
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

GÜVENLİK YÖNETİM SİSTEMİNE DAYALI HİBRİT HAZOP METODOLOJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Nazlıcan GÜNGÖR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2024

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Nazlıcan GÜNGÖR

21/10/2024

GÜVENLİK YÖNETİM SİSTEMİNE DAYALI HİBRİT HAZOP METODOLOJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Nazlıcan GÜNGÖR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Kimyasal proseslerde bulunan kimyasalların; yanıcı, parlayıcı ve toksik gibi tehlike özellikleri ve kazaya yol açabilecek fizikokimyasal özellikleri sebebiyle belirli risk potansiyelleri mevcuttur. Bu riskler; kimyasalın bulunduğu ekipmandaki proses parametrelerinde yaşanan sapmaların kontrol altına alınamaması ile gelişen bütünlük kaybı sonucu kimyasalın çevreye yayılarak patlama, yangın ve toksik yayılım gibi proses kazalarının gerçekleşmesidir. Proses güvenliğinin sağlanması için otomasyon sistemi ile, olası sapmaların fark edilip kontrol altına almak, alınamadığında da bariyerleri uygun sırada devreye alarak kazayı önlemek/ etkilerini azaltmak gereklidir. Ancak, otomasyon sistemi bileşenlerinden birindeki arıza, insan müdahalesini gerektirebilir. Aniden gelişen bu durum Hazop çalışmasında genellikle göz ardı edilmektedir. Bu tez çalışmasında, otomasyon sistemi bileşenlerinden birinin arızalanması sonucu aniden devreye giren insan müdahalesi ve otomasyon sisteminin diğer bileşenleri ile yürütülen prosesler 'hibrit' olarak tanımlanmış ve insan faktörü geliştirilen Hibrit Hazop (H-Hazop) metodolojisinde değerlendirilmiştir. Örnek çalışma olarak CAPECO petrol ürünleri depolama ve dağıtım tesisindeki benzin depolama tankının seviye parametresindeki sapmadan dolayı meydana gelen patlama kazası incelenmiştir. Seviye transmiterinin devre dışı kalması nedeniyle operasyonu manuel olarak kontrol etmede insan tarafından yapılan hata ve tanktaki seviyenin giderek artmasına neden olan diğer hatalar listelenmiştir. Daha sonra taşmayı önlemek ve taşmanın etkilerini azaltmak için gerekli insan müdahaleleri belirlenmiştir. İnsan hatalarının bilgi eksikliği, yanlış operasyonel davranış ve güvenlik kültürü farkındalığının eksikliğinden kaynaklandığı belirlenmiş ve Güvenlik Yönetim Sistemi kapsamında 'operasyonel kontrol', 'değişim yönetimi' ve 'acil durumlara yönelik planlama' unsurlarıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Çalışma ile insan faktörünün olumlu ve olumsuz etkileri incelenmiş ve bu metodolojinin uygulanmasıyla operasyonun kontrolünde yapılan insan hatalarının en aza indirilebileceği görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91232
Anahtar Kelimeler	:	Proses güvenliği, insan faktörü, H-Hazop, güvenlik yönetim sistemi, akaryakıt depolama tesisi
Sayfa Adedi	:	105
Danışman	:	Prof. Dr. Fatma Suna BALCI

DEVELOPMENT OF PROCESS SAFETY MANAGEMENT BASED HYBRID HAZOP METHODOLOGY

(M. Sc. Thesis)

Nazlıcan GÜNGÖR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

Chemicals in chemical processes have certain risk potentials due to their hazardous properties such as flammable, explosive and toxic and their physicochemical properties that may cause accidents. These risks are the failure to control deviations in process parameters in the equipment containing the chemical and the resulting loss of integrity, resulting in the chemical spreading into the environment and causing process accidents such as explosion, fire and toxic dispersion. In order to ensure process safety, it is necessary to detect and control possible deviations with the automation system, and when they cannot be controlled, to prevent/reduce the accident by activating barriers in the appropriate order. However, in the process, a malfunction in one of the automation system components may require human intervention to take over the automation task. This situation, which occurs suddenly, is generally ignored in the Hazop study. In this thesis study, both the human intervention that suddenly comes into play due to the failure of one of the automation system components and the processes carried out with other components of the automation system are defined as 'hybrid' and the human factor in this process is evaluated in the developed Hybrid Hazop (H-Hazop) methodology. As a case study, the explosion accident that occurred due to the deviation in the level parameter of the gasoline storage tank in CAPECO petroleum products storage and distribution facility was examined. The error made by the human in manually controlling the operation due to the level transmitter being disabled and other errors that caused the level in the tank to increase gradually were listed. Then, the necessary human interventions were determined in order to prevent the overflow and reduce the effects of the overflow. It was determined that human errors were caused by lack of information, incorrect operational behavior and lack of safety culture awareness and it was determined that they were related to the elements of 'operational control', 'management of change' and 'planning for emergencies' within the scope of the Safety Management System. The positive and negative effects of the human factor were examined with the study and it was seen that human errors made in controlling the operation could be minimized with the application of this methodology.

Science Code	:	91232
Key Words	:	Process safety, human factor, H-Hazop, safety management system, fuel storage facility
Page Number	:	105
Supervisor	:	Prof. Dr. Fatma Suna BALCI

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca bilgisi, deneyimini ve sonsuz desteği hiçbir zaman esirgemeyen hem akademik hem de ahlaki anlamda örnek aldığım ve öğrenci olmaktan her zaman gurur duyacağım çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Fatma Suna BALCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman her anlamda yanımda olup bana güç veren, sevgisini, desteğini hiç esirgemeyen canım annem Aliye İNANÇ'a, varlıklarıyla beni her zaman motive eden değerli eşim Murat GÜNGÖR ve biricik kızım Defne Ela GÜNGÖR'e bütün kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

Sayfa

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
˚C	Sıcaklık
atm	Basınç
W	Elektrik Enerjisi
Q	Debi
V	Akış Hızı
D	Boru Ççapı
Re	Reynolds Sayısı
ρ	Yoğunluk
μ	Viskozite
f	Friksiyon Faktörü
ΔP	Basınç Kaybı
η	Pompa Verimliliği

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AIChE	Amerika Kimya Mühendisliği Enstitüsü
BEKRA	Büyük Endüstriyel Kaza Risklerinin Azaltılması
BFD	Blok Akış Diyagramı
BLEVE	Kaynayan Sıvı Genleşen Buhar Patlaması
BPCS	Temel Proses Kontrol Sistemi
CCF	Ortak Nedenli Hata
CCPS	Amerikan Kimya Proses Güvenliği Merkezi
CSB	ABD Kimyasal Güvenlik ve Tehlike Araştırma Kurulu
EIGA	Avrupa Endüstriyel Gazlar Derneği
EMARS	Büyük Kaza Raporlama Sistemi
EPA	ABD Çevre Koruma Kurumu
ESD	Acil Durdurma Sistemi

Kısaltmalar	Açıklamalar
ETA	Olay Ağacı Analizi
EUC	Kontrol Altındaki Ekipman
FTA	Hata Ağacı Analizi
GYS	Güvenlik Yönetim Sistemi
HAZOP	Tehlike ve İşletilebilirlik
H-HAZOP	Hibrit Hazop
ILO	Uluslararası Çalışma Örgütü
INTERLOK	Kilitleme Sistemi
IPL	Bağımsız Koruma Katmanları
İSG	İş Sağlığı ve Güvenliği
LOPA	Korunma Katmanları Analizi
MI	Mekanik Bütünlük
OSHA	ABD İş Güvenliği ve Sağlığı İdaresi
P&ID	Borulandırma ve Enstrümantasyon Diyagramı
PFD	Proses Akış Diyagramı
PHA	Proses Tehlike Analizi
PIF	Performansı Etkileyen Faktörler
PSM	Proses Güvenliği Yönetimi
RMP	Risk Yönetim Planı
SIL	Güvenlik Bütünlük Seviyesi
SIS	Güvenlik Donanımlı Sistem
TCDD	2,3,7,8- Tetraklorodibenzo-p-dioksin
TCP	2,4,5-Triklorofenol
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
WI	Olursa Ne Olur? Analizi
WWT	Atıksu Arıtma Tesisi

1. GİRİŞ

Doğada saf halde bulunan kimyasal maddelerin yapı ve özellikleri kimyasal süreçlerde değiştirilerek kullanılmaktadır. Saf halleriyle ya da yapıları değiştirilerek kullanılan kimyasallardan bazıları zararlı kimyasal olarak nitelendirilmektedir [1]. Tehlikeli kimyasal olarak nitelendirilen bu kimyasallar, özelliklerinden dolayı (yanıcı, patlayıcı, toksik) fiziksel zarar, insan sağlığına zarar ve çevreye yönelik zarar niteliklerine göre sınıflarına ayrılmaktadır. İşletme şartlarındaki sapmalar sonucunda ani sıcaklık, basınç, faz değişikliği gibi oluşumların etkisiyle bulunduğu kabın içerisinde mekanik bütünlük (mechanical integrity-MI) kaybına sebebiyet vererek ekipmanın parçalanması ile kimyasal kazayla sonuçlanabilmektedir. Aynı şekilde reaksiyona girme eğilimleri yüksek olan kararsız yapıdaki kimyasallar da yanlış operasyon sonucu birbirleriyle etkileşime girmesi veya mekanik darbeye maruz kalmaları durumunda oksijene gerek duymadan bozunarak artan iç basıncın artması nedeniyle de patlama reaksiyonu vermekte ve çevreye karşı tehlikeli hale gelerek tehlikeli kimyasal durumuna gelmektedir. Tüm kimyasallar fizikokimyasal özelliklerinden dolayı işletme şartlarındaki değimlerden kaynaklı kazaya sebebiyet verecek bütünlük kaybına yol açabilir. Olası kazanın şiddeti açısından tehlikeli kimyasalların değerlendirilmesinin yanı sıra prosesteki tüm kimyasalların kazaya gidiş yolu yönünden fizikokimyasal özelliklerinin incelenmesi gereklidir.

Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO)'nün tanımına göre iş kazası; belirli bir zarar veya yaralanmaya yol açan önceden planlanmamış beklenmedik bir olaydır. İş kazalarının azaltılabilmesi için mevcut risklerin doğru analiz edilmesi gerekmektedir. Önlem alınacak riskler değerlendirilirken kazanın olasılığı ve şiddeti dikkate alınmaktadır [2]. Bir kazanın şiddet seviyesi ise; kazanın etkisi (yangın, yaralanma vb.) ve etkilenenlerdir (üç kişi, tüm tesis çalışanları vb.). Yaşanan iş kazalarındaki 'etki'; tehlikeli işte çalışan kişinin yaralanması, ölümü (iskeleden düşme, elektrik çarpması vb. sonucu yaralanma/ölüm) iken 'etkilenen'; kaza sonucuna maruz kalan çalışan sayısıdır.

Ülkemizde Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve İçişleri Bakanlığı tarafından ortaklaşa yürütülen 'Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik (BEKRA)'e göre proses kazası; bir kuruluşun işletilmesi esnasında, kontrolsüz gelişmelerden kaynaklanan ve kuruluş içinde/dışında insan ve/veya çevre sağlığı için tehlikeye yol açan tehlikeli kimyasalların

bulunduğu kabın mekanik bütünlüğünü kaybetmesi sonucu çevreye yayılması ve kimyasal özelliğinden kaynaklı toksik etki, yangın veya patlama olayının gerçekleşmesidir [3]. Meydana gelen proses kazalarında ise ‘etki’; yangın, patlama, toksik yayılım iken ‘etkilenen’; tüm tesis çalışanları (hatta bazı durumlarda tesis çevresindeki yaşayan halk) ve çevredir.

İş ve proses kazalarının şiddet seviyeleri incelendiğinde proses kazalarında gerek etkinin (tüm tesisin patlaması, toksik bir kimyasalın çevreye yayılması vb.) gerekse kazadan etkilenen sayısının (tüm tesis çalışanları ve tesisin sınır çevresi) fazla olduğu aşikardır. Kimyasal tesislerde yaşanan proses kazalarının şiddeti çok büyük olduğu için bu kazaların olasılığının (kazanın yaşanabileceği zaman dilimi) düşük düzeyde tutulması gerekmektedir. Öncelikle proses kazalarının önlenmesi ve önlenemediği durumlara hazırlıklı olup etkilerinin azaltılması için proaktif çalışmaların yürütülmesi gereklidir.

Ülkemizde tehlikeli kimyasal bulunduran işletmelerde uygulanan yönetmeliğe göre proses kazalarının meydana gelme olasılığı $1x10^{-4}$/yıl veya bu değerden daha küçük bir değerde olması zorunludur [3]. Kimyasal proseslerdeki ekipmanlarındaki tasarım parametrelerinin çalışma aralıklarından her türlü uzaklaşma sapma olarak tanımlanmaktadır. İşletilebilirlik sapmanın kontrol altına alınamaması ile üretimi sekteye uğratırken sapmada meydana gelecek ilave değerler prosesin/ekipmanın kontrolünü kaybetmesine ve kazaya yol açabilir. Dolayısıyla tesiste işletilebilirliği bozan ve bütünlük kaybına sebep olan proses parametrelerinin tasarım değerinden uzaklaşma (sapma) ihtimalinin engellenmesi için belirli yaklaşımlar izlenmesi gereklidir. Bu yaklaşım mevcut riskleri bertaraf ederek proses güvenliğini sağlamayı hedefleyen ‘Güvenlik Yönetim Sistemi (GYS)’dir.

GYS; kimyasal tesislerde proses kazalarının önlenmesi, önlenemeyen kazaların etkilerinin azaltılması için izlenmesi gereken uygulama adımlarıdır. Kimyasal tesislerinde tehlikelerin yaratacağı potansiyel risklerin ortadan kaldırılması ve/veya kontrol altına alınabilmesi amacıyla GYS kurması ve sağlıklı bir şekilde uygulaması şarttır [4]. Tesiste bulundurulan tehlikeli kimyasalların anlık depolama miktarları, yönetmelikte belirtilen alt ve üst depolama sınırları ile kıyaslanarak kuruluşlar ‘alt seviyeli kuruluş’ veya ‘üst seviyeli kuruluş’ olarak nitelendirilmektedir. BEKRA mevzuatı kapsamında üst seviyeli kuruluşlarda GYS kurulması yasal zorunluluk olmakla birlikte alt seviyeli kuruluşların veya alt seviyeli kuruluş

olmayan kimyasal işleyen tesislerinin de uygulaması zorunlu olmasa da proses güvenliği açısından önemlidir.

Etkin bir GYS yedi temel unsur altında toplanmıştır: kuruluşta sürdürülebilir proses güvenliği farkındalığının oluşturulması amacıyla 'Organizasyon ve personel', tehlikelerin belirlenmesi ve kontrol çalışmalarının yürütülmesi için 'Büyük kaza tehlikelerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi' ve 'İşletim kontrolü', yapılan herhangi bir değişikliğin (ekipman, personel, prosedür) oluşturacağı güvenlik zafiyetinin değerlendirilmesi için 'Değişimin yönetimi', yaşanacak acil durumlar için alınacak aksiyonların belirlendiği 'Acil durumlar için planlama', yönetim sisteminin uygulanabilirliğinin ve veriminin analiz edildiği 'Performansın izlenmesi', sistemin sürekli denetlenip iyileştirilmesi amacıyla yapılan 'Denetleme ve inceleme' [3, 4].

GYS'nin etkin uygulanabilmesi dolayısıyla işletmede proses güvenliğinin sürekliliğinin sağlanması için kritik nokta kuruluştaki mevcut tehlike ve risklerin öngörülüp doğru bir şekilde risk değerlendirmenin yapılmasıdır. Risk analizi; kuruluşta olağan işletme koşullarında insan, çevre ve ekonomik kayıplara neden olabilecek potansiyel risklerin tanımlanması, değerlendirilmesi ve risklerin azaltılması/ortadan kaldırılması için sistematik bir metodoloji sağlamaktadır. Tehlikelerden kaynaklı potansiyel risk durumlarını, ekipman çalışma parametrelerinin tasarım amacından hangi durumlarda saptığını tanımlayarak mevcut metodolojilerden daha sistematik ve kapsamlı analiz yapıldığından, kimya endüstrisinde geniş ve etkili bir çalışma alanı var olduğundan, pek çok risk analizinde kullanılan teknikleri de içinde barındırdığından ve kabul edilebilir risk seviyesini belirlediğinden Hazop metodolojisi en uygun risk değerlendirme yöntemlerinden biri olarak kullanılmaktadır [5, 6].

Hazop metodolojisinde tesiste belirlenen proses parametrelerinin tasarım aralığının dışına çıktığı durumlar başka bir deyişle sapmalar tespit edilir. Sapmaların nedenleri ve doğurabileceği riskler değerlendirilerek bu sapmaların yaşanmaması, yaşandığı durumda da etkilerinin azaltılması için uygun kontrol sistemlerinin gereksinimini belirlemek için Hazop çalışması yürütülür. Küçük işletmelerde kaza önleme ve şiddet azaltma adımları insan tarafından alınan aksiyonlarla gerçekleştirilir. Gerek olası sapmaları önlemek gerekse sonuçlarını kontrol altına almak için gerekli çalışmaların otomasyonlarla yürütülmesi tercih edilen bir yaklaşım olmakla birlikte yüksek kapasiteli proseslerde neredeyse bir

zorunluluktur. Ancak otomasyon sistemi ile yürütülen proseslerde, otomasyon sisteminin arızası sonucu devre dışı kalmasıyla bu sistem yerine acil ve hızlı aksiyon almak için insanın devreye girme ihtimali mevcuttur. Bu durum geliştiğinde ise, insanın devreye aniden girmesi ve hızlı bir şekilde uygun aksiyonları alması gerekliliğinden, proses insan hatalarına açık hale gelir ve hatalar sonucu kaza kaçınılmaz olur.

Bu çalışmada otomasyon sisteminin devre dışı kalmasıyla beraber gelişen insan faktörünün söz konusu olduğu proseslere hibrit olarak tanımlanmaktadır. Hem insan hem de otomasyon sisteminin bileşenlerinin kombinasyonu sonucu yapılan proses kontrol ve güvenlik bariyerlerinde insan faktörünün değerlendirildiği Hazop modifikasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmuş olup Hibrit Hazop (H-Hazop) kavramı ortaya konulmuştur.

İnsan ve otomasyon sisteminin sağlıklı bir şekilde bir arada kullanıldığı Hibrit Hazop metodolojisi geliştirilerek metodolojinin etkin bir şekilde uygulaması örnek çalışma ile desteklenmesi hedeflenmiştir.

Tesisin normal işletme şartlarında yaşanan sapmaların kök nedenleri ve güvenlik bariyerleri operasyonel arızalara ek olarak insan hataları üzerinden de değerlendirilmiştir. Böylelikle mevcut çalışmalardan farklı olarak tesisin proses güvenliğini sağlama konusunda yapılacak tehlike belirleme ve risk analizinde kimyasal ve fiziksel parametrelere ek olarak organizasyonel parametreler (insan hataları) de kök neden ve güvenlik bariyeri olarak incelenmiştir. Geliştirilen Hibrit Hazop metodolojisinin uygulama çalışması seçilen tesis/kaza prosesinde yürütülmüştür. Devre dışı kalan otomasyon sistemi yerine görev alan insan faktörünün etkileri belirlenerek daha kapsamlı bir insan faktörü değerlendirme çalışması oluşturulmuş ve risk değerlendirme çalışmasının etkinliğinin ve güvenilirliğinin iyileştirilmesi beklenmektedir.

2. PROSES GÜVENLİĞİ

2.1. Temel Tanımlar/Kavramlar

Kaza, yanlışlıkla ve beklenmedik bir şekilde gerçekleşen, can ve mal kaybı veya zarara neden olan bir eylem [7] olarak tanımlanmakla birlikte ISO 45001 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi olası kayıpları daha açıklayıcı bir şekilde ifade ederek kazayı şu şekilde tanımlamaktadır: beklenmedik bir şekilde gerçekleşen ve sonucunda ölüm, yaralanma, hasar veya diğer kayıpların yaşandığı istenmeyen eylemdir.

