



**BİR KİMYASAL MADDE ÜRETİM TESİSİNDEKİ İNSAN HATALARININ
TESPİTİ VE ANALİZ EDİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLERİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Kübra OLGUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kübra OLGUN

26/01/2023

BİR KİMYASAL MADDE ÜRETİM TESİSİNDEKİ İNSAN HATALARININ TESPİTİ
VE ANALİZ EDİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLERİN
KARŞILAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Kübra OLGUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Sanayileşme ile birlikte kimyasal maddelerin üretimi ve kullanımı artmakta ve temel nedeni insan hataları olan iş kazaları sayısında da artış görülmektedir. İnsan hataları; maliyeti artırmakla kalmayıp sağlık ve güvenliği de olumsuz yönde etkiler ve kazalara neden olabilir. Kazaların önlenmesi veya etkilerinin en aza indirgenebilmesi için, insan hatalarının doğru tespit edilmesi ve bunun için önlemler alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, kimyasal madde üreten bir tesiste kazaya sebep olabilecek olası hatalar ilk olarak, Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP) yöntemi ile belirlenmiş ve bu olası hatalar içerisinde kök nedeni insan hatası olan hatalar tespit edilmiştir. Tespit edilen insan hatalarının sayısallaştırılabilmesi için Operatör Hatasını Tahmin Etme Ampirik Tekniği (TESEO) ve İnsan Hatası Değerlendirme ve Azaltma Tekniği (HEART) kullanılmıştır. İnsan Hatası Değerlendirme ve Azaltma Tekniği (HEART) uygulanırken Etki Değerlendirme Oranı önce (APOA) uzman yargısı ile sonra da Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile belirlenmiştir. Yöntemler birbiri ile kıyaslanarak yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda, azot tank basıncının düşmesine karşı operatör müdahalesi hatası, en yüksek insan hata olasılığı olarak belirlenmiştir. TESEO yöntemi hızlı ve kolay olmasına karşın, HEART yönteminde kullanılan hata oluşturma koşulları (EPC) analizin daha detaylı yapılmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca AHP yönteminin HEART yöntemine entegre edilmesiyle, HEART yönteminde uzman yargısından oluşan subjektiflik giderilmiş ve daha tarafsız sonuçlara ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 91204
Anahtar Kelimeler : İnsan hatası, insan hata analizi, iş kazaları
Sayfa Adedi : 108
Danışman : Prof. Dr. Metin GÜRÜ
İkinci Danışman : Dr. Abdurrahman AKMAN

DETECTION OF HUMAN ERRORS IN A CHEMICAL PRODUCTION PLANT AND
COMPARISON METHODS USED IN ANALYZING HUMAN ERROR

(M. Sc. Thesis)

Kübra OLGUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

With industrialization, the production and use of chemical substances are increasing, and the number of occupational accidents, the main reason of which is human errors, is also increasing. Human errors not only increase costs, but also negatively affect health and safety and can cause accidents. In order to prevent accidents or minimize their effects, human errors must be correctly identified and measures must be taken for this. In this study, possible faults that may cause an accident in a facility producing chemicals were first determined by the Hazard and Operability Analysis (HAZOP) method, and among these possible errors, the root cause of human error was determined. Tecnica Empirica Stima Errori Operatori (TESEO) and Human Error Evaluation and Reduction Technique (HEART) were used to digitize detected human errors. While applying the Human Error Evaluation and Reduction Technique (HEART), Impact Evaluation Ratio (APOA) was determined first by expert judgment and then by Analytical Hierarchy Process (AHP), which is one of the Multi-Criteria Decision Making methods. The methods were interpreted by comparing them with each other. As a result of the study, operator intervention error against the decrease of nitrogen tank pressure was determined as the highest probability of human error. Although the TESEO method is fast and easy, the error generating conditions (EPC) used in the HEART method allow the analysis to be done in more detail. In addition, by integrating the AHP method into the HEART method, the subjectivity of the expert judgment in the HEART method has been eliminated and more objective results have been achieved.

Science Code	: 91204
Key Words	: Human error, human error analysis, occupational accidents
Page Number	: 108
Supervisor	: Prof. Dr. Metin GÜRÜ
Co-Supervisor	: Dr. Abdurrahman AKMAN

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitim sürecim boyunca bilgi ve desteğini esirgemeyen, her daim bir adım daha ilerlemem için yol gösteren ve yol gösterici olmam konusunda beni teşvik eden Tez Danışmanım Prof. Dr. Metin GÜRÜ'ye içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, desteği ile her zaman benim de kendime güvenimi artıran İkinci Tez Danışmanım Dr. Abdurrahman AKMAN'a sonsuz sabrından dolayı ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekan Yardımcısı Prof. Dr. Fatih AKKURT'a çok teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi yanımda olan ve desteklerini her daim hissettiğim canım annem ve babam, Sibel – Erkan OLGUN'a çok teşekkür ederim.

Çalışmamın saha çalışması aşamasında desteğini esirgemeyen Fabrika Müdürü Mehmet TÖK'e ve Üretim Mühendisi Emre SEZER'e çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana yol arkadaşı olan Ayşe Aybüke ERTÜRK'e ve hayatım boyunca bana destek olan canım kardeşim ve meslektaşım Öğr. Gör. Şeyma OLGUN'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. İŞ KAZALARI VE İNSAN HATALARI.....	5
2.1. İş Kazaları.....	5
2.2. İnsan Hataları.....	13
2.2.1. İnsan hatalarına sebep olan performans şekillendirme faktörleri	14
3. TEHLİKE TANIMLAMA VE RİSK ANALİZ METOTLARI.....	17
3.1. Karşılaştırmalı Yöntemler	19
3.1.1. Kontrol listesi (Check-list)	19
3.1.2. Olursa ne olur? (What-if).....	20
3.1.3. Güvenlik denetimi (Safety audit).....	21
3.2. Temel Yöntemler.....	21
3.2.1. Tehlike ve işletilebilirlik analizi (Hazard and operability analysis – HAZOP).....	21
3.2.2. Olası hata türleri ve etkileri analizi (Failure mode and effects analysis – FMEA).....	25
3.2.3. Hata ağacı analizi (Fault tree analysis – FTA)	28
3.2.4. Ön tehlike analizi (Preliminary hazard analysis – PHA).....	30
3.2.5. Beyin fırtınası	31

4. İNSAN HATALARININ MEYDANA GELME OLASILIĞININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER	33
4.1. Operatör Hatalarını Tahmin Etme Ampirik Tekniği (TESEO)	33
4.2. İnsan Hata Oranı Tahmin Tekniği (THERP)	35
4.3. Başarı Olasılığı İndeksi Metodolojisi (SLIM-MAUD)	36
4.4. İnsan Olay Analizi İçin Bir Teknik (ATHEANA)	37
4.5. Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi (CREAM)	38
4.6. İnsan Hata Değerlendirme ve Azaltma Tekniği (HEART)	39
4.6.1. AHP (Analitik hiyerarşi prosesi)	42
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	47
6. MATERYAL VE METOT	53
6.1. Çalışmanın Yapıldığı Tesisin Tanıtımı	53
6.2. HAZOP Çalışması	55
6.3. TESEO Çalışması	58
6.4. HEART Çalışması	59
6.4.1. Uzman yargısı ile APOA tespiti	61
6.4.2. AHP – HEART ile APOA tespiti	61
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	63
8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	83
EKLER	89
EK-1. TESEO yöntemi için seçilen insan olasılığı parametreleri ve analiz sonuçları	90
EK-2. APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi sonuçları	93
EK-3. APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları	96
EK-4. Tezden çıkan yayınlar	106
ÖZGEÇMİŞ	108

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Sektör türüne göre kaza sayısı, ölümlü kaza sayısı ve ölüm sayısı.....	7
Çizelge 2.2. Dünyada gerçekleşen bazı endüstriyel kazalar	7
Çizelge 2.3. Ülkemizde gerçekleşen bazı endüstriyel kazalar	9
Çizelge 2.4. İş kazalarının nedenleri	10
Çizelge 3.1. Tehlike ve risk kavramları için örnekler	18
Çizelge 3.2. Kontrol listesi (Check-list) yöntemi ile risk değerlendirmesi	19
Çizelge 3.3. Olursa ne olur? (What-if) yöntemi ile risk değerlendirmesi	20
Çizelge 3.4. HAZOP analizi süreci	23
Çizelge 3.5. Standart kılavuz kelimeler ve genel anlamları	23
Çizelge 3.6. Proses işlemleri için olası parametre örnekleri	24
Çizelge 4.1. TESEO hata olasılığı parametreleri	34
Çizelge 4.2. Genel görev türleri ve nominal HEP değeri	39
Çizelge 4.3. Hata oluşturma koşulları (EPC)	40
Çizelge 4.4. Yeni ve revize EPC'ler.....	42
Çizelge 4.5. Saaty ikili karşılaştırma önem ölçekleri	44
Çizelge 4.6. Random indeks değerleri.....	45
Çizelge 6.1. TESEO yöntemi için seçilen değerler	59
Çizelge 6.2. Önem derecesine göre hiyerarşik yapının oluşturulması	61
Çizelge 6.3. Seçilen EPC'ler için oluşturulan karşılaştırma matrisleri	62
Çizelge 7.1. Bağlantı noktaları için uygulanan HAZOP analizi	63
Çizelge 7.2. Tanelendirme reaktörü için uygulanan HAZOP analizi.....	64
Çizelge 7.3. Destilasyon kolonu için uygulanan HAZOP analizi	69
Çizelge 7.4. Dekantör için uygulanan HAZOP analizi	70
Çizelge 7.5. Elektrik kesintisi ve statik elektrik birikimi için uygulanan HAZOP analizi	71

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.6. Belirlenen insan hataları.....	71
Çizelge 7.7. Kantitatif yöntemlere göre hesaplanan hata olasılığı sonuçları	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Endüstri sektörlerine göre kaza frekansları.....	6
Şekil 2.2. İş kazalarının meydana gelme nedenleri.....	12
Şekil 2.3. Belirli bir ortamda insan, makine ve çevre arasındaki ilişki.....	13
Şekil 3.1. Risk analizi ve risk değerlendirmesi prosedürü	18
Şekil 3.2. HAZOP analizi akım şeması.....	22
Şekil 3.3. FMEA yöntemi ile risk değerlendirmesi.....	28
Şekil 3.4. Hata ağacı analizi aşamaları.....	29
Şekil 3.5. Ön tehlike analizi aşamaları.....	30
Şekil 4.1. TESEO akım şeması	35
Şekil 6.1. HAZOP analizinin gerçekleştirildiği prosese ait akım şeması.....	54
Şekil 6.2. Analiz yöntemlerine göre iş akış diyagramı	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

$\lambda_{\max}$	Tutarlılık Oranı Katsayısı
A	Karşılaştırma Matrisi
B	Karşılaştırma Matrisindeki Her Bir Sütun Değeri
C	Normalleştirilmiş Matris
D	Karşılaştırma Matrisi ile Ağırlık Matrisi Çarpımı
i	Karşılaştırma Değeri
j	Karşılaştırma Değeri
K ₁	Aktivitenin Tipolojik Faktörü
K ₂	Geçici Stres Faktörü
K ₃	Operatörün Tipolojik Faktörü
K ₄	Aktivitenin Endişe Faktörü
K ₅	Aktivitenin Ergonomik Faktörü
W	Ağırlık Matrisi

Kısaltmalar

Açıklamalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi
APOA	Etki Değerlendirme Oranı
ATAŞ	Anadolu Tasfiyehanesi Anonim Şirketi
ATHEANA	İnsan Olay Analizi İçin Bir teknik
CI	Tutarlılık Göstergesi
CPC	Ortak Performans Koşulları
CR	Tutarlılık Oranı
CREAM	Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi
E-MARS	Büyük Kaza Raporlama Sistemi
EPC	Hata Oluşturma Koşulları

Kısaltmalar**Açıklamalar**

FANP	Bulanık Ağ Süreci
FMEA	Olası Hata Türleri ve Etkileri Analizi
FTA	Hata Ağacı Analizi
GEP	Genel Hata Olasılığı
GTT	Genel Görev Türü
HAZOP	Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi
HE	İnsan Hatası
HEART	İnsan Hata Değerlendirme ve Azaltma Tekniği
HEP	İnsan Hata Olasılığı
HR	İnsan Güvenilirliği
HSE	İngiltere'nin İş Sağlığı ve Güvenliği Kurumu
HU	İnsan Güvenilmezliği
ILO	Uluslararası Çalışma Örgütü
LPG	Likit Petrol Gazı
MKE	Makine ve Kimya Endüstrisi
MSDS	Malzeme Güvenlik ve Bilgi Formu
P&ID	Borulama ve Enstrümantasyon Diyagramı
PHA	Ön Tehlike Analizi
PR	Hatayı Telafi Etme Olasılığı
PSF	Performans Şekillendirme Faktörleri
RARA	Demiryolu Eylem Güvenilirlik Değerlendirme
RI	Random İndeksi Değerleri
SLI	Başarı Olasılık İndeksi
SLIM – MAUD	Başarı Olasılık İndeksi Metodolojisi
TCDD	2,3,7,8 tetraklorodibenzo p dioksin
TESEO	Operatör Hatalarını Tahmin Etme Ampirik Tekniği
THERP	İnsan Hata Oranı Tahmin Tekniği
TÜPRAŞ	Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
USNRC	ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu
WHO	Dünya Sağlık Örgütü

1. GİRİŞ

Sanayi Devrimi tarihte bir dönüm noktası olmakla birlikte, insan ve hayvan gücüne dayalı üretim anlayışından, makine gücünün egemen olduğu bir üretim anlayışına geçiş olarak tanımlanmaktadır. Tarihsel açıdan bakıldığında çok sayıda köklü değişikliğe neden olurken insanlık tarihinde de birçok alanda ilerlemeye yol açmıştır. İnsanlık var olduğundan bu yana mevcut olan ancak verimli şekilde kullanılamayan hammaddeler, sanayileşme ile birlikte insan hayatında fark yaratacak şekilde işlenmeye başlanmış ve böylece büyük teknolojik değişimler ortaya çıkmıştır (Berktaş ve Oraklıbel, 2021).

Teknolojik değişimler makineleşmeyi artırmıştır. Böylece eskisinden daha fazla üretim, tüketim ve daha az maliyetle daha fazla kazanç fikirleri ortaya çıkmış ve bu durum ekonominin gelişmesine ve iş alanlarının genişlemesine yol açmıştır. Tüm bu talepleri karşılayabilmek için üretim tesisi sayısı artmış ancak bu kez de tesislerde üretim kaygısı baş göstermiştir.

Sanayileşme ile her geçen gün üretimin artması, yeni kimyasal maddelerin, enerji kaynaklarının kullanılması, nükleer gücün endüstriye uygulanması, insan ve makine gücünün yerini elektrik ve elektroniğin alması birçok problemi de beraberinde getirmiş ve iş kazalarının sayısının artmasına neden olmuştur (Tekin, 1991).

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununa göre iş kazası; işyerinde ya da işin yürütümü sebebiyle ortaya çıkan, ölüme neden olabilen ya da vücut bütünlüğünü bedenlen veya ruhen engelli hale getiren olay olarak tanımlanır. İş kazaları sonucu meydana gelen maddi ve manevi zararlar, kaza geçiren kişileri etkilemekle birlikte ülke ekonomisine de büyük bir yük oluşturmaktadır. Bu nedenle çeşitli kuruluşlar, iş kazalarını ölçmek, nedenlerini belirleyerek etkilerini azaltmak ya da önleyebilmek için ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli çalışmalar yürütmektedir (Durdu, 2014).

İş güvenliğinin sağlanmasını engelleyen iki faktör vardır. Bunlardan biri güvensiz durum, diğeri ise güvensiz davranışlardır. Güvensiz durumun büyük kısmı ile güvensiz davranışların tamamı insan unsuru tarafından ortaya çıkarılmaktadır. İş güvenliğinin sağlanması için bu faktörlerin ortadan kaldırılması gerekmektedir (Tekin, 1991). İş kazalarının meydana gelmesi ve meydana gelen kazaların, kaza nedenlerinin ağırlık

oranları üzerine yapılan çalışmalar neticesinde; iş kazalarının %80'inin insanlara, %18'inin mekanik ve fiziki çevre koşullarına ve %2'sinin ise umulmadık olaylara bağlı olarak gerçekleştiği kabul edilmektedir. Tüm bu genellemeler sonucunda, iş kazalarının yaklaşık %98'inin üzerinde önleyici tedbirler alınabileceği ihtimaline ulaşılmaktadır (Camkurt, 2013).

Sekiz bölümden oluşan tez çalışmasının birinci bölümünde; tezin konusu, amacı ve kapsamı ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

İkinci bölümde; iş kazaları, iş kazalarının meydana gelme nedenleri, insan hataları ve insan hatalarına neden olan performans şekillendirme faktörleri ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde; tehlike ve risk tanımları yapılarak tehlike tanımlaması yapılırken kullanılabilecek kalitatif yöntemler açıklanmıştır. Yöntemlerin uygulanması esnasında dikkat edilecek süreçlere yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde; tespit edilen insan hatalarının meydana gelme olasılığının belirlenmesinde kullanılabilecek kantitatif yöntemler incelenmiştir. Yöntemlerin aşamalarından, avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde, tez çalışması için yapılan literatür araştırması verilmiştir.

Altıncı bölümde; çalışma süresince tehlikelerin tanımlanması ve insan hatalarının belirlenmesi amacıyla tercih edilen, Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP) yöntemi sürecinden bahsedilmiştir. Belirlenen insan hatalarından biri seçilerek, insan hata olasılığının belirlenmesi amacıyla kullanılan TESEO ve HEART yönteminin analiz adımları açıklanmıştır. Ayrıca HEART yöntemi içerisindeki Etki Değer Oranı'nın tarafsız değerlendirmesini yapmak için kullanılan Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi seçilen hata üzerinden açıklanmıştır.

Yedinci bölümde; çalışma sonrası elde edilen sonuçlar verilerek yöntemler birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Tezin son bölümü olan sekizinci bölümde ise, ulaşılan sonuçların değerlendirilmesi yapılarak, önerilere yer verilmiştir.

Bu tezin amacı; kimyasal madde üreten bir tesiste insan hatalarının tespit edilmesi ve tespit edilen insan hatalarının analiz edilmesinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılmasıdır. Çünkü ülkemizde insan hatalarından kaynaklanan iş kazalarını incelemek amacıyla yapılan akademik çalışmalar tüm sektörleri kapsayıcı nitelikte değildir. Nükleer endüstri kazalarında, uçak ve gemi kazalarında; kazaya neden olan tehlikeler belirlenmiş ya da insan hata olasılığı değerleri hesaplanmıştır. Ancak kimya endüstrisinde hem tehlike tanımlamasının yapılarak insan hatalarının tespit edildiği hem de tespit edilen insan hatalarının meydana gelme olasılığının hesaplandığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

2. İŞ KAZALARI VE İNSAN HATALARI

2.1. İş Kazaları

Kaza genellikle; beklenmeyen bir zamanda ve beklenmeyen şekilde, tedbirsizlik, ihmal, bilgisizlik, dikkatsizlik gibi nedenler sonucunda yaralanmalara, insana, doğaya, hayvana, eşyaya zarar veren, can ve mal kaybına neden olan olay olarak tanımlanır. Kaza eğer, işyerinde, işin yapıldığı süre içerisinde ve işçinin işi ile ilgili bir nedenden dolayı meydana gelmişse iş kazası olarak adlandırılır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO)’ne göre iş kazası; “daha önceden planlanmamış, çoğunlukla ölümlere ve yaralanmalara, makinelerin zarar görmesine, bir süreliğine üretimin aksamasına neden olan olay” olarak nitelendirilir. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) de iş kazasını “beklenmedik, önceden planlanmayan şekilde, belirli bir zarar veya yaralanma ile sonuçlanan olay” olarak belirtmiştir. Sonuç olarak tanımların her birinde iş kazasının, planlanmayan, istenmeyen, tahmin edilmeyen, sonucunda insana ve eşyaya zarar veren bir olay olduğu belirtilmiştir (Akyıldız ve Barlas, 2015).

Sanayi Devrimi ile birlikte dünyada üretime olan talep artmış ve bu durum üretim alanlarında belirli standartların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Talep ve rekabetin artması firmaları daha da fazla üretime yönlendirmiş; bunun sonucunda da meydana gelen çalışma saatlerindeki artış ve güvensiz çalışma ortamları çalışan üzerinde fiziksel ve psikolojik baskı oluşturarak iş kazalarının yaşanmasına ve sayılarının artmasına neden olmuştur. İş kazaları, çalışma ortamının güvensiz olmasından ve insan davranışlarından meydana gelmektedir (Altınten, 2020).

Endüstriyel kazalar gerçekleştiği sektörler göre, kimya sanayi (petrokimya hariç), imalat sanayi, taşıma ve depolama, metal işlenmesi, petrokimya, enerji üretimi, temini ve dağıtımı, tarım ve madencilik ve su, atıksu ve atık yönetimi başlıklarından oluşmaktadır.

Kaza sıklığının hesaplanması amacıyla, White Queen BV ve HSE tarafından yapılan çalışmalarda kimyasal üretimin gerçekleştiği sektörler kaza sıklığının en yüksek olduğu sektörler olarak belirlenmiştir (Doğan, 2015). Begüm Doğan’ın yüksek lisans tezinden yararlanılarak oluşturulan, endüstri sektörlerine göre kaza frekansları Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1. Endüstri sektörlerine göre kaza frekansları (Doğan, 2015)

Joint Research Center Büyük Kaza Önleme Bürosu tarafından kullanılan ve merkezi İtalya'nın Ispra bölgesinde bulunan, Büyük Kazaları Raporlama Sistemi (e-MARS) 1980 yılından itibaren aktif haldedir. Bu sisteme 1984 yılından itibaren, Avrupa'da 1980 yılı itibariyle meydana gelmiş tüm büyük endüstriyel kazaların bildirimi yapılmaktadır (Öcelan, 2014). e-MARS'ın amacı; endüstriyel kazaların önlenmesini sağlamak ve olası sonuçları hafifletmek için tehlikeli maddeleri içeren kazalardan ve ramak kalılardan öğrenilen derslerin paylaşılmasını kolaylaştırmaktır (Petrillo ve Felice, 2018: 6).

Avrupa Komisyonu Büyük Kaza Raporlama Sistemi (e-MARS)'ne kayıtlı ve 1994-2004 yılları arasında meydana gelen kaza sayısı, ölümlü kaza ve kaza sonucunda meydana gelen ölümlerin sektörlere göre dağılımı incelendiğinde; kazaların çoğunlukla kimyasal madde üretim tesislerinde meydana geldiği görülmektedir. Bu tesislerdeki kazaların da yaklaşık %50'si genel kimyasal madde ve petrokimya üretimi alanında gerçekleşmektedir (Doğan, 2015). Sektörlere göre kaza sayısı, ölümlü kaza sayısı ve ölüm sayısı grafiği Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Sektör türüne göre kaza sayısı, ölümlü kaza sayısı ve ölüm sayısı (Doğan, 2015)

	Kaza Sayısı	Ölümlü Kaza Sayısı	Ölüm Sayısı
Genel kimyasal üretimi	100	15	53
Petrokimyasal	50	11	23
Toptan perakende depolama	26	8	8
Metal arıtma ve işleme	20	7	13
Plastik ve kauçuk üretimi	17	2	2
Pestisitler, ilaç	15	3	3
Patlayıcı depolama ve üretimi	12	9	36
Güç üretimi ve dağıtımı	11	1	2
Gıda ve içecek	11	1	3
Tarım	8	2	4
Atık arıtma	8	0	0
Fuar/eğlence yerleri	6	1	1
Kağıt üretimi	4	0	0
Taşıma ve nakliye merkezi	3	0	0
Kereste ve mobilya	3	1	2
Elektronik ve elektrik mühendisliği	2	0	0
Seramik	1	0	0
Bina ve mühendislik çalışmaları	1	1	2
Tekstil, giyim ve ayakkabı	1	0	0
Genel mühendislik	0	0	0
Maden faaliyetleri	0	0	0
Bilinmeyen	1	1	1

2002-2011 yılları arasında gerçekleşen 183 kaza incelendiğinde de, kazaların meydana geldiği sektörler içerisinde %46 ile kimyasal madde üretimi ilk sırada ve %15 ile petrol rafineleri ikinci sırada gelmektedir (Doğan, 2015).

Dünyada endüstriyel kazalar bakımından en çok felaketi bırakan kimya sanayinde gerçekleşen bazı kazalar Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Dünyada gerçekleşen bazı endüstriyel kazalar (Bostanoğlu, 2020: 17 ve Petrillo ve Felice, 2018: 10)

Tarih	Kazanın Gerçekleşme Yeri	Kimyasal	Gerçekleşen Olay	Kaza Sonuçları
1974	Flixborough, Birleşik Krallık	Sikloheksan	Patlama	28 ölü, 89 yaralı
1976	Seveso, İtalya	TCDD (2,3,7,8 tetraklorodibenzo p dioksin, Seveso dioksin)	Zehirli madde yayılması	TCDD kirliliği nedeniyle çok sayıda klorakne vakası Yaklaşık 410 yanık vakası binlerce insanın tahliyesi Yakın kırsal bölgede geniş çaplı kirlilik Önlem amacıyla çok sayıda besi hayvanının öldürülmesi

Çizelge 2.2. (devam) Dünyada gerçekleşen bazı endüstriyel kazalar (Bostanoğlu, 2020: 17 ve Petrillo ve Felice, 2018: 10)

Tarih	Kazanın Gerçekleşme Yeri	Kimyasal	Gerçekleşen Olay	Kaza Sonuçları
1984	Bhopal, Hindistan	Metilizosiyanat	Zehirli madde salınımı	3 000'den fazla ölü, 170 000 yaralı
1984	Mexico, Meksika	LPG	Patlama ve yangın	650 ölü, 6 400 yaralı
1986	Çernobil, Ukrayna	Nükleer	Patlama ve yangın	31 ölü, 6 000 tiroid kanseri vakası
1986	Basel, İsviçre	Kimyasal tarım maddesi	Yangın	Büyük çapta ekolojik hasar Ren Nehri boyunca su tedarikinde bozulma
1989	Pasadena, Teksas, ABD	Petrokimya	Patlama ve yangın	23 ölü, 130 yaralı
2000	Enschede, Hollanda	Patlayıcılar	Patlama ve yangın	21 ölü, en az 900 yaralı
2001	Toulouse, Fransa	Petrokimya	Patlama	29 ölü, yaklaşık 2 500 yaralı
2005	Buncefield, Birleşik Krallık	Petrokimya	Patlama ve yangın	Yakıt dağıtım ağı kesintisi Kaza yerine 400 m yakındaki yerleşim yerlerinde zarar
2005	Teksas, ABD	Petrokimya	Patlama	15 ölü, 170 yaralı
2010	Ajka, Macaristan	Kimyasal	Patlama	8 ölü, 90 yanık vakası
2012	Gumi, Güney Kore	Petrokimya	Sızıntı	5 ölü, 18 yaralı 200 hektardan fazla tarım alanı tahrip
2013	West, Teksas, ABD	Petrokimya	Patlama ve yangın	15 ölü, 200 yaralı
2013	Qingdao, Çin	Petrokimya	Patlama	52 ölü, 166 yaralı

Çizelge 2.2’de verilen felaketlerden Seveso felaketi, 1976’da meydana gelmiştir. Kimya şirketi zehirli bir dioksin bulutu üretmiştir. Kazanın muhtemel nedeni insan hatasıdır. Zehirli bulut birkaç ülkeyi de etkilemiştir. Felaket sonucunda ölüm gerçekleşmemiştir ancak 240 kişi zehirli bulut nedeniyle cilt hastalığına yakalanmıştır (Petrillo ve Felice, 2018: 10).

Bhopal felaketi, 1984 yılında 40 ton zehirli gazın salınımı nedeniyle meydana gelmiştir. Tarihteki en ciddi kimyasal felakettir. Kazanın nedeni 15 000 kişinin ölümüne yol açan insan hatasıdır. Olay nedeniyle yaklaşık 4 000 kişi sakat kalmıştır (Petrillo ve Felice, 2018: 10).

Çernobil felaketi, 1986 yılında Ukrayna’da meydana gelen bir nükleer santraldeki en kötü kazadır. Kazanın nedenleri sistem tasarımı ile ilgilidir. Bir test sırasında reaktör sıcaklığı artmış ve borular patlamıştır. Böylece büyük bir patlama ve yangın meydana gelmiştir. Kaza sonucunda radyoaktif bulut tüm Avrupa’ya yayılmıştır (Petrillo ve Felice, 2018: 10).

Buncefield felaketi, 2005 yılında İngiltere’de savaştan sonra en şiddetli yangına neden olan bir yakıt deposunda meydana gelen patlamadır. 43 kişi yaralanmıştır. Kurtarma operasyonuna 150’den fazla operatör katılmıştır (Petrillo ve Felice, 2018: 10).

Ajka felaketi, 2010 yılında Macaristan’da alüminyum fabrikasında meydana gelmiştir. Büyük bir çamur havuzu patlayarak komşu ülkeleri endüstriyel çamurla doldurmuştur. Kazanın nedeni insan hatasından kaynaklanmaktadır. Çamurun içerdiği kimyasal bileşenler, nehirlerdeki yaşamı olumsuz etkilemiştir (Petrillo ve Felice, 2018: 10).

Qingdao felaketi, 2013 yılında Çin’de en büyük petrol şirketi olan Sinopec’e ait borulardaki bir sızıntıyı onarmaya çalışırken meydana gelmiştir. Patlamanın ardından 18 000 kişi tahliye edilmiştir (Petrillo ve Felice, 2018: 10).

Son olarak Fukushima Daiichi nükleer santral kazası, 2011 yılında Japonya’da gerçekleşen deprem sonucu reaktörler otomatik olarak kapanmış ve kararsız izotopların parçalanmaya devam etmesi sonucu ısı artmaya devam etmiştir. Deprem sonucunda oluşan tsunami, soğutma jeneratörlerini devre dışı bırakmış ve patlamalar meydana gelmiştir (Zorluoğlu Yılmaz, 2021).

