for the new human reliability analysis method ‘A Technique for Human Error Analysis (ATHEANA),’” *Int. Top. Meet. probabilistic Saf. assessment moving Toward risk based Regul. Park City, UT*, 1996.
- [12] D. I. Gertman, H. S. Blackman, J. L. Marble, C. Smith, R. L. Boring, and P. O'Reilly, “The SPAR H human reliability analysis method,” in *American Nuclear Society 4th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human Machine Interface Technology*, 2004.
- [13] C. Niza, S. Silva, and M. L. Lima, “Occupational accident experience: Association with workers’ accident explanation and definition,” *Saf. Sci.*, vol. 46, no. 6, 2008, doi: 10.1016/j.ssci.2007.11.015.
- [14] L. J. Bellamy, D. Lisbona, M. Johnson, E. Kooi, and H. J. Mandel, “The major accident failure rates Project: Concept phase,” HSE Research Report RR915, Health and Safety Executive, Bootle, UK, 2012.
- [15] V. Şölen, “Laboratuvar kazaları ve ilk yardım,” *J. Fac. For. Istanbul Univ.*, vol. 32, no. 1, pp. 132–165, 2014, doi: 10.17099/jffiu.21947.
- [16] M. Omidvari, N. Mansouri, and J. Nouri, “A pattern of fire risk assessment and emergency management in educational center laboratories,” *Saf. Sci.*, vol. 73, 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2014.11.003.
- [17] M. Eyvazlou, A. Dadashpour Ahangar, A. Rahimi, M. R. Davarpanah, S. S. Sayyahi, and M. Mohebbali, “Human reliability assessment in a 99Mo/99mTc generator production facility using the standardized plant analysis risk-human (SPAR-H) technique,” *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 25, no. 2, pp. 321–330, Apr. 2019, doi: 10.1080/10803548.2017.1415832.
- [18] Y. Zhan *et al.*, “Human reliability study on the door operation from the view of Deep Machine Learning,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 99, 2019, doi: 10.1016/j.future.2018.11.055.
- [19] C. Taylor, S. Øie, and K. Gould, “Lessons learned from applying a new HRA method for the petroleum industry,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 194, 2020, doi: 10.1016/j.res.2018.10.001.
- [20] J. Liu *et al.*, “A study on assigning performance shaping factors of the SPAR-H method for adequacy human reliability analysis of nuclear power plants,” *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 81, p. 103051, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ERGON.2020.103051.
- [21] W. Zhang, X. Meng, X. Yang, H. Lyu, X. Y. Zhou, and Q. Wang, “A Practical Risk-Based Model for Early Warning of Seafarer Errors Using Integrated Bayesian Network and SPAR-H,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 16, 2022, doi: 10.3390/ijerph191610271.
- [22] S. İl Ahn, R. E. Kurt, and E. Akyuz, “Application of a SPAR-H based framework to assess human reliability during emergency response drill for man overboard on ships,” *Ocean Eng.*, vol. 251, p. 111089, May 2022, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.111089.
- [23] L. Ma, X. Ma, P. Xing, and F. Yu, “A hybrid approach based on the HFACS-FBN for identifying and analysing human factors for fire and explosion accidents in the laboratory,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 75, 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104675.
- [24] Z. Lu, “Analysis of China students’ laboratory accidents in the past 39 years and the laboratory management reform in the future,” *Educ. Chem. Eng.*, vol. 42, 2023, doi: 10.1016/j.ece.2022.12.001.
- [25] G. Elidolu, S. İl Ahn, S. İlke Sezer, R. Emek Kurt, E. Akyuz, and P. Gardoni, “Applying evidential reasoning extended SPAR-H modelling to analyse human reliability on crude oil tanker cargo

- operation,” *Saf. Sci.*, vol. 164, 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2023.106169.
- [26] Y. He, N. S. Kuai, L. M. Deng, Z. L. Wang, and M. J. Peng, “An investigation into accidents in laboratories in universities in China caused by human error: A study based on improved CREAM and SPAR-H,” *Heliyon*, vol. 10, no. 7, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28897.
- [27] W. Si and L. Niu, “Enhancing Human Reliability Prediction in Smart Tower Crane Interfaces: A Refined Approach Using Simplified Plant Analysis Risk–Human Reliability Assessment and the Decision Making Trial and Evaluation Laboratory–Analytic Network Process,” *Build. 2024, Vol. 14, Page 1083*, vol. 14, no. 4, p. 1083, Apr. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14041083.
- [28] X. Liu, S. Yan, X. Zhang, and W. Ahmed, “Dynamic human reliability analysis method for nuclear power plant main control room based on SPAR-H and SD,” *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 57, no. 3, p. 103253, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.NET.2024.10.015.
- [29] Z. Mosavianasl, A. Babaeipouya, and R. Borun, “Evaluation of human reliability in steel industry using SPAR-H and CREAM techniques,” *Pakistan J. Med. Heal. Sci.*, vol. 12, no. 2, 2018.
- [30] L. X. Hou, R. Liu, H. C. Liu, and S. Jiang, “Two decades on human reliability analysis: A bibliometric analysis and literature review,” 2021. doi: 10.1016/j.anucene.2020.107969.