Kazaya yol açan sebepleri ve kazanın sonuçlarını sağlıklı değerlendirebilmek için aşağıda verilen ilave tanımlara ihtiyaç vardır. Tehlike; insan ve çevre sağlığına, ekipman veya malzemenin zarar görmesine, üretimin aksamasına, işyeri ortamının zarar görmesine sebep olan potansiyel kaynaktır. Risk; tehlikenin kontrol edilemediği durumlarda olası istenmeyen olaylardır. Riskin büyüklüğünü belirleyen iki bileşenden biri tehlikeli bir olayın meydana gelme olasılığı, diğeri ise tehlikeli olayın vereceği zararın ciddiyet düzeyi yani şiddettir. Başka bir deyişle; kaza olasılığı ve kayıp/yaralanmanın büyüklüğü bakımından insana verilen zarar, çevresel hasar veya ekonomik kaybın bir ölçüsüdür [8]. Nesnel bir durum olan tehlikenin riske dönüşmesini kolaylaştıran ‘tetikleyici faktörler’ de bazen tek başlarına riskin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Tüm bu tanımlar trafikte buzlanmanın yoğun olduğu yerde arabanın kayarak kaza yapması örneği üzerinden değerlendirilirse; burada tehlike kaynağının kendisi trafikte araç kullanımıdır. Risk yani istenmeyen olay; aracın bir başka araca ya da canlıya çarpması, verilen hasar yani şiddet ise; çarptığı canlının yaralanması, ölümü veya aracın hasar alması olarak sıralanabilmektedir. Bu örnekteki tetikleyici faktörler; trafikte telefonla konuşmak, hızlı araç kullanmak gibi işi yürütürken yapılan hatalar olabildiği gibi, karayolunun buzlanması şeklinde iklimsel şartlardan dolayı dış faktörler de olabilmektedir.

Birçok iş yerinde olağan takılma, düşme gibi veya hareketli ekipmandan kaynaklı çalışanların yaralanmasına neden olan mekanik tehlikeler; enerji kaynağı olarak elektrik kullanımı sonucu elektrik çarpması, çalışma şekli ile ilgili olarak yüksekte çalışma sonucu yüksekten düşme gibi tehlikelerin var olmasının yanı sıra çoğu iş yerinde kimyasal kullanımı söz konusu olup bu kimyasallar, özellikleri açısından bir tehlike kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Kimyasal üretim tesislerinde ise, kimyasallar başlı başına tehlike

kaynağı olmakla birlikte yukarıda anlatılan diğer tehlike kaynakları da mevcuttur. Proseslerde kullanılan bu kimyasallar; proseste kontrol altına alınamadığı durumlarda sahip oldukları yanıcı, parlayıcı ve toksik özellikleri neticesinde ciddi kazalara sebep oldukları için 'tehlikeli kimyasal' olarak nitelendirilmektedir [1,9]. Bu kimyasallar prosesteki işletme şartlarında yaşanan ani sıcaklık, ani basınç veya faz değişikliği gibi değişiklikler sonucunda bulundukları kabın (tank, reaktör, ısı değiştirici vb. proses ekipmanlarının) iç basıncını artırarak mekanik bütünlüğünün bozulmasına sebep olmaktadır. Kap içerisindeki kimyasalın ortama yayılmasıyla birlikte tehlike kategorisine göre yangın, kimyasal patlama veya toksik salınım gibi olaylarla sonuçlanmaktadır. Şayet kap içerisinde tehlikesiz bir kimyasal olması durumunda bile kimyasalların yapı özelliklerinin değişmesi sonucu tehlikeli hale gelebilmektedir. Bunun için ise kimyasalın bulunduğu kabın işletme şartlarının veya dış ortam şartlarının değişime uğraması yeterlidir. İşletme şartlarında yaşanan sıcaklık, basınç, hava akışı, asidite, başka bir kimyasalla etkileşime girmesi gibi değişiklikler kap içindeki kimyasalların tehlikeli hale gelmesi için tetikleyici faktörlerdir. Benzer şekilde dış ortam şartlarında yaşanacak değişimler (meteorolojik koşullar nedeniyle veya sahada meydana gelen yangın, patlama gibi olaylar sonucu kabın çevresinde sıcaklık artışının yaşanması) kap içi işletme şartlarının değişimine yol açarak yine tehlikesiz olan kimyasalların tehlikeli hale gelmesini kolaylaştıracaktır. Sonuç olarak; tehlikesiz bir kimyasal dahi işletme şartlarının değişmesiyle şarapnel etkili fiziksel bir patlama yaratabilirken, tehlikeli kimyasal şarapnel etkisine ek olarak kimyasalın tehlike grubuna göre (yanıcı, parlayıcı, toksik) çok daha şiddetli etkilere sahip kazalara yol açacaktır. Ek olarak kap içerisinde sıcaklık ve basınç altında birbirleriyle reaksiyona girme potansiyelleri yüksek kimyasalların olduğu durumlar da değerlendirilirse; bu kimyasallar birbirleriyle reaksiyon verdiklerinde daha zararlı kimyasalların ortaya çıkmasına yol açarak yaşanacak kazanın şiddetini de arttıracaktır. Aynı şekilde reaksiyona girme eğilimleri yüksek olan kararsız yapıdaki kimyasalların mekanik darbeye maruz kaldıkları durumlarda oksijene gerek duymadan bozunarak artan iç basıncın etkisiyle de patlama reaksiyonu verecektir.

İş kazası; Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'ne göre önceden planlanmamış, çoğu kişisel yaralanmalara, makinelerin ve araç gereçlerin zarara uğramasına, üretimin bir süre durmasına yol açan bir olaydır. Uluslararası Çalışma Örgütü'ne göre ise belirli bir zarar ya da yaralanmaya neden olan, beklenmeyen, önceden planlanmayan bir olaydır. Ülkemizde 6331 Sayılı 'İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'na göre ise iş kazası; "işyerinde veya işin yürütümü nedeniyle meydana gelen, ölüme sebebiyet veren veya vücut bütünlüğünü ruhen

ya da bedenen engelli hâle getiren olay" olarak tanımlanmaktadır. Diğer tanımlarda iş kazalarından koruma amacıyla belirtilen kişiler genellikle 'işçi' olarak nitelendirilirken ülkemizde uygulanan kanunda bu kişiler kamu veya özel işyerlerinde görev alan 'tüm çalışanları' kapsamaktadır. İş kazalarını önlemek ve işyerinde bulunan tüm kişilerin sağlık ve güvenliğini korumak amacıyla 'İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG)' kavramı ve 'İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi' ortaya çıkarılarak sistematik bilimsel çalışmalar geliştirilmiştir. WHO ile ILO İş Sağlığı ve Güvenliği kavramını, "Tüm mesleklerde işçilerin bedensel, ruhsal, sosyal iyilik durumlarını en üst düzeye ulaştırmak, bu düzeyde sürdürmek, işçilerin çalışma koşulları yüzünden sağlıklarının bozulmasını önlemek, işçileri çalıştırılmaları sırasında sağlığa aykırı etmenlerden oluşan tehlikelerden korumak, işçileri fizyolojik ve psikolojik durumlarına en uygun mesleksel ortamlara yerleştirmek ve bu durumları sürdürmek, özet olarak işin insana ve her insanın kendi işine uyumunu sağlamak" olarak tanımlamıştır. Bu amaç doğrultusunda belirlenen faaliyetlerin etkin bir şekilde uygulanması için 'İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi' bir araç olarak kullanılmaktadır.

Proses kazasına yönelik ise; ülkemizde bu kazaların insanlara ve çevreye olan zararlarının en aza indirilmesi ve sürekli korumayı sağlamak amacıyla gerekli görülen önlemler ile ilgili usul ve esaslar 30702 sayılı Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve İçişleri Bakanlığı tarafından yayımlanan 'Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik'te belirlenmiştir. Yönetmeliğe göre proses kazası; herhangi bir kuruluşun işletilmesi esnasında, kontrolsüz gelişmelerden kaynaklanan ve kuruluş içinde veya dışında insan ve/veya çevre sağlığı için anında veya daha sonra ciddi tehlikeye yol açabilen bir veya birden fazla tehlikeli maddenin sebep olduğu büyük bir yayılım, yangın veya patlama olayının gerçekleşmesidir [3]. Kimyasal tesislerde hem depolama faaliyetlerinde hem de prosesin işletilmesi esnasında hammadde, yan ürün ve ürün olarak proses sahasında anlık bulunan kimyasalların miktarları oldukça fazladır. Bu tesislerde meydana gelen herhangi bir kazada sahada bulunan tehlikeli kimyasalların anlık depolanan miktarlarının bir kısmı veya tamamı bu kazaya iştirak etmesi durumunda kazanın şiddet seviyesi artmaktadır. İşte burada bahsedildiği gibi tesiste anlık depolama miktarı çok fazla olan tehlikeli kimyasallardan kaynaklı proses kazalarına da 'büyük endüstriyel kaza (katastrofik kaza)' denmektedir.

Bir tesiste proses kazası meydana geldiğinde şiddet seviyesi fazla olsun veya olmasın herhangi bir kuruluşta mevcut tehlikelerin yaratacağı olası riskleri öngörüp bertaraf ederek

kuruluşun hedeflenen verimde, insan ve çevre açısından güvenli bir şekilde işletilmesine yönelik belirlenen yaklaşımlar ‘Proses Güvenliği Yönetim Sistemi (GYS)’dir. Bu tez çalışmasının Bölüm 2.3’te Proses Güvenliği Yönetim Sistemi detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

İnsan ve çevre sağlığının korunması, kuruluşun güvenli işletilmesi için iş ve proses kazalarının azaltılması ve mevcut risklerin doğru analiz edilmesi gerekmektedir. Riskler kazanın meydana gelme olasılığı ve şiddeti dikkate alınarak değerlendirilmektedir [2]. Kazanın şiddet seviyesi ise; kazanın etkisi ve etkilenendir (Eş. 2.1 ve Eş. 2.2).

Risk=Olasılık * Şiddet (2.1)

Şiddet=Etki * Etkilenen (2.2)

İş ve proses kazalarında risk bileşenlerini detaylı tartışmak gerekirse, tehlikeli iş olarak yüksekte çalışma yapan bir tesis çalışanının düşmesi sonucu yaralanması bu iş kazasının ‘etki’si, düşen tesis çalışan sayısı ise ‘etkilenen’dir. Benzer şekilde reaktörde kontrol edilemeyen sıcaklık artışı sonucu reaktörün patlaması ve beraberinde gelişen yangın bu proses kazasının ‘etki’ bileşeni, reaktör ünitesi ve diğer ünitelerde çalışan tesis personelleri, tesisin çevresine yangının yayılması sonucu çevre halkı sayısı ve çevre kirliliği bu kazadan ‘etkilenen’dir. Verilen örnekte görüldüğü gibi iş ve proses kazalarının etki ve etkilenen sayısı kıyaslandığında; proses kazalarında aynı etki için dahi kazadan etkilenen sayısının çok daha fazla olduğu görülmektedir. Dolayısıyla kimyasal tesislerde yaşanan proses kazasının şiddet düzeyi oldukça fazladır ve bu tesislerde riske yol açan tehlikeleri tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmadığı için risk seviyesini tasarım aşamasında ‘kabul edilebilir’ düzeyde tutmak gereklidir [8]. Bunun için de riskin olasılık bileşeninin minimum düzeyde tutulması gerekmektedir. Ülkemizde mevcut yönetmeliğe göre, tehlikeli kimyasal bulunduran ve/veya işleten tesislerde muhtemel kazaların meydana gelme olasılığı $1x10^{-4}$/yıl veya bu değerden daha küçük bir değerde olması gerekmektedir [3]. Proses kazalarının meydana gelme olasılığının azaltılması için ise işletilebilirliği bozan, bütünlük kaybına sebep olan sapmaların engellenmesi ve güvenlik önlemlerinin alınması dolayısıyla ‘proses güvenliği’ nin sağlanması şarttır [8].