Ülkemizde gerçekleşen endüstriyel kazalardan bazıları da Çizelge 2.3.’te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Ülkemizde gerçekleşen bazı endüstriyel kazalar (Öcelan, 2014 ve Akman 2015)

Tarih	Kazanın Gerçekleşme Yeri	Gerçekleşen Olay	Kaza Sonuçları
1997	Kırıkkale-MKE	Mühimmat fabrikasında patlama	Şehrin tahliye edilmesi, büyük maddi hasarın meydana gelmesi
1999	İzmit-TÜPRAŞ	Akaryakıt depolama tanklarında yangın	Maddi zarar
2002	Kocaeli-AKÇAGAZ	LPG dolum tesisinde yangın ve patlama	3 yaralı, maddi zarar
2004	Mersin-ATAŞ	Tank tam yüzey yangını	Tank kullanılamaz halde
2007	İzmir-Aliğa	Boya vernik fabrikası yangını	Büyük maddi hasar
2008	Kırıkkale-MKE	Barut fabrikasında patlama	3 ölü, 30 yaralı
2011	Batman	LPG dolum tesisinde patlama	3 ölü, maddi hasar
2011	Ankara-Ostim	CNG tüplerinde patlama	20 ölü, çok sayıda yaralı
2013	Elmadağ-MKE	Sevk barutu üretim tesisinde patlama	2 ölü, 4 yaralı
2013	Tekirdağ	Kimya fabrikasında patlama	3 yaralı

Çizelge 2.3. (devam) Ülkemizde gerçekleşen bazı endüstriyel kazalar (Öcelan, 2014 ve Akman 2015)

Tarih	Kazanın Gerçekleşme Yeri	Gerçekleşen Olay	Kaza Sonuçları
2013	Kırıkkale-MKE	Patlayıcı madde deposunda patlama	Büyük maddi hasar, 3 deponun kullanılmaz hale gelmesi
2013	İstanbul-Tuzla	Tersanede kaynak yapımı esnasında patlama	1 ölü
2014	Elmadağ-MKE	Barut üretimi sırasında patlama	3 yaralı
2014	Kocaeli	Trafo kazanı imalat fabrikasında patlama	2 yaralı
2014	Kayseri	Fırın üretimi yapan fabrikada patlama	8 yaralı
2014	Denizli	Unlu mamüller üretim tesisinde patlama	1 ölü, 20 yaralı
2018	Elmadağ-MKE	Barut fabrikasında patlama	1 ölü, 4 yaralı

İşyerlerindeki çeşitli kimyasal, fiziksel, mekanik ve ergonomik faktörler çalışanlar üzerinde doğrudan ve dolaylı etkilere sebep olmaktadır. Doğrudan etkiler, kısa sürede zehirlenmeye, uzun sürede ise meslek hastalığına neden olmaktadır. Dolaylı etkiler ise, iş kazaları şeklinde meydana gelmektedir.

Çevre koşulları, üretim teknolojisi ve üretim araçlarının yanı sıra psikolojik, fizyolojik, sosyolojik ve birçok etken iş kazalarının ortaya çıkmasında önemli role sahiptir. Fakat iş kazalarının meydana gelmesinde etkili olan etkenlerin tamamı temel iki etkene indirgenebilir. Bunlar, işyerindeki güvensiz koşullar (durumlar) ve çalışanların güvensiz hareketleri (davranışları)'dır (Kıratlı, 2015). İş kazalarının nedenleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. İş kazalarının nedenleri

Güvensiz Koşullar (Durumlar)	Güvensiz Hareketler (Davranışlar)
Makine ve tezgah koruyucularının yetersiz olması	İşin bilinçsiz yapılması
Çevre şartlarının sağlıksız ve güvensiz olması	İş disiplinine uyulmaması
Elektrik makinelerinin topraklanmamış olması	Dikkatsizlik ve dalgınlık
Basınçlı kaplar ve kaldırma makinelerinin test ve kontrollerinin yapılmamış olması	Makine koruyucularının çıkarılması
İşyerinin düzensiz olması	Kişisel koruyucuların kullanılmaması
İstifleme yüksekliğinin tehlikeli olması	İşe uygun olmayan alet ve makinelerin kullanılması
El aletlerinin işe uygun olmaması	Tehlikeli hızda çalışılması

Çizelge 2.4. (devam) İş kazalarının nedenleri

Güvensiz Koşullar (Durumlar)	Güvensiz Hareketler (Davranışlar)
Kapatılmamış, açık boşluk bulunması	Görev dışında iş yapılması
Çalışma metodunun güvensiz olması	İzinsiz ve yetkisiz olarak tehlikeli bölgede bulunulması
	Tehlikeli hızda ve ehliyetsiz olarak araç kullanılması vb.

ABD’de iş kazaları üzerine çalışmalar yapan “National Safety Council”e göre iş kazalarının %18’i mekanik faktörlere, %19’u çalışan kişilere ve %63’ü mekanik faktörler ve çalışan kişilerin toplam etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Yine ABD’ de iş kazaları üzerine çalışmalar yapan “Department of Labor and Industry of The State of Pennsylvania”ya göre ise; iş kazalarının %3’ünün mekanik etkenlerden, %2’sinin ise çalışan kişilerden ve %95’inin de mekanik etkenler ve çalışan kişilerin toplam etkisinden kaynaklandığı öne sürülmektedir (Camkurt, 2013).

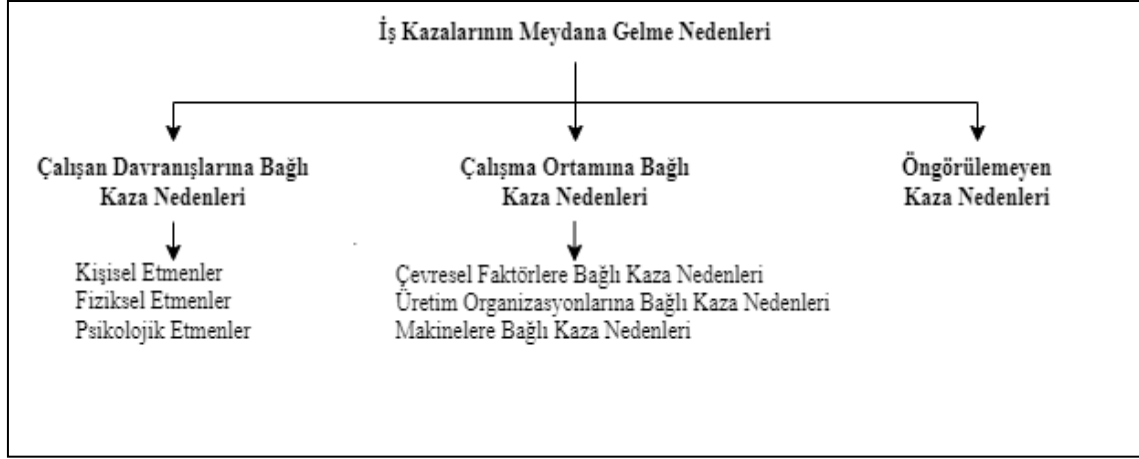
Ülkemizde gerçekleşen iş kazalarının sebeplerini belirlemek için farklı tarihlerde çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Çelikkol, iş kazalarının %80’inin insan kaynaklı olduğunu, %20’sinin ise işyeri çalışma şartlarının uygunsuzluğu ve üretim araçlarından kaynaklandığını öne sürmüştür. Haksöz (1985), MKE’de yaptığı çalışmada, kazaların %95’inin çalışanların güvensiz hareketlerinden ve kişisel koruyucularını kullanmamalarından, %5’inin ise, teknik nedenlerden meydana geldiğini belirtmiştir. Kepir ise, iş kazalarının %88’inin insandan, %10’unun mekanik eksikliklerden kaynaklandığını ve %2’sinin insan kontrolü dışında gerçekleştiğini tespit etmiştir. İş kazaları üzerine yapılan araştırma sonuçlarına göre, iş kazalarının oluşmasında %80 oranında insan faktörünün etkili olduğu tespit edilmiştir (Camkurt, 2013).

İş kazalarının meydana gelme nedenlerinin ağırlık oranları konusunda çeşitli araştırmalara dayanan farklı görüşler mevcuttur. Bu görüşlere göre; iş kazalarının %80’i insanlara, %18’i mekanik ve fiziksel çevre koşullarına ve %2’si de umulmadık olaylara bağlı olarak meydana geldiği kabul edilir. Yapılan genellemeye göre, iş kazalarının tahmini olarak %98’i üzerinde önleyici tedbirlerin alınabileceği öne sürülmektedir (Kıratlı, 2015).

İş kazalarının meydana gelme nedenleri; çalışan davranışlarına bağlı kaza nedenleri, çalışma ortamına bağlı kaza nedenleri ve öngörülemeyen kaza nedenleri olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir.

Çalışan davranışlarına bağlı kaza nedenleri; kişisel etmenler, fiziksel etmenler ve psikolojik etmenler, çalışma ortamına bağlı kaza nedenleri ise; çevresel faktörlere bağlı kaza nedenleri, üretim organizasyonlarına bağlı kaza nedenleri ve makinelere bağlı kaza nedenleri olarak alt gruplara ayrılabilir (Camkurt, 2013).

İş kazalarının meydana gelme nedenleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. İş kazalarının meydana gelme nedenleri

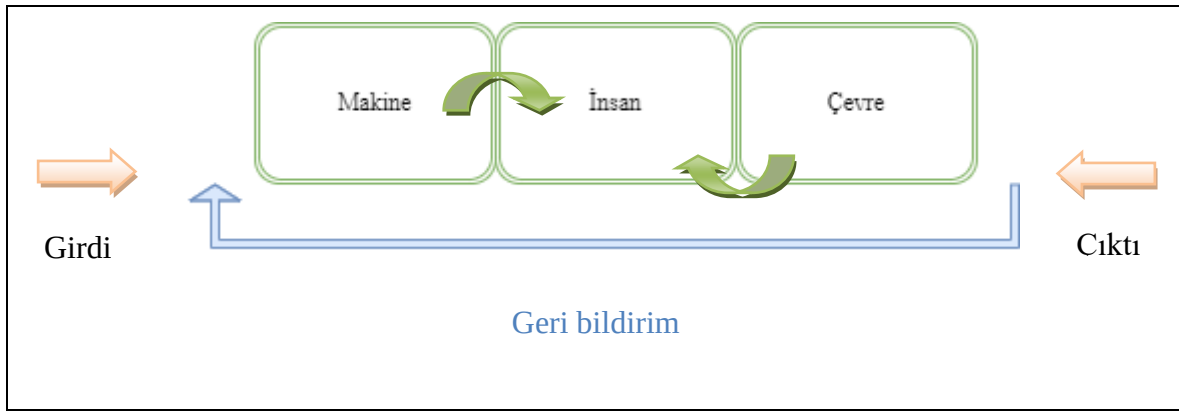
Teknolojideki ilerlemelerle birlikte kaza sayıları, ilk yıllarda hızlı bir düşüş kaydetmiştir ama buna rağmen belirli bir düzeyin altına indirilememiştir. Bunun nedeni, kazalarda var olan insan faktörü payının tam anlamıyla ortadan kaldırılamamasıdır (Erdem ve diğerleri, 2015).

İnsan faktörünün;

- Ardında takip edilmesi basit izler bırakmaması,
- Hiç kimse tarafından konuşulmak, tartışılmak istenmemesi,
- Toplanan verilerin sayısal değerlere dönüştürülmesinin ve analizinin zor olması,
- Çok parametrelili ve kolayca etkilenebilecek yapıya sahip olması,
- Mevcut bilgilerin sınırlı olmasından dolayı sonuca ulaşmanın güç olması gibi konular karşılaşılabilecek mühim ortak sorun alanlarını meydana getirmektedir (Erdem ve diğerleri, 2015).

Tüm bunlara karşın, insan faktörü kavramı özetle, insan performansının artırılması ve insan hatasının minimuma indirilmesine dair sıkı bir düzene sahip bir alan ve insanların diğer insanlar ve makinelerle aralarındaki ilişkiyi inceleyen uygulamalı bir bilim olarak tanımlanır (Erdem ve diğerleri, 2015).

Endüstriyel tesislerin güvenliği ve doğru şekilde yönetimi, çeşitli faktörlerin etkileşimi sonucunda gerçekleşir. Endüstriyel kazaların kaynağı da çevresel, organizasyonel ve insani faktörlerde bulunur. Özellikle, insanın teknolojik faktörlerden ayrılması mümkün değildir (Petrillo ve Felice, 2018: 2). Şekil 2.3'te belirli bir ortamda insan, makine ve çevre arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Belirli bir ortamda insan, makine ve çevre arasındaki ilişki

İnsan da makine de tesisler için vazgeçilmez unsurlardır ve ikisi de hatalara tabidir. Bir felaket sırasında insanların hata yapma olasılığının daha yüksek olduğu; zaman eksikliği, stres vb. durumlar ortaya çıkabilir. İnsan hatası, insan davranışının doğal bir parçasıdır ve insanın çeşitli özelliklerine ve çalışma ortamına bağlanabilir (Petrillo ve Felice, 2018: 2).

2.2. İnsan Hataları

İnsan hatalarını anlamaya ve en aza indirmeye yardımcı olacak bazı ilkeler şunlardır:

- Yaşı, soyu, cinsiyeti, uyruğu, konuştuğu ana dili, zekâ seviyesi ve boyu fark etmeksizin, herkes hata yapabilir.

- Hata, sonuçlarından ayrı olarak değerlendirilmelidir. Çünkü hata, insan kendisini savunmaya geçmeden ve duygularını karıştırmadan önce yapılan analizler sonucunda belirgin olarak görülebilir. Bu aşama, hatayı fark etmenin ilk ve en önemli adımudur.
- Bu bakış açısı insanlara açık olmayı teşvik eder. Böylece insanların kendi beyinsel işlevlerini anlaması sağlanır. Sonuç olarak, hata türü bir kez belirlendiği zaman, hatayı azaltıcı ya da önleyici tedbirler geliştirmek olasıdır.

Öngörülemeyen durumlar dışında, insanlar genelde kuralları ihlal etmezler ve hata yapmazlar. İnsanların hata yapmasına değişken durumlar ve uygun olmayan şartlar sebep olur. Kazaya neden olan insan hatalarının temeli ise, doğru şekilde durum muhakemesi yapamamaya dayanır (Erdem ve diğerleri, 2015).

İnsan performansının doğru bir şekilde ortaya konması için sürekli bir denge durumunun var olması gerekmektedir. Dengeli bir performansı etkileyen, insan hatalarına sebep olan performans şekillendirme faktörleri aşağıda verilmiştir:

2.2.1. İnsan hatalarına sebep olan performans şekillendirme faktörleri

Performansı etkileyen faktörler; kişisel özelliklerden kaynaklanan faktörler, fizyolojik faktörler ve insanın psikolojik yapısından kaynaklanan faktörler olarak ifade edilebilir.

Kişisel özelliklerden kaynaklanan faktörler

- Yaş
- Aile durumu
- Cinsiyet
- İş deneyimi
- Mevki
- Eğitim seviyesi
- Alışkanlıklar

Fizyolojik faktörler

- Fiziksel eksiklikler

- Yorgunluk ve uykusuzluk
- Monotonluk

İnsanın psikolojik yapısından kaynaklanan faktörler

- Zekâ
- Stres ve iş yükü
- Kaza yatkınlığı
- Duygusal durum
- Motivasyon ve iş memnuniyeti
- Psikolojik rahatsızlıklar (Camkurt, 2013).

Kimya endüstrisindeki kaza kök sebepleri incelendiğinde, kazaların çoğunlukla insan davranışlarına bağlı kazalar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan araştırma sonuçlarına göre; insanın doğasını değiştirmesinin oldukça zor olması ve bu sebeple insanları hata yapmamaya ikna etmeye çalışmaktansa, çalışma ortamı (ekipman veya tesis tasarımı ya da çalışma metodu vb.) değiştirilerek hata olasılıkları ortadan kaldırılmaya çalışılmalıdır.

Çalışma ortamı ve şartları gözle görünen ya da görünmeyen tehlikeleri içerir. Hata olasılıklarını azaltmak ya da ortadan kaldırmak için bu tehlikeler ile tehlikelerden kaynaklanacak riskler tahmin edilmeli ve risk değerlendirilmesi yapılmalıdır (Akman, 2015a).

3. TEHLİKE TANIMLAMA VE RİSK ANALİZ METOTLARI

İnsan, kimyasallar, makineler, proses ve prosedürler gibi birçok girdinin bir araya gelmesiyle oluşan işyerleri sistem olarak incelenebilir. Sistem güvenliği artırıldığında, işyerlerindeki iş sağlığı ve güvenliğini de sağlamak mümkün olabilmektedir.

Sistem güvenliği, sistemi meydana getiren öğelerin tehlike tanımları yapılarak bu tehlikelerden kaynaklanacak risklerin analizine ve bu risklerin azaltılmasına ya da yok edilmesine dair alınacak önlemlerin temeline dayanır (Akman, 2015a).

Risk ve tehlike kavramları genellikle birbirlerine karıştırılıp birbirleri yerine kullanılmalarına rağmen, bu iki kavram aralarındaki önemli farklılıklar nedeniyle birbirinden ayrılır (Akman, 2015b).

Tehlike, bir zarara sebep olma olasılığıdır. Bu zarar ölüm, yaralanma, hastalanma, bir ekipmanın hasar görmesi, üretimin aksaması gibi çeşitli şekillerde meydana gelebilir. Ayrıca tehlike; insanın yaralanmasına, çevrenin ya da malın zarar görmesine sebep olan veya tüm bunların birleşimi şeklinde meydana gelen fiziksel bir durum olarak da tanımlanabilir. Başka bir tanımda tehlike; zarara neden olan insan davranışları, makineler, çalışma yöntemleri ve iş organizasyonu gibi durumlar olarak da ele alınabilir. 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununa göre çıkarılan İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliğinde tehlike; işyerinde mevcut ya da dışarıdan gelme ihtimali olan, çalışana veya işyerine zarar verme olasılığı olarak belirtilmiştir (Akman, 2015b).

Risk, tehlike nedeniyle meydana gelen bir olayın hasar oluşma derecesi ile olayın meydana gelme ihtimalinin birleşimidir. Risk; Hartono, McCabe ve Nasir'e göre belirsizlik ve belirsizliğin sonucu olarak tanımlanmıştır. 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununa göre çıkarılan İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliğinde risk; tehlikeden kaynaklanan yaralanma, kayıp veya başka zararlı sonuçların ortaya çıkma olasılığı olarak belirtilmiştir (Akman, 2015b).

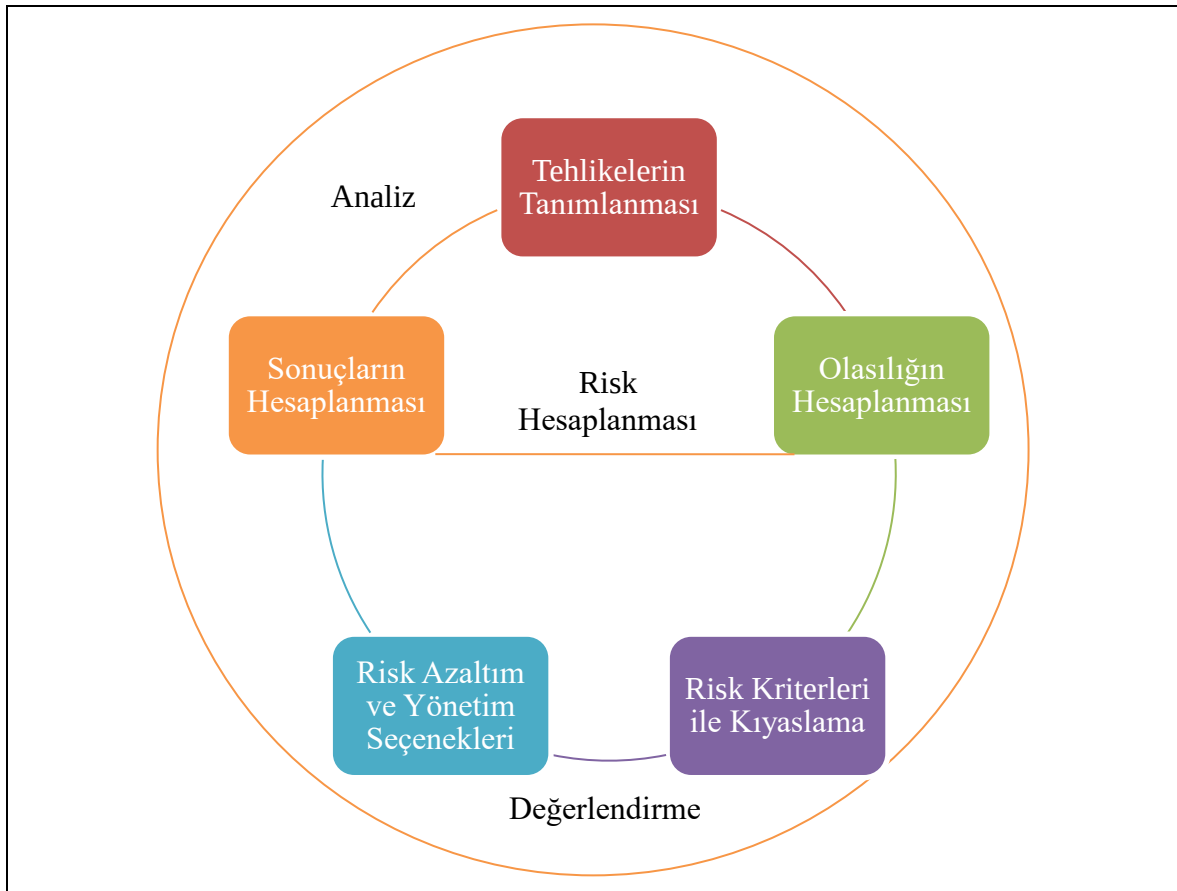
Tehlike ve risk kavramlarının daha iyi anlaşılabilmesi için Çizelge 3.1'de kavramlar için örnekler verilmiştir.

Çizelge 3.1. Tehlike ve risk kavramları için örnekler (ÇŞB, 2017: 15)

Tehlike	Risk
Alevlenir, uçucu, aşındırıcı, toksik, patlayıcı vb. maddeler	Çalışan personel tarafından solunması zararlı olan kimyasal maddenin solunması
Yüksek sıcaklık ya da basınç altında olan teknik sistem	Tehlikeli madde ihtiva eden tesiste yangın riski

Çalışma ortamı ve şartları gözle görünen ya da görünmeyen tehlikeleri içinde barındırır. Bu tehlikeleri anlamak ve onların nasıl tanımlanması gerektiğini bilmek, tehlikeleri başarılı şekilde kontrol etmek için oldukça önemlidir (Akman, 2015a).

Tehlikelerin analiz edilerek bu süreç içerisinde insan, çevre, mal veya bunların bir kombinasyonunun maruz kaldığı risk seviyelerinin tahmin edilmesi risk analizi olarak tanımlanır. Risk analizi ve sonuçlarının anlamlılığını değerlendiren süreç ise, risk değerlendirmesi olarak adlandırılır (ÇŞB, 2017: 16). Risk analizi ve risk değerlendirme prosedürü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Risk analizi ve risk değerlendirmesi prosedürü (ÇŞB, 2017)

İşyerinde mevcut olan veya dışarıdan gelebilecek tehlikelerin tanımlanması, tehlikelerin riske dönüşmesini sağlayan faktörler ve bu tehlikelerin sebep olduğu risklerin analiz edilerek derecelendirilmesi ve kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması maksadıyla yapılan analizlerden bazıları aşağıda verilmiştir (Çetinkaya ve Utlu, 2015).

3.1. Karşılaştırmalı Yöntemler

3.1.1. Kontrol listesi (Check-list)

Nitel yöntemler arasında en çok tercih edilen yöntemdir. Çalışma alanına özgü sorular hazırlanarak bu sorulardan kontrol listeleri meydana getirilir. Sorulara verilen cevaplar, evet - hayır, uygun - uygun değil şeklinde olur. Sonra alınması gereken tedbirler belirtilir. Kontrol listesi metodunun hazırlanması ve uygulanması oldukça kolay olduğu için çeşitli sektörlerde kullanılabilir. Hareket etmeden önce ön kontrol yapılması gerekli olan tren, gemi, uçak gibi ulaşım araçlarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Kontrol listesi hazırlanması esnasında hesaba katılmayan bir tehlike oldukça büyük felaketlere sebep olabilir (Erdem, 2021). Kontrol listesi yöntemi ile yapılacak risk değerlendirmesinde kullanılacak örnek form Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kontrol listesi (Check-list) yöntemi ile risk değerlendirmesi

Check-List Formu			
Proses/Sistem	:	Tarih :	
Alt Sistem	:		
Formu Dolduran	:		
Birimi	:	Revizyon No :	
Görevi	:		
Doküman No	:	Sayfa No :	
Tehlikeler	Evet	Hayır	Açıklama
A01.			
A02.			
A03.			
A04.			
A05.			
B01.			
B02.			
B03.			
B04.			
B05.			

Çizelge 3.2. (devam) Kontrol listesi (Check-list) yöntemi ile risk değerlendirmesi

Check-list Formu			
C01.			
C02.			
C03.			
C04.			
C05.			

3.1.2. Olursa ne olur? (What-if)

Bu yöntem, süreçlerin incelenmesi ve üretim yerlerinin ziyaret edilmesi sırasında oldukça fayda sağlamaktadır. Kontrol edilemeyen olması muhtemel tehlikelerin saptanabilme oranını artırır. Bu yöntem çalışmaların yapıldığı herhangi bir anda uygulanabilir. Ayrıca, daha az tecrübeli risk analistleri tarafından da kullanılabilir. “Olursa ne olur?” sorusu ile başlar ve bu sorulara cevaplar verilir. Sorulara verilen cevaplar doğrultusunda, eksiklikler belirlenir ve bu eksikliklere neden olan faktörler için çözüm önerileri sunulur (Arslan, 2020). Çizelge 3.3’te Olursa ne olur? yöntemi ile yapılacak risk değerlendirmesinin aşamaları verilmiştir.

Çizelge 3.3. Olursa ne olur? (What-if) yöntemi ile risk değerlendirmesi

Soru	Sonuç	Tavsiye	Sorumlu Personel	Eylem Zamanı
...olursa ne olur?				
...olursa ne olur?				
...olursa ne olur?				

Yöntemin güçlü yönleri aşağıda verilmiştir:

- Her organizasyonun her sürecine yaygın şekilde uygulanır.
- Detaylı bir hazırlık aşamasına gerek yoktur.
- Diğer risk analiz yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha hızlı bir yöntemdir.
- Sonuçlarda ortaya çıkan hata ya da arızalardan ziyade kullanıcıları sistemde oluşan sapmalara yönlendirdiği için sistem odaklı bir yöntemdir.
- Yapılan kontroller yöntem ile incelenir ve hangisinin diğerlerine göre daha verimli olduğu kolayca analiz edilir.

Yöntemin zayıf yönleri aşağıda verilmiştir:

- Eğer yöntem başka bir yöntemin tamamlayıcısı olarak kullanılmamışsa, alanında deneyimli uzman bir personele ihtiyaç duyulmaktadır.
- Deneyimli uzman bir personel eksik olduğunda, detaylı bir ön çalışma gerekmektedir.
- Yeterli deneyim ve bilgiye sahip olmayan bir ekip tarafından analiz yapıldığında, bir takım riskler gözden kaçırılabilir ve bunun sonucunda tehlikeler meydana gelir (Ünal, 2019).

3.1.3. Güvenlik denetimi (Safety audit)

Güvenlik denetimi, fabrika ziyaretleri ve kontrol listeleri (Check-list) yöntemlerinin birleşimi ile uygulanmaktadır. İki yöntem de deneyimi fazla olmayan analistler tarafından her sürece uygulanabilen yaklaşımlardır. Güvenlik denetiminin uygulanabilmesi için mutlaka tehlikelerin tanımlanmış ve risk haritalarının çıkarılmış olması gerekmektedir. Tehlikelerin belirlenmesi ve sınıflandırılmaların yapılması da güvenlik denetimi yapmayı kolaylaştırmaktadır. Ayrıca bu yöntemde, talimatlar, çalışma izinleri ve iç yönergelerin de hazırlanması gerekmektedir. Kaza, olay araştırması ve raporlamasının da kesinlikle yapılması gereklidir (Genç, 2010).