2.2. Proses Güvenliğinin Sağlanması

‘Güvenlik" kelimesi kaza önleme politikasının uygulamaya başlandığı ilk dönemlerde baretler, güvenlik ayakkabılarının kullanımı, çeşitli kurallar ve düzenlemeler içermekteydi. Vurgulanan temel nokta ‘işçi güvenliği’ idi. Ancak yakın dönemde, "güvenlik" kelimesi tehlike tanımlama, teknik değerlendirme ve yeni mühendislik özelliklerinin tasarımını içermeye başlamıştır [8].

‘Proses güvenliği’ kavramı ise literatürde birbirine benzer ifadelerle pek çok kez tanımlanmıştır. Amerikan Kimya Mühendisleri Enstitüsü Kimyasal Proses Güvenliği Merkezi (Center For Chemical Process Safety-CCPS) tarafından yapılmış olan “kimyasal proses tesislerinde katastrofik boyutta gerçekleşebilecek kimyasal veya enerji salımını önleme, azaltma, salınıma hazırlıklı olma, müdahale veya normale dönme faaliyetleri” tanımı proses güvenliğinin kapsamını net bir şekilde oraya koymaktadır [10]. Avrupa Endüstriyel Gazlar Derneği (European Industrial Gases Association-EIGA) ise proses güvenliğini enerji veya tehlikeli maddelerin salınımıyla ilişkili meydana gelen kazaları, olayları özellikle patlama, yangın ve kayıpları önlemeye odaklanan mühendislik ve yönetim ilkelerinin bir birleşimi olarak ifade etmektedir [11]. Genel olarak tanımlamak gerekirse proses güvenliği; proses endüstrisinde kimyasal salınımlar, patlamalar, yangınlar ve yapısal çökmelerin önlenmesini esas alan bir alandır [12].

Proses güvenliği yalnızca tesisin risklerine yönelik meydana gelen kazaların tekrar yaşanmaması için kazaların kök nedenlerini analiz etme ve çözüm bulmaya yönelik reaktif yaklaşım değildir. Aynı zamanda tesis bazında potansiyel kaza senaryoları önceden belirlenerek bu riskleri bertaraf etme veya azaltmaya yönelik çalışmaları da kapsayan proaktif bir yaklaşımdır [2].

Proseste var olan kimyasalların tehlikeli özelliklerinin ortadan kaldırılması mümkün değildir. Bu yüzden kimyasalların içerdikleri tehlikeleri kontrol altında tutarak prosesin güvenli bir şekilde işletilebilmesi için öncelikle proses parametrelerinde sapmaların yaşanmaması gereklidir. Sapma; parametrelerin tasarımcı tarafından belirlenen tasarım limitlerinin dışına çıkması olarak tanımlanmaktadır. İşletme esnasında yaşanabilecek sapmalar; sıcaklık, basınç, akış hızı, asidite vb. gibi proses parametrelerinin tasarım değerlerinden uzaklaşmasıdır. Bu sapmaların temel nedeni ise; prosesteki diğer herhangi

parametre(ler)deki yaşanan sapmadır. Seçilen parametrenin sapmasına neden olan diğer parametredeki değişimin nedeni incelenecek olursa; bu parametrenin bulunduğu ekipmandaki arıza, operatörün hatası şeklinde nedenler sıralanabilmektedir. Örneğin bir depolama tankında sıcaklık artışı sonucu bir sapma yaşanmaktadır. Burada, tanka beslenen hammaddenin yüksek sıcaklıkta olması temel sapma nedeni iken, bu beslenen hammaddenin neden yüksek sıcaklıkta olduğu da (ısı değiştirici arızası sonucu yüksek sıcaklıkta beslenmesi, operatör yüksek sıcaklıktaki ürün vanasını açması/operatör hatası vb.) sapmanın kök nedenleridir. Bunların yanı sıra; dış etmenler de parametre sapmasına neden olabilmektedir. İklimdeki ani değişiklikler (şiddetli yağmur, rüzgâr, sıcaklığın ani ve aşırı yükselmesi vb.), yangın, deprem gibi doğa olayları sapmayı tetikleyecek dış etmenlerdendir. Proses parametrelerindeki sapmaların önlenemediği durumlarda öncelikle işletim kontrol dışına çıkacaktır ki bu durum bütünlük kaybı olarak adlandırılmaktadır [13]. Bütünlük kaybına yol açabilecek olası sonuçlar ise; faz değişimleri, kimyasal karakterlerdeki değişiklikler, sıcaklık kaynaklı iç basınç artışı gibi durumlardır.

Bütünlük kaybı sonrası çevreye yayılan tehlikeli kimyasalın özelliğine göre patlama, yangın ya da toksik yayılım olarak nitelendirilen büyük endüstriyel kazalara yol açacaktır. Elbette ki bir tesiste işletim faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yürütülmemesi ve kazaların yaşanması istenmeyen bir olaydır. Bu istenmeyen olayları önlemenin yolu da işletim kontrolünü güvenli bir şekilde yürütmekten geçmektedir. Güvenlik Yönetim Sistemi'nin 3. maddesinde de işletim kontrolünün ne kadar önemli ve elzem olduğu vurgulanmaktadır.

Sapmaların önlenmesi için öncelikle sapmanın yaşandığını fark etmek gerekmektedir ki bunun için de proses parametreleri düzenli olarak ölçülerek izlenmesi parametrelerde değişimin olup olmadığı belirlenmelidir. Ardından tespit edilen sapma, sisteme ya da onu kontrol altına alacak ilgili kişiye sinyal (alarm) vasıtasıyla bildirilmektedir. Alınan sinyal neticesinde sistem ya da ilgili kişi devreye girerek sapmaya neden olan olay ortadan kaldırılmakta ve proses parametreleri limit değerlerine geri çekilmektedir. Sapmanın yaşandığı andan itibaren hızlı bir şekilde yürütülen bu mekanizma 'Temel Proses Kontrol Sistemleri (Basic Process Control System- BPCS)' ile yapılmaktadır [13]. Örnek üzerinden 'Temel Proses Kontrol Sistemleri'nin çalışma yaklaşımını Bölüm 2.2.1'de açıklanmıştır.

Temel Proses Kontrol Sistemlerinin sapmayı önleme ya da kontrol altına alma konusunda yetersiz kaldığı durumda, diğer parametrelerin de sapmasına yol açarak yaşanan tüm

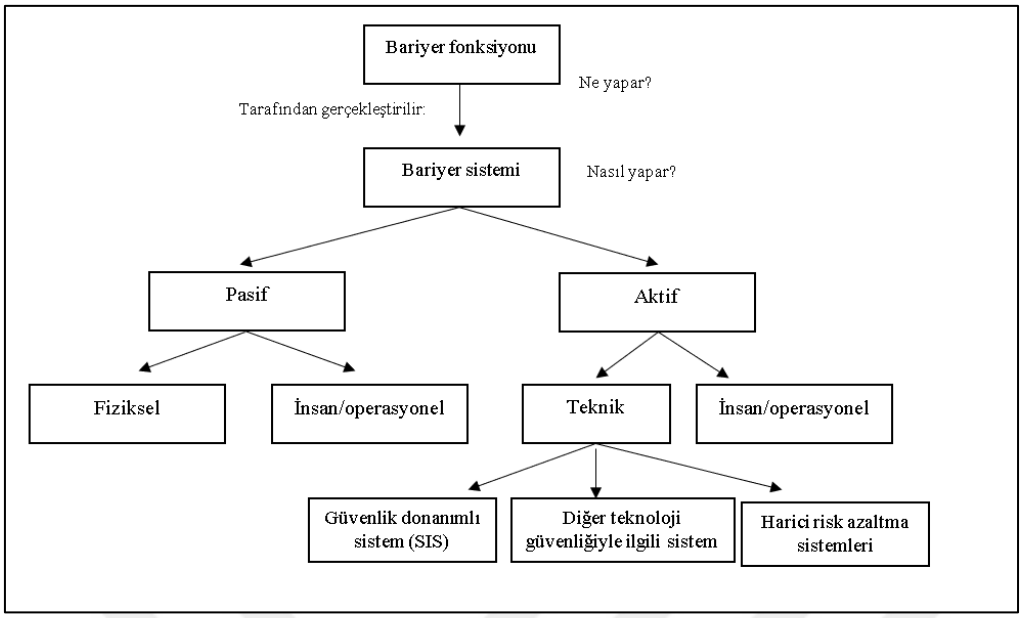
sapmalar birbirlerini tetikleyip bütünlük kaybına yol açacaktır. Aynı örnek üzerinden gidecek olursak sıcaklık artışı kontrol altına alınamadığında, eğer hammadde gaz fazında ise kabın hacmi sınırlı olduğu için (ekipman kısıtlaması), hammadde sıvı fazında ise sıvının buharlaşmasına sebep olarak neticede reaktör iç basıncını artıracaktır. Bu noktaya gelindiğinde de işletimi kontrol altına almak mümkün olmayacaktır. Artık işletmenin, meydana gelecek kazayı önlemek ya da kazanın şiddetini azaltmayı sağlayacak sistemleri devreye alması gerekmektedir. Bu sistemlere de Güvenlik Donanımlı Sistemler (Safety Instrumented System – SIS) denmektedir [13].

Güvenlik Donanımlı Sistemler; tesiste meydana gelebilecek istenmeyen olayları engellemek, olayların meydana gelmesi durumunda kontrol altına almak ve etkisini azaltmak için planlanan fiziksel ve/veya fiziksel olmayan araçlardan oluşan sistemlerdir. Bu sistemlerin çalışma yaklaşımı şu şekildedir: prosesteki tehlikenin riske dönüşmeye yaklaştığı durum fark edilir ve risk engellenir, engellenemediği durumlarda ise riskin şiddetini azaltmak için kontrol eylemleri devreye alınır. Buradaki kontrol eylemlerinden kasıt ‘güvenlik bariyerleri’dir [13]. Örnek üzerinden ‘güvenlik bariyerleri’nin uygulaması Bölüm 2.2.1’de açıklanmıştır.

Güvenlik bariyerleri temel proses kontrol sistemleri ile benzer olmakla birlikte temel farklılık; güvenlik bariyerleri ile prosesteki potansiyel riskin ölçülmesidir. Artık yaşanan sapma işletim kontrolünün kaybedilmesine yol açmış ve proses kazasına sebep olacağı için bu aşamada olası risk(ler) ölçülerek fark edilir ve ardından kazayı önlemek ve/veya etkisini azaltmak için gerekli önleme çalışmaları yürütülür.

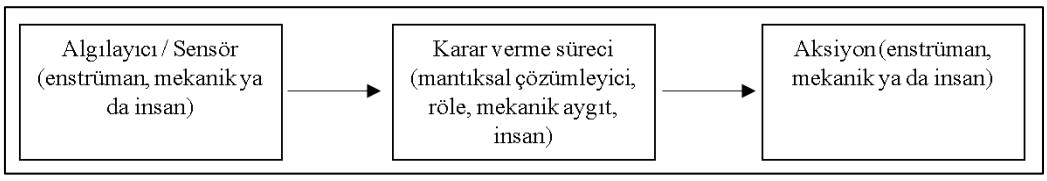
Bariyer kavramını örnek ile açıklamak için tehlikeli kimyasal bulunduran bir tankı ele alalım. Besleme operasyonu sırasında tank seviyesinin kontrolsüz bir şekilde yükselmesi sonucu tanktan kimyasalın taşması istenmeyen bir olaydır. Bu durumu önlemek için tankın besleme vanasının operatör tarafından manuel bir şekilde ya da otomasyon sistemleri tarafından otomatik olarak kapatılması bir bariyer sistemidir. Buradaki operatör, besleme vanası, otomasyon sistemi, bariyer sisteminin elemanlarıdır.

Bariyer sistemleri Şekil 2.1.’de gösterildiği gibi ‘aktif’ ve ‘pasif’ olarak sınıflandırılmaktadır [14].



Şekil 2.1. Güvenlik bariyerlerinin sınıflandırılması [14]

Genellikle fiziksel olan pasif bariyerler (toplama havuzu, güvenlik duvarları) sürekli olarak çalışmaktadır, etkinleştirilmesine gerek yoktur. Örneğin toplama havuzu(dayk) tank dibinde var olarak aslında olası taşma tehlikesine karşı sürekli çalışmaktadır. Ancak aktif bariyerler proses parametrelerindeki herhangi bir değişikliğe yanıt olarak devreye girmekte ve bu sebeple çalışması için etkinleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Aktif bariyerlerde bir algılayıcı (sensör) vasıtasıyla değişiklik algılandıktan sonra karar verme süreci başlamakta ve bunun sonucunda ilgili eylem ekipman veya insan yardımıyla gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.2.) [15].



Şekil 2.2. Aktif bariyerlerin temel bileşenleri [15]

Güvenlik bariyerlerinden otomasyon sistemlerine örnek vermek gerekirse; sahada yaygın bir şekilde uygulaması olan ve otomatik koruma sağlayan ‘trip sistemi(trip)’ proseste herhangi bir sebepten kaynaklı yaşanan operasyonel başarısızlığa bağlı proses kazasına engel olmak amacıyla tam koruma sağlamak için tesisin tamamının veya bir bölümünün kapatılmasıdır. ‘Acil Kapatma/Durdurma Sistemleri’ (Emergency shut down-ESD) ve İnterlok(interlock)'

sistemi de trip sistemine benzerdir. Bir örnek ile kilit sistemlerinin çalışma şekli üzerine konuşulursa; ceketten soğutma suyu geçen, a ve b kimyasallarının tanktan beslendiği bir batch reaktör prosesi ele alınsın. Reaktör içinde karıştırıcı vasıtasıyla kimyasallar karıştırılarak reaksiyon gerçekleşmekte ve operasyonun belirli bir anında karıştırıcının çalışmama durumunda yukarda sayılan otomatik koruma sistemi (Interlok, Trip, ESD sistemi) devreye girerek reaktöre ürün besleyen vanayı durdurmakta ve böylece reaktör içinde biriken tehlikeli kimyasallardan kaynaklı istenmeyen sonuçlar engellenmektedir [13].

Güvenlik bariyerlerinden yüksek performans elde etmek için yaşanacak çeşitli olası kaza senaryolarına karşı bariyerlerin etkin, mekanik olarak dayanıklı, ihtiyaç duyulduğu anda hızlı yanıt vermesi (aktive olması) ve güvenilir olması gerekmektedir. Ancak burada yüksek performans için en önemli etmen kuşkusuz bariyerlerin birbirinden bağımsız olmasıdır. Bariyerlerin bağımsız olması; bariyerlere ihtiyaç duyulduğu anda bir bariyer devre dışı oluyorsa diğer bariyerin görevini yerine getirebilmesi/devre dışı olmaması demektir. Bunu sağlamak için ise bariyerlerin ortak nedenli bir hata (common cause failure-CCF) durumundan etkilenmeyecek şekilde tasarımının ve kurulumunun yapılması gerekmektedir. Bariyerlerin bağımsız olması ve ortak nedenli hata kavramlarını şu örnekle açıklayabiliriz: Proseste yaşanan ani sıcaklık artışı sonucu sapmanın nedenleri tespit edilerek yağmurlama (sprinkler) sistemi devreye alınması gerektiği kararına varılmakta ancak proseste, aynı elektrik sistemine bağlı olan birden fazla sprinkler sistemleri mevcuttur. Bu durumda sprinkler sistemi devreye alınmak istendiği anda elektrik kesintisi yaşanma ihtimaline karşı proses bu başarısızlığı tolere edemeyecektir. Elektrik kesildiğinde tüm sprinkler sistemleri aynı elektrik sisteminden beslendiğinden devreye alınamayacaktır. Başka bir örnekte, reaktör içini soğutmakla görevli yedekli ısı değiştiricileri aynı reaktör besleme vanasını bağlı bir şeklide kurulumu yapılmış olsun. Proseste reaktöre soğuk su besleme vanasında yaşanan ani arıza (vananın tıkanması, vananın hata vermesi vb.) sonucu ısı değiştiriciden soğutma suyu reaktöre beslenememekte ve yedek ısı değiştiricisi devreye alınmak istenmektedir. Ancak yedek ekipman da aynı vanaya bağlı olduğu için ‘ortak nedenli hata (vananın arızası)’ sebebiyle devre dışı kalacaktır. Her iki örnekte de vurgulanan aslında proseste uygun bariyerlerin seçiminin önemli olduğu kadar bu bariyerlerin yaşanacak herhangi bir ortak nedenli arızadan etkilenmeyecek şekilde birbirinden bağımsız olarak çalışıyor olması da çok önemlidir. Ayrıca bariyerlerin bağımsız olmasına ek olarak bir bariyerin ihtiyaç duyulduğu anda etkili bir şekilde görev yapması yani talep edildiği anda arızalanma (failure on demand)ması da bariyerden etkili bir performans almak için gereken özelliklerdendir.

Herhangi bir tesiste uygulanan risk değerlendirme yöntemlerinin (özellikle LOPA) ardından belirlenen bariyerlerin seçimleri de bu bilgiler göz önüne alınarak yapılması gerekmektedir [13, 15].

2.2.1. Kontrol sistemleri ve bariyerlerin kurulması yaklaşımı

Kimyasal süreçlerde proses güvenliğinin sağlamanın yolu işletimin kontrolünden geçtiği daha önceki bölümlerde vurgulanmıştır. İşletimin kontrolü ise kontrol sistemleri aracılığıyla parametrelerde sapmaları tespit ederek parametreyi çalışma aralığına geri çekilmesini sağlamaktır. Örnek üzerinden 'temel proses kontrol sistemleri'nin çalışma yaklaşımını açıklamak gerekirse reaktör çıkış akımındaki sıcaklık parametresinde yaşanan bir sapmayı ele alalım.

- Reaktör çıkışında sıcaklık artışı veya azalması ilk olarak izleme-ölçme ekipmanları (sıcaklık ölçer, transmiter vb.) aracılığıyla tespit edilir ve böylece sıcaklık parametresindeki sapma fark edilir.
- Kontrol odasına ya da sahadaki operatöre sinyal (alarm) verilir.
- Kontrol odasındaki proses kontrol ünitesi ya da sahadaki operatör sapmanın nedenini yani reaktör çıkış sıcaklığının değişmesine yol açan olayı araştırır. Besleme akımının sıcaklığındaki artış reaktör çıkış sıcaklığındaki artışın en etkili nedenlerinden biridir. Bunun dışında, şayet ekzotermik bir reaksiyonsa giriş akımın akış hızındaki artış, besleme miktarındaki artış reaksiyon hızını artırarak reaktör çıkış akımındaki sıcaklığın artmasına sebep olur. Endotermik bir reaksiyonda ise bu parametre tersi sapmaya yol açar.
- Tespit edilen sapmanın nedenine uygun müdahaleler yapılarak sapma ortadan kaldırılır. (Öncelikle besleme akımının sıcaklığındaki ya da akış hızındaki değişime neden olan olay tespit edilir. Isı değiştiricisinden çıkan sıcak akım sebebiyle reaktöre yüksek sıcaklıkta akım beslendiyse ısı değiştiricideki sapma incelenir. Isı değiştiricideki yardımcı akışkanın yetersiz kalması ya da yardımcı akışkanın sıcaklığındaki sapma sonucu ısı değiştiricide sıcak akım çıkışı yaşandıysa müdahale ısı değiştiricisinin yardımcı akışkanına yapılır.)
- Böylelikle işletimin kontrolü sağlanmış olur ve sapmanın bütünlük kaybına giden yolu önlenmiş olur (Yaşanan sapma, kazaya gidişi hızlı bir şekilde geliştiriyorsa, bu durumda sapma nedenini ortadan kaldırmak yerine kazayı önlemek/etkisini azaltmak için gerekli

aksiyonlar alınır. Örneğin, basınç artışı buharlaşma kaynaklı ise soğutma ile bütünlük kaybının önlenmesi veya tank içeriğinin artışı ile basınç rahatlatma vanasının devreye girmesi gibi.).