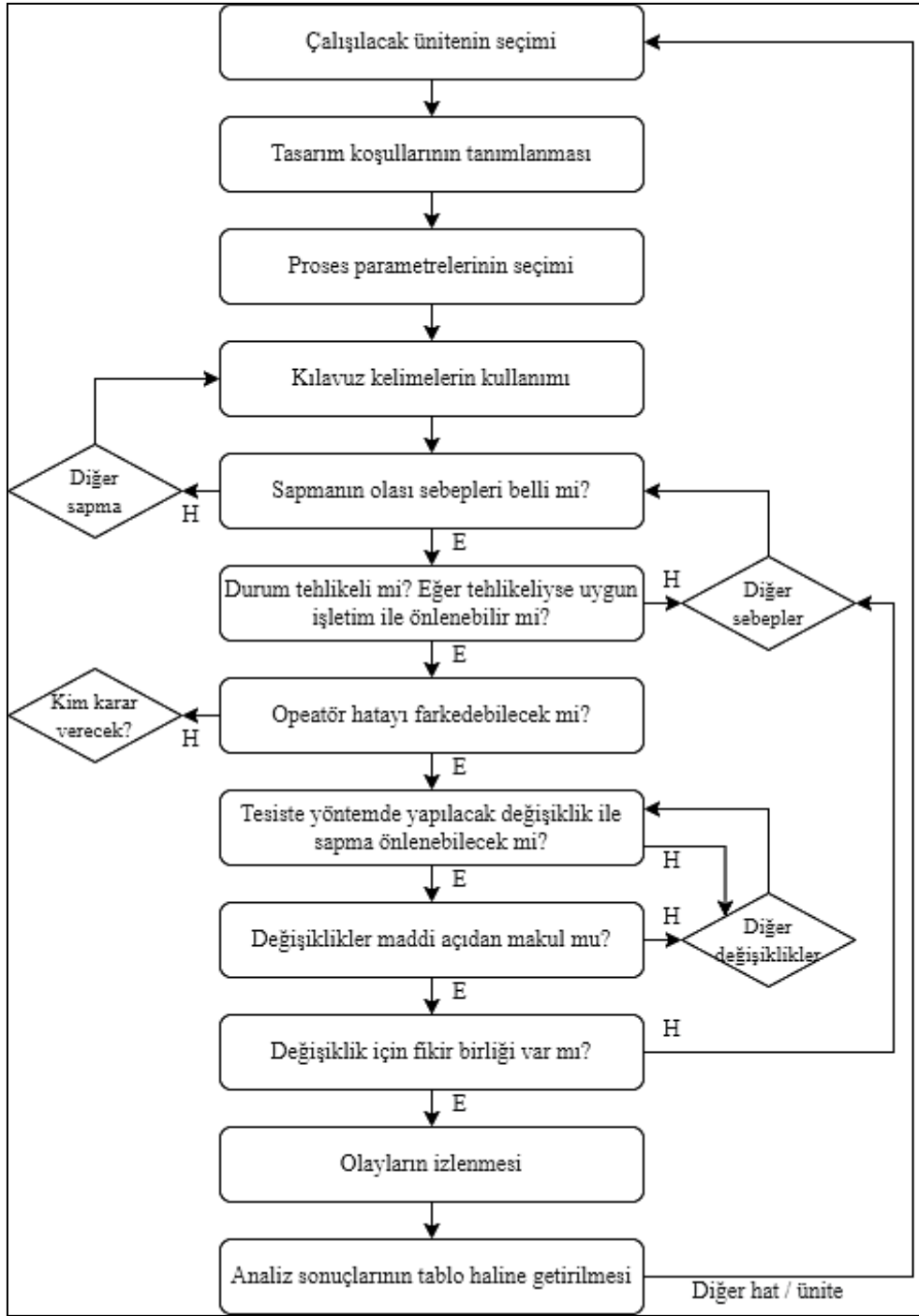
3.2. Temel Yöntemler

3.2.1. Tehlike ve işletilebilirlik analizi (Hazard and operability analysis – HAZOP)

HAZOP yani Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi, İngilizce olarak “HAZard ve OPerability Analysis” terimlerinin kısaltılması ile oluşturulmuştur (Macdonald ve Mackay, 2004: 98).

Bir tesiste verimli çalışmayı engelleyen her türlü tehlike ve sorunların tespit edilmesi amacıyla HAZOP analizi kullanılabilir. İşletim sorunları ve muhtemel tehlikeler, her türlü gözden kaçırma ihtimalini azaltmak için sistematik ve sırayla değerlendirilir (Kletz, 2001: 206). HAZOP yaklaşımı, kılavuz kelimelerin kullanıldığı ve disiplinli bir ekip tarafından yürütülen bir beyin fırtınasıdır (Wu ve Lind, 2018).

Şekil 3.2’de HAZOP analizinin akım şeması verilmektedir (Akman, 2015a).



Şekil 3.2. HAZOP analizi akım şeması

HAZOP analizinin süreci Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. HAZOP analizi süreci (Center for Chemical Process Safety, 2008: 117)

Terim	Tanım
Çalışma düğümleri	Proses parametrelerinin sapmalar için araştırıldığı, belirli sınırları olan ekipman bölümlerinin veya P&ID'ler üzerindeki konumlarının belirlenmesi
İşlem adımları	Proseste işlem adımlarının HAZOP çalışma ekibi tarafından analiz edilmesi
Tasarım amacı	Sapma olmadığı durumlarda tesisin nasıl çalışması gerektiğinin tanımlanması (örneğin, süreç tanımı, hat şemaları, P&ID'ler, akış şemaları)
Kılavuz kelimeler	Tasarım amacını, süreç tehlikelerini belirlemek ve beyin fırtınası sürecini yönlendirmek amacıyla basit kelimelerin kullanılması
Proses parametreleri	İşlemle ilgili fiziksel veya kimyasal özelliklerin kullanılması
Sapmalar	Kılavuz kelimelerin süreç parametrelerine sistematik olarak uygulanmasıyla tasarım amacından sapmaların belirlenmesi.
Sebepleri	Sapmaların meydana gelme nedenlerinin belirlenmesi.
Sonuçları	Sapmaların sonuçlarının belirlenmesi.
Güvenlik önlemleri	Sapma nedeninin önlenmesi, sapmaya karşı koruma sağlanması.
Öneriler	Tasarım değişiklikleri, prosedür değişiklikleri vb. çalışma önerilerinde bulunulması.

HAZOP analizinde tasarım amacından sapmalar, kılavuz kelimeler ve proses parametreleri kullanılarak tanımlanır (Chae, Y. Yoon and E. Yoon, 1992). Kılavuz kelimeleri Çizelge 3.5'te ve proses parametreleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.5. Standart kılavuz kelimeler ve genel anlamları (Crawley ve Tyler, 2015: 16)

Kılavuz Kelime	Anlamı
Hiç	Tasarım amacının hiçbir başarıya ulaşamaması
Daha fazla	Bir parametredeki nicel artış
Daha az	Bir parametredeki nicel azalış
Yanı sıra	Ek bir aktivitenin meydana gelmesi
Kısmen	Tasarım amacının sadece bir kısmına ulaşılması
Ters	Tasarım amacının tersinin gerçekleşmesi
Diğer	İstenilen durumun dışında bir faaliyetin gerçekleşmesi, olağandışı bir faaliyetin meydana gelmesi
Erken/Geç	İstenilen zamanlamadan farklı bir zamanda gerçekleşmesi

Çizelge 3.6. Proses işlemleri için olası parametre örnekleri (Ericson, 2015: 372)

Akış	Ayırma
Basınç	Aşınma
Sıcaklık	Yoğunluk
Seviye	Karıştırma
Viskozite	Sinyal
Reaksiyon	Başlatma
Kompozisyon	Kapatma

Örneğin;

$$\begin{array}{ccccc} \text{Kılavuz Kelime} & & \text{Parametre} & & \text{Sapma} \\ \text{Hayır} & + & \text{Akış} & = & \text{Akış yok (Chae ve diğerleri,1992).} \end{array}$$

Tasarımdan sapmaların belirlenmesi sırasında, her kılavuz kelime anlamlı sapma meydana getirecek şekilde proses parametresi ile birleştirilmemektedir. Oluşturulan kombinasyonlar fiziksel bir anlama sahip olmalıdır (Crawley ve Tyler, 2015: 17). Sapmaların ortaya çıkma nedenleri belirlendikten sonra, oluşan sapma sonucunda ne gibi önlemlerin alınması gerektiğine karar verilir (Akman, 2015).

Bir fabrikada ya da işletmede HAZOP'un yanında başka risk değerlendirme metotlarının da uygulanması gerektiği unutulmamalıdır. HAZOP, işletmedeki proses ya da operasyonlar aşamasındaki tehlikeli sapmaların belirlenmesinde etkilidir, ancak işletme ya da fabrikada proseslerden başka elektrik, mekanik, depolama ve yardımcı işler de vardır ve bu işlerde meydana gelebilecek tehlikelerin belirlenmesi için diğer risk değerlendirme metotlarının da uygulanması gerekmektedir (Özkılıç, 2005: 115).

HAZOP uygulaması,

- Risk değerlendirmesi yapılırken HAZOP ekibinin belirlediği sürelerde,
- Çalışma koşullarında önemli değişiklik meydana geldiğinde,
- Sağlık gözetim sonuçlarına ve ortam ölçümlerine göre gerektiği durumlarda,
- Kimyasal maddeler nedeni ile operasyonda herhangi bir kaza meydana geldiğinde,
- En az beş yılda bir kez,
- Tamir ve bakım, onarım işlerine başlanılmadan önce,

- Tehlikeli kimyasal maddeler içeren yeni bir faaliyette ya da prosese yeni bir eklenti olduğunda yenilenmelidir.

HAZOP analizi genellikle; teknolojik kazalar ile ilgilenen, acil durum planlarını geliştirmek ve güncellemek isteyen şirketler tarafından tercih edilirken basit teknolojik proseslerde ve çevresel risk değerlendirilmelerinde de kullanılır. Bu yöntem, tecrübeli bir liderin yön verdiği uzman çalışma grubunun disiplinli çalışması sonucunda uygulanabilir ve yapılan işlem hakkında ayrıntılı bilgi edinilmesini sağlar. Ayrıca HAZOP yaklaşımı; esnek, disiplinli ve sistematiktir (Özkılıç, 2005: 187).

3.2.2. Olası hata türleri ve etkileri analizi (Failure mode and effects analysis – FMEA)

Hata Türleri ve Etkileri Analizi yöntemi, ABD ordusunda geliştirilmiş olup sistem ve donatım hatalarının etkilerinin belirlenmesinde kullanılan bir tekniktir. Yöntem öncelikle, ürünlerin ve proseslerin geliştirilmesinde hata riskinin yok edilmesine odaklanır ve bu maksatla yapılan faaliyetleri belgeler. Genellikle bu yöntem, önleyici faaliyetlerle ilgilenir (Özkılıç, 2005: 129).

Hata Türü ve Etkileri Analizi, her hatanın oluşma nedenini ve etkenlerini belirleyerek olası hataları tanımlar. Daha sonra hatanın olasılığı şiddeti ve saptanabilirliğine göre hata önceliğini belirleyerek sorunların takip edilmesini ve düzeltici faaliyetlerin yapılmasına olanak sağlar (Özkılıç, 2005: 129).

FMEA; Sistem, Tasarım, Proses ve Servis FMEA olmak üzere dört farklı şekilde sıralanır ve uygulama alanları her türlü hizmet ve üretim şeklini kapsamaktadır.

Sistem FMEA

Sistem analizi yaparak sistem eksikliğinden kaynaklanan olası hata türlerinin belirlenmesine odaklanılır. Yöntemin amacı, sistemin kalite ve güvenilirliğini artırmaktır.

Yöntemin yararları;

- Sistemi etkileme potansiyeli bulunan problemlerin yer alacağı alanlar daralır,
- Sistem içerisinde gerçekleştirilecek prosedürler için bir temel oluşturulmasını sağlar,

- Sistem içerisinde yer alan fazlalıkların belirlenmesine yardımcı olur,
- Optimum sistem tasarım seçeneklerinin belirlenmesine yol gösterir.

Tasarım FMEA

Üretime başlamadan önce, tasarım hatalarından kaynaklanan hata türlerine yönelik ürünlerin analiz edilmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Yöntemin amacı; tasarım kalitesini ve güvenliğini artırmaktır.

Yöntemin sağladığı yararlar;

- Tasarım geliştirme faaliyetleri ile alakalı önceliklerin tespit edilmesi,
- Olası hataların tasarım aşaması esnasında tespit edilmesinin sağlanması,
- Olası güvenlik problemlerinin tespit edilerek yok edilmesine yardımcı olması,
- Kritik ve önemli özelliklerin tespit edilmesine yardımcı olur.

Proses FMEA

Üretim ve montaj prosesini analiz etmek ve bu proseslerdeki eksikliklerden kaynaklanabilecek hata türlerini ortadan kaldırmak amacıyla bu yöntem tercih edilir.

Yöntemin yararları;

- Montaj ve üretim prosesinin analizine yardımcı olarak düzeltici faaliyetlerin önceliklerinin belirlenmesini sağlar.
- Kritik ve ya önemli özellikleri belirleyerek kontrol planı oluşturulmasına fayda sağlar.

Servis FMEA

Organizasyonda yer alan aksaklıkların analiz edilmesinde tercih edilen bir yöntemdir.

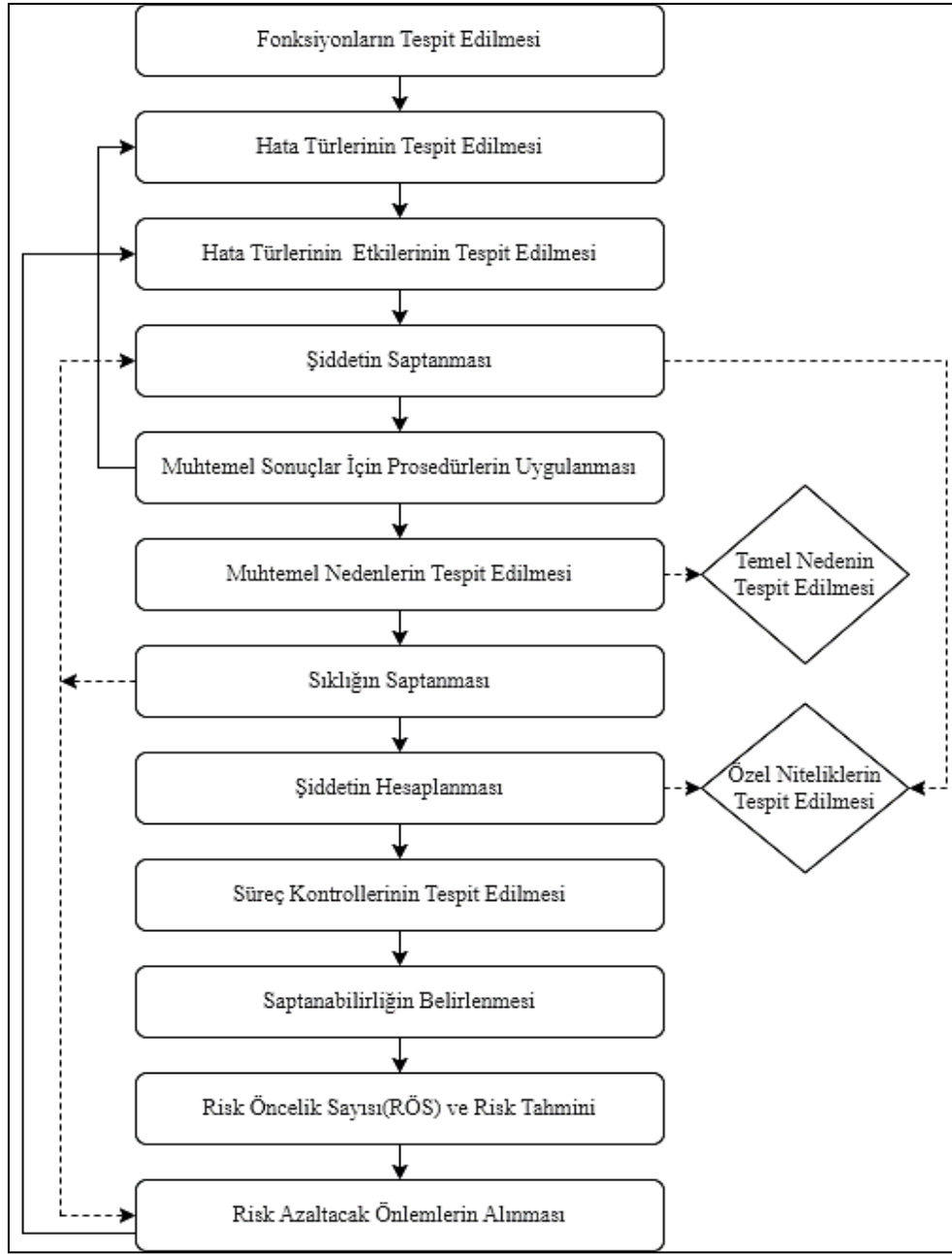
Yöntemin yararları;

- İş akışının, proses ve sistem analizinin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini, kritik işlerin ve hataların belirlenmesinde ve kontrol planlarının meydana getirilmesinde yardımcı olur.

Hata Türü ve Etkileri Analizi aşağıda verilen aşamalardan oluşur:

1. FMEA amaç ve düzeylerinin tespit edilmesi amacıyla FMEA planlamasının yapılması
2. FMEA'nın uygulamaya konulabilmesi için; özel prosedürlerin, kriterlerin ve ana kuralların tanımlanması
3. Faaliyet aşama ve türlerine, fonksiyonlara, çevreye ve etkileşim alanlarına göre sistem analizinin yapılması
4. Proseslerin ve karşılıklı bağlantıların gösterilmesi amacıyla hata ağacı, görev ve güvenilirlik şemalarının oluşturup analiz edilmesi
5. Olası hata türlerinin belirlenmesi
6. Hata türleri ve etkilerinin değerlendirilerek sınıflandırılması
7. Hataların olmasını engelleyecek ve hataları kontrol edecek tedbirlerin tanımlanması
8. Alınacak tedbirlerin etkilerinin değerlendirilmesi
9. Sonuçların belgelendirilmesi.

FMEA analizine ait iş akış diyagramı Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. FMEA yöntemi ile risk değerlendirmesi (Özkılıç, 2005: 133)

FMEA analizi; olası zarar oluşturacak durumların önceden tahmin edilerek önemler alınmasına ve böylesi olası zararların artış olasılığının giderilmesine yardımcı olur (Alataş, 2007).

3.2.3. Hata ağacı analizi (Fault tree analysis – FTA)

1962 yılında Bell laboratuvarlarında kıtalar arası balistik füze atış kontrol sistemlerinde, emniyet değerlendirmesi yapmak amacıyla tasarlanmış bir yöntemdir. Yöntem, sistemin

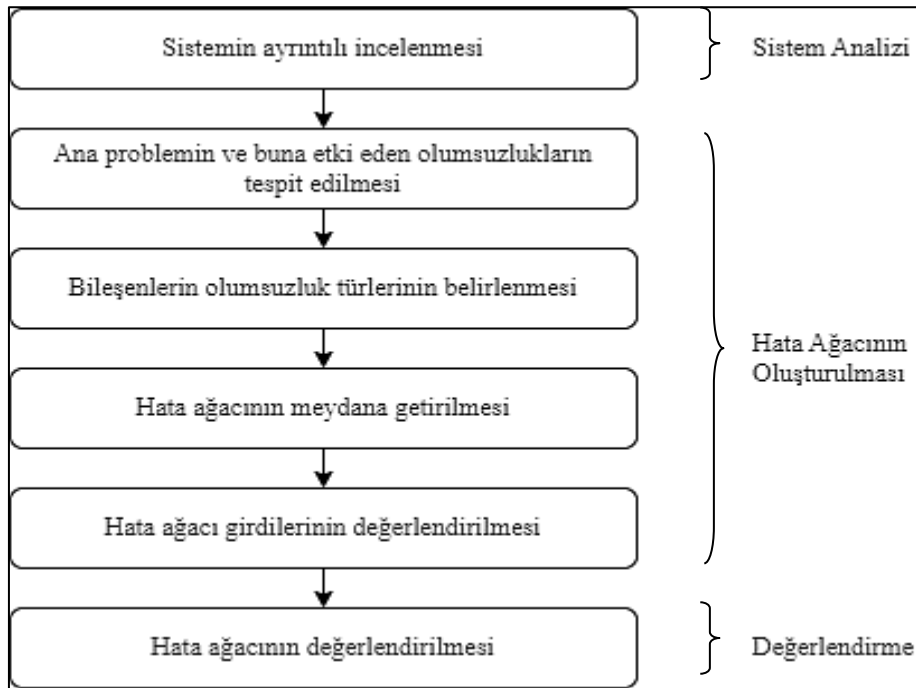
muhtemel hataları ile sistem bileşenlerinin sakıncaları arasındaki bağlantıyı ortaya koyan ve tündengelim mantığına dayanan diyagramlardır (  nal, 2019).

Yöntemde işletmede yaşanması istenmeyen olay, tepe olay şeklinde belirlenir ve daha sonra belirlenen tepe olaydan geriye doğ ru, istenmeyen durumu ortaya çıkaran olası olaylar detaylı şekilde incelenir. Hata ağ acı analizi her türlü büyüklükteki işletmelerde ve işletmelerin alt sistemlerinde uygulanabilir. Yöntemin gerçekleştirilebilmesi için; başarı ve hata, temel olayların birbirinden bağ ımsızlığ ı ve olayların gerçekleşme oranının sabit olduğ u kabul edilir.

Yöntem a  ağ ıda verilen aşamalardan oluşur:

1. Sistem, tepe olay ve dallarının belirlendiğ i sistem tanımının yapılması
2. Sistemin sembollerle ifade edilerek hata ağ acının oluşturulması
3. Sistem zafiyetlerinin ortaya   ıktığ ı nitel analiz yapılması
4. Tepe olay ile alakalı hata olasılığ ı gibi sayısal verilerin elde edildiğ i nicel analiz yapılması (  nal, 2019).

Hata ağ acı analizi aşamaları   ekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Hata ağ acı analizi aşamaları (  zkılı  , 2005: 120)

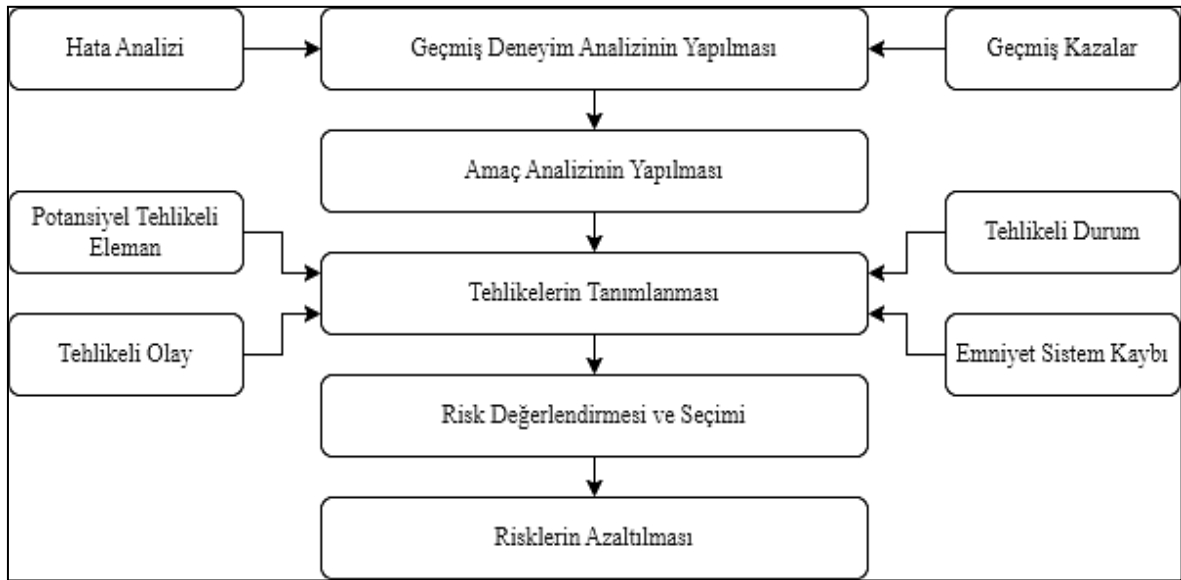
3.2.4. Ön tehlike analizi (Preliminary hazard analysis – PHA)

Tesisin tasarım aşamasında daha detaylı analizlere yol gösterici olması amacıyla bu yöntem kullanılmaktadır. Yöntem, daha öncesinde hiç risk analizinin yapılmadığı tesislerde, hızlıca uygulanabilen nitel risk analizi yöntemlerinden biridir.

Önce olası sakıncalı olaylar tanımlanarak daha sonra ayrı ayrı bu olaylar çözümlenir. Her bir tehlike ya da sakıncalı olay, mümkün olan önleyici ve düzenleyici ölçümler ile formüle edilir. Yöntem kısaca, hangi tür tehlikenin ne sıklıkla meydana geldiğini ve hangi analiz metotlarının kullanılması gerektiği hakkında bilgi verir. Tanımlanan tehlikeler, sıklık/sonuç diyagramı ile sıralanarak alınacak önlemler belirlenir (Alataş, 2007).

Yöntem erken tasarım aşamasında uygulanan bir yöntem olduğundan tek başına yeterli bir analiz yöntemi değildir. Diğer yöntemlere başlangıç verisi sağlaması bakımından yararlıdır (Alataş, 2007).

Ön tehlike analizi aşamaları Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Ön tehlike analizi aşamaları (Özkılıç, 2005: 97)

Ön tehlike analizinde en önemli nokta, geçmiş kazalar ve eğer tutuluyorsa tehlikeli durum ve ramak kala olaylarının dikkate alındığı geçmiş deneyim analizinin yapılmasıdır. Çünkü

geçmiş deneyim analizinin işletmede daha çok hangi hatanın ortaya çıktığı konusunda bilgi vermesi, hangi yöntemin kullanılacağına karar vermede yardımcı olur (Alataş, 2007).

3.2.5. Beyin fırtınası

Herhangi bir konuda fikir beyan edilmek istenildiğinde, çözüm önerilerinde bulunulmak istenildiğinde ya da kök sebep toplamak istenildiğinde grup şeklinde yapılan analiz yöntemidir. Gruba katılan kişi sayısı 5-6 kişiden az ve 19-20 kişiden fazla olmamalıdır. Farklı fikirler elde edebilmek için grupta; farklı düşünen, farklı yaşlarda olan ve farklı kültürleri temsil eden insanlar olmasına dikkat edilir. Ayrıca uzman kişilerden ziyade konuyla ilgisi olmayanların da grupta bulunması, bilinenlere şartlanmadan konuya farklı açılardan bakılabilmesi yönünden önemlidir (Berber ve Deste, 2021).

Tehlike tanımlamada kullanılan tekniğin tek başına ne olduğundan ziyade tüm muhtemel tehlikeleri kapsayıcılığı ve her tehlike grubunun da aynı yaklaşım ile analiz edilebilmesi önemlidir. Bu anlamda beyin fırtınası yöntemi, tehlikelerin belirlenmesi aşamasında ve sürecin proaktif olup olmadığını anlamak için tercih edilen yöntemlerden biridir. Tehlike tanımından sonra olası tehlikeler sıralanır ve önemsiz görülen tehlike senaryoları ihmal edilir (Akyıldız, 2009).

4. İNSAN HATALARININ MEYDANA GELME OLASILIĞININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

4.1. Operatör Hatalarını Tahmin Etme Ampirik Tekniği (TESEO)

İş kazalarının en az %40'ının insan hatası nedeniyle ortaya çıktığı yapılan araştırmalar sonucunda tespit edilmiştir. Bu durum, içinde insanı barındıran tüm sistemlerde yapılacak risk analizlerinde muhtemel insan hatalarının dikkate alınması gerektiğini göstermiştir (Bello ve Colombari, 1980).

TESEO yani operatör hatalarını tahmin etme tekniği, insan güvenilirliğine dayanır. İnsan güvenilirliği, bir operatörün sistem tarafından belirlenen maksimum süre içerisinde bir işi yerine getirme olasılığı olarak tanımlanır ve HR ile gösterilir. İnsan güvenilmezliği HU ise, Eş. 4.1'e göre belirlenir.

$$HU = 1 - HR \quad (4.1)$$

Operatörün telafi ile hatayı düzeltme olasılığı ise PR ile gösterilir ve Eş. 4.2'de insan hatası HE ve telafi etme olasılığı PR yerine konularak insan güvenilmezliği elde edilir (Bello ve Colombari, 1980).

$$HU = HE \times (1 - PR) \quad (4.2)$$

TESEO yönteminde operatörün hata olasılığı aşağıda verilen K_1 , K_2 , K_3 , K_4 ve K_5 değerlerinin çarpımı ile Eş. 4.3'e göre hesaplanır:

- K_1 : Gerçekleştirilecek Faaliyet Türü (Aktivitenin Tipolojik Faktörü)
- K_2 : Aktiviteyi Gerçekleştirmek İçin Mevcut Zaman (Geçici Stres Faktörü)
- K_3 : Operatörün Özellikleri (Operatörün Tipolojik Faktörü)
- K_4 : Aktivitenin Endişe Durumu (Aktivitenin Endişe Faktörü)
- K_5 : Çevresel Ergonomik Özellikler (Aktivitenin Ergonomik Faktörü) (Bello ve Colombari, 1980)

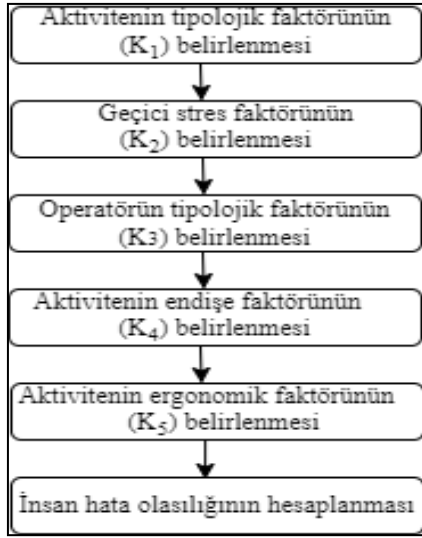
$$Hata Olasılığı (HU) = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \quad (4.3)$$

Hata olasılığı değeri, HU; K₁, K₂, K₃, K₄ ve K₅ değerlerinin Çizelge 4.1'den alınıp Eş. 4.3'te yerine konulması ile elde edilir. Hata olasılığının 1'e eşit olduğu durumlarda, operatörün aktiviteyi başarılı bir şekilde gerçekleştirme olasılığı sıfır olarak kabul edilir (Bello ve Colombari, 1980).