İşletimin kontrolünün sağlanamadığı yani sapmanın geri alınamadığı durumlarda proses parametresi uç değerlere (aşırı yüksek, aşırı düşük) ulaşarak bütünlük kaybına yol açar. Bütünlük kaybının meydana geldiği durumda artık güvenlik bariyerleri ile kazayı önlemeye ya da kazanın şiddetini azaltmaya yönelik aksiyonlar devreye alınır. Bütünlük kaybı sonucu çevreye yayılan tehlikeli kimyasalın tehlike kategorisine göre büyük endüstriyel kazalara (patlama, yangın ya da toksik yayılım) yol açması engellenmeye çalışılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda uygulanan 'güvenlik bariyerleri' aşağıdaki örnek üzerinden detaylı açıklanmıştır.

- Kap içi basıncının aşırı yükselmesine neden olan olay tespit edilir. (Depolama tankına yangın alevinin ulaşması ile meydana gelen sıcaklık artışının basıncı arttırması) Bu noktada kazaya giden yol çok hızlı gelişiyorsa, basıncın aşırı yükselmesinin nedenleri araştırılırken eş zamanlı olarak kazayı önlemek amaçlı uygun bariyerler devreye alınır.
- Olaya uygun güvenlik bariyerleri ile müdahale ederek basınç düşürülmeye çalışılır. (Örneğin basınç değişimi; faz değişimi(buharlaşma) kaynaklı ise yağmurlama sistemi ile sıcaklık düşürülüp yoğunlaşma sağlanır)
- Kimyasalın ani boşaltılarak kabın rahatlatılmasına yönelik bariyer uygulanıyorsa çevreye yayılan kimyasalın oluşturacağı riske göre (yangın, patlama, toksik yayılım) takip edecek kazaların önlenmesi ve şiddetinin düşürülmesi hedeflenerek yeni bariyerler devreye alınır (yanıcı bir kimyasal için tutuşturucu kaynağın ortamdan uzaklaştırılması, yanma olayına karşın hava ile temasının kesilmesi, toksik bir kimyasalın toksikliğinin sönümlendirilmesi vb.)
- Takip eden kazalar önlenemiyorsa bir sonraki basamak sahanın boşaltılması olacaktır.

Ekzotermik bir reaksiyonun gerçekleştiği reaktör içinde reaksiyonun gaz fazında olduğunu düşünelim. Sıcaklığın tasarım limitlerinin dışına çıkması sonucu reaktör iç basıncı ideal gaz yasası gereği sıcaklıkla orantılı olarak artacaktır. Eğer reaktör içinde sıvı fazda gerçekleşen bir reaksiyonun varlığı söz konusu ise, sıcaklığın artışı basınç parametresinin artışına yol açacak olan buharlaşma miktarını artıracaktır. Artan buharlaşma miktarı reaktör iç basıncın da artmasına sebep olacaktır. Her iki durumda da artan reaktör iç basıncının rahatlatılması

gereklidir ki, aksi takdirde aşırı iç basınç zamanla reaktörün zayıf yerlerini (bağlantı noktaları, ölçüm noktaları gibi) zorlayarak mekanik bütünlüğün bozulmasına yol açacaktır. Reaktör iç basıncı rahatlatmak (basıncı tekrar tasarım limit değerlerine çekmek) için en uygun bariyerler, basınç artışının hangi yolla meydana geldiği sorgulanarak seçilmektedir. Bu aşamada reaktör içindeki gaz ve sıvı fazda gerçekleşen reaksiyonları ayrı ayrı inceleyelim.

Eğer gaz fazındaki reaksiyonda gazın ısınması sonucu basınç artışı yaşandıysa basınç rahatlatma valfleri devreye girerek basınç düşürülebilir. Ancak buradaki önemli husus şudur ki, valf aracılığıyla atmosfere salınan gaz fazında kimyasal tehlike kategorisine göre yeni bir risk oluşturmaktadır (yanıcı, parlayıcı veya toksik etki). Valf aracılığıyla reaktördeki yüksek basınç giderileceği zaman eş zamanlı olarak doğacak yeni riskin şiddetini azaltacak uygun başka bariyerlerin (tutuşturucu kaynakların uzaklaştırılması gibi) de beraberinde uygulanması gerekmektedir. Ayrıca burada sıcaklık parametresindeki artışın reaktör içinde daha tehlikeli (özellikle toksik) ara bir ürünün oluşmasına yol açıp açmadığı konusu da incelenerek bariyerlerin bu neticede belirlenmesi de ihmal edilmemelidir. Ara bir ürünün oluşumu söz konusu ise, kimyasalın stokiyometrisine bağlı olarak reaktör içinde kimyasal yükün artmasına sebep olarak kazanın şiddetini artıracağından bariyerlerin bu nokta da ihmal edilmeden belirlenmesi gereklidir (Bölüm 2.3.1'de aktarılan Seveso kazasında olduğu gibi). Eğer sıvı fazdaki reaksiyonda kimyasalın ani buharlaşması kaynaklı basınç artışı meydana geldiyse yağmurlama sistemi (soğutma-sprinkler sistem) devreye alınarak yüksek miktardaki mevcut buhar yoğuşturularak iç basıncın düşmesini sağlamaktadır. Böylelikle ekipman içindeki tehlikeli kimyasal atmosfere verilmeden reaktör iç basınç düşürülerek ekipmanın mekanik bütünlüğü korunarak büyük endüstriyel kaza önlenir. Sprinkler sisteminin gazın soğutulmasında da etkili olduğu düşünülürse tehlikeli kimyasalı çevreye yaymadan ekipman içinde olası riski giderebildiği için bu gibi durumlarda valflerden daha önce tercih edilmesi önerilmektedir. Bu noktada izah edildiği üzere sapmanın hangi yollarla meydana geldiği incelenerek doğru güvenlik bariyeri tayin edilemezse, kazayı önlemeye çalışılırken başka bir kazaya sebebiyet verilebilir. Tüm bu önlemlere rağmen patlama, yangın veya toksik yayılım meydana gelirse artık alınabilecek tek önlem kişiye yönelik önlemlerdir (sahanın boşaltılarak olası etkinin/şiddetin düşürülmesi, kişisel koruyucu ekipmanların uygulanarak bireysel korumanın sağlanması).

2.3. Güvenlik Yönetim Sistemi (GYS)

2.3.1. Dünyada ve ülkemizde GYS'nin tarihsel gelişimi

Tehlikeli kimyasal bulunduran üretim tesislerindeki proses riskleri ilk günden itibaren mevcuttu ancak proses güvenliği bilincinin oluşmasında etkili olan kilit rol; yaşanan büyük endüstriyel kazalar olmuştur. 1974 yılında meydana gelen ve 28 kişinin hayatını kaybettiği Flixborough kazasında yaşanan felaketin ardından alınan önlemler ve benimsenen proses güvenliği yaklaşımı sayesinde proses risklerinde bir miktar azalmalar olmuştur. Ancak ilerleyen dönemde gerek prosesteki potansiyel risklerin öngörülememesi gerekse mevcut önlemlerin yetersiz kalması nedeniyle proses kazalarında yeniden artış gözlemlenmiştir [16]. Özellikle 1976 yılında İtalya'nın Milano kentinin Seveso kasabasında meydana gelen kaza kimyasal tesislerdeki risklerin önlenmesi adına hem tesis sorumluları hem de devlet yükümlülüğünde kesin adım atılması konusunda dönüm noktası olmuştur. Kazanın detayları aşağıdaki paragrafta açıklanmıştır.

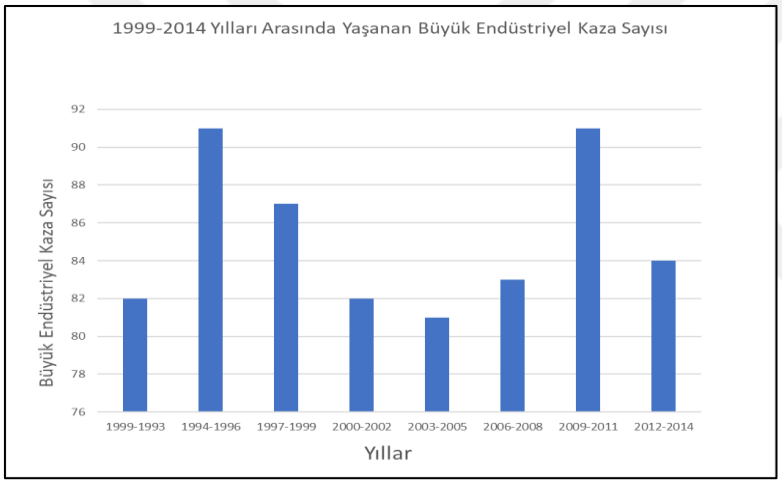
Seveso kasabasındaki ICMESA kimya firmasına ait fabrikada kesikli reaktörde bir bitki ilacı sentezinde kullanılan ve oldukça toksik madde olan 2,4,5-triklorofenol (TCP) üretilmektedir. Kaza günü vardiya bitiminde reaktör içinde mevcut kimyasallara rağmen hafta sonuna giriş yapıldığı için soğutma sistemi kapatılmış ve reaktör içinde ekzotermik bir reaksiyon meydana geldiği için reaktörde sıcaklık artışı devam etmiştir. Bu esnada yüksek sıcaklığın etkisiyle TCP kimyasalına ek olarak TCP'den çok daha tehlikeli bir yan ürün (2,3,7,8- tetraklorodibenzo-p-dioksin- TCDD) kimyasalı, reaksiyon stokiyometrisinden dolayı 10 kat fazla miktarda oluşmuştur. Reaktördeki kontrolsüz sıcaklık artışı reaktör iç basıncını artırmış, ilk bariyer olan basınç rahatlatma valfı reaktör iç basıncını rahatlatmak amacıyla tasarımcı tarafından set edilen basınç değerinde devreye girmiştir. Ancak basınç rahatlatma valfından atmosfere reaktördeki toksik TCDD kimyasalı yayılarak etkisinin yıllar sonra dahi görüldüğü büyük bir endüstriyel kaza yaşanmıştır [17].

Kaza analiz edilecek olursa; buradaki yapılan en büyük hata esasen güvenlik bariyeri olarak seçilen basınç rahatlatma valfının set değerinin yanlış tasarlanmasıdır. Valfın set değeri tasarlanırken reaktör içi sıcaklığın ulaşabileceği en yüksek değer ve yan ürün oluşma ihtimali göz önüne alınması gerekirdi. Sıcaklık değerlerinden yola çıkılarak doğru belirlenen basınç değerine göre valflerle yüksek basınç rahatlatılırdı ve böylece en azından TCDD

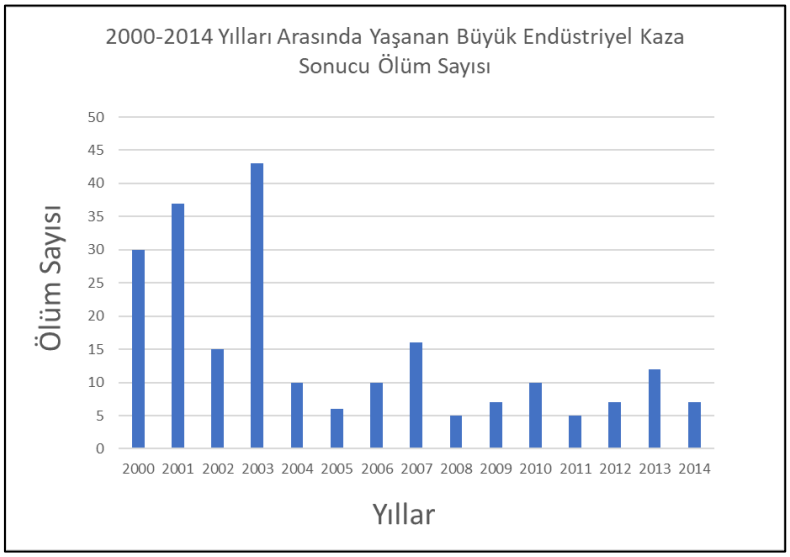
kimyasalının oluşumuna izin vermeden daha az toksik bir kimyasal (TCP) çevreye yayılabilirdi. Bu noktada valflerden çevreye kimyasal salınımı söz konusu olduğu için valfler yerine yağmurlama sisteminin uygulanması çok daha güvenli bir bariyer seçimi olacaktı. Yaşanan sapma sıcaklık kaynaklı olduğu için yağmurlama sistemi sayesinde reaktör içi yüksek sıcaklık ve basınç düşürülebilirdi. Sıcaklık düştüğündeyse oluşan buhar bulutu yoğuştuğu için etki alanı tüm kasabadan ziyade sadece tesis içini kapsayabilirdi. Böylece en azından kazanın etki alanı ve şiddet düzeyi çok daha düşük olabilirdi.

Bu vahim kaza başta İtalya olmak üzere tüm Avrupa'da kimyasal üretim tesislerindeki tehlikelere ve tehlikelerin doğuracağı risklere karşı çok önemli bir bilinç oluşturmuştur. SEVESO kazasının ardından 1982 yılında Avrupa Ekonomik Topluluğunda yer alan proses endüstrileri için endüstriyel kazaların engellenmesi ve gerekli önlemlerin alınmasına yönelik hazırlanmış olan Seveso Direktifi 82/501/EEC (SEVESO I) kabul edilmiştir. Bu direktif proses güvenliği alanında Avrupa'daki birçok mevzuatın temelini oluşturmuştur [17]. Beraberinde tesisin mevcut tehlikelerine karşı güvenli bir şekilde işletilmesi için yürütülmesi gereken faaliyetleri ifade eden "Proses Güvenliği Yönetimi" kavramı, 1992 yılında yayınlanan Amerika Birleşik Devletleri İş Güvenliği ve Sağlığı İdaresi (OSHA) 29 CFR 1910.119 sayılı "Tehlikeli Kimyasalların Proses Güvenlik Yönetimi" standardı ile yaygın bir şekilde kullanılmıştır. [18]. Seveso I Direktifi'nin ardından 1984 yılında Bhopal'de, Union Carbide Corporation isimli pestisit üreten fabrikada metil izosiyanat depolama tankına su sızmasıyla birlikte ekzotermik reaksiyon meydana gelmiştir. Tank içi sıcaklık artarak tahliye vanalarından atmosfere 40 ton MIC yayılarak çevre halk dakikalar içerisinde görme bozuklukları ve körlük, solunum güçlüğü şeklinde etkilenmiş ve oldukça yüksek oranda ölüm ile sonuçlanmıştır. Kaza sonrası yapılan araştırmalarda, kazadan önce suyun tahliyesi için gerekli vanaların kapalı olduğu, tanktaki soğutma sisteminin devre dışı kaldığı ve aylarca devreye alınmadan çalışıldığı, tankların maksimum dolum oranında doldurulduğu şeklinde pek çok güvenlik zafiyeti belirlenmiştir. Bhopal'de ve diğer işletmelerde yaşanmaya devam eden büyük endüstriyel kazaların %85'inin yönetim sistemi eksikliği sebebiyle meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu tespitin ardından SEVESO II Direktifi yayımlanarak hem tehlikeleri kimyasalların sınıflandırılması yapılmış hem de proses güvenliğine dair bir yönetim sistemi uygulaması için gereklilikler belirlenmiştir. Ardından yaşanan kazalar da değerlendirilerek hem kimyasalların hem de sorumlu olan işletmelerin kapsamlarının genişletilmesi gibi değişiklikler yapılarak SEVESO III 2012/18 / EU Direktifi güncel halini almıştır [19].

SEVESO I direktifinden sonra Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi Büyük Kaza Tehlikesi Bürosu (Major Accident Hazard Bureau of the Joint Research Centre of the European Commission) tarafından veri tabanı analiz çalışmaları yapılmıştır. Üye devletlerden alınan bilgiler ışığında gelişen teknolojiyle birlikte kimyasal üretim tesislerinin sayısı arttığı bilgisi de göz önünde bulundurulduğunda Şekil 2.3.'te de gösterildiği gibi büyük endüstriyel kazaların sayısının sabit kaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde kaza sonucu ölüm sayısının da azaldığı Şekil 2.4.'te gösterilmektedir. Özellikle 1992 yılında "Tehlikeli Kimyasalların Proses Güvenlik Yönetimi" standardının uygulamaya girmesiyle birlikte sektörde artan proses güvenliği algısı ve insan hatasının azalması kaza sayısının da önemli ölçüde azalmasını sağlamıştır [9].



Şekil 2.3. 1991-2014 yılları arasında yaşanan büyük endüstriyel kazaların sayısı [9]



Şekil 2.4. 2000-2014 arasında yaşanan büyük endüstriyel kazalardaki ölüm sayısı [9]

Ülkemizde ise; Seveso direktifleri dikkate alınarak tehlikeli maddeler bulunduran kuruluşlarda büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve muhtemel kazaların insanlara ve çevreye olan zararlarının en aza indirilmesi amacıyla alınması gereken önlemler ile ilgili usul ve esaslar 2019 tarih ve 30702 sayılı 'Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik' ile belirlenmektedir [3].

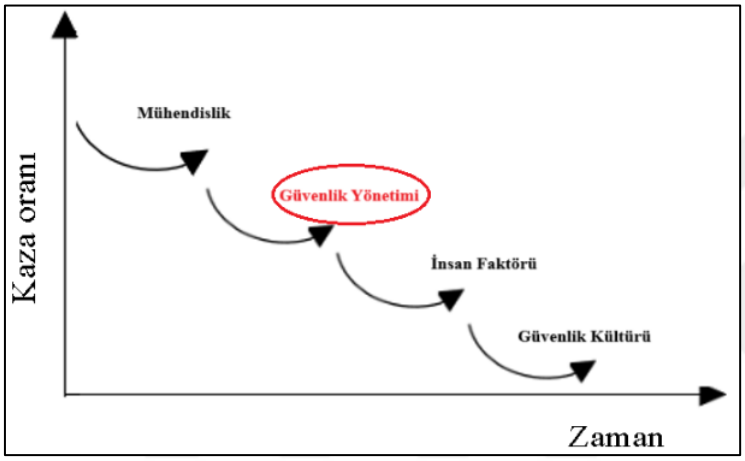
Yönetmelikte tehlikeli madde bulunduran kuruluşlar alt seviyeli ve üst seviyeli olarak sınıflandırılmakla birlikte Yönetmeliğin Ek'inde verilen tehlikeli madde listelerinde belirtilen eşik değerine göre belirlenmektedir. Üst seviyeli kuruluşlarda GYS kurulması yasal zorunluluk olmakla birlikte alt seviyeli kuruluşların veya alt seviyeli kuruluş olmayan kimyasal üretim tesislerinin de uygulaması zorunlu tutulmamakta ancak proses güvenliğinin etkili bir şekilde sağlanması ve sürekliliği açısından GYS'nin kurulması konusu oldukça önemlidir [3]. Dünya genelinde bu sistem "Proses Güvenlik Yönetim Sistemi" olarak adlandırılırken Yönetmelik ile ülkemizde "Güvenlik Yönetim Sistemi" adı altında uygulanmaktadır.

2.3.2. GYS varlığı ve unsurları

GYS, tehlikeli kimyasal bulunduran proseslerde büyük endüstriyel kazalara sebebiyet vermemek için kayıp önleme politikası benimsenerek proses risklerinin sağlıklı bir şekilde yönetimi için sistematik ve kapsamlı bir düzenlemedir [4]. Kayıp önleme politikası; prosese özgü tehlikelerin belirlenip yaratacağı riskler doğru bir şekilde değerlendirilerek gerekli önlemlerin alınması, tesis personelleri tarafından güvenlik kültürü bilincinin oluşturulması, olası kazalar yaşandığında uygulanacak acil durum planlarının hazırlanması, düzenli denetimlerin yapılarak gerekli iyileştirmelerin saptanması faaliyetlerini içermektedir.

Güvenlik kültürü; kuruluştaki tüm çalışanların proses güvenliğinin devamlılığını sağlamak için yapılması gerekenleri doğru bir şekilde uygulama istekleri olarak tanımlanmaktadır [20]. Güvenlik kültürü potansiyel riski azaltmak, mümkünse kazaları ortadan kaldırmak veya önlenemediği durumlarda kaza sıklıklarını düşürmek için kilit bir unsur olarak görülmektedir. Etkili bir GYS için kuruluştaki tüm çalışanlar tarafından benimsenen proses güvenliği kültürü oluşması şarttır [21].