Çizelge 4.1. TESEO hata olasılığı parametreleri (Kletz, 2001: 137)

Aktivite Çeşidi	K ₁ (Aktivitenin Tipolojik Faktörü)
Basit, rutin	0,001
Dikkat gerektiren ancak rutin	0,01
Rutin olmayan	0,1
Rutin Aktiviteler İçin Mevcut Zaman, sn	K ₂ (Geçici Stres Faktörü)
2	10
10	1
≥20	0,5
Rutin Olmayan Aktiviteler İçin Mevcut Zaman, sn	K ₂ (Geçici Stres Faktörü)
3	10
30	1
45	0,3
≥60	0,1
Operatörün Özellikleri	K ₃ (Operatörün Tipolojik Özellikleri)
Özenle seçilmiş, alanında uzman, iyi eğitilmiş	0,5
Ortalama bilgi düzeyinde ve eğitimi devam ediyor	1
Düşük düzeyde bilgili ve iyi eğitilmemiş	3
Aktivitenin Endişe Durumu	K ₄ (Aktivitenin Endişe faktörü)
Şiddetli acil durum	3
Potansiyel acil durum	2
Normal durum	1
Çevresel Ergonomik Özellikler	K ₅ (Aktivitenin Ergonomik Faktörü)
Mükemmel mikroiklim, tesisle mükemmel uyum	0,1
İyi mikroiklim, tesisle iyi uyum	1
Kesintili mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3
Kesintili mikroiklim, tesisle düşük seviye uyum	7
Yetersiz mikroiklim, tesisle düşük seviye uyum	10

Şekil 4.1'de TESEO yöntemi için akım şeması verilmiştir.



Şekil 4.1. TESEO akım şeması

4.2. İnsan Hata Oranı Tahmin Tekniği (THERP)

THERP, insan hatası oranlarını tahmin etmek ve ekipman ya da prosedürler gibi faktörlerle ilişkili olarak insan hatalarından kaynaklanması muhtemel bir insan-makine sisteminin bozulmasını değerlendirmek için tercih edilen bir yöntemdir. Ayrıca yöntem, belirli durumlar hakkında yargıda bulunabilmek için performans şekillendirme faktörlerinden yararlanır (Havlikova, Jirgl and Bradac, 2015).

THERP yöntemi, insan güvenilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan en iyi belgelenmiş ve en çok kabul gören yöntemlerden birisidir. Yöntem basitlik avantajı sunar ancak zaman içinde insan güvenilirliğini dikkate almadığı belirtilmiştir (Havlikova ve diğerleri, 2015).

Yöntem beş temel adım içerir ve bunlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Sistem ya da süreç tanımlanır.
2. Gerçekleştirilen tüm insan işlemleri ve bunların sistem ya da süreç görev veya işlevleriyle ilişkileri belirlenerek listelenir.
3. Her bir insan işlemi ya da işlem grubu için hata oranları tahmin edilir.
4. Tespit edilemeyen hataların sonuçları da dahil olmak üzere insan hatalarının sistem ya da süreç üzerindeki etkisi belirlenir.
5. Sistem ya da işlem başarısızlık oranlarını azaltacak değişiklikler geliştirip önerilerde bulunulur (Havlikova ve diğerleri, 2015).

Çok adımlı karmaşık görevler için, THERP olay ağacının modellenmesi zordur. İnsan hatası olasılığının hesaplanabilmesi için, her göreve ait insan hata olasılığını tanımlamak gerekir ve bazen bunu yapmak kolay değildir (Calixto, 2016: 4).

THERP yönteminin başlıca avantajı, insan hata olasılığını hesaplamak için doğrudan ve göreceli olarak basit bir yöntem olmasıdır. Ancak yöntemin dezavantajı ise, insan hatası olasılıklarının hesaplanmasında insan performans faktörlerinin olmamasıdır (Calixto, 2016: 521).

4.3. Başarı Olasılığı İndeksi Metodolojisi (SLIM-MAUD)

1980lerde ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu, nükleer santrallerdeki insan hatası olasılıklarını tahmin etmek, uzman yargılarını kullanmak ve çeşitli yöntemleri araştırmak için bir araştırma programı başlatmıştır. Araştırılan yöntemlerden biri de SLIM-MAUD yani Başarı Olasılık İndeksi Metodolojisidir. SLIM, nükleer enerji santrallerinde belirli insan eylemlerinin başarı ve başarısızlık olasılığına ilişkin uzmanların tahminlerini ortaya çıkaran ve düzenleyen bir dizi prosedürden oluşmaktadır (Calixto, 2016: 510).

SLIM yönteminin adımları aşağıda verilmiştir.

1. Uzman grubu oluşturulur ve analiz edilecek olay belirlenir.
2. Analiz edilecek olay için performans şekillendirme faktörleri (PSF) tanımlanır.
3. Her bir PSF için ağırlıklandırma faktörleri atanır.
4. Her bir PSF puanlanır.
5. Başarı olasılık indeksi (SLI) hesaplanır.
6. SLI, insan hatası olasılığına (HEP) dönüştürülür (Calixto, 2016: 510).

SLIM-MAUD, performans şekillendirme faktörlerinin etkilerini açık ama yalnızca nicel bir şekilde değerlendirir. Ancak, açık şekilde bir model operatörü olmadığından, PSF'lerin etkilerini nasıl uyguladığına dair bir açıklamada bulunamaz. Yani matematiksel anlamı dışında; uzman tahminleri, hatalı insan eylemlerine karşı açık ve sistematik bir muamele sağlamaz (Hollnagel, 1998: 133).

4.4. İnsan Olay Analizi İçin Bir Teknik (ATHEANA)

ATHEANA, ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (USNRC) tarafından insan davranışlarını temsil etmek amacıyla geliştirilmiş bir insan güvenilirlik analizi yöntemidir (Forester ve diğerleri, 2004). Nükleer santrallerde çeşitli durumlarda kullanılmak üzere geliştirilen ve analize esneklik sağlayan bir yöntemdir (A. Kim, J. Kim, Chae, Seong and Jang, 2017).

ATHEANA yönteminin süreci aşağıda verilmiştir:

1. Analiz edilecek olay tanımlanır.
2. Analizin kapsamı yani gerekli sistem kombinasyonları veya bileşen arızaları, önceki insan eylemleri ve senaryoda meydana gelen başarısızlıklar tanımlanır.
3. Operatörlerin belirli durumlarda, herhangi bir zamanda yanıt vermesini sağlayan sürekli eylem ifadeleri de dahil olmak üzere tesis parametrelerinin davranışlarıyla belirtilen prosesler tanımlanır.
4. Güvenlik açıkları ve temel durum senaryosundan sapmalar tanımlanır.
5. İnsanı hata yapmaya zorlayan EPC (Hata Oluşturma Koşulları) tanımlanır.
6. Analistler her bir EPC için olasılıklarının tahmininde bulunur.
7. Tahmini EPC olasılıkları kullanılarak insan hata olasılığı belirlenir (Forester ve diğerleri, 2004).

Yöntem, önemli insan eylemlerini ve bunların başarısına ya da başarısızlığına yol açabilecek bağlamları belirlemek için ayrıntılı bir araştırma süreci sağlar. Bununla birlikte, insan eylemlerinin nicelleştirilmesini resmi olarak desteklemeye uygun ve kabul edilmiş bir insan davranışı modeli mevcut değildir. Yani mevcut niceleme modelleri, ATHEANA kullanılarak tanımlanan bilgilerin uygun şekilde analize dahil edilmesini sağlamak için yeterli değildir ve bu nedenle nicelemeyi gerçekleştiren analistlerin yargılarına ihtiyaç duyulmaktadır (Forester ve diğerleri, 2004).

ATHEANA'nın teorik arka planı, tahmin için oldukça zayıf görünmektedir bu nedenle bilişsel özelliklerden de tam olarak yararlanamamaktadır. Ancak, görev hataları da dahil olmak üzere insan hatalı eylemlerine genellikle bilişsel hatalar neden olur. Bu nedenle,

bilişsel psikolojide geliştirilen insan hata analiz şeması, kaza sonrası insan güvenilirlik analizi için daha faydalı olabilir (Kim, 2001).

4.5. Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi (CREAM)

Endüstriyel işletmelerde çalışma ortamlarının karmaşıklığı ve tehlikeleri nedeniyle, insan güvenilirliği analizi yapılırken bir görevin bilişsel talepleri dikkate alınmalıdır. CREAM yöntemi, nükleer endüstride, deniz taşımacılığında, insanlı denizaltılarda ve kimyasal tesislerde yaygın olarak uygulanmaktadır (Y. He, Kuai, Denh and X. He, 2021).

CREAM, insan eylemlerinin nedenlerini yani insan bilişsel faaliyetlerini analiz etmeye, insan, teknoloji ve organizasyon üçlüsünün çeşitli bileşenlerinin ve hata modalarının sınıflandırma şemalarına dayanır. Kısacası; kişiyle, sistemle, teknolojiyle ve organizasyonla ilgili faktörleri inceler (Kim, 2001). Ayrıca CREAM, insan performansını etkileyen Ortak Performans Koşulları (CPC) olarak adlandırılan dokuz çalışma koşulunu tanımlayan bir insan hatası olasılığı niceleme yöntemidir (Ahn ve Kurt, 2020).

CREAM yönteminin süreci aşağıda verilmiştir:

1. Analiz edilecek görev seçilir.
2. Görev, hiyerarşik görev analizi gibi bir yöntemle analiz edilir.
3. Ortak Performans Koşulları olarak adlandırılan çalışma koşulları değerlendirilir.
4. Bilişsel talepler profili, basitleştirilmiş bir dizi bilişsel işlev, yani gözlem, yorumlama, planlama ve yürütme açısından bilişsel yönelik belirli talepleri belirlemek için oluşturulur.
5. Olası kontrol modu, verilen görev için belirli CPC'lerin insan üzerindeki etkileri entegre edilerek her bir görev ögesi için belirlenir.
6. Olası işlev başarısızlığı tanımlanır.
7. Bilişsel işlev başarısızlıklarının her biri için nominal bilişsel başarısızlık olasılığı atanarak, bilişsel başarısızlık olasılığı tahmin edilir (Kim, 2001).

CREAM tarafından önerilen başarısızlık olasılığı değerlerinin, yöntemin ilkelerini göstermesi amacıyla sınıflandırılması olumlu bir özelliktir ancak önerilen verilerin kalitesini artırmak için izlenecek talimatların ne olduğu açık değildir. Ayrıca, planlama

gibi bazı bilişsel işlevler için veri toplamayı geliştirecek güvenilir deneyler kurmak zordur (Reer, 2008).

4.6. İnsan Hata Değerlendirme ve Azaltma Tekniği (HEART)

HEART yöntemi, insan hata olasılığını değerlendirmede kullanılan, insan güvenilirliğinin önemli olduğu herhangi bir sektöre ya da duruma uygulanabilen, hızlı ve basit bir yöntemdir (Bell ve Holroyd, 2009: 14). Yöntemin dayandığı öncüller aşağıda verilmiştir:

- Temel insan güvenilirliği, gerçekleştirilecek görev ile ilişkilidir.
- Bu güvenilirlik seviyesi, mükemmel koşullarda, olasılık sınırları dahilinde belirli bir nominal olasılık ile tutarlı olarak elde edilme eğilimindedir.
- Mükemmel koşulların her durumda var olmadığı düşünülürse, tahmin edilen insan güvenilirliği, belirlenen Hata Oluşturma Koşulları (EPC)'nın bir fonksiyonu olarak azalabilir (Bell ve Holroyd, 2009: 14).

HEART yönteminde, her biri ilişkili bir nominal insan hatası potansiyeli olan 9 Genel Görev Türü (GTT) ve görev güvenilirliğini etkileyebilecek 38 Hata Oluşturma Koşulu (EPC) vardır ve bunların her biri nominal insan hatası potansiyelinin (HEP) çarpılabileceği maksimum miktara sahiptir (Bell ve Holroyd, 2009: 14).

HEART yöntemine ait Genel Görev Türleri ve Nominal İnsan Hatası Potansiyeli (HEP) Değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Genel görev türleri ve nominal HEP değeri (Williams, 2016)

Genel Görev Türü	Açıklama	Önerilen Nominal İnsan Güvenilmezliği	5.-95. Yüzdelik Sınırlar
A	Tamamen alışılmamış, yabancı olan; olası sonuçlarına ait fikir sahibi olunmayan hızda gerçekleşen	0,55	0,35 – 0,97
B	Denetim veya prosedürler olmaksızın tek bir denemede sistemi yeni veya orijinal bir duruma değiştirmek ya da eski haline getirmek	0,26	0,14 – 0,42
C	Yüksek düzeyde kavrama ve beceri gerektiren karmaşık görev	0,16	0,12 – 0,28

Çizelge 4.2. (devam) Genel görev türleri ve nominal HEP değeri (Williams, 2016)

Genel Görev Türü	Açıklama	Önerilen Nominal İnsan Güvenilmezliği	5.-95. Yüzdelik Sınırlar
D	Oldukça basit bir görevin hızlıca ve dikkatsizce gerçekleştirilmesi	0,09	0,06 – 0,13
E	Nispeten düşük düzeyde beceri içeren, rutin, çokça uygulanan, hızlı görev	0,025	0,007 – 0,045
F	Prosedürleri izleyerek, bazı kontrollerle bir sistemi orijinal veya yeni duruma değiştirmek ya da eski haline getirmek	0,003	0,0008 – 0,007
G	Saatte birkaç kez gerçekleşen, yüksek motivasyonlu, yüksek eğitilmiş ve deneyimli bir kişi tarafından mümkün olan en yüksek standartlarda gerçekleştirilen, başarısızlığın olası sonuçlarının tamamen farkında olan, potansiyel hatayı düzeltmek için zamanla, ancak önemli iş yardımlarından yararlanmadan, tamamen tanıdık, iyi tasarlanmış, çokça uygulanan, rutin görev	0,004	0,00008 – 0,009
H	Sistem durumunun doğru yorumlanmasını sağlayan artırılmış veya otomatikleştirilmiş bir denetleme sistemi olduğunda bile sistem komutuna doğru yanıt vermek	0,00002	0,000006 – 0,009
M	Herhangi bir açıklaması bulunamayan çeşitli görevler	0,03	0,008 – 0,11

Hata Oluşturma Koşulları (EPC) Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Hata oluşturma koşulları (EPC) (Williams, 2016)

Hata Oluşturma Koşulları (EPC)		Maksimum Nominal Tahmin Edilen Etki Faktörü
1	Nadiren ortaya çıkan veya yeni olan önemli bir durum karşısında operatörün duruma aşına olmaması	x 17
2	Hata tespiti ve düzeltmeleri için mevcut zamanın kısıtlı olması	x 11
3	Sinyal/Gürültü oranının düşük seviyede olması	x 10
4	Sisteme zarar veren, uygun olmayan bir durum karşısında bilgiye kolay erişimin engellenmesi ya da erişim izinlerinin geçersiz kılınması.	x 9
5	Operatörlere kolayca özümseyebilecekleri bir biçimde mekansal ve işlevsel bilgiyi aktarmanın hiçbir yolunun olmaması	x 8
6	Bir operatörün dünya modeli ile bir tasarımcının hayal ettiği dünya modelinin birbirine uymaması	x 8
7	Hatayı sebep olan istenmeyen eylemi tersine çevirmenin bir yolunun olmaması	x 8
8	Özellikle gerekli bilgilerin eşzamanlı sunumundan kaynaklanan aşırı bilgi yüklemesinin olması	x 6

Çizelge 4.3. (devam) Hata oluşturma koşulları (EPC) (Williams, 2016)

Hata Oluşturma Koşulları (EPC)		Maksimum Nominal Tahmin Edilen Etki Faktörü
9	Bir tekniğin bırakılması ve karşıt bir felsefenin uygulanmasını gerektiren başka bir tekniğe başvurulması	x 6
10	Belirli bilgilerin anlam kaybına uğramadan görevden göreve aktarılması	x 5,5
11	Gerekli performans standartlarında belirsizlik olması	x 5
12	Algılanan ve gerçek risk seviyeleri arasında uyumsuzluk olması	x 4
13	Sistem geri bildiriminin zayıf, belirsiz veya uyumsuz olması	x 4
14	Sistem geri bildiriminin açık, doğrudan ve zamanında yapılamaması	x 4
15	Operatörün deneyimsiz olması (örneğin, yeni nitelikli bir esnaf, ancak "uzman" değil)	x 3
16	Bilgi kalitesinin prosedürler ve kişi / kişi etkileşimi ile iletilmesi sırasında azalması	x 3
17	Çıktının bağımsız olarak kontrolünün yapılmaması	x 3
18	Acil ve uzun süreli hedefler arasında bir anlaşmazlık olması	x 2,5
19	Doğruluk kontrolleri için bilgi çeşitliliğinin olmaması	x 2,5
20	Bireyin eğitim başarı düzeyi ile görevin gereklilikleri arasında uyumsuzluk olması	x 2
21	Daha tehlikeli diğer prosedürleri kullanmak için bir teşvikin olması	x 2
22	Bir işin sınırları dışında zihin ve beden egzersizi yapma fırsatının, dinlenme molalarının çok az olması	x 1,8
23	Güvenilir olmayan enstrümantasyon (fark edilecek kadar)	x 1,6
24	Bir operatörün yeteneklerinin veya deneyiminin ötesinde mutlak yargılara ihtiyaç duyulması	x 1,6
25	Görev ve sorumluluk dağılımının belirsiz olması	x 1,6
26	Bir aktivite sırasında operatörün ilerlemesini, görevinin dışına çıkmamasını sağlayacak tavsiye ve yardımların bulunmaması	x 1,4
27	Görevlerin operatörün fiziksel yeteneklerini, kapasitelerini aşma tehlikesinin olması	x 1,4
28	Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	x 1,4
29	Duygusal stresin yüksek seviyede olması	x 1,3
30	Operatörler arasında sağlık durumunun kötü olması ve performansı etkilemesi	x 1,2
31	Çalışma moralinin düşük olması	x 1,2
32	Göstergelerin ve prosedürlerin anlamının tutarsız olması	x 1,2
33	Ortamın kötü olması	x 1,15
34	Uzun süreli hareketsizlik veya düşük zihinsel iş yükü görevlerinin tekrarlanması	x 1 (ilk yarım saat için) x 1,05 (bundan sonraki her saat için)
35	Normal çalışma-uyku döngülerinin bozulması	x 1,1
36	Görev hızının başkalarının müdahalesinden etkilenmesi	x 1,06
37	Görevi tatmin edici bir şekilde yerine getirmek için ek ekip üyelerine ihtiyaç duyulması	x 1,03 (ilave çalışan başına)
38	Daimi görevleri yerine getiren personelin yaşı	x 1,02

HEART yönteminin yaratıcıları, insan faktörleri araştırmasıyla ilgili yaklaşık 25.000 makaleyi incelemişler ve daha sonra Çizelge 4.4'te verilen EPC'leri ve çarpanlarını revize etmeye veya ilave etmeye karar vermiştir (Williams ve Bell, 2016).

Çizelge 4.4. Yeni ve revize EPC'ler (Williams ve Bell, 2016)

	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Durum	Maksimum Nominal Tahmin Edilen Etki Faktörü
29	Duygusal stresin yüksek seviyede olması	Revize	x 2
32	Göstergelerin ve prosedürlerin anlamının tutarsız olması	Revize	x 3
33	Ortamın kötü olması	Revize	x 2
35	Normal çalışma-uyku döngülerinin bozulması	Revize	x 1,2 (Her 24 saatte uyku kaybı başına)
37	Görevi tatmin edici bir şekilde yerine getirmek için ek ekip üyelerine ihtiyaç duyulması	Revize	x 1,2 (ilave çalışan başına)
38	Daimi görevleri yerine getiren personelin yaşı	Revize	x 1,16 (25 ila 85 yaş arası her 10 yıl için)
39	Dikkatin dağılması, görevin kesintiye uğraması	Yeni	x 4
40	Günün saati	Yeni	x 2,4

HEART yöntemi ile analiz yaparken öncelikle, dokuz Genel Görev türünden biri seçilir ve göreve nominal insan hatası potansiyeli yani HEP değeri atanır. Sonra genel görev türünü etkileyebilecek EPC değerine karar verilir ve her bir EPC değeri için Değerlendirilen Etki Değer Oranı (APOA) belirlenerek insan hatası olasılığı (HEP) hesaplanır (Bell ve Holroyd, 2009: 52).

Değerlendirilen Etki Değer Oranı çeşitli şekillerde elde edilebilir. Bu çalışmada, analizi yapan kişi tarafından tahmini olarak ve Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi ile belirlenmiştir.

4.6.1. AHP (Analitik hiyerarşi prosesi)

İlk olarak 1968 yılında Alpert ve Mayes tarafından ortaya atılan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), 1970li yılların başında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biridir (Gülenç ve Bilgin, 2010).

AHP, daha iyi kararlar alınması için kişilere kendi karar mekanizmalarını tanıma fırsatı sunar, onları hangi kararı nasıl vereceği konusunda zorlamaz. Ayrıca karar sürecine, karar vericilerin hem öznel hem de nesnel düşünceleri dahil edilmektedir (Gülenç ve Bilgin, 2010).

AHP yönteminin uygulama aşamaları dört adımdan meydana gelmektedir:

1. Aşama: Hiyerarşik yapının meydana getirilmesi

AHP yöntemi uygulanmaya başladığında ilk olarak, karar vericinin amacına uygun şekilde karar problemi, konuyla alakalı uzman kişilerin görüşlerine başvurarak ya da anket çalışmaları ile belirlenir. Daha sonra bu probleme ait ana kriterler, alt kriterler ve karar alternatifleri belirlenerek hiyerarşik yapı oluşturulur (Nebati, Sağanda, Erol, Subaşı ve Göz, 2021).

2. Aşama: İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması

Hiyerarşik yapının meydana getirilmesinden sonra, ikili karşılaştırmalar yapılarak karşılaştırma matrisleri elde edilir. İkili karşılaştırmaların yapılması sırasında Çizelge 4.5'te verilen Saaty'nin ikili karşılaştırma önem derecelerinden yararlanılır. Hangi kriterin diğerine göre ne kadar önemli olduğu sorusuna cevap oluşturulur (Yorulmaz ve Aksu, 2021).

Karşılaştırma matrisi karar vericinin öznel düşüncelerine bağlı olup iki faktörün kıyaslanması anlamına gelmektedir. Karşılaştırma matrisi (A) Eş. 4.4'te verilmiştir (Akyüz ve Çelik, 2015).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad a_{ii} = 1, \quad a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, \quad a_{ji} \neq 0, \quad a_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4.4)$$

Çizelge 4.5. Saaty ikili karşılaştırma önem ölçekleri (Keçek ve Yüksel, 2016)

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Eşit düzeyde önemli	Her iki kriter de eşit katkıda bulunur.
3	Orta düzeyde önemli	Bir kriter diğer kritere göre biraz daha üstündür.
5	Kuvvetli düzeyde önemli	Bir kriter diğer kritere göre daha fazla üstündür.
7	Çok kuvvetli düzeyde önemli	Bir kriter diğer kritere göre çok üstündür.
9	Aşırı düzeyde önemli	Bir kriter diğer kritere göre en üst düzeyde üstündür.
2, 4, 6, 8	Ara değerler	Değerlendirme yaparken sözler yetersiz kalıyorsa, ara değerler kullanılır.

3. Aşama: Kriter ve alternatif ağırlıklarının belirlenmesi

İkili karşılaştırma matrislerinden faydalanılarak her karar alternatifinin ağırlığı belirlenmektedir. Karşılaştırma matrisindeki her bir sütun değeri (B), o değerin yer aldığı sütun toplamına bölüldüğünde matris normalleştirilmektedir (C). Normalleştirilmiş matriste yer alan her bir sütun değerinin toplamı 1'e eşit olmaktadır. Daha sonra ağırlık matrisi (W), her satırda yer alan değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak elde edilmektedir (Nebati ve diğerleri, 2021). W matrisinde yer alan değerler de alt alta toplandığı zaman toplamaları 1'e eşit olmaktadır. Karşılaştırma matrisindeki her bir sütun değeri Eş. 4.5'e göre belirlenir ve normalleştirilmiş matris Eş. 4.6'da verilmiştir.

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix}, \quad b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad (4.5)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Her bir kriterin ağırlığı Eş. 4.7'ye göre belirlenir.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix}, \quad w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (\text{Yorulmaz ve Aksu, 2021}) \quad (4.7)$$

4. Aşama: Tutarlılık oranının belirlenmesi

Tutarlılık ölçümü, AHP yöntemi ile yapılan analiz sonucunun ne kadar gerçekçi olduğunun kontrol edilmesini sağlar. Böylece elde edilen sonuca olan güvenilirlik artırılır. Tutarlılık oranı hesaplanmasında, $\lambda_{\max}$ katsayısı kullanılmaktadır. $\lambda_{\max}$ katsayısının hesaplanabilmesi için öncelikle A, karşılaştırma matrisi ile W, ağırlık matrisi çarpılarak D matrisi Eş. 4.8’de verilen şekilde elde edilir.

$$D = A \times W = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Eş. 4.9’dan yararlanılarak her bir değere ait E değeri hesaplanır ve bu değer kullanılarak da Eş. 4.10’da verilen $\lambda_{\max}$ değeri hesaplanır.

$$E_i = \frac{d_i}{w_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.9)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (4.10)$$

$\lambda_{\max}$ değerinin hesaplanmasının ardından tutarlılık göstergesi denilen CI gösterge değeri Eş. 4.11’e göre hesaplanır.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (4.11)$$

“Random indeks değerleri” olarak adlandırılan RI gösterge değeri Çizelge 4.6’dan alınır.

Çizelge 4.6. Random indeks değerleri (Akyüz ve Çelik, 2015)

Matris Boyutu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI Değerleri	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Çizelge 4.6’dan alınan RI değerleri ve Eş. 4.11’den hesaplanan CI değeri Eş. 4.12’de yerine konularak Tutarlılık Oranı, CR değeri hesaplanır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.12)$$

CR değerinin 0,10 değerinden küçük olması durumunda, karar verici tarafından gerçekleştirilen karşılaştırmaların tutarlı bir karşılaştırma olduğu sonucuna varılır. CR değerinin 0,10 değerinden büyük olması durumunda ise, AHP yöntemi hesaplamalarında hata yapıldığı ve karar verici tarafından gerçekleştirilen karşılaştırmaların tutarlı olmadığı sonucuna ulaşılır (Yorulmaz ve Aksu, 2021).

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hata yapma, insanın doğuştan gelen bir yeteneğidir ve kişinin kendi yaptığı hatalar ile ölüm ve yıkımı yayması son zamanlara kadar sadece komutanlar ve siyasiler ile sınırlı kalmıştır. Günümüzde ise, daha karmaşık ve kompleks proseslerin işletilmesi operatörlerin daha önemli kararlar almasına yol açmıştır. Endüstriyel faaliyetlerdeki toplam felaket olaylarının ise en az %40'ının insan hataları nedeniyle meydana geldiği yapılan çalışmalarla ortaya konulmaktadır. İnsanın bulunduğu her ortamda yapılan risk analizleri, olası insan hatalarının dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Bello ve Colombari, 1980).

İnsan-makine sistemleri, bir insan (operatör) ile teknik sistem arasındaki gerçek etkileşimi temsil eder. İnsan-makine sistem güvenilirliğine ilişkin önceki değerlendirmeler, esas olarak teknik alt sistemlerin incelenmesine odaklanmıştır ve bir insanın sistem güvenilirliği üzerindeki etkisi nicel açıdan dikkate alınmamıştır. İnsan faktörünü ve insan güvenilirliğini değerlendirmede yeni araştırmalara başlamanın nedeni, hava ve deniz felaketleri ile birlikte, nükleer santralleri ve kimya fabrikalarını etkileyen arızalardır. İnsan-makine sistemlerinde insan faktörü önemli bir rol oynar ve insan başarısızlığının bir güvenlik tehlikesine yol açabileceği ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, insan-makine sistemlerinin güvenilirlik analizini karakterize eden prosedürler analiz edilmiştir. Genel sistem performansına insan katkısının, donanım ve yazılım güvenilirliğinden daha önemli olduğu düşünüldüğünden, insan etkileşimlerinin tüm yönleriyle ele alınması gerekliliği vurgulanmıştır (Havlikova ve diğerleri, 2015).

Rafinelerde tankerlere petrol ürünlerinin yüklenmesi esnasında, patlamaya ve yangına sebep olabilecek durumlar incelendiğinde, hem depo hem de tır için taşma önleme sistemine ilave olarak sürücü tarafından gerçekleştirilen hataların da kazanın meydana gelmesinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir. Mevcut yükleme sisteminin ve insan-makine etkileşiminin iyileştirilmesi kazanın meydana gelme olasılığını düşürebilir. Çalışmada TESEO yöntemi, insan hata olasılığını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Çalışma sonucunda kazaların genellikle ekipman arızasından ziyade sürücü hatalarından kaynaklandığı tespit edilmiştir. İnsan hatalarını yok edebilmek için de otomasyon kurulması gerekliliği ortaya çıkmıştır (Shahriari, Starhe and Hektor, 2007).

Herhangi bir risk değerlendirmesinin yapılabilmesinin ilk ve en önemli adımı; tehlikelerin tanımlanmasıdır. Tehlike tanımlama yöntemleri küresel düzeyde kabul görmeleri nedeniyle, proses güvenliği alanında başarılı olmuştur. Ancak, tehlike tanımlama yöntemlerinin kullanımı sırasında bazı zorluklar ortaya çıkmıştır. Bu zorlukların giderilmesi, tehlike tanımlamalarının iyileştirilmesi ve çalışmaların verimliliğinin artırılması HAZOP'un ortaya çıkması ile gerçekleştirilmiştir (Cameron, Mannan, Nemeth, Park, Pasman, Rogers and Seligmann, 2017).

Karmaşık sistemlerin yaşam döngüsü boyunca güvenliği sağlamak için sistematik yöntem ve tekniklerin geliştirilmesi, sistem mühendisliği için önemli bir zorluktur. HAZOP, petrol ve gaz endüstrisinin tehlikeleri ve işletilebilirlik sorunlarını belirlemek için kullandığı sistematik yöntem ve tekniklerden biridir. Gelişmiş endüstriyel süreçlerde ve teknolojik altyapılarda meydana gelen son kazalar da, sistem karmaşıklığının süreç güvenliği yönteminde büyük bir zorluk olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, bir HAZOP çalışması perspektifinden sistem karmaşıklığı ile nasıl başa çıkılacağına dair fikir vermektedir. Geleneksel olarak HAZOP her seferinde yalnızca bir düğümü dikkate alır ve düğüm sınırı yöntemi zayıflatabilir. Ancak modelleme yapılarak düğüm sınırı azaltılabilir ve HAZOP çalışmalarının karmaşıklığı azaltılır (Wu ve Lind, 2018).

Kimyasal proseslerde HAZOP çalışmalarının etkinliğini ve güvenilirliğini kanıtlamak için uzman bir yaklaşımın kullanılması önerilmektedir. Çalışmada, LPG depolama ve ayrıştırma sürecine HAZOP analizi uygulanmıştır. Tespit edilen operatör eğitimsizliği ve bakım programının değiştirilmesi sapmalarının iyileştirilebilmesi için yazılım programı kullanılması önerilmektedir. Geliştirilen sistem ile HAZOP yaklaşımının oldukça verimli ve zaman kazandırıcı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sistem ile, HAZOP çalışmaları için talep edilen insan gücünün yaklaşık %50'den fazlası azaltılabilmektedir. Çalışma, karmaşık kimyasal tesislerde HAZOP yaklaşımının güvenilirliğinin artırılabilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyacın olduğu vurgulamaktadır (Chae ve diğerleri, 1992).

Risk değerlendirmesi; tehlikelerin tanımlanması, risklerin kontrol edilerek derecelendirilmesi ve risk kontrollerinin güncellenmesi amacıyla yapılır. Çalışmada tehlikelerin belirlenmesi için, HAZOP ve FMEA gibi kalitatif yöntemler kullanılmış ve bazı durumlarda riskleri kalitatif yöntemlerle derecelendirmenin zorluğundan bahsedilmiştir. Bu zorluğu giderebilmek için sonuç ve olasılık değerlendirmelerinde

kantitatif yöntemlerin kullanılması gerektiği belirtilmiştir (Iqbal, Isaac, Rajaway, Khuthbuddin and Ameen, 2021).

Güvenli olmayan insan eylemlerinin olasılıklarını tahmin etmek için bir uzman çıkarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Uzman yaklaşımı ile insan eylemlerinin olasılığı ölçmek ve belirsizliği ele almak için analistlerin bilgilerinden yararlanılır. Çalışmada ATHEANA analiz yöntemi incelenilmiş olup yöntem, insan eylemlerinin değerlendirildiği olasılıksal risk değerlendirmesi hata oluşturma koşullarına (EPC) ve analistin bilgi ve deneyimine odaklanır. Ayrıca yöntem, analistlere basitçe başarısızlık olasılıkları hakkındaki fikirlerini sormak yerine, başarısızlık olasılığıyla ilgili hangi deneyim ve bilgilere sahip olduklarını sormayı vurgulamaktadır. Yöntemin diğer yöntemlere göre farkı, insan etkilerini daha derinlemesine incelemesidir. Eğer bilgi alışverişi tam ve tarafsızsa ve sonuç gerçekten her uzmanın bilgi durumunu yansıtıyorsa, o zaman fikir birliği sonucu güvenilir ve tartışmasızdır. Ancak, uzmanların fikir birliği olmayabilir o zaman da belirsizlik ortaya çıkar. Çalışmada uzman yaklaşımındaki belirsizliğin giderilmesi için nicel yöntemlerin kullanılması gerekliliğinden bahsedilmiştir (Forester ve diğerleri, 2004).

Nükleer santrallerde, operatörün bir olayı teşhis etmesi ve yürütmesi sonucu kök nedeni insan hatası olan kazalar ortaya çıkmıştır. Bu kazalar insan hata olasılığının tahmin edilmesi ve sayısallaştırılması gerektiğini vurgular. İnsan hata olasılığının tahmin edilmesinde çeşitli yöntemler kullanılırken, kullanılması gereken yöntemin ne olduğu konusunda bir fikir birliği bulunmamaktadır. Gerçek verilerin bulunmadığı ve simülasyon verilerinin kullanıldığı bu çalışmada, insan hata olasılığı tahmin edilmeye çalışılmış ve bu amaçla kantitatif yöntemlerden; THERP, CREAM ve ATHEANA yöntemleri incelenmiştir. THERP yönteminde, hata modellemesinin doğru şekilde yapılma zorluğundan ve yöntemde insan-makine ara yüzü eksikliğinden bahsedilmiştir. CREAM yönteminin yaygın olarak kullanılması gerekliliğinden bahseden literatüre ulaşamamıştır. ATHEANA yönteminin ise uygulanması maliyetli, rehberliği karmaşık, metodoloji olarak hantal bir yöntem olması ve sayısallaştırılması için uzman yargısı gerektirmesi güvenilir bir yöntem olarak tercih edilmeme sebeplerindendir (Prasad ve Gaikwad, 2015).

Yakıt ihmal istasyonları hidrojen depolama sistemlerindeki güvenli havalandırma cihazlarında, bakım prosedürleri esnasında ortaya çıkan operatör hataları ile ilgili çalışmada birinci ve ikinci nesil insan güvenilirliği teknikleri kullanılmıştır. Hatalı eylem

olasılığının belirlenmesinde birinci nesil insan güvenilirliği tekniği olan İnsan Hatası Değerlendirme ve Azaltma Tekniği (HEART) yöntemi kullanılmıştır ve sonuçlar ikinci nesil insan güvenilirliği tekniği olan CREAM tekniği ile kıyaslanmıştır. İnsan hata olasılığı belirlenirken HEART yönteminde, insan merkezli faktörlere vurgu yapan Hata Oluşturma Koşulları (EPC) vurgulanmıştır. CREAM yönteminde ise, insan eylemi performansını iyileştirebilecek ya da azaltabilecek belirli çalışma bağlamları dikkate alınmıştır. İki yöntem kıyaslandığında, incelenen başarısızlıkların meydana gelme olasılıkları birbirine oldukça yakınken, HEART yönteminin insan hatası olasılığını değerlendirmede etkili bir yöntem olduğu tespit edilmiştir (Castiglia ve Giardina, 2013).

Denizcilikte güvenlik kritik bir konudur ve kazaların nedenleri çeşitli faktörlerden oluştuğu için kaza olaylarını tahmin etmek ve önlemek oldukça zordur. Çalışmada, denizcilik alanındaki insan hatalarıyla ilişkili belirli senaryoları değerlendirmek ve insan eylemlerinin yer aldığı bağlamların bir değerlendirmesini yapmak için Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi (CREAM) yöntemi kullanılmıştır. Gemilerdeki makine dairesi yangınlarına acil müdahalede insan güvenilirliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, dış koşullara bağlı olarak değişen insan başarısızlık olasılığı göz önünde bulundurulmuştur. Yöntemde dikkate değer olan şey, sayısallaştırılmış insan hatası olasılığının elde edilebilmesidir. Bu çalışma ile insan hata analizi yapılarak nakliye operasyonlarının emniyeti sağlanabilir ve ayrıca denizde emniyetin artırılmasına önemli katkı sağlayabilir (Ahn ve Kurt, 2020).

Son yıllarda insan hataları, yüksek hızlı demiryolu kazalarının başlıca sebeplerinden biri olarak kabul edilir ve bu durum insan hatası olasılığının sayısallaştırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. İnsan hatası olasılığının değerlendirildiği bu çalışmada, HEART yöntemindeki zayıflıkların giderilmesi için, HEART yöntemi Demiryolu Eylem Güvenilirlik Değerlendirme (RARA) ve Bulanık Ağ Süreci (FANP) ile birlikte kullanılmıştır. Öncelikle, RARA tekniği ile Genel Hata Olasılığı (GEP) ve Hata Oluşturma Koşulları (EPC) belirlenmiştir. Sonra FANP tekniği ile, seçilen EPC'ler arasındaki bağımlılık ve etkileşim problemleri incelenmiş her bir EPC'nin oran etkisi tespit edilmiştir. Sonuç olarak, uzman görüşü ile ortaya çıkan belirsizlik giderilmiştir (Wang, Liu and Qin, 2018).

İnsan hatalarından kaynaklanan demiryolu sistemindeki ölümlü kaza oranlarını azaltabilmek için lokomotif sürüş süresince insan performansları incelenmiştir. Çalışmada,

insan hata olasılığını belirlemek için kullanılan yöntemler arasından HEART yönteminin en iyi yöntem olduğu belirlenmiştir. HEART yöntemi; anlaşılması kolay, dünyada yaygın şekilde kullanılan, hızlı ve güvenilir bir yöntemdir. HEART yönteminde etki değer oranının belirlenebilmesinde somut bir yöntemin bulunmaması ve uzman yargısına dayanması, yöntemin dezavantajı olarak belirtilmiştir. Ayrıca her bir EPC (Hata Oluşturma Koşulları)'ye karşılık gelen Etki Değer Oranı (APOA) belirlenerek subjektif yargıyı kanıtlayan hibrit bir HEART yöntemi önerisinde bulunulmuştur. Son olarak çalışmada, THERP yönteminin rehberlik etmesi konusunda yetersiz kaldığı ve SLIM yönteminin değerlendirilmekte olan görev üzerinde hata olasılığını etkileyen faktörler bakımından analiste hiçbir kısıtlama getirmediği belirtilmiştir (Zhou, Lei and Chen, 2019).

Denizcilik endüstrisinin küresel ekonomide rolüne rağmen, insan hatası hala deniz kazalarının önde gelen nedenlerindendir. Çalışmada, 2010-2017 yılları arasında ABD'de 50 gemiyi içeren 31 çarpışma kazası raporundaki insan faktörlerinin bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmada, HEART yönteminde 4M (insan-makine-medya ve yönetim), hata oluşturma koşulları ile kategorize edilmiştir. Böylece, insan faktörleriyle bağlantılı risk ve emniyetin teknik olarak anlaşılması açısından deniz kazası değerlendirme ve azaltma tekniklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda ABD çarpışma kazaları için ortalama insan hata olasılığı %59 olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışma sonuçları, insan ve yönetim etkileşimlerinin kazalara neden olan en yaygın faktörler olduğunu belirtmektedir (Bowo, Furusho and Mutmainnah, 2020).

Son zamanlarda büyük endüstriyel kazalar, insan ve çevre sağlığını tehdit eden, ortaya çıkardığı maddi hasarlar ve güvenlik riskleri nedeniyle önemli teknolojik felaketler haline gelmiştir. Çalışmada, büyük endüstriyel kazalar için acil durum planı hazırlanması maksadıyla olumsuz hiçbir durumdan etkilenilmeyecek mesafede acil durum noktasının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışanların iş kazalarından minimum etkilendiği acil durum noktası, Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile belirlenmiştir. AHP yönteminin birden fazla kriter arasından seçim kriterinin ağırlığının belirlenmesi için uygun bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca AHP yöntemi farklı görüş ve yargıları aynı anda değerlendirme imkanı sunarken kalitatif ve kantitatif değerlendirme kriterlerini de içerir. Bu nedenle de analiz sırasında objektif değerlendirmeler sunar (Hoşcan ve Çetinyokuş, 2021).

Gemi inşa sektörü hem karmaşık yapısı nedeniyle yüksek alanlarda çalışılması hem de tehlikeli kimyasal madde kullanımını nedeniyle, iş sağlığı ve güvenliği bakımından önemli riskler içermektedir. Ülkemizde de risk değerlendirmeleri genellikle uzman görüşlerine dayanmaktadır. Bu nedenle de aynı konuda farklı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Tersanelerde ihtiyaç duyulan gerçekçi ve tutarlı bir risk analizi yöntemi için, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi dikkate alınarak bir iş sağlığı ve güvenliği risk analiz yöntemi oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) katsayıları, L-tipi (5x5) Risk Değerlendirme Matrisi'ne dahil edilmiş ve tersanelerin risk analizi için var olan her bir tehlikenin riskini ve genel risk seviyesini açığa çıkaracak bir yöntem geliştirilmiştir. Böylece tersaneler arasında kıyaslama ve sıralama yapılabilmesine olanak sağlanmıştır (Akın, Eren, Oral ve Heperkan, 2020).

Denizcilik endüstrisinde güvenliği artırmak maksadıyla kimyasal tanker gemisinde tank temizleme işlemi insan güvenilirlik analizi yapılmıştır. Çalışmada Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), HEART yöntemi ile birlikte incelenmiştir. Hata üreten koşulların hesaplanabilmesi için, etki değer oranının ağırlıklandırılması hedeflenmiştir. Böylece karar verme ve insan faktörleri arasında metodolojik bir gelişme sağlanmıştır. AHP'nin HEART yöntemine entegrasyonu ve güvenilirliğe dayalı süreç iyileştirme vurgulanmıştır. Ayrıca HEART yöntemi genellikle, petrokimya ve nükleer gibi endüstrilerde tercih edilse de EPC değerleri farklı durumlara göre değiştirildiğinde diğer endüstrilere de uyum sağlayacağı belirtilmiştir (Akyüz ve Çelik, 2015).

6. MATERİYAL VE METOT

6.1. Çalışmanın Yapıldığı Tesisin Tanıtımı

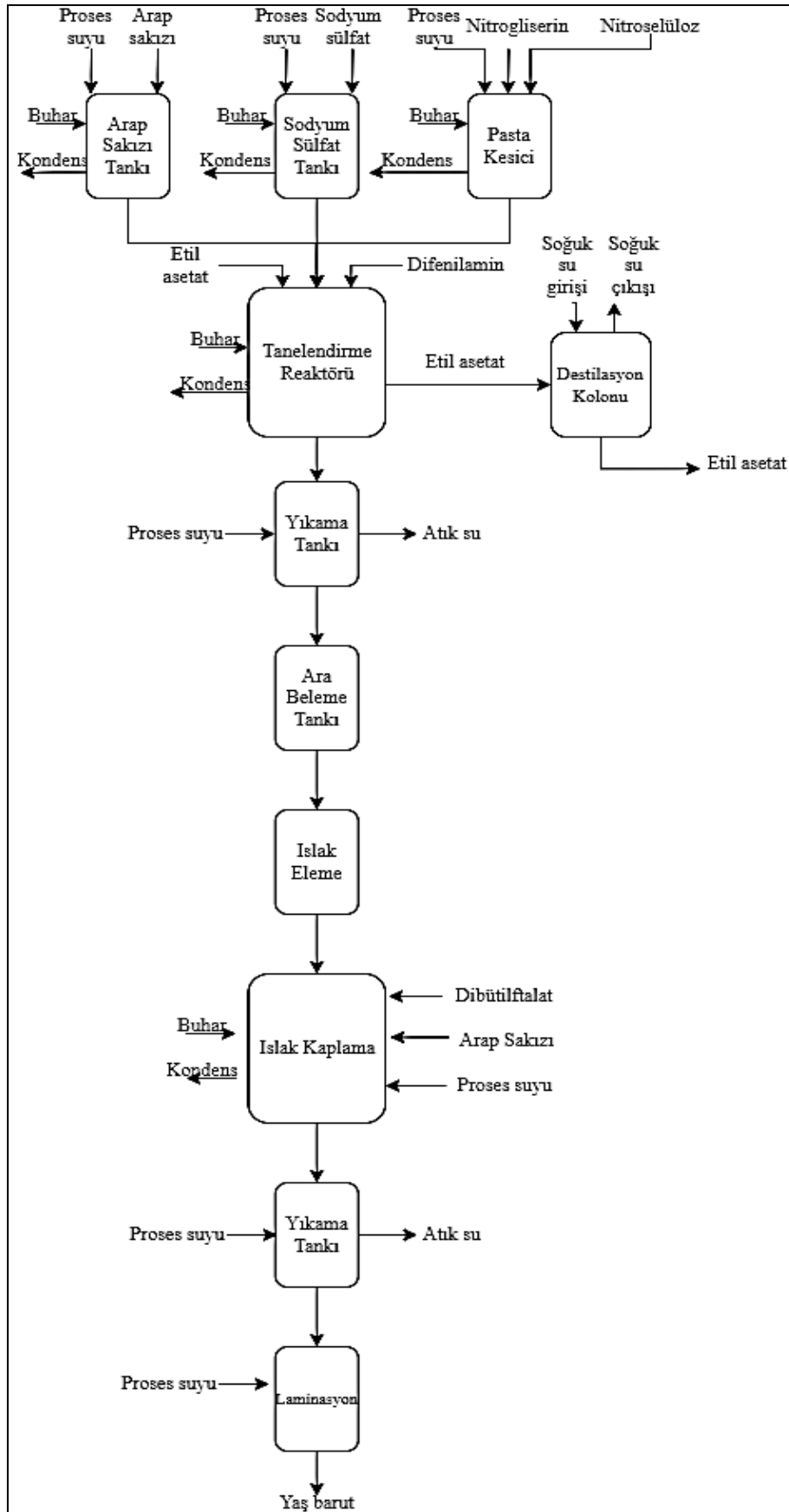
Bu çalışma ülkemizde kurulu, savunma sanayine hizmet veren ve patlayıcı madde üreten bir tesiste gerçekleştirilmiştir. Tesisin adı, yeri, üretim atölyeleri ve üretim yöntemleri gibi bazı bilgilerde güvenlik nedeniyle detaylı bilgi verilmekten kaçınılmıştır.

Tesiste çalışmanın yapıldığı bölüm, küresel formda sevk barutu üretim atölyesidir. Küresel barut üretim atölyesi aşağıda verilen bölümlerden oluşmaktadır.

- Ana bina
- Etil asetat depolama
- Kuru kaplama
- Eleme
- Barut deposu

Bu çalışmada, tesiste kazaya neden olabilecek olası hataları tespit edebilmek amacıyla kalitatif bir yöntem olan Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP) yöntemi tercih edilmiştir. HAZOP analizinin uygulanabilmesi için, üretimin sıklıkla gerçekleştiği ana bina ve tehlikeli bir kimyasal madde olan etil asetatın depolandığı bölüm seçilmiştir.

Şekil 6.1’de HAZOP analizinin gerçekleştirildiği prosese ait akım şeması verilmiştir.



Şekil 6.1. HAZOP analizinin gerçekleştirildiği prosese ait akım şeması

6.2. HAZOP Çalışması

Olası hataların belirlenebilmesi için tesiste gerçekleştirilen HAZOP çalışması süreci aşağıda verilmiştir:

- Tesiste HAZOP çalışmasının uygulanabileceği atölyenin seçimi,
- HAZOP ekibinin oluşturulması,
- HAZOP amacının açıklanması,
- Prosese ait borulama ve enstrümantasyon (P&ID) diyagramlarının incelenmesi,
- İş akış diyagramlarının incelenmesi,
- Proses ve kullanılan ekipmanlara dair detaylı bilgi edinilmesi,
- Proseste kullanılan tehlikeli maddelerin tanımlanması ve değerlendirilmesi,
- Malzeme güvenlik ve bilgi formlarının (MSDS) temin edilmesi,
- Sıcaklık, basınç, akış hızı gibi proses kontrol parametrelerinin incelenmesi,
- Kısım-kısım, hat-hat kılavuz kelimelerin kullanılarak incelenmesi,
- Analiz sonucunun raporlanması.

Tesiste HAZOP çalışmasının uygulanabileceği atölyenin seçimi

Saha çalışmasının ilk aşaması olarak; uygulama yapılacak tesisin yetkili makamları ile görüşülmüş ve gerekli izinler alınmıştır. Daha sonra tesis genel hatlarıyla incelenmiş, proseslere ilişkin bilgiler edinilmiştir. Üretimde sıklıkla kullanılmasından dolayı ve kullanılan tehlikeli kimyasal maddeler nedeniyle küresel barut üretim atölyesinde analiz yapılmasına karar verilmiştir.

HAZOP ekibinin oluşturulması

HAZOP analizi ile tehlikeler belirlenirken kılavuz kelimeler ve proses parametrelerinden yararlanılmıştır. Belirlenen tehlikelerin sebepleri, sonuçları ve alınacak önleyici tedbirleri tespit edebilmek için; o atölyeden sorumlu bir üretim mühendisi, iş güvenliği uzmanı, bakım mühendisi, işçi ve formenden oluşan bir HAZOP ekibi oluşturulmuştur. Analiz sırasında ekipte bulunan kişilerin tecrübesi oldukça önemlidir. Bu nedenle ekip oluşturulurken prosesi bilen ve deneyimli kişilerin seçilmesine dikkat edilmiştir.

HAZOP amacının açıklanması

Analize başlamadan önce, oluşturulan ekibe analizin amacı anlatılmıştır. Üretim yapılan tesiste kaza oluşumunu önlemek, olası tehlikeleri en aza indirmek, kalite kaybını azaltabilmek amacıyla olası tehlikelerin tespit edilmesinin ve alınacak önlemlerin önemi belirtilmiştir. Bu nedenle beyin fırtınası şeklinde toplantılar düzenlenmiştir.

Prosesle ait borulama ve enstrümantasyon (P&ID) diyagramlarının incelenmesi

Ekipmanların, cihazların, borulandırmanın, vanaların, bağlantıların ve bunların düzenlenmesini gösteren borulama ve enstrümantasyon (P&ID) diyagramları temin edilmiştir. Diyagramdaki sıcaklık elemanları, akış ölçerler, basınç göstergeleri, seviye göstergeleri ve proses kontrol cihazları incelenmiştir.

İş akış diyagramlarının incelenmesi

Prosesle yer alan ekipmanların yerleşimi, birbirleriyle bağlantıları, akım hatları, akış hızları ve bileşimlerini ve ekipmanların işletme koşullarını gösteren iş akış diyagramları elde edilmiş ve incelenmiştir. Prosesle ait iş akış diyagramı tesis güvenliği ve gizliliği nedeniyle verilmemiştir.

Prosesle ve kullanılan ekipmanlara dair detaylı bilgi edinilmesi

Prosesle kullanılan ana ekipmanlar, tanelendirme reaktörü, kaplama reaktörü, hammadde tankları ve destilasyon kolonudur. Ekipmanlarda gerçekleştirilen işlemler hakkında ayrıntılı bilgi edinilmiştir.

Prosesle kullanılan tehlikeli maddelerin tanımlanması ve değerlendirilmesi

Prosesle kullanılan tehlikeli maddeler, hammaddeler, ara maddeler, nihai ürünler, yan ürünler ve atıklar belirlenmiştir. Nitrogliserin, nitroselüloz, etil asetat kullanılan tehlikeli kimyasal maddelerdendir.

Malzeme güvenlik ve bilgi formlarının (MSDS) temin edilmesi

Tehlikeli maddelere ait malzeme güvenlik ve bilgi formları (MSDS) incelenerek tehlikeli durumları ve maruz kalındığında alınacak önlemler hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Sıcaklık, basınç, akış hızı gibi proses kontrol parametrelerinin incelenmesi

P&ID diyagramlarından proseste ekipmanların çalışma koşullarını içeren sıcaklık, basınç, akış hızı gibi parametreler incelenmiştir.

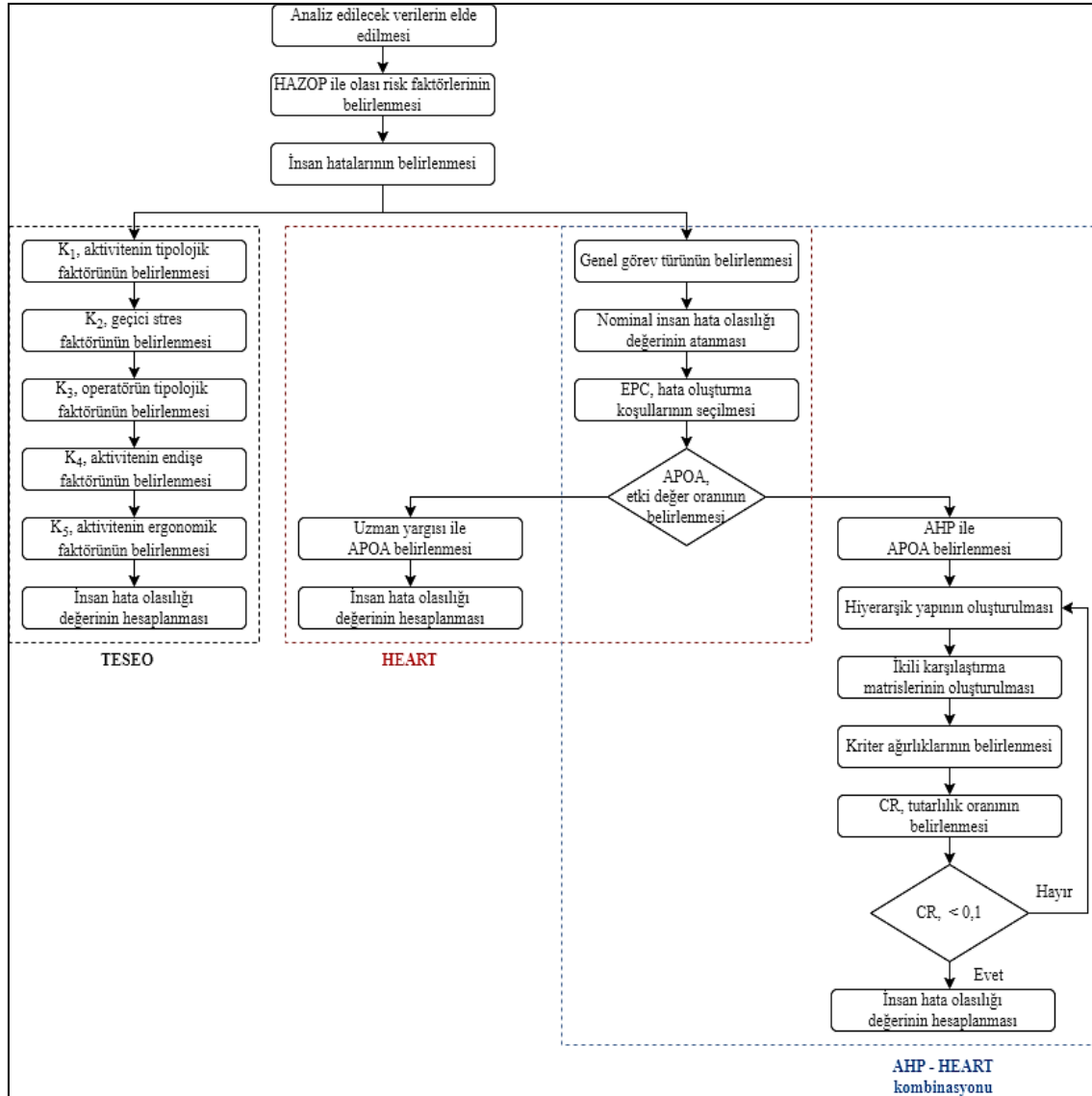
Kısım-kısım, hat-hat kılavuz kelimelerin kullanılarak incelenmesi

Proses hat-hat belirli bölümlere ayrılarak kılavuz kelimeler ve proses parametrelerinin kullanılmasıyla normal operasyon koşullarından sapmalar belirlenmiştir. Tasarımdan sapmalar belirlendikten sonra bu sapmalara neden olan durumlar incelenmiştir. Sapma sebepleri belirlendikten sonra olası sonuçları, tesiste mevcut önlemler ve önerilen tedbirler detaylı şekilde tespit edilmiştir.

Analiz sonucunun raporlanması

Tesiste gerçekleştirilen HAZOP analizi çalışmaları adım adım uygulandıktan sonra yapılan çalışmalar dokümente edilmiş ve elde edilen sonuçlar, sonuçlar ve tartışma bölümünde verilmiştir.

HAZOP analizi sonucu tanımlanan tehlikeler içerisinde insan hatalarından kaynaklanan tehlikeler belirlenmiş ve insan hata olasılığı hesaplanarak tehlikeler sayısallaştırılmıştır. Kantitatif analiz yöntemi olarak Operatör Hatasını Tahmin Etme Ampirik Tekniği (TESEO) ve İnsan Hatası Değerlendirme ve Azaltma Tekniği (HEART) kullanılmış olup iş akış diyagramı Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Analiz yöntemlerine göre iş akış diyagramı

6.3. TESEO Çalışması

Operatör hatalarını tahmin etme tekniği yöntemi ile insan hata olasılığını hesaplamak için örnek olarak;

Hata 9. Operatörün statik elektrik birikimini engellemeye yönelik alınan tedbirlere uymaması

Hatası seçilmiş ve yöntemin adımları sırasıyla verilmiştir.

Tehlike tespiti sırasında, metal aksamaların tamamı eş potansiyele getirilmediğinde ya da çalışanlara statik elektrik riskine yönelik uygun kıyafet verilmediğinde (iş elbisesi, ayakkabısı vb.) statik elektrik birikiminden kaynaklanan yangın ve patlama tehlikesinin ortaya çıkabileceği tespit edilmiştir.

Analiz için; topraklama hatlarının bakımlarının periyodik olarak kontrol edilmediği ve operatörün yapılacak işle ilgili ortalama bir tecrübeye sahip olduğu varsayılmıştır.

Belirlenen hata için Çizelge 4.1’den seçilen K_1 , K_2 , K_3 , K_4 ve K_5 değerleri, Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. TESEO yöntemi için seçilen değerler

		Seçilen Değerler
K_1	Basit, rutin aktivite	0,001
K_2	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5
K_3	Ortalama bilgi düzeyinde ve eğitiliyor	1
K_4	Normal durum	1
K_5	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3

Seçilen değerler Eş. 4.3’te yerine konularak, hata olasılığı hesaplanmıştır.

6.4. HEART Çalışması

Seçilen “Operatörün statik elektrik birikimini engellemeye yönelik alınan tedbirlere uymaması” hatası için HEART analiz süreci aşağıda verilmiştir:

- Genel Görev türünün belirlenmesi,
- Genel görev türüne nominal insan hatası potansiyeli atanması,
- Uygun hata oluşturma koşulları (EPC)’nin belirlenmesi,
- Seçilen tüm EPC’ler için etki değerlendirme oranı (APOA)’nın belirlenmesi,
- İnsan hata olasılığı değerinin hesaplanması.

Genel görev türünün belirlenmesi

Görevin; Çizelge 4.2’de verilen 9 genel görev türü içerisinde “E - Nispeten düşük düzeyde beceri içeren, rutin, çokça uygulanan, hızlı görev” türüne uygun olduğu belirlenmiştir.

Genel görev türüne nominal insan hatası potansiyeli atanması

Belirlenen “E” genel görev türüne ait Çizelge 4.2’de önerilen nominal insan güvenilmezliği değeri atanmıştır.

Uygun hata oluşturma koşulları (EPC)’nin belirlenmesi

Hata Oluşturma Koşulları (EPC), Çizelge 4.3’ten alınarak maksimum nominal tahmin edilen etki faktörü atanmıştır. Hata oluşturma koşulları birden fazla olabilir ve insan hatasını en çok etkilediği düşünülen hatalar seçilmiştir. Statik elektrik birikimini engellemeye yönelik operatör müdahalesi hatası için;

EPC 9 - Bir tekniğin bırakılması ve karşıt bir felsefenin uygulanmasını gerektiren başka bir tekniğe başvurulması

EPC 12 - Algılanan ve gerçek risk seviyeleri arasında uyumsuzluk olması

EPC 28 - Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması

Hata oluşturma koşulları seçilmiştir.

Seçilen tüm EPC’ler için etki değerlendirme oranı (APOA)’nın belirlenmesi

Seçilen her bir EPC değeri için etki değerlendirme oranı iki şekilde tespit edilmiştir. İlk olarak, uzman yargısı ile etki değerlendirme oranı belirlenmiş ardından Analitik Hiyerarşi Prosesi kullanılarak etki değerlendirme oranı hesaplanmıştır.

6.4.1. Uzman yargısı ile APOA tespiti

Analizi yapan kişi öznel yargısını kullanarak, tahmini bir şekilde analiz edilen hata için hata oluşturma koşullarının ne derecede etkili olduğuna karar vermiştir. Bu değer kişiden kişiye değişkenlik gösterebilir.

6.4.2. AHP – HEART ile APOA tespiti

Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi ile Etki Değer Oranı (APOA) belirlenmiş ve HEART analizi tamamlanmıştır.

İlk olarak Çizelge 4.3.’ten seçilmiş olan EPC’ler önem derecelerine göre sıralanmış ve Çizelge 6.2’de verilen hiyerarşik yapı oluşturulmuştur.

Çizelge 6.2. Önem derecesine göre hiyerarşik yapının oluşturulması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi
12. Algılanan ve gerçek risk seviyeleri arasında uyumsuzluk olması	9. Bir tekniğin bırakılması ve karşıt bir felsefenin uygulanmasını gerektiren başka bir tekniğe başvurulması	3
12. Algılanan ve gerçek risk seviyeleri arasında uyumsuzluk olması	28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	7
9. Bir tekniğin bırakılması ve karşıt bir felsefenin uygulanmasını gerektiren başka bir tekniğe başvurulması	28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	5

Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra Eş. 4.4.’e göre ikili karşılaştırmalar yapılarak karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. Karşılaştırmalar yapılırken Çizelge 4.5’te verilen Saaty’nin ikili karşılaştırma önem derecelerinden faydalanılmıştır. Oluşturulan karşılaştırma matrisi Çizelge 6.3.’te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Seçilen EPC'ler için oluşturulan karşılaştırma matrisleri

	12. Algılanan ve gerçek risk seviyeleri arasında uyumsuzluk olması	9. Bir tekniğin bırakılması ve karşıt bir felsefenin uygulanmasını gerektiren başka bir tekniğe başvurulması	28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması
12. Algılanan ve gerçek risk seviyeleri arasında uyumsuzluk olması	1	3	7
9. Bir tekniğin bırakılması ve karşıt bir felsefenin uygulanmasını gerektiren başka bir tekniğe başvurulması	1/3	1	5
28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	1/7	1/5	1

Karşılaştırma matrisinin her bir sütun değeri, o değerin yer aldığı sütun toplamına bölünmüştür ve matris normleştirilmiştir. Daha sonra her bir satırda yer alan değerlerin aritmetik ortalaması alınmış ve ağırlık matrisi elde edilmiştir.

AHP yöntemi ile yapılan sonuçlarının ne kadar gerçekçi olduğunu kontrol etmek amacıyla tutarlılık oranı belirlenmiştir. Tutarlılık oranını belirleyebilmek için, $\lambda_{\max}$ katsayısından yararlanılmıştır. $\lambda_{\max}$ katsayısı ile tutarlılık göstergesi belirlenmiş ve Çizelge 4.6'dan alınan Random indeks değerleri ile tutarlılık oranı hesabı yapılmıştır.

Tutarlılık oranı hesabında; tutarlılık oranı değerinin 0,10 değerinden büyük veya küçük olma durumu incelenmiştir. Böylece AHP yöntemi ile karar verici tarafından gerçekleştirilen karşılaştırmaların ne kadar tutarlı olduğu incelenmiştir.

Benzer hesaplama yöntemleri diğer hatalar için de yapılmış ve sonuçlar; Ek-1, Ek-2 ve Ek-3'te verilmiştir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kimyasal madde üreten bir tesiste kazaya sebep olabilecek olası hataları belirleyebilmek için Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP) metodu kullanılmıştır. Belirlenen hatalar ayrıntılı şekilde aşağıda verilmiş olup bağlantı noktaları ve sürtünmeye maruz yerlerde yapılan HAZOP analizi Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Bağlantı noktaları için uygulanan HAZOP analizi

TEHLİKE VE İŞLETİLEBİLİRLİK ANALİZİ							
Sistem proses	Küresel Barut Üretimi-Ana Bina				HAZOP No		
Bileşen	Bağlantı noktaları, sürtünmeye maruz yerler				Sayfa No		
Malzeme Kaynağı	Ham kitle ve nitroselüloz				HAZOP Tarihi		
Açıklamalar					HAZOP Ekibi		
Sıra No	Kılavuz Kelime	Proses Parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Mevcut Önlemler	Önerilen Tedbirler
1	...den başka	Ham kitle ve nitroselüloz beslemesi	Ham kitle ve nitroselüloz beslemesi sırasında mil yatakları, kazan kapaklarının menteşeleri, v.b gibi sürtünmeye maruz yerler ile elektrik motorları üzerlerinde tehlikeli miktarlarda hamkitle ve nitroselüloz birikmesi	Bağlantı noktaları, hammadde yükleme ve boşaltma yerleri, pompalardan kaçak, Eğitim ve denetim eksikliği, iş yoğunluğu ve iş stresi	Yangın, patlama		Mil yatakları, kazan kapaklarının menteşeleri transpalet gibi sürtünmeye maruz yerler ile elektrik motorları üzerlerinde hamkitle ve nitroselülozun birikerek kurumasına müsaade edilmemelidir. Zemin, elektrik motorları ve sıcak yüzeyler düzenli aralıklarla temizlenmeli ve her iş başlangıcında kontrol edilmelidir.
2	Fazla	Pompa sıcaklığı	Ürün transfer pompalarında sıcaklık artışı	Transfer boru hatlarında tıkanıklık, rulman arızası, sıcaklık alarmına yönelik operatör müdahale hatası	Yangın, patlama	Pompalarda sıcaklık sensörü ve alarmı	Pompa sıcaklık alarmına ait bileşenler periyodik bakım programına alınmalıdır. Kontrol sistemi operatörlerine ilave eğitim verilmelidir. Alarm yönetim sistemi kurulmalıdır.

Tanelendirme reaktörü için uygulanan HAZOP analizi Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Tanelendirme reaktörü için uygulanan HAZOP analizi

TEHLİKE VE İŞLETİLEBİLİRLİK ANALİZİ							
Sistem proses	Küresel Barut Üretimi-Ana Bina			HAZOP No			
Bileşen	Tanelendirme Reaktörü			Sayfa No			
Malzeme Kaynağı	Aktif madde, etil asetat, arap sakızı ve sodyum sülfat			HAZOP Tarihi			
Açıklamalar				HAZOP Ekibi			
Sıra No	Kılavuz Kelime	Proses Parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Mevcut Önlemler	Önerilen Tedbirler
1	den başka	Aktif madde akışı	Aktif maddelerin reaktör girişinden başka yere akışı	Operatörün bağlantı yollarını hatalı ayarlaması nedeniyle yanlış reaktöre aktif madde alınması.	Yanlış reaktöre aktarılan aktif maddelerin kontrolsüz bırakılması nedeniyle yangın veya patlama olması.	Saha formeninin aktif madde transfer işlemine nezaret etmesi	Aktif madde akışının hatalı tanka beslenmesini önleyecek interlock sistemi kurulması. Operatörlere ilave eğitim verilmesi. Zemin, elektrik motorları ve sıcak yüzeyler düzenli aralıklarla temizlenmeli ve her iş başlangıcında kontrol edilmelidir. Sürtünmeye maruz yerlerde hammaddenin birikerek kurumasına müsaade edilmemelidir
				Bağlantı noktaları, hammadde yükleme ve boşaltma yerleri ve pompalardan kaçak olması	Sürtünmeye maruz yerlerde tehlikeli hammadde birikmesi sonucu yangın veya patlama olması		
2	Fazla	Arap sakızı akışı	Arap sakızının reaktöre fazla beslenmesi	Operatör hatası	Gereksiz hammadde kullanımından kaynaklanan finansal kayıp	Saha operatörlerinin arap sakızı transfer işlemine nezaret etmesi	Operatörlere ilave eğitim verilmesi.
3	Az	Arap sakızı akışı	Arap sakızının reaktöre az beslenmesi	Operatör hatası	Tanelendirme olmaması kaynaklı kalite kaybı	Saha operatörlerinin arap sakızı transfer işlemine nezaret etmesi	Operatörlere ilave eğitim verilmesi.

Çizelge 7.2. (devam) Tanelendirme reaktörü için uygulanan HAZOP analizi

TEHLİKE VE İŞLETİLEBİLİRLİK ANALİZİ							
Sistem proses	Küresel Barut Üretimi-Ana Bina				HAZOP No		
Bileşen	Tanelendirme Reaktörü				Sayfa No		
Malzeme Kaynağı	Aktif madde, etil asetat, arap sakızı ve sodyum sülfat				HAZOP Tarihi		
Açıklamalar					HAZOP Ekibi		
Sıra No	Kılavuz Kelime	Proses Parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Mevcut Önlemler	Önerilen Tedbirler
4	Fazla	Sodyum sülfat akışı	Sodyum sülfatın reaktöre fazla beslenmesi	Operatör hatası	Gereksiz hammadde kullanımından kaynaklanan finansal kayıp	Saha operatörlerinin sodyum sülfat transfer işlemine nezaret etmesi	Operatörlere ilave eğitim verilmesi.
5	Az	Sodyum sülfat akışı	Sodyum sülfatın reaktöre az beslenmesi	Operatör hatası	Ürün yoğunluğunun azalması kaynaklı kalite sorunu.	Saha operatörlerinin sodyum sülfat transfer işlemine nezaret etmesi	Operatörlere ilave eğitim verilmesi.
6	Fazla	Etil asetat akışı	Etil asetatın reaktöre fazla miktarda beslenmesi	Etil asetat akış ölçer arızası. Reaktör seviye sensörü arızası.	Reaktörün taşması nedeniyle yangın veya patlama. Fazla akıştan dolayı statik elektrik artışına bağlı olarak yangın veya patlama olması	Etil asetat akış ölçeri ve reaktör seviye sensörü	Etil asetat akış ölçeri ve reaktör seviye sensörü periyodik bakım programına alınmalıdır. Etil asetat akış hızının 7 m/s yi geçmemesi sağlanmalıdır.
7	Az	Etil asetat akışı	Etil asetatın reaktöre az miktarda beslenmesi	Etil asetat akış ölçer arızası.	Hamurlaşma olmaz. Kalite kaybı yaşanır.	Etil asetat akış ölçeri	Etil asetat akış ölçeri periyodik bakım programına alınmalıdır.
8	den başka	Etil asetat akışı	Etil asetatın besleme yapılacak reaktör yerine başka bir reaktöre beslenmesi. Etil asetatın vana, flanş veya benzeri bağlantı yerlerinden sızıntı yapması	Operatörün hatalı reaktöre besleme yapması. Seviye sensörü arızası. Korozyon nedeniyle kaçak olması	Hatalı reaktöre transfer nedeniyle taşma, yangın veya patlama. Etil Asetat sızıntısı nedeniyle yangın veya patlama	Saha formeninin aktif madde transfer işlemine nezaret etmesi Reaktör seviye sensörü. Etil asetat detektörü.	Operatörlere ilave eğitim verilmesi. Etil asetatın hatalı reaktöre beslenmesini önleyecek interlock sistemi kurulması.

Çizelge 7.2. (devam) Tanelendirme reaktörü için uygulanan HAZOP analizi

TEHLİKE VE İŞLETİLEBİLİRLİK ANALİZİ							
Sistem proses		Küresel Barut Üretimi-Ana Bina			HAZOP No		
Bileşen		Tanelendirme Reaktörü			Sayfa No		
Malzeme Kaynağı		Aktif madde, etil asetat, arap sakızı ve sodyum sülfat			HAZOP Tarihi		
Açıklamalar					HAZOP Ekibi		
Sıra No	Kılavuz Kelime	Proses Parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Mevcut Önlemler	Önerilen Tedbirler
9	Fazla	Reaktör sıcaklığı	Tanelendirme reaktöründe sıcaklığın yükselmesi	Kızgın buhar besleme sistemi arızası, sıcaklık sensör arızası, PLC arızası, yüksek sıcaklık alarmına yönelik operatör müdahale hatası	Reaktörde basınç artışına bağlı olarak bütünlük kaybı, patlama, yangın	Yüksek sıcaklık alarmı, saha sıcaklık göstergesi, saha operatörleri	Sıcaklık kontrol döngüsüne ait bileşenler periyodik bakım programına alınmalıdır. Kontrol sistemi operatörlerine ilave eğitim verilmelidir. Alarm yönetim sistemi kurulmalıdır.
10	Fazla	Reaktör sıcaklığı	Destilasyon aşamasında sıcaklığın hızlı arttırılması	Kızgın buhar besleme sistemi arızası, sıcaklık sensör arızası, PLC arızası, reaktördeki sıcaklık artış gradiyentinin operatör tarafından yanlış girilmesi	Reaktörde yüksek sıcaklık ve basınç oluşumu. Reaktörde köpük oluşumuna ve operatörün zamanında müdahale edememesine bağlı olarak taşma yangın, patlama	Destilasyon yüksek sıcaklık alarmı, reaktörde köpük alarmı, köpük kesici besleme sistemi	Destilasyon aşamasındaki sıcaklık artış gradiyentinin önemine ilişkin ilave eğitim verilmesi. Köpük kesici beslemesinin otomatik yapılması
11	Az	Reaktör sıcaklığı	Tanelendirme reaktöründe sıcaklığın düşmesi	Soğutma suyu besleme sistemi arızası	Tanelendirme olmaması kaynaklı kalite kaybı	Düşük sıcaklık alarmı, saha sıcaklık göstergesi, saha operatörleri	

Çizelge 7.2. (devam) Tanelendirme reaktörü için uygulanan HAZOP analizi

TEHLİKE VE İŞLETİLEBİLİRLİK ANALİZİ							
Sistem proses		Küresel Barut Üretimi-Ana Bina			HAZOP No		
Bileşen		Tanelendirme Reaktörü			Sayfa No		
Malzeme Kaynağı		Aktif madde, etil asetat, arap sakızı ve sodyum sülfat			HAZOP Tarihi		
Açıklamalar					HAZOP Ekibi		
Sıra No	Kılavuz Kelime	Proses Parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Mevcut Önlemler	Önerilen Tedbirler
12	Fazla	Reaktör basıncı	Tanelendirme reaktöründe basıncın yükselmesi	Kızgın buhar besleme sistemi arızası, sıcaklık sensör arızası, PLC arızası, yüksek sıcaklık alarmına yönelik operatör müdahale hatası	Reaktörde basınç artışına bağlı olarak bütünlük kaybı, patlama, yangın	PRV	Yüksek basınç alarm sistemi kurulması. PRV periyodik bakım programına alınmalıdır. PRV çıkışı güvenli bir alana yönlendirilme lidir
13	Yok	Boğaz keçesi soğutma suyu	Tanelendirme reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesi soğutma suyunun kesilmesi	Azot tanklarının basıncının düşmesi, soğutma hattı sisteminde tıkanıklık, soğutma sıvısı eksikliği	Tanelendirm e reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesindeki sıcaklık artışı nedeniyle yangın, patlama	Boğaz keçesi soğutma sistemi.	Azot tanklarına düşük basınç alarm sistemi kurulması, boğaz keçesine yüksek sıcaklık alarm sistemi kurulması. Operatörlerin azot tank basıncını düzenli takip etmesine ilişkin ilave eğitim verilmesi
14	...den farklı	Karıştırma hızı	Karıştırma hızı normalden farklı		Ürüne ve hammadde karakteristiği ne göre değişir.		

Çizelge 7.2. (devam) Tanelendirme reaktörü için uygulanan HAZOP analizi

TEHLİKE VE İŞLETİLEBİLİRLİK ANALİZİ							
Sistem proses	Küresel Barut Üretimi-Ana Bina				HAZOP No		
Bileşen	Tanelendirme Reaktörü				Sayfa No		
Malzeme Kaynağı	Aktif madde, etil asetat, arap sakızı ve sodyum sülfat				HAZOP Tarihi		
Açıklamalar					HAZOP Ekibi		
Sıra No	Kılavuz Kelime	Proses Parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Mevcut Önlemler	Önerilen Tedbirler
15	Yok	Karıştırma	Karıştırıcının çalışmaması, karıştırıcı devir göstergesi arızası	Karıştırıcı arızası veya operatörün karıştırıcıyı başlatmaması	Destilasyon aşamasına kadar olan süreçte kalite kaybı yaşanır. Reaktörde köpük oluşumuna ve operatörün zamanında müdahale edememesine bağlı olarak taşma yangın, patlama	Karıştırıcı devir sayısı göstergesi	Karıştırıcı çalıştırılmadan reaktörün destilasyona alınmasının engellenmesine yönelik interlock sistemi kurulması
16	Yok	Soğutma suyu akışı	Soğutma suyu akışının kesilmesi	Soğutma sistemi arızası(pompa arızası, elektrik sistemi arızası vs)	Destilasyon kolonunda basınç artışına bağlı olarak bütünlük kaybı, patlama, yangın	Yedek soğutma sistemi (şebeke suyu) bağlantısı	Soğutma sistemi ve yedek soğutma sisteminin emreamade tutulmasını teminen sürekli bakım yapılması kontrol edilmesi.

Destilasyon kolonunda uygulanan HAZOP analizi Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Destilasyon kolonu için uygulanan HAZOP analizi

TEHLİKE VE İŞLETİLEBİLİRLİK ANALİZİ							
Sistem proses		Küresel Barut Üretimi-Ana Bina			HAZOP No		
Bileşen		Destilasyon Kolonu			Sayfa No		
Malzeme Kaynağı					HAZOP Tarihi		
Açıklamalar					HAZOP Ekibi		
Sıra No	Kılavuz Kelime	Proses Parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Mevcut Önlemler	Önerilen Tedbirler
1	Fazla	Destilasyon kolon sıcaklığı	Destilasyon kolonundaki sıcaklığın yükselmesi	Reaktördeki sıcaklık artış gradiyentinin operatör tarafından yanlış girilmesi, soğutma suyu arızası, sıcaklık sensör arızası, PLC arızası, yüksek sıcaklık alarmına yönelik operatör müdahale hatası	Destilasyon kolonunda basınç artışına bağlı olarak bütünlük kaybı, patlama, yangın	Destilasyon aşamasındaki sıcaklık artış gradiyentinin destilasyonda aşırı sıcaklık ve basınç oluşmayacak şekilde ayarlanması, Destilasyon yüksek sıcaklık alarmı	Destilasyon aşamasındaki sıcaklık artış gradiyentinin önemine ilişkin ilave eğitim verilmesi. Soğutma sistemi ve yedek soğutma sisteminin emreamade tutulmasını teminen sürekli bakım yapılması kontrol edilmesi. Sıcaklık kontrol döngüsüne ait bileşenler periyodik bakım programına alınmalıdır. Kontrol sistemi operatörlerine ilave eğitim verilmelidir. Alarm yönetim sistemi kurulmalıdır.
2	Fazla	Destilasyon kolon basıncı	Destilasyon kolonunda basıncın yükselmesi	Reaktördeki sıcaklık artış gradiyentinin operatör tarafından yanlış girilmesi, soğutma suyu arızası, sıcaklık sensör arızası, PLC arızası, yüksek sıcaklık alarmına yönelik operatör müdahale hatası	Destilasyon kolonunda basınç artışına bağlı olarak bütünlük kaybı, patlama, yangın	Destilasyon aşamasındaki sıcaklık artış gradiyentinin destilasyonda aşırı sıcaklık ve basınç oluşmayacak şekilde ayarlanması, Destilasyon yüksek sıcaklık alarmı	Destilasyon aşamasındaki sıcaklık artış gradiyentinin önemine ilişkin ilave eğitim verilmesi. Soğutma sistemi ve yedek soğutma sisteminin emreamade tutulmasını teminen sürekli bakım yapılması kontrol edilmesi. Sıcaklık kontrol döngüsüne ait bileşenler periyodik bakım programına alınmalıdır. Kontrol sistemi operatörlerine ilave eğitim verilmelidir. Alarm yönetim sistemi kurulmalıdır.

Etil asetat dekantörü için uygulanan HAZOP analizi Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. Dekantör için uygulanan HAZOP analizi

TEHLİKE VE İŞLETİLEBİLİRLİK ANALİZİ							
Sistem proses	Küresel Barut Üretimi-Ana Bina				HAZOP No		
Bileşen	Dekantör				Sayfa No		
Malzeme Kaynağı	Etil asetat				HAZOP Tarihi		
Açıklamalar					HAZOP Ekibi		
Sıra No	Kılavuz Kelime	Proses Parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Mevcut Önlemler	Önerilen Tedbirler
1	Erken	Dekantasyon	Dekantörden etil asetatın kanala ve atık su hattına kaçması	Dekantörde yeterince su-etil asetat faz ayrımı yapılmasını beklemeksizin operatörün kanala boşaltma yapılması	Kanalda veya atık su hattında etil asetat birikimine bağlı olarak yangın, patlama		Etil asetat-su faz ayrımının net süresinin belirlenerek buna ilişkin prosedür oluşturulması. Dekantasyon süreci boyunca çatı havalandırma sisteminin aktif olmasının sağlanması. Bu süre boyunca sıcak iş iznini gerektirecek bir işlem yapılmaması
2	Geç	Dekantasyon	Dekantörden etil asetatın kanala ve atık su hattına kaçması	Dekantör boşaltma vanasının gereğinden fazla açık bırakılması	Kanalda veya atık su hattında etil asetat birikimine bağlı olarak yangın, patlama	Patlayıcı ortam oluşumunu engellemeye yönelik çatı havalandırma sistemi	Etil asetat-su faz ayrımı gerçekleşikten sonra dekantasyonun ne kadar süre ile yapılacağına ilişkin prosedür oluşturulması. Dekantasyon süreci boyunca çatı havalandırma sisteminin aktif olmasının sağlanması. Bu süre boyunca sıcak iş iznini gerektirecek bir işlem yapılmaması

Elektrik kesintisi ve statik elektrik birikiminden kaynaklanacak tehlikeler için uygulanan HAZOP analizi Çizelge 7.5’te verilmiştir.

Çizelge 7.5. Elektrik kesintisi ve statik elektrik birikimi için uygulanan HAZOP analizi

TEHLİKE VE İŞLETİLEBİLİRLİK ANALİZİ							
Sistem proses		Küresel Barut Üretimi-Ana Bina			HAZOP No		
Bileşen					Sayfa No		
Malzeme Kaynağı					HAZOP Tarihi		
Açıklamalar					HAZOP Ekibi		
Sıra No	Kılavuz Kelime	Proses Parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Mevcut Önlemler	Önerilen Tedbirler
1	Yok	Elektrik	Elektrik kesilmesi	Elektrik dağıtım şebekesinde arıza olması	Proses kontrol sistemi çalışmaz. Kontrolsüz gelişmeler dolayısıyla yangın ve patlama olabilir.	UPS (Kesintisiz güç kaynağı) ve jeneratör	UPS ve jeneratör periyodik bakım programına alınmalıdır.
2	Fazla	Statik elektrik	Statik elektrik birikimi	Tüm metal aksamın eş potansiyele getirilmemesi, statik elektrik riskine yönelik çalışanlara uygun kıyafet (iş elbisesi, ayakkabısı) verilmemesi	Yangın, patlama		Tüm metal aksam eş potansiyele getirilmelidir. Topraklama hatları periyodik olarak kontrol edilmelidir. Statik elektrik riskine yönelik çalışanlara uygun kıyafet (iş elbisesi, ayakkabısı) verilmelidir.

HAZOP analizi sonucu küresel barut üretim atölyesi için toplamda 24 adet hata tespit edilmiştir. Bu hatalar içerisinde insandan kaynaklı meydana gelecek 10 adet hata belirlenmiş ve insan hata olasılığının hesaplanabilmesi için bu hatalara TESEO ve HEART analizleri uygulanmıştır. Belirlenen insan hataları Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Belirlenen insan hataları

No	İnsan Hataları
1	Aktif maddenin operatör tarafından yanlış reaktöre transfer edilmesi
2	Etil asetatın operatör tarafından besleme yapılacak reaktör yerine başka bir reaktöre beslenmesi
3	Tanelendirme reaktöründe sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası

Çizelge 7.6. (devam) Belirlenen insan hataları

No	İnsan Hataları
4	Destilasyon aşamasında reaktör sıcaklık artış hızının operatör tarafından kontrol sistemine hatalı bir şekilde girilmesi
5	Destilasyon kolonundaki sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası
6	Karıştırıcının operatör tarafından çalıştırılmaması hatası
7	Dekantörde yeterince su-etil asetat faz ayrımı yapılmasını beklemeksizin operatörün kanala boşaltma yapılması
8	Ürün transfer pompalarında sıcaklık artışına karşı operatör müdahalesi hatası
9	Operatörün statik elektrik birikimini engellemeye yönelik alınan tedbirlere uymaması
10	Operatörün azot tank basıncını düzenli takip etmemesinden dolayı tanelendirme reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesi soğutma suyunun kesilmesi

Belirlenen insan hatalarının meydana gelme sebepleri ve yapılan bazı varsayımlar aşağıda verilmiştir.

Hata 1. Aktif maddenin operatör tarafından yanlış reaktöre transfer edilmesi

Operatör bağlantı yollarını hatalı ayarladığında, aktif madde kontrolsüz olarak yanlış reaktörlere aktarılır. Bunun sonucunda yangın veya patlama olabilir.

Varsayımlar;

- Aktif madde akışının hatalı tanka beslenmesini önleyecek interlock sistemi bulunmamaktadır.
- Operatör yaptığı işle ilgili ortalama bir tecrübeye sahiptir.
- Operatör tesis içerisinde ayrı bir kontrol odasındadır. Ancak operatörün bulunduğu kontrol odasından tesis içerisine dışarıdan geçiş yapılmaktadır.

Hata 2. Etil asetatın operatör tarafından besleme yapılacak reaktör yerine başka bir reaktöre beslenmesi

Operatörün besleme yapılacak reaktör yerine başka bir reaktöre etil asetat beslemesi yapması. Hatalı reaktöre transfer nedeniyle taşma, yangın veya patlama olabilir.

Varsayımlar;

- Etil asetatın hatalı reaktöre beslenmesini önleyecek interlock sistemi bulunmamaktadır.

- Operatör yaptığı işle ilgili ortalama bir tecrübeye sahiptir.
- Operatör tesis içerisinde ayrı bir kontrol odasındadır. Ancak operatörün bulunduğu kontrol odasından tesis içerisine dışarıdan geçiş yapılmaktadır.

Hata 3. Tanelendirme reaktöründe sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası

Kızgın buhar besleme sisteminde arıza olduğunda, sıcaklık sensörlerinde arıza olduğunda tanelendirme reaktöründe sıcaklık yükselir. Reaktörde sıcaklık yükselmesi sonucu meydana gelen basınç artışı, bütünlük kaybı, patlama ve yangına neden olabilir.

Varsayımlar;

- Yüksek sıcaklık alarmı ve saha sıcaklık göstergelerinde bakımdan kaynaklı problemlerin olduğu ve saha operatörlerinin duruma müdahale edemediği varsayılmaktadır.
- Operatör yaptığı işle ilgili özenle seçilmiş, uzman ve iyi eğitilidir.
- Operatör tesis içerisinde ayrı bir kontrol odasındadır. Ancak operatörün bulunduğu kontrol odasından tesis içerisine dışarıdan geçiş yapılmaktadır.

Hata 4. Destilasyon aşamasında reaktör sıcaklık artış hızının operatör tarafından kontrol sistemine hatalı bir şekilde girilmesi

Reaktördeki sıcaklık artış gradiyenti operatör tarafından yanlış girildiğinde; reaktörde yüksek sıcaklık ve basınç oluşur. Operatörün zamanında müdahale edememesine bağlı olarak da taşma yangın, patlama meydana gelebilir.

Varsayımlar;

- Operatör yaptığı işle ilgili ortalama bir tecrübeye sahiptir.
- Operatör tesis içerisinde ayrı bir kontrol odasındadır. Ancak operatörün bulunduğu kontrol odasından tesis içerisine dışarıdan geçiş yapılmaktadır.

Hata 5. Destilasyon kolonundaki sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası

Reaktördeki sıcaklık artış gradiyenti operatör tarafından yanlış girildiğinde, soğutma suyu arızası, sıcaklık sensörü arızası, PLC arızası ya da yüksek sıcaklık alarmına yönelik operatör müdahalesi hatası olduğunda; destilasyon kolonunda sıcaklık yükselir. Buna bağlı olarak da bütünlük kaybı, patlama ve yangın meydana gelebilir.

Varsayımlar;

- Operatör yaptığı işle ilgili özenle seçilmiş, uzman ve iyi eğitilidir.
- Operatör tesis içerisinde ayrı bir kontrol odasındadır. Ancak operatörün bulunduğu kontrol odasından tesis içerisine dışarıdan geçiş yapılmaktadır.

Hata 6. Karıştırıcının operatör tarafından çalıştırılmaması hatası

Karıştırıcıda arıza olup çalışmadığında ya da operatör karıştırıcıyı çalıştırmayı başlatmadığında; reaktörde köpük oluşur ve operatör zamanında müdahale edemediğinde taşmaya bağlı olarak yangın ve patlama meydana gelebilir. Ayrıca ürün reaktörden destilasyona alınana kadar kalite kaybına uğrar.

Varsayımlar;

- Operatör yaptığı işle ilgili ortalama bir tecrübeye sahiptir.
- Operatör tesis içerisinde ayrı bir kontrol odasındadır. Ancak operatörün bulunduğu kontrol odasından tesis içerisine dışarıdan geçiş yapılmaktadır.

Hata 7. Dekantörde yeterince su-etil asetat faz ayrımı yapılmasını beklemeksizin operatörün kanala boşaltma yapılması

Operatör, dekantörde yeterince etil asetat – su faz ayrımı yapılmasını beklemeksizin kanala boşaltma yapmış olabilir. Böylece kanalda veya atık su hattında etil asetat birikimine bağlı olarak yangın, patlama meydana gelebilir.

Varsayımlar;

- Prosedürde etil asetat – su faz ayrımı süresinin net bir şekilde belirtilmemiştir.
- Operatör yaptığı işle ilgili ortalama bir tecrübeye sahiptir.
- Operatör tesis içerisinde ayrı bir kontrol odasındadır. Ancak operatörün bulunduğu kontrol odasından tesis içerisine dışarıdan geçiş yapılmaktadır.

Hata 8. Ürün transfer pompalarında sıcaklık artışına karşı operatör müdahalesi hatası

Transfer boru hatlarında tıkanıklık, rulman arızası olabilir. Pompalarda sıcaklık artışı olabilir. Operatör sıcaklık alarmını duymamış olabilir ve müdahale etmekte yetersiz kalabilir. Böyle bir durum yangın ve patlamaya sebep olabilir.

Varsayımlar;

- Operatör yaptığı işle ilgili özenle seçilmiş, uzman ve iyi eğitilidir.
- Operatör tesis içerisinde ayrı bir kontrol odasındadır. Ancak operatörün bulunduğu kontrol odasından tesis içerisine dışarıdan geçiş yapılmaktadır.

Hata 9. Operatörün statik elektrik birikimini engellemeye yönelik alınan tedbirlere uymaması

Metal aksamaların tamamı eş potansiyele getirilmediğinde ya da çalışanlara statik elektrik riskine yönelik uygun kıyafet verilmediğinde (iş elbisesi, ayakkabısı vb.) statik elektrik birikiminden kaynaklanan yangın ve patlama olabilir.

Varsayımlar;

- Topraklama hatlarının bakımları periyodik olarak kontrol edilmemektedir.
- Yapılacak işlem basittir.
- Operatör yaptığı işle ilgili ortalama bir tecrübeye sahiptir.

Hata 10. Operatörün azot tank basıncını düzenli takip etmemesinden dolayı tanelendirme reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesi soğutma suyunun kesilmesi

Operatörün azot tank basıncını düzenli takip etmediğinin varsayıldığı durumlarda, azot tanklarının basıncı düşebilir. Soğutma hattı sisteminde tıkanıklık olduğunda soğutma sıvısı eksikliği meydana gelebilir ve böylece tanelendirme reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesinde sıcaklık artışı meydana gelir. Bunun sonucunda yangın ve patlama olabilir.

Varsayımlar;

- Azot tanklarında düşük basınç alarm sistemi bulunmamaktadır.
- Boğaz keçesinde yüksek sıcaklık alarm sistemi bulunmamaktadır.
- Operatör yaptığı işle ilgili ortalama bir tecrübeye sahiptir.
- Operatör tesis içerisinde ayrı bir kontrol odasıdır. Ancak operatörün bulunduğu kontrol odasından tesis içerisine dışarıdan geçiş yapılmaktadır.

Belirlenen her hata için gerekli varsayımlar yapılmış ve kantitatif yöntemlerden sırasıyla TESEO ve HEART analizleri hatalara uygulanmıştır. HEART yöntemi içerisindeki uzman yargısından kaynaklanan belirsizliği giderebilmek amacıyla AHP metodu kullanılmıştır. Her hata için TESEO yönteminde kullanılan faktörler, HEART yönteminde tercih edilen EPC'ler ve analiz sonuçları Çizelge 7.7'de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Kantitatif yöntemlere göre hesaplanan hata olasılığı sonuçları

Hata Sırası	İnsan Hatası	TESEO						HEART		
		Seçilen					HEP Değeri	Seçilen	HEP Değeri	
		K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅		EPC	Uzman Yargısı	HEART - AHP
1	Aktif maddenin operatör tarafından yanlış reaktöre transfer edilmesi	0,01	0,5	1	1	3	0,02	EPC 13, EPC 15, EPC 25	0,10	0,10
2	Etil asetatın operatör tarafından besleme yapılacak reaktör yerine başka bir reaktöre beslenmesi	0,01	0,5	1	1	3	0,02	EPC 13, EPC 17, EPC 26	0,11	0,12
3	Tanelendirme reaktöründe sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası	0,01	0,5	0,5	2	3	0,02	EPC 13, EPC 34, EPC 39	0,01	0,01
4	Destilasyon aşamasında reaktör sıcaklık artış hızının operatör tarafından kontrol sistemine hatalı bir şekilde girilmesi	0,01	0,5	1	1	3	0,02	EPC 15, EPC 17, EPC 25	0,09	0,08

Çizelge 7.7. (devam) Kantitatif yöntemlere göre hesaplanan hata olasılığı sonuçları

Hata Sırası	İnsan Hatası	TESEO						HEART		
		Seçilen					HEP Değeri	Seçilen	HEP Değeri	
		K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅		EPC	Uzman Yargısı	HEART - AHP
5	Destilasyon kolonundaki sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası	0,01	0,5	0,5	2	3	0,02	EPC 34, EPC 35, EPC 39	0,01	0,01
6	Karıştırıcının operatör tarafından çalıştırılmaması hatası	0,001	0,5	1	1	3	0,002	EPC 15, EPC 25, EPC 28	0,18	0,16
7	Dekantörde yeterince su-etil asetat faz ayrımı yapılmasını beklemeksizin operatörün kanala boşaltma yapılması	0,01	1	1	1	3	0,03	EPC 11, EPC 17, EPC 19	0,14	0,13
8	Ürün transfer pompalarında sıcaklık artışına karşı operatör müdahalesi hatası	0,001	0,5	0,5	1	3	0,001	EPC 19, EPC 34, EPC 39	0,01	0,01
9	Operatörün statik elektrik birikimini engellemeye yönelik alınan tedbirlere uymaması	0,001	0,5	1	1	3	0,002	EPC 9, EPC 12, EPC 28	0,20	0,18
10	Operatörün azot tank basıncını düzenli takip etmemesinden dolayı tanelendirme reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesi soğutma suyunun kesilmesi	0,01	0,5	1	1	3	0,02	EPC 13, EPC 19, EPC 28	0,32	0,35

Tasarlanan sistemlerin yeniden tasarlanamayacak ya da değiştirilemeyecek tek bileşeninin insanlar olduğu unutulmamalıdır. İnsanları hata yapmamaya ikna etmeye çalışmak yerine kazaların tekrar olmasını önleyecek tasarım ve çalışma yöntemlerinde değişiklikler yapılabilir, eğitim, denetim ve talimatlarda düzenlemeler yapılabilir.

Tehlike ve risklerin belirlenmesinde diğer yöntemlere kıyasla HAZOP yönteminin tercih edilmesinin sebepleri; değerlendirilen ekipmanların kapsamlı ve sistematik şekilde incelenmesi, insan hatalarının sonuçlarının değerlendirilmesi, ekipman verimliliğinin artırılması ve sürecin daha iyi anlaşılmasının sağlanmasıdır (Kotek ve Tabas, 201: 810).

Tehlike tanımlaması yapıldıktan sonra kalitatif yöntemlerin yetersiz kaldığı anlaşılmış ve kantitatif yöntemlere başvurulmuştur. Kazalara sebep olan insan hatalarını belirlemede kullanılacak yöntemler arasından en iyi yöntem olarak ifade edilebilecek bir yöntem bulunmamaktadır. Her yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Ancak, genel bir kıyaslama yapıldığında; TESEO yönteminin kullanımının kolay ve basit olması, diğer yöntemlere kıyasla hızlı analize cevap vermesi yöntemin tercih edilme sebeplerindendir. HEART yönteminin ise çeşitli endüstrilerde hiçbir kısıtlama olmadan kullanılabilir olması, çok yönlü ve hızlı olması ve yöntemde kullanılan EPC'lerin kazaların

makine, insan, ortam ve yönetime dayalı nedensel faktörlerinin incelenmesine yarar sağlaması yöntemin tercih edilmesine olanak sağlamıştır (Bowo ve diğ., 2020: 40). Ayrıca AHP yöntemi HEART yöntemine entegre edilerek, HEART yöntemindeki uzman yargısına dayalı sübjektiflik giderilmiş ve daha doğru, nesnel sonuçlara ulaşılmıştır.

8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ortaya çıkan endüstriyel kazalar; çalışan sağlığını etkilerken kaybolan işgücünün maliyetleri etkilemesiyle de ekonomi üzerinde büyük bir etki yaratır. İş kazalarının nedenleri; yönetsel, çevresel ve insan kaynaklı olabilir. Kazalar genellikle; denetim eksikliğinden, kaza araştırmalarının yetersizliğinden, çalışanların niteliklerinden kaynaklanabilir.

Felaketleri önlemek, sistem tasarımını yapmak ve insan performansını artırmak için insan hata analizinin yapılması oldukça önemlidir. Çünkü insan hata analizinin yapılmasıyla, insanların hem kaza olasılığı içerisindeki rolü incelenir hem de kazaya neden olan diğer faktörler ele alınır. Çeşitli nedenlerle meydana gelen kazaları önlemek için çeşitli türde analizlere ihtiyaç vardır. Ancak; iş kazalarının önlenmesindeki en etkili yöntem, tehlike tanımlamasının yapılmasıdır. Kazaya neden olan tehlikeler araştırılıp uygun önlemlerin alınmasıyla kaza olasılıkları azaltılabilir. Tehlike tanımlama yöntemlerini kullanarak işlerini düzenleyen ve çalışanlarını bu tehlikelerin varlığına göre eğiten kuruluşlarda kazaların %90 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Tekin, 1991: 354).

Bu çalışmada; kimyasal bir tesisteki olası hatalar kalitatif bir yöntem olan Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP) ile belirlenmiştir. Daha sonra olası hatalar içerisinde kök nedeni insan hataları olan hatalar tespit edilmiş ve Çizelge 7.6.'da verilmiştir. Belirlenen insan hatalarının meydana gelme olasılıklarını önceliklendirmek amacıyla kantitatif yöntemlerden TESEO ve HEART yöntemleri kullanılmıştır. HEART yöntemi içerisinde Etki Değer Oranı'nın sübjektifliğini ve belirsizliğini giderebilmek amacıyla da AHP yöntemine başvurulmuştur. Çalışmanın son aşamasında ise kazaya neden olabilecek insan hatalarının hata olasılık değerleri tüm yöntemler için elde edilmiş ve sonuçlar birbiri ile kıyaslanmıştır.

Yapılan çalışmada HAZOP analizi sonucunda 24 adet olası hata tespit edilmiştir. Hataların meydana gelme sebepleri, sonucunda olası tehlikeler, mevcut önlemler ve önerilen tedbirler belirlenmiştir. Daha sonra, 24 olası hata içerisinde insandan kaynaklı meydana gelen 10 adet insan hatası tespit edilmiştir. Tespit edilen insan hatalarının hata olasılığını hesaplamak için ilk olarak TESEO yöntemi kullanılmıştır. Çizelge 7.7.'de verilen sonuçlar incelendiğinde; en düşük hata olasılığı değerlerine TESEO yönteminde ulaşıldığı

görülmektedir. Bunun nedeni yöntemin; kaba, tahmini ve detaylı inceleme olanağı sağlamayan bir yöntem olmasıdır.

HEART yöntemi ile yapılan analiz sonucunda; Etki Değer Oranı'nın uzman yargısı ile belirlendiği durumda hata olasılığı değerleri daha yüksek hesaplanmıştır. Yöntem insan hatası verilerini ayrıntılı olarak ele alır. Değişen koşullara göre farklı hata oluşturma koşulları (EPC) tercih edilebilir. Ancak her EPC'nin kullanımı öznel ve uzman yargısına dayanır. Bu nedenle sonuçların doğruluğu konusunda endişe oluşturabilir.

Etki Değer Oranı'ndaki sübjektifliği giderebilmek için Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri'nden biri olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi, HEART yöntemine entegre edilmiştir. HEART – AHP kombinasyonunda kriterler diğer yöntemlere kıyasla hem nitel hem de nicel olarak ele alınabilmektedir. EPC seçimi sırasında alınan kararların tutarlılığının da incelenmesi HEART yönteminde sübjektiflikten kaynaklanan eksikliği gidermiştir. Böylece elde edilen sonuçlara güven artmıştır.

Sanayileşme ile birlikte her geçen gün kimyasal madde üretiminde artış meydana gelmektedir. Bunun sonucu olarak da iş kazası olasılıkları artmaktadır. İş kazalarını tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir ancak alınacak önlemlerle birlikte etkileri azaltılabilir. İş kazalarını azaltmak, iş güvenliğini sağlamak için dikkat edilmesi gereken en önemli unsur insandır. Tehlike tanımlama metotları ile insan, makine, ürün, malzeme ve zaman kaybına neden olabilecek koşullar ortadan kaldırılarak çalışma ortamları iyileştirilebilir. Çalışma koşullarının iyileşmesi iş kazalarını azaltabileceği gibi aynı zamanda maliyetleri düşürerek verimliliği de artırabilir.

Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar neticesinde getirilen bazı öneriler aşağıda verilmiştir.

- Risk algısı öznel bir kavram olup bilgi ve tecrübeyle bir araya geldiğinde anlamlı sonuç sağlar. Bu nedenle HAZOP analizi için ekip üyelerini seçerken, analizin uygulanacağı prosesi iyi bilen, deneyimli kişilerin seçilmesine dikkat edilmelidir.
- Tehlike tanımlamaları yapıldıktan sonra riskler değişebilir ve yeni riskler ortaya çıkabilir. Bu nedenle yapılan çalışma sonlandırılmamalı ve sürekli güncel tutulmalıdır.

- İş kazalarının ana sebepleri; dikkat dağınıklığı, yorgunluk, kendine aşırı güven ve stresli ortamda çalışmadır. Çalışanların dinlenmeleri ve dikkatlerini toplayıcı kısa molaların verilmesi iş kazası olasılığını azaltabilir.
- Tecrübesizlik ve eğitimsizlikten kaynaklanan kazaları önleyebilmek adına çalışanlara iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri verilmeli ve toplumsal farkındalık oluşturulmalıdır.
- Çalışan mesleki eğitimine ve kapasitesine uygun işlere yerleştirilmelidir. Kişinin kendine uygun olmayan işte çalışması kaza olasılığını artırmaktadır.
- Ayrıca işyerinin fiziksel koşulları da önemlidir. Aşırı sıcak, soğuk ve nemli ortamlar çalışanı zorlar. Genel sağlık koşullarına uygun, kişisel koruyucuların bulunduğu çalışma ortamları hazırlanmalıdır.
- HEART yönteminde Genel Görev Türü, Hata Oluşturma Koşulları ve Etki Değer Oranı'nın seçimi önemlidir. Uzman yargısı analiz sonucunu değiştireceğinden, bu kriterlerin seçimi sırasında görevle uygun olmasına dikkat edilmelidir.
- AHP yönteminde; karar probleminin belirlenmesi, probleme ait hiyerarşik yapı ve karşılaştırma matrislerinin oluşturulması karar vericinin öznel ifadeleri ile belirlendiği için alınacak karar hangi kişi ya da tesisi ilgilendiriyorsa, o kişilerin AHP sürecine katılımı sağlanmalıdır.

İş sağlığı ve güvenliği alanında ülkemiz henüz istenilen seviyede değildir ve yapılan akademik çalışmalar tüm alanları kapsayıcı nitelikte değildir. Kimyasal tesislerdeki kazaların en önemli nedenleri arasında insan hatasının olduğu göz önünde bulundurularak bu çalışma ile sistematik bir yöntemle olası insan hatalarının tespit edilmesinin, analiz edilerek bu hataların daha iyi anlaşılmasının sağlanmasının ve alınması gerekli tedbirlerin belirlenmesi aşamasına bir girdi oluşturması bakımından sayısallaştırılarak önceliklendirilmesinin iş kazalarının önlenmesine ve mevcut güvenlik koşullarının iyileştirilmesine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahn, S.I. and Kurt, R.E. (2020). Application of a CREAM based framework to assess human reliability in emergency response to engine room fires on ships, *Ocean Engineering*, 216, 108078, 1-15.
- Akın C.G., Eren Ö., Oral H.V. ve Heperkan H.A. (2020). Yeni bir risk değerlendirme yöntemi ile tersane işletmelerinin sınıflandırılması. *Business and Management Studies: An International Journal*, 8 (1), 2372-2384.
- Akman, A. (2015a). Kimya sektöründe tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP) analizi. *Çalışma Dünyası Dergisi*, 3 (2), 59-74.
- Akman, A. (2015b). *Bir patlayıcı madde üretim tesisindeki risk faktörlerinin belirlenmesi ve patlama riskine yönelik etki analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Akyıldız, H. (2009). Bir balıkçı gemisinin sistematik güvenlik değerlendirmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 179, 11-17.
- Akyıldız, H. ve Barlas, B. (2015). Tersanelerde iş sağlığı ve güvenliği yönünden risk analizi yöntemleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, *Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü Teknik Raporu*, No: DEN 2015/02, İstanbul.
- Akyüz, E. ve Çelik, M. (2015). A methodological to human reliability analysis for cargo tank cleaning operation on board chemical tanker ships, *Safety Science*, 75, 146-155.
- Alataş, C. (2007). *İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme metotları ve risk yönetimi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Altınten, B. (2020). *İş güvenliği uzmanlarında güvenlik kültürü ve iş kazası deneyimleri arasındaki ilişkinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arslan, Ş. (2020). *Tüp dolum tesisinde fine-kinney, olursa ne olur? analizi yöntemleri ve çalışanların fiziksel, kimyasal risk etmenlerine karşı duyarlılığının belirlenmesi: Elazığ örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Iğdır Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Iğdır.
- Bell, J. and Holroyd, J. (2009). Review of human reliability assessment methods, *Health and Safety Executive*, 14-18.
- Bello, G.C. and Colombari, V. (1980). The human factors in risk analyses of process plants: the control room operator model 'TESEO', *Reliability Engineering*, 1 (1), 3-14.
- Berber, G. ve Deste, M. (2021). Bir gıda işletmesinde süreç iyileştirme uygulaması: Dondurma fabrikası örneği, *Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22 (3), 53-72.

- Berktaş, S. ve Oraklıbel, D.R. (2021). Sanayi Devrimi ile gelen değişim: İş bölümü ve yabancılaşma, *Atlas Ulusal Sosyal Bilimler Dergisi*, 1 (6), 112-121.
- Bostanoğlu M. (2020). *Sanayi-çevre ilişkisi: AB ve Türkiye’de büyük endüstriyel kazaların önlenmesi yönergesi*. İstanbul: İktisadi Kalkınma Vakfı Yayınları, 16-18.
- Bowo, L. P., Furusho, M. and Mutmainnah, W. (2020). A new HEART – 4M method for human error assessment in maritime collision accidents. *Transactions of Navigation*, 5 (2), 39-46.
- Calixto, E. (2016). *Gas and oil reliability engineering: Modelling and analysis* (Second edition). Boston, MA, USA: Gulf Professional Publishing, 471-552.
- Cameron, I., Mannan, S., Nemeth, E., Park, S., Pasman, H., Rogers, W. and Seligmann, B. (2017). Process hazard analysis, hazard identification and scenario definition: are the conventional tools sufficient, or should and can we do much better?, *Process Safety and Environmental Protection*, 110, 53-70.
- Camkurt, M. Z. (2013). Çalışanların kişisel özelliklerinin iş kazalarının meydana gelmesi üzerindeki etkisi, *TÜHİS İş Hukuku ve İktisat Dergisi*, 24 (6), 70-101.
- Castiglia, F. ve Giardina, M. (2013). Analysis of operator human errors in hydrogen refuelling stations: comparison between human rate assessment techniques, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 1166-1176.
- CCPS (Center for Chemical Process Safety), (2008). *Guidelines For Hazard Evaluation Procedures* (Third edition). New York: Wiley, 116-118.
- Chae, H., Yoon, Y.H. and Yoon, E.S. (1992). A knowledge - based expert system for hazard and operability studies, 25 (24), 215-220.
- Crawley, F. and Tyler, B. (2015). *HAZOP: Guide to Best Practice* (Third edition). Elsevier, 13-28.
- Çetinkaya, R.U. ve Utlı, Z. (2015). Elektrometal kaplama işlemlerinde hazop risk değerlendirmesi: örnek uygulama, *Celal Bayar University Journal of Science*, 11 (2), 279-286.
- ÇŞB (2017). *Büyük endüstriyel kaza risklerinin azaltılması (BEKRA) işletmeciler için rehber*. Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 15-16.
- Doğan B. (2015). *Büyük endüstriyel tesislerde kaza risklerinin ve kök nedenlerinin tespiti: Atmosferik distilasyon kolonu örneği*, Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara.
- Durdu, H.İ. (2014). İş kazalarının ekonomik analizi ve bazı sektörler bazında değerlendirilmesi, *Sosyal Güvenlik Dergisi*, 0 (5), 67-91.
- Erdem, M. (2021). *Kontrol listesi (check-list) ve fine-kinney risk değerlendirme yöntemleri kullanılarak bir eğitim kurumu risk analizi uygulaması ve karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gaziantep.

- Erdem, M.S., Tüzemen, Ş., Yavuzkan, G., Köseoğlu, N., Ayadı, Y. ve Taghizadehalvandi, M. (2015). İnsan mühendisliğinde pilotaj hataları ve / veya uçak tasarım problemleri açısından bir inceleme: (insan hatalarının önemi) . *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3 (3) , 493-500.
- Ericson, C.A. (2015). *Hazard Analysis Techniques for System Safety*, USA: Wiley, 365-381.
- Forester, J., Bley, D., Cooper, S., Lois, E., Siu, N., Kolaczowski, A. and Wreathall, J. (2004). Expert elicitation approach for performing ATHEANA quantification, *Reliability Engineering and System Safety*, 83, 207-220.
- Genç, M. (2010). *Agrega tesisinde iş güvenliği risk analizi uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Gülenç, İ.F. ve Bilgin, G.A. (2010). Yatırım kararları için bir model önerisi: AHP yöntemi, *Öneri Dergisi*, 9 (34), 97-107.
- Havlikova, M., Jirgl, M. and Bradac, Z. (2015). Human reliability in man-machine systems. *Procedia Engineering*, 100, 1207-1214.
- He, Y., Kuai, N., Deng, L. and He, X. (2021). A method for assessing human error probability through physiological and psychological factors tests based on CREAM and its applications, *Reliability Engineering and System Safety*, 215, 107884, 1-12.
- Hollnagel, E. (1998). *Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)*. (First edition). Oxford, England: Elsevier Science, 120-150.
- Hoscan, O. and Çetinyokuş, S. (2021). Determination of emergency assembly point for industrial accidents with AHP analysis, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 69, 104386.
- Iqbal, M.I., Isaac, O., Rajawy, I.A., Khuthbuddin, S. and Ameen, A. (2021). Hazard identification and risk assessment with controls (hirac) in oil industry – a proposed approach, *Materials Today: Proceedings*, 44, 4898-4902.
- Keçek, G. ve Yüksel, R. (2016). Analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve promethee teknikleriyle akıllı telefon seçimi, *Sosyal Bilimler Dergisi*, 49, 46-63.
- Kıratlı, N. (2015). *Döküm sektöründe çalışan işçilerin iş kazası geçirme durumu ve etkileyen risk faktörleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kim, A.R., Kim, J.T., Chae, Y.H., Seong, P.H. and Jang, I. (2017). Study on the assessment method of human error probabilities in the digitalized main control room-170, *Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies*, 506-514.
- Kim, I.S. (2001). Human reliability analysis in the man-machine interface design review, *Annals of Nuclear Energy*, 28, 1069-1081.

- Kletz, T. (2001). *Hazop and Hazan: Identifying and Assessing Process Industry Hazards*. (Fourth edition). Rugby, U.K: CRC Press, 137-206.
- Kotek, L. and Tabas, M. (2012). HAZOP study with qualitative risk analysis for prioritization of corrective and preventive actions. *Procedia Engineering*, 42, 808-815.
- Macdonald, D. and Mackay, S. (2004). *Practical Hazop, Trips and Alarms*. (First edition). Oxford, UK: Elsevier-Newnes, 97-129.
- Nebati, E.E., Sağanda, G.N., Erol, H., Subaşı, S.R. ve Göz, T.E. (2021). Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi ile çalışan performansının değerlendirilmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (2), 582-590.
- Öcelan S. (2014). *Petrokimya tesislerinde iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili risk faktörleri ve risk değerlendirmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özkılıç, Ö. (2005). *İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri*. Ankara: Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu, 97-187.
- Petrillo A. And Felice F.D. (2018). *Human factors and reliability engineering for safety and security in critical infrastructures*. (First edition). Springer Cham, 2-10.
- Prasad, M. and Gaikwad, A.J. (2015). Human error probability estimation by coupling Simulator data and deterministic analysis, *Progress in Nuclear Energy*, 81, 22-29.
- Reer, B. (2008). Review of advances in human reliability analysis of errors of commission-part 2:EOC quantification, *Reliability Engineering and System Safety*, 93, 1105-1122.
- Shahriari, M., Starhe, J. and Hektor, E. (2007). Evaluation and improvement of man-machine interaction in tank lorry loading - a case study, *(IFAC) International Federation of Automatic Control Proceedings Volumes*, 40 (16), 366-371.
- Tekin, A.F. (1991). İş güvenliği ve önemi, *Eskişehir Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9 (1-2), 329-360.
- Ünal, A. (2019). *Gemi makine dairesi yangınlarının incelenmesi, tehlikelerin tanımlanması ve risk değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.
- Wang, W., Liu, X. and Qin, Y. (2018). A modified HEART method with FANP for human error assessment in high-speed railway dispatching tasks, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 67, 242-258.
- Williams, J.C. (2016). Heart – a proposed method for achieving high reliability in process operation by means of human factors engineering technology, *Safety and Reliability*, 35 (3), 5-25.

- Williams, J.C. and Bell, J.L. (2016). Consolidation of the error producing conditions used in the human error assessment and reduction technique (HEART), *Safety and Reliability*, 35 (3), 26-76.
- Wu, J. and Lind, M. (2018). Management of system complexity in HAZOP for the oil&gas industry, *IFAC (International Federation of Automatic Control) Papers Online*, 51-8, 211-216.
- Yorulmaz, M. ve Aksu, A., (2021). Liman İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulama Performansının AHP Yöntemiyle Değerlendirilmesi: Kocaeli Liman Bölgesi Örneği, *Sakarya Üniversitesi İşletme Bilimi Dergisi*, 9 (1), 1-24.
- Zhou, J.L., Lei, Y. and Chen, Y. (2019). A hybrid HEART method to estimate human error probabilities in locomotive driving process, *Reliability Engineering and System Safety*, 188, 80-89.
- Zorluoğlu Yılmaz, A. (2021). Nükleer santral kazalarından doğan sorumluluk ve tazminat – Fukushima Daiichi nükleer santral kazası ışığında, *Hacettepe Hukuk Fakültesi Dergisi*, 11 (2), 1035-1077.

EKLER

EK-1. TESEO yöntemi için seçilen insan olasılığı parametreleri ve analiz sonuçları

Çizelge 1.1. Hata-1 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-1			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Aktif maddenin operatör tarafından yanlış reaktöre transfer edilmesi	K ₁	Dikkat gerektiren ancak rutin	0,01	0,02
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5	
	K ₃	Ortalama bilgi düzeyinde ve eğitiliyor	1	
	K ₄	Normal durum	1	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

Çizelge 1.2. Hata-2 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-2			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Etil asetatın operatör tarafından besleme yapılacak reaktör yerine başka bir reaktöre beslenmesi	K ₁	Dikkat gerektiren ancak rutin	0,01	0,02
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5	
	K ₃	Ortalama bilgi düzeyinde ve eğitiliyor	1	
	K ₄	Normal durum	1	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

Çizelge 1.3. Hata-3 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-3			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Tanelendirme reaktöründe sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası	K ₁	Dikkat gerektiren ancak rutin	0,01	0,02
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5	
	K ₃	Özenle seçilmiş, uzman ve iyi eğitilmiş	0,5	
	K ₄	Potansiyel acil durum	2	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

Çizelge 1.4. Hata-4 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-4			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Destilasyon aşamasında reaktör sıcaklık artış hızının operatör tarafından kontrol sistemine hatalı bir şekilde girilmesi	K ₁	Dikkat gerektiren ancak rutin	0,01	0,02
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5	
	K ₃	Ortalama bilgi düzeyinde ve eğitiliyor	1	
	K ₄	Normal durum	1	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

EK-1. (devam) TESEO yöntemi için seçilen insan olasılığı parametreleri ve analiz sonuçları

Çizelge 1.5. Hata-5 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-5			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Destilasyon kolonundaki sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası	K ₁	Dikkat gerektiren ancak rutin	0,01	0,02
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5	
	K ₃	Özenle seçilmiş, uzman ve iyi eğitilmiş	0,5	
	K ₄	Potansiyel acil durum	2	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

Çizelge 1.6. Hata-6 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-6			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Karıştırıcının operatör tarafından çalıştırılmaması hatası	K ₁	Basit, rutin	0,001	0,002
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5	
	K ₃	Ortalama bilgi düzeyinde ve eğitiliyor	1	
	K ₄	Normal durum	1	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

Çizelge 1.7. Hata-7 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-7			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Dekantörde yeterince su-etil asetat faz ayrımı yapılmasını beklemeksizin operatörün kanala boşaltma yapılması	K ₁	Dikkat gerektiren ancak rutin	0,01	0,03
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (10 sn)	1	
	K ₃	Ortalama bilgi düzeyinde ve eğitiliyor	1	
	K ₄	Normal durum	1	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

Çizelge 1.8. Hata-8 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-8			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Ürün transfer pompalarında sıcaklık artışına karşı operatör müdahalesi hatası	K ₁	Basit, rutin	0,001	0,001
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5	
	K ₃	Özenle seçilmiş, uzman ve iyi eğitilmiş	0,5	
	K ₄	Normal durum	1	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

EK-1. (devam) TESEO yöntemi için seçilen insan olasılığı parametreleri ve analiz sonuçları

Çizelge 1.9. Hata-9 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-9			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Operatörün statik elektrik birikimini engellemeye yönelik alınan tedbirlere uymaması	K ₁	Basit, rutin aktivite	0,001	0,002
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5	
	K ₃	Ortalama bilgi düzeyinde ve eğitiliyor	1	
	K ₄	Normal durum	1	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

Çizelge 1.10. Hata-10 için seçilen değerler ve analiz sonucu

Hata-10			Seçilen Değerler	İnsan Hata Olasılığı
Operatörün azot tank basıncını düzenli takip etmemesinden dolayı tanelendirme reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesi soğutma suyunun kesilmesi	K ₁	Dikkat gerektiren ancak rutin	0,01	0,02
	K ₂	Müdahale için mevcut zaman (20 sn)	0,5	
	K ₃	Ortalama bilgi düzeyinde ve eğitiliyor	1	
	K ₄	Normal durum	1	
	K ₅	Kesintili (sürekli) mikroiklim, tesisle kesintili uyum	3	

EK-2. APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

Çizelge 2.1. Hata-1 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-1	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Aktif maddenin operatör tarafından yanlış reaktöre transfer edilmesi	E	0,025	EPC 13	x4	0,5	0,10
			EPC 15	x3	0,2	
			EPC 25	x1,6	0,3	

Çizelge 2.2. Hata-2 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-2	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Etil asetatin operatör tarafından besleme yapılacak reaktör yerine başka bir reaktöre beslenmesi	E	0,025	EPC 13	x4	0,4	0,11
			EPC 17	x3	0,4	
			EPC 26	x1,4	0,2	

Çizelge 2.3. Hata-3 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-3	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Tanelendirme reaktöründe sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası	G	0,004	EPC 13	x4	0,1	0,01
			EPC 34	x1,05	0,4	
			EPC 39	x4	0,5	

Çizelge 2.4. Hata-4 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-4	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Destilasyon aşamasında reaktör sıcaklık artış hızının operatör tarafından kontrol sistemine hatalı bir şekilde girilmesi	E	0,025	EPC 15	x3	0,3	0,09
			EPC 17	x3	0,6	
			EPC 25	x1,6	0,1	

EK-2. (devam) APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

Çizelge 2.5. Hata-5 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-5	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Destilasyon kolonundaki sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası	G	0,004	EPC 34	x1,05	0,5	0,01
			EPC 35	x1,2	0,1	
			EPC 39	x4	0,4	

Çizelge 2.6. Hata-6 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-6	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Karıştırıcının operatör tarafından çalıştırılmaması hatası	D	0,09	EPC 15	x3	0,2	0,18
			EPC 25	x1,6	0,3	
			EPC 28	x1,4	0,5	

Çizelge 2.7. Hata-7 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-7	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Dekantörde yeterince su-etil asetat faz ayrımı yapılmasını beklemeksizin operatörün kanala boşaltma yapması	E	0,025	EPC 11	x5	0,3	0,14
			EPC 17	x3	0,5	
			EPC 19	x2,5	0,2	

Çizelge 2.8. Hata-8 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-8	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Ürün transfer pompalarında sıcaklık artışına karşı operatör müdahalesi hatası	G	0,004	EPC 19	x2,5	0,4	0,01
			EPC 34	x1,05	0,3	
			EPC 39	x4	0,3	

EK-2. (devam) APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

Çizelge 2.9. Hata-9 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-9	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Operatörün statik elektrik birikimini engellemeye yönelik alınan tedbirlere uymaması	E	0,025	EPC 9	x6	0,4	0,20
			EPC 12	x4	0,5	
			EPC 28	x1,4	0,1	

Çizelge 2.10. Hata-10 için APOA'nın uzman yargısı ile belirlendiği HEART analizi

Hata-10	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Operatörün azot tank basıncını düzenli takip etmemesinden dolayı tanelendirme reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesi soğutma suyunun kesilmesi	D	0,09	EPC 13	x4	0,4	0,32
			EPC 19	x2,5	0,3	
			EPC 28	x1,4	0,3	

EK-3. APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

“Hata-1. Aktif maddenin operatör tarafından yanlış reaktöre transfer edilmesi” için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.1. Hata-1 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
13. Sistem geri bildiriminin zayıf, belirsiz veya uyumsuz olması	15. Operatörün deneyimsiz olması	7	Çok Kuvvetli Düzeyde Önemli
13. Sistem geri bildiriminin zayıf, belirsiz veya uyumsuz olması	25. Görev ve sorumluluk dağılımının belirsiz olması	5	Kuvvetli Düzeyde Önemli
25. Görev ve sorumluluk dağılımının belirsiz olması	15. Operatörün deneyimsiz olması	3	Orta Düzeyde Önemli

Çizelge 3.2. Hata-1 için karşılaştırma matrisi

	EPC 13	EPC 15	EPC 25
EPC 13	1	7	5
EPC 15	1/7	1	1/3
EPC 25	1/5	3	1

Çizelge 3.3. Hata-1 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	7	5	0,75	0,64	0,79	0,73
	1/7	1	1/3	0,10	0,09	0,05	0,08
	1/5	3	1	0,15	0,27	0,16	0,19
Toplam	1,34	11	6,33	1,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge 3.4. Hata-1 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,04	0,02	0,58	0,03	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.5. Hata-1 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-1	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Aktif maddenin operatör tarafından yanlış reaktöre transfer edilmesi	E	0,025	EPC 13	x4	0,73	0,10
			EPC 15	x3	0,08	
			EPC 25	x1,6	0,19	

EK-3. (devam) APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

"Hata 2. Etil asetatın operatör tarafından besleme yapılacak reaktör yerine başka bir reaktöre beslenmesi" için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.6. Hata-2 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
13. Sistem geri bildiriminin zayıf, belirsiz veya uyumsuz olması	17. Çıktının bağımsız olarak kontrolünün yapılmaması	1	Eşit Düzeyde Önemli
13. Sistem geri bildiriminin zayıf, belirsiz veya uyumsuz olması	26. Bir aktivite sırasında operatörün ilerlemesini, görevinin dışına çıkmamasını sağlayacak tavsiye ve yardımların bulunmaması	5	Kuvvetli Düzeyde Önemli
17. Çıktının bağımsız olarak kontrolünün yapılmaması	26. Bir aktivite sırasında operatörün ilerlemesini, görevinin dışına çıkmamasını sağlayacak tavsiye ve yardımların bulunmaması	5	Kuvvetli Düzeyde Önemli

Çizelge 3.7. Hata-2 için karşılaştırma matrisi

	EPC 13	EPC 17	EPC 26
EPC 13	1	1	5
EPC 17	1	1	5
EPC 26	1/5	1/5	1

Çizelge 3.8. Hata-2 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	1	5	0,45	0,45	0,45	0,45
	1	1	5	0,45	0,45	0,45	0,45
	1/5	1/5	1	0,10	0,10	0,10	0,10
Toplam	2,20	2,20	11	1,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge 3.9. Hata-2 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,01	0,005	0,58	0,008	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.10. Hata-2 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-2	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Etil asetatın operatör tarafından besleme yapılacak reaktör yerine başka bir reaktöre beslenmesi	E	0,025	EPC 13	x4	0,45	0,12
			EPC 17	x3	0,45	
			EPC 26	x1,4	0,10	

EK-3. (devam) APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

“Hata 3. Tanelendirme reaktöründe sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası” için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.11. Hata-3 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
34. Uzun süreli hareketsizlik veya düşük zihinsel iş yükü görevlerinin tekrarlanması	13. Sistem geri bildiriminin zayıf, belirsiz veya uyumsuz olması	7	Çok Kuvvetli Düzeyde Önemli
34. Uzun süreli hareketsizlik veya düşük zihinsel iş yükü görevlerinin tekrarlanması	39. Dikkatin dağılması, görevin kesintiye uğraması	3	Orta Düzeyde Önemli
39. Dikkatin dağılması, görevin kesintiye uğraması	13. Sistem geri bildiriminin zayıf, belirsiz veya uyumsuz olması	5	Kuvvetli Düzeyde Önemli

Çizelge 3.12. Hata-3 için karşılaştırma matrisi

	EPC 34	EPC 13	EPC 39
EPC 34	1	7	3
EPC 13	1/7	1	1/5
EPC 39	1/3	5	1

Çizelge 3.13. Hata-3 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	7	3	0,68	0,54	0,71	0,64
	1/7	1	1/5	0,10	0,08	0,05	0,08
	1/3	5	1	0,22	0,38	0,24	0,28
Toplam	1,47	13	4,20	1,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge 3.14. Hata-3 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,08	0,04	0,58	0,07	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.15. Hata-3 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-3	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Tanelendirme reaktöründe sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası	G	0,004	EPC 13	x4	0,08	0,01
			EPC 34	x1,05	0,64	
			EPC 39	x4	0,28	

EK-3. (devam) APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

“Hata 4. Destilasyon aşamasında reaktör sıcaklık artış hızının operatör tarafından kontrol sistemine hatalı bir şekilde girilmesi” için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.16. Hata-4 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
17. Çıktının bağımsız olarak kontrolünün yapılmaması	15. Operatörün deneyimsiz olması	5	Kuvvetli Düzeyde Önemli
17. Çıktının bağımsız olarak kontrolünün yapılmaması	25. Görev ve sorumluluk dağılımının belirsiz olması	7	Çok Kuvvetli Düzeyde Önemli
15. Operatörün deneyimsiz olması	25. Görev ve sorumluluk dağılımının belirsiz olması	3	Orta Düzeyde Önemli

Çizelge 3.17. Hata-4 için karşılaştırma matrisi

	EPC 17	EPC 15	EPC 25
EPC 17	1	5	7
EPC 15	1/5	1	3
EPC 25	1/7	1/3	1

Çizelge 3.18. Hata-4 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	5	7	0,75	0,79	0,64	0,73
	1/5	1	3	0,15	0,16	0,27	0,19
	1/7	1/3	1	0,10	0,05	0,09	0,08
Toplam	1,34	6,33	11	1,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge 3.19. Hata-4 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,04	0,02	0,58	0,03	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.20. Hata-4 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-4	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Destilasyon aşamasında reaktör sıcaklık artış hızının operatör tarafından kontrol sistemine hatalı bir şekilde girilmesi	E	0,025	EPC 15	x3	0,19	0,08
			EPC 17	x3	0,73	
			EPC 25	x1,6	0,08	

EK-3. (devam) APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

“Hata 5. Destilasyon kolonundaki sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası” için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.21. Hata-5 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
34. Uzun süreli hareketsizlik veya düşük zihinsel iş yükü görevlerinin tekrarlanması	35. Normal çalışma – uyku döngülerinin bozulması	7	Çok Kuvvetli Düzeyde Önemli
34. Uzun süreli hareketsizlik veya düşük zihinsel iş yükü görevlerinin tekrarlanması	39. Dikkatin dağılması, görevin kesintiye uğraması	5	Kuvvetli Düzeyde Önemli
39. Dikkatin dağılması, görevin kesintiye uğraması	35. Normal çalışma – uyku döngülerinin bozulması	3	Orta Düzeyde Önemli

Çizelge 3.22. Hata-5 için karşılaştırma matrisi

	EPC 34	EPC 35	EPC 39
EPC 34	1	7	5
EPC 35	1/7	1	1/3
EPC 39	1/5	3	1

Çizelge 3.23. Hata-5 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	7	5	0,75	0,64	0,79	0,73
	1/7	1	1/3	0,10	0,09	0,05	0,08
	1/5	3	1	0,15	0,27	0,16	0,19
Toplam	1,34	11	6,33	1,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge 3.24. Hata-5 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,04	0,02	0,58	0,03	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.25. Hata-5 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-5	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Destilasyon kolonundaki sıcaklığın yükselmesine karşı operatör müdahalesi hatası	G	0,004	EPC 34	x1,05	0,73	0,01
			EPC 35	x1,2	0,08	
			EPC 39	x4	0,19	

EK-3. (devam) APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

“Hata 6. Karıştırıcının operatör tarafından çalıştırılmaması” hatası için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.26. Hata-6 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	15. Operatörün deneyimsiz olması	5	Kuvvetli Düzeyde Önemli
28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	25. Görev ve sorumluluk dağılımının belirsiz olması	3	Orta Düzeyde Önemli
25. Görev ve sorumluluk dağılımının belirsiz olması	15. Operatörün deneyimsiz olması	2	Ara Değer

Çizelge 3.27. Hata-6 için karşılaştırma matrisi

	EPC 28	EPC 15	EPC 25
EPC 28	1	5	3
EPC 15	1/5	1	1/2
EPC 25	1/3	2	1

Çizelge 3.28. Hata-6 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	5	3	0,65	0,63	0,67	0,65
	1/5	1	1/2	0,13	0,12	0,11	0,12
	1/3	2	1	0,22	0,25	0,22	0,23
Toplam	1,53	8	4,50	1,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge 3.29. Hata-6 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,01	0,005	0,58	0,008	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.30. Hata-6 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-6	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Karıştırıcının operatör tarafından çalıştırılmaması hatası	D	0,09	EPC 15	x3	0,12	0,16
			EPC 25	x1,6	0,23	
			EPC 28	x1,4	0,65	

EK-3. (devam) APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

“Hata 7. Dekantörde yeterince su-etil asetat faz ayrımı yapılmasını beklemeksizin operatörün kanala boşaltma yapması” için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.31. Hata-7 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
17. Çıktının bağımsız olarak kontrolünün yapılmaması	11. Gerekli performans standartlarında belirsizlik olması	3	Orta Düzeyde Önemli
17. Çıktının bağımsız olarak kontrolünün yapılmaması	19. Doğruluk kontrolleri için bilgi çeşitliliğinin olmaması	5	Kuvvetli Düzeyde Önemli
11. Gerekli performans standartlarında belirsizlik olması	19. Doğruluk kontrolleri için bilgi çeşitliliğinin olmaması	2	Ara Değer

Çizelge 3.32. Hata-7 için karşılaştırma matrisi

	EPC 17	EPC 11	EPC 19
EPC 17	1	3	5
EPC 11	1/3	1	2
EPC 19	1/5	1/2	1

Çizelge 3.33. Hata-7 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	3	5	0,65	0,67	0,63	0,65
	1/3	1	2	0,22	0,22	0,25	0,23
	1/5	1/2	1	0,13	0,11	0,12	0,12
Toplam	1,53	4,50	8	1,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge 3.34. Hata-7 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,02	0,01	0,58	0,02	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.35. Hata-6 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-7	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Dekantörde yeterince su-etil asetat faz ayrımı yapılmasını beklemeksizin operatörün kanala boşaltma yapılması	E	0,025	EPC 11	x5	0,23	0,13
			EPC 17	x3	0,65	
			EPC 19	x2,5	0,12	

EK-3. (devam) APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

“Hata 8. Ürün transfer pompalarında sıcaklık artışına karşı operatör müdahalesi hatası” için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.36. Hata-8 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
19. Doğruluk kontrolleri için bilgi çeşitliliğinin olmaması	34. Uzun süreli hareketsizlik veya düşük zihinsel iş yükü görevlerinin tekrarlanması	3	Orta Düzeyde Önemli
19. Doğruluk kontrolleri için bilgi çeşitliliğinin olmaması	39. Dikkatin dağılması, görevin kesintiye uğraması	3	Orta Düzeyde Önemli
34. Uzun süreli hareketsizlik veya düşük zihinsel iş yükü görevlerinin tekrarlanması	39. Dikkatin dağılması, görevin kesintiye uğraması	1	Eşit Düzeyde Önemli

Çizelge 3.37. Hata-8 için karşılaştırma matrisi

	EPC 19	EPC 34	EPC 39
EPC 19	1	3	3
EPC 34	1/3	1	1
EPC 39	1/3	1	1

Çizelge 3.38. Hata-8 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	3	3	0,60	0,60	0,60	0,60
	1/3	1	1	0,20	0,20	0,20	0,20
	1/3	1	1	0,20	0,20	0,20	0,20
Toplam	1,66	5	5	1,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge 3.39. Hata-8 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,00	0,00	0,58	0,00	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.40. Hata-8 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-8	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Ürün transfer pompalarında sıcaklık artışına karşı operatör müdahalesi hatası	G	0,004	EPC 19	x2,5	0,60	0,01
			EPC 34	x1,05	0,20	
			EPC 39	x4	0,20	

EK-3. (devam) APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

“Hata 9. Operatörün statik elektrik birikimini engellemeye yönelik alınan tedbirlere uymaması” için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.41. Hata-9 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
12. Algılanan ve gerçek risk seviyeleri arasında uyumsuzluk olması	9. Bir tekniğin bırakılması ve karşıt bir felsefenin uygulanmasını gerektiren başka bir tekniğe başvurulması	3	Orta Düzeyde Önemli
12. Algılanan ve gerçek risk seviyeleri arasında uyumsuzluk olması	28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	7	Çok Kuvvetli Düzeyde Önemli
9. Bir tekniğin bırakılması ve karşıt bir felsefenin uygulanmasını gerektiren başka bir tekniğe başvurulması	28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	5	Kuvvetli Düzeyde Önemli

Çizelge 3.42. Hata-9 için karşılaştırma matrisi

	EPC 12	EPC 9	EPC 28
EPC 12	1	3	7
EPC 9	1/3	1	5
EPC 28	1/7	1/5	1

Çizelge 3.43. Hata-9 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	3	7	0,68	0,71	0,54	0,64
	1/3	1	5	0,22	0,24	0,38	0,28
	1/7	1/5	1	0,10	0,05	0,08	0,08
Toplam	1,47	4,20	13	1,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge 3.44. Hata-9 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,08	0,04	0,58	0,07	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.45. Hata-9 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-9	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Operatörün statik elektrik birikimini engellemeye yönelik alınan tedbirlere uymaması	E	0,025	EPC 9	x6	0,28	0,18
			EPC 12	x4	0,64	
			EPC 28	x1,4	0,08	

EK-3. (devam) APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi sonuçları

“Hata 10. Operatörün azot tank basıncını düzenli takip etmemesinden dolayı tanelendirme reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesi soğutma suyunun kesilmesi” için AHP-HEART analizi

Çizelge 3.46. Hata-10 için karşılaştırma kriterlerinin önem sıralaması

Karşılaştırma Değeri (i)	Karşılaştırma Değeri (j)	Önemi	Karşılaştırma Ölçütü
13. Sistem geri bildiriminin zayıf, belirsiz veya uyumsuz olması	19. Doğruluk kontrolleri için bilgi çeşitliliğinin olmaması	3	Orta Düzeyde Önemli
13. Sistem geri bildiriminin zayıf, belirsiz veya uyumsuz olması	28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	3	Orta Düzeyde Önemli
19. Doğruluk kontrolleri için bilgi çeşitliliğinin olmaması	28. Bir görevde gerçek anlamın çok az olması ya da hiç olmaması	1	Eşit Düzeyde Önemli

Çizelge 3.47. Hata-10 için karşılaştırma matrisi

	EPC 13	EPC 19	EPC 28
EPC 13	1	3	3
EPC 19	1/3	1	1
EPC 28	1/3	1	1

Çizelge 3.48. Hata-10 için karşılaştırma matrisi, normalleştirilmiş matris ve ağırlık matrisi

	Karşılaştırma Matrisi			Normalleştirilmiş Matris			Ağırlık Matrisi
	1	3	3	0,60	0,60	0,60	
	1/3	1	1	0,20	0,20	0,20	
	1/3	1	1	0,20	0,20	0,20	
Toplam	1,66	5	5	1,00	1,00	1,00	1,00

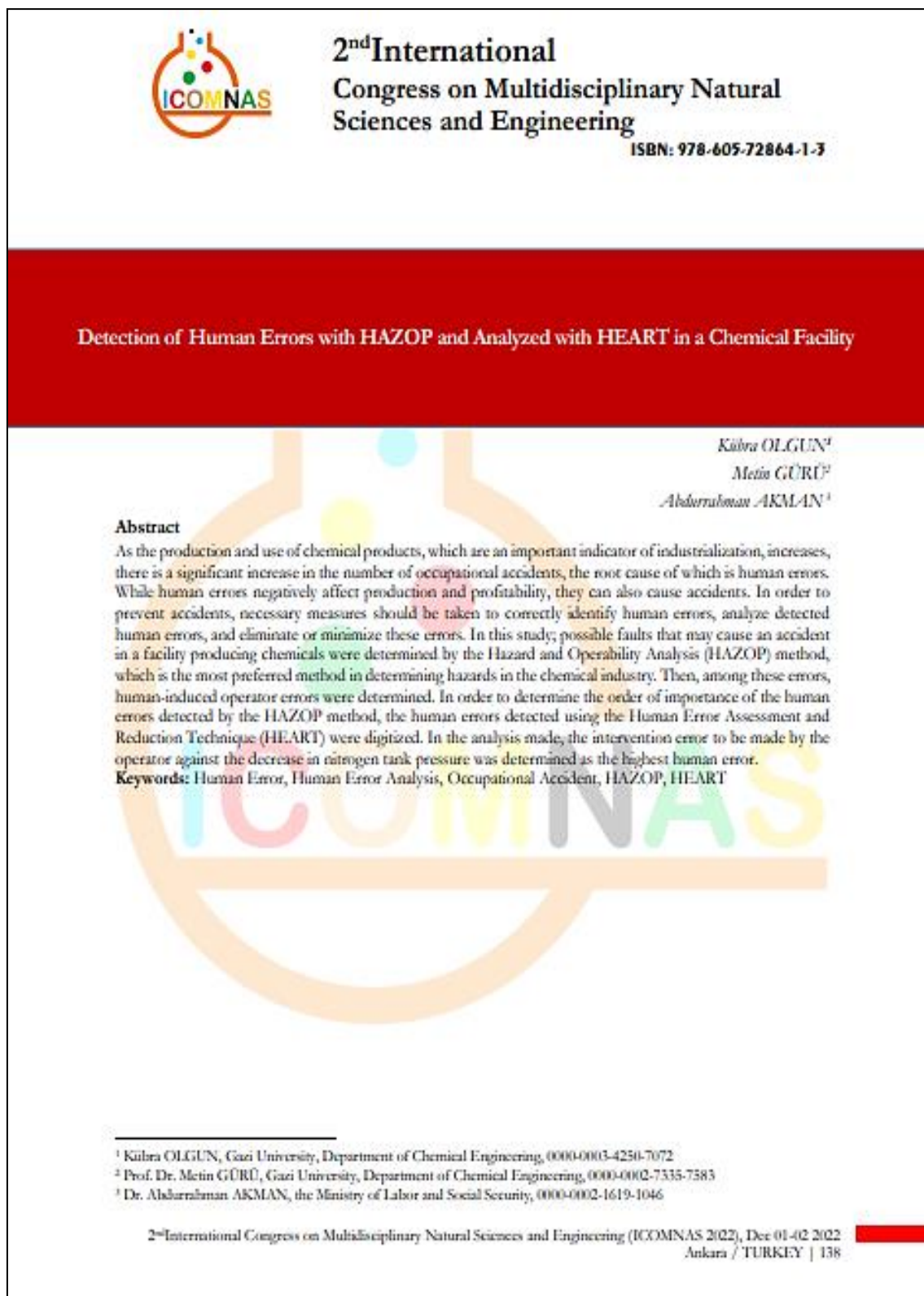
Çizelge 3.49. Hata-10 için tutarlılık hesabı

λ_{max}	CI	RI	CR	Sonuç
3,00	0,00	0,58	0,00	CR < 0,10 olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Çizelge 3.50. Hata-10 için APOA'nın AHP ile belirlendiği HEART analizi

Hata-10	Görev Türü	Genel Görev Güvenilmezliği	Hata Oluşturma Koşulları (EPC)	Maksimum Etki	Etki Değerlendirme Oranı (APOA)	İnsan Hata Olasılığı
Operatörün azot tank basıncını düzenli takip etmemesinden dolayı tanelendirme reaktörü karıştırıcısının boğaz keçesi soğutma suyunun kesilmesi	D	0,09	EPC 13	x4	0,60	0,35
			EPC 19	x2,5	0,20	
			EPC 28	x1,4	0,20	

EK-4. Tezden çıkan yayınlar



Resim 4.1. 2. Uluslararası Multidisipliner Doğa Bilimleri ve Mühendislik Kongresi - Özet

EK-4. (devam) Tezden çıkan yayınlar

Ölçün, Kübra & Gürü, Metin & Akman, Abdurrahman; Kimyasal Bir Tesiste İnsan Hatalarının HAZOP ile Tespiti ve HEART ile Analiz Edilmesi

Kimyasal Bir Tesiste İnsan Hatalarının HAZOP ile Tespiti ve HEART ile Analiz Edilmesi

Kübra OLGUN¹

Metin GÜRÜ²

Abdurrahman AKMAN³

Giriş

Sanayi devrimiyle birlikte dünya büyük bir değişim içerisinde girmiştir. Teknolojik ilerlemeler ve makineleşmenin artması ile ekonomi gelişmiş ve iş alanları genişlemiştir. Artan talepleri karşılayabilmek için kimyasal madde üreten tesis sayısı da artmış ve bu tesislerde üretim kaygısı ortaya çıkmıştır. Bütün bu gelişmeler sonucunda, tesislerde insana ve çevreye zarar verici boyutları tahmin edilebilir üzerinde olan ve sonuçları tesis sınırlarını dahi aşabilen iş kazaları meydana gelebilmektedir.

İş kazaları genellikle, insan faktörünün işyeri ortamı ve üretim araçları ile ilişkisinden kaynaklanmakta olup çeşitli kurum ve kuruluşlar iş kazalarının nedenlerini açığa çıkartıp bunları önlemek için araştırmalar yapmaktadırlar. Bu konuda devletler, ulusal mevzuatlarında düzenlemeler gerçekleştirmekte ve Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) gibi uluslararası örgütler de küresel çapta konuyla alakalı çalışmalar yürütmektedirler (Darda, 2014: 68).

Çalışanların bilinçsiz, disiplinsiz, kontrolsüz ve dikkatsiz davranışları, ortamda bulunan güvensiz çalışma metodları, makine ve aletlerin uygun kullanılmaması ve düzensizlik iş kazalarının meydana getirebilmektedir. Bunlara ek olarak; tehlikelerin önemsenmemesi, psikolojik sorunlar, eğitimsizlik, yorgunluk, yetki ve sorumluluklara net olmaması, işin yetkili çalışana yaptırılmaması ve yetersiz sağlık hizmetleri gibi etmenler de iş kazalarına neden olabılır (Türm, 2017: 53).

İş kazalarının nedenlerini belirlemek için farklı tarihlere farklı kişiler tarafından bazı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; Haksöz yaptığı çalışmada, kazaların %95'inin kişisel konuya kullanılmaması ve güvensiz davranışlardan, %5'inin ise teknik nedenlerden kaynaklandığını belirtmiştir. Metal Sanayicileri Sendikası (MESS) üyelerinde ise iş kazası nedenleri incelendiğinde, iş kazalarının %87 güvensiz hareketlerden, %13 güvensiz şartlardan meydana geldiği tespit edilmiştir (Karakurt vd., 2012: 229).

Sonuç olarak iş kazalarının meydana gelme aşırıkları üzerine çeşitli araştırmalara dayanan farklı görüşler mevcut olmakla birlikte, iş kazalarının %80'inin insan hatasından, %18'inin fiziki ve mekanik çevre şartlarından ve %2'sinin ise beklenmedik olaylardan ortaya çıktığı kabul edilmektedir. Bu genellemeler neticesinde, iş kazalarının yaklaşık olarak %98'i üzerinde kazaları önleyici tedbirlerin alınabileceği ilhamı bulunmaktadır (Çankurt, 2013: 71). Bu nedenle çalışmada, kimyasal bir tesiste meydana gelebilecek iş kazaları içerisindeki olası insan hatalarının tespit edilerek önlenmesi veya etkilerinin azaltılması hedeflenmiştir. Bu amaçla Tehlike ve İşletilebilirlik Analiz metodu olan HAZOP yöntemi tercih edilmiştir. HAZOP, tesislerin tasarım amaçlarından sapmalarına sebep olan olayları araştırırken, çalıştırma esnasında tespit edilen problemlere yönelik çözümler de sunar (Çetinkaya Uzun ve Utlu, 2015: 280). Kalitatif olarak belirlenen insan hatalarının

¹ Kübra OLGUN, Gazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Oran: 0000-0003-4250-7072

² Metin GÜRÜ, Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Oran: 0000-0002-7335-7583

³ Abdurrahman AKMAN, Dr., Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Oran: 0000-0002-1619-1046

Resim 4.2. 2. Uluslararası Multidisipliner Doğa Bilimleri ve Mühendislik Kongresi - Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar-6 Uluslararası Kitap Bölümü



Gazili olmak ayrıcalıktır