Proses güvenliğinin zayıf olduğu işletmelerde mevcut kaza risklerini ve sıklıklarını azaltmak için işletmelerin ilk yaklaşımları mühendislik tasarımları olmuştur. Ancak sadece güvenli ekipman ve tesis tasarımı ömür boyu güvenli tesis işletimini sağlamamaktadır. Bu farkındalığın gelişmesiyle birlikte işletmelerin odak noktası 'güvenlik yönetimi' ve 'güvenlik kültürü' olmuştur. Tek yönlü mühendislik iyileştirilmesi ile proses kazalarını azaltmanın mümkün olmadığı aksine daha güvenli tasarımlara ek daha güvenli tesis için 'güvenlik yönetimi', 'güvenlik kültürü' ve 'insan faktörü' nün çok yönlü uygulamalarıyla proses kazalarının önlenebileceği anlaşılmıştır (Şekil 2.5.'te gösterilmiştir) [21].



Şekil 2.5. Proses kaza oranlarının azalması için uygulanan endüstri yaklaşımı [21]

GYS, bir işletmenin yalnızca istenilen spesifikasyonda ve kalitede üretim yapma güdüsünden sıyrılarak prosesin insan, çevre ve maliyet açısından güvenli işletilmesi gerekliliğini ortaya koyan bütüncül bir sistemdir. Temel amacı, proaktif (önleyici) bir yaklaşımla prosesin tehlikelerinin saptanması, değerlendirilmesi ve yanıcı, patlayıcı veya toksik özellikteki kimyasalların bulunduğu kabın mekanik bütünlüğünü kaybetmesine sebep olarak çevreye yayılımını ve insana, çevreye vereceği maddi manevi hasarı risk değerlendirme yöntemleri ve güvenlik kültürü bilinciyle yürütülen organizasyonel faaliyetleri ile önlemektir [22]. İşletmedeki her birim tarafından prosesin ve risklerin gerekliliklerini kapsayacak şekilde uygulandığında potansiyel kazaları önleyebilecek bir düzenlemedir [23]. Proses güvenliğini sağlamak hedefiyle belirlenen GYS çalışmaları tesis işletmeye alındığı andan itibaren tesiste bulunan tüm tesis çalışanlarının yanı sıra alt yüklenici çalışanları ve ziyaretçileri kapsamaktadır.

2.3.3. Dünyada GYS uygulamaları

OSHA tarafından yayımlanan "Tehlikeli Kimyasallar için Proses Güvenliği Yönetimi" standardının temel amacı, proseste belirli bir değerin üzerinde bulunan yüksek derecede tehlikeli kimyasalların yol açtığı yangın, patlama ve kimyasal toksik salınım gibi olayların sıklığını azaltmak ve güvenli bir şekilde proses içinde yönetimi için teknik ve organizasyonel yaklaşımını belirlemektir [24]. Özellikle Bhopal kazasından (1985) sonra benzer büyük endüstriyel kazaları önlemek için geliştirilen 'Proses Güvenliği Yönetimi (process safety management-PSM)' standardı 14 ana maddeden oluşmaktadır: çalışan katılımı, proses güvenliği bilgisi, proses tehlike analizi, işletim prosedürleri, eğitim, yükleniciler, devreye alma öncesi güvenlik incelemesi, mekanik bütünlük, sıcak çalışma izinleri, değişiklik yönetimi, olay araştırmaları, acil durum planlaması ve müdahalesi, denetimler ve ticari sırlar'dır. Tehlikeli kimyasalın yol açacağı proses kazalarının öncelikle önlemek, sonrasında büyüklüğünü ve sıklığını azaltmak hedefinde olan bu yönetim sistemini ve yükümlülüklerini anlamak için her bir maddesi aşağıda açıklanmıştır [8].

'Çalışan katılımı', tehlikeli kimyasal bulunduran tesisteki tüm çalışanların bu sürece katılımını gerektirmektedir. Prosesin tehlikelerini ve risklerini tanımak, güvenlik kültürü ve bilinci oluşturmak gerekli önlemleri almak için atılacak ilk adımdır. Tehlikelerin anlaşılması ve tanımlanması için proses akış şemaları, proses kimyası ve proses sınırlamaları, proses sapmaları ve sonuçları gibi 'proses güvenliği bilgileri' derlenmesi ve tüm çalışanlara sunulması gerekmektedir. 'Proses tehlike analizi (PHA)' ile prosese hâkim mühendisler, kimyagerler, operatörler ve deneyimli uzmanlar tarafından prosesin karmaşıklığına uygun bir yöntem seçilerek tehlike ve risk analizleri yapılması ve prosesin mevcut riskleri bertaraf etmek ve/veya etkilerini azaltmak için aksiyon planları belirlenmesi gereklidir. Tesisin güvenli çalışmasını kolaylaştıran proses güvenlik bilgileriyle tutarlı 'işletim prosedürleri' belgelenmelidir. İlk başlatma, normal/geçiçi işlemler, acil durumda kapatma gibi prosedürler; proses limitlerini ve sapmaların sonuçlarını, güvenlik ve sağlık hususlarını, kimyasalların tehlikeli özelliklerini, maruz kalma durumunda alınması gereken önlemleri, mühendislik ve idari kontrolleri, güvenlik kontrol sistemleri ve fonksiyonları vb. bilgileri içermelidir. Etkili bir 'eğitim' programı çalışanların prosese ve üstlendikleri göreve ilişkili tehlikeleri anlamalarına yardımcı olmaktadır. Prosesin herhangi bir aşamasında görevlendirilen 'yükleniciler'in tesiste herhangi bir kazaya sebebiyet verebilme ihtimallerine karşın görevlerini tesis çalışanları kadar güvenli bir şekilde yerine getirmeleri için hem

yaptıkları işin tehlikelerine hem de gerekli önlemlere ve acil durumlarda alınacak aksiyonlara yönelik eğitilmeleri gereklidir. Yükleniciler seçilirken dahi göreve uygunluğuna ek olarak proses güvenliği performansı göz önünde bulundurulması gereklidir. 'Devreye alma öncesi güvenlik incelemesi' proseste veya çalıştırma koşullarına yapılan bir değişiklikten sonra yürütülen özel bir güvenlik incelemesidir. Bu incelemeden sorumlu ekip; sistemin tasarıma ve yapılan risk analizlerine uygun olarak inşa edilmesini, güvenlik, bakım, çalıştırma ve acil durum prosedürlerinin uygulanmasını uygun eğitimin tamamlanmasını sağlamaktadır. 'Mekanik bütünlük' maddesinde ekipman, boru tesisatı, tahliye sistemleri, kontroller ve alarmların mekanik olarak sağlam ve çalışır durumda olup olmadığı değerlendirilmektedir. Ekipmanın kullanım ömrünün tespiti, yenileme/değiştirme ihtiyacının belirlenmesi mekanik bütünlük programları ile veya ekipmanın tasarım standartları ve maruz kaldığı risk seviyesine uygun olarak muayenesinin yapılması ile tespit edilebilmektedir. 'Sıcak çalışma izinleri' sıcak çalışma aktivitelerini (kaynak, taşlama veya kıvılcım üreten ekipman kullanma) gerçekleştirmeden önce herhangi bir tehlike ve risk teşkil etmeden prosedürlere uygun ve güvenli bir şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. PSM standardının 'değişim yönetimi' maddesi; proses kimyası, proses ekipmanı ve işletim prosedürlerindeki değişiklikleri güvenli bir şekilde yönetmek için bir değişiklik meydana gelmeden önce operasyonun güvenliğini etkilemeyeceğinden emin olmak için yürütülen faaliyetleri içermektedir. Değişiklikler yapıldıktan sonra değişiklikten etkilenen tüm çalışanlar mevcut durum ve riskler hakkında eğitilmeli ve devreye alma öncesi bir inceleme de yapılmalıdır. PSM standardı 'olay soruşturması'nı zorunlu kılmaktadır. İşverenler 48 saat içinde büyük bir salınım veya kazaya neden olmuş tüm olayları araştırmalı ve soruşturmanın ardından gerekli soruşturma önerilerine uygun şekilde aksiyonlar alınmalıdır. Standardın bir diğer maddesi olan 'Acil durum planlaması ve müdahalesi'nin amacı, işverenlerin son derece tehlikeli kimyasalların salınması durumuna etkili bir şekilde hazır olmalarını sağlamaktır. Standardın 'denetimler' bölümünde işverenlerin, tesisin standarda uygunluklarını en az üç yılda bir değerlendirmeleri gerektiği belirtilmektedir. Standardın 'ticari sırlar' bölümünde ise, yüklenici faaliyetlerinin doğuracağı tehlike ve riskleri en aza indirgemek amacıyla tüm yüklenicilere prosesin güvenli bir şekilde işletimine ilişkin bilgilerin verilmesi vurgulanmaktadır [8, 25].

Ayrıca Amerika Kimya Mühendisliği Enstitüsü (American Institute of Chemical Engineers-AIChE) tarafından da risk tabanlı 20 elementli bir proses güvenliği modeli geliştirilmiştir. OSHA tarafından hazırlanan standardın bazı maddeleriyle ortak olmakla birlikte bu modelin

maddeleri; güvenlik kültürü, yasal gereklilik ve standartlara uyum, proses güvenliği yetkinliği, çalışanın katılımı, paydaşların bilgilendirilmesi, proses bilgi birikim yönetimi, tehlike tanımlama ve risk analizi, işletme prosedürleri, güvenli çalışma pratikleri, tesis bütünlüğü ve güvenilirliği, yüklenici yönetimi, eğitim ve performans güvencesi, değişiklik yönetimi, işletmesel hazır olma, operasyonların yürütülmesi, acil durum yönetimi, kaza olay araştırma, ölçümler ve metrikler, denetleme, yönetimin gözden geçirmesidir [8, 25].

Ayrıca Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Kurumu (United States Environmental Protection Agency - EPA) tarafından da 20 Haziran 1996'da 11 maddeden oluşan Risk Yönetim Planı (Risk Management Plan-RMP) yayımlanmıştır. PSM düzenlemesine benzer olmasına rağmen RMP Standardı birçok açıdan saha dışındaki insanları ve çevreyi korumak için tasarlanmıştır ve bu iki standardın karşılaştırılması da Çizelge 2.1'de verilmiştir [8].

Çizelge 2.1. Proses Güvenliği Yönetimi (PSM) ve Risk Yönetim Planı (RMP) modellerinin karşılaştırılması [8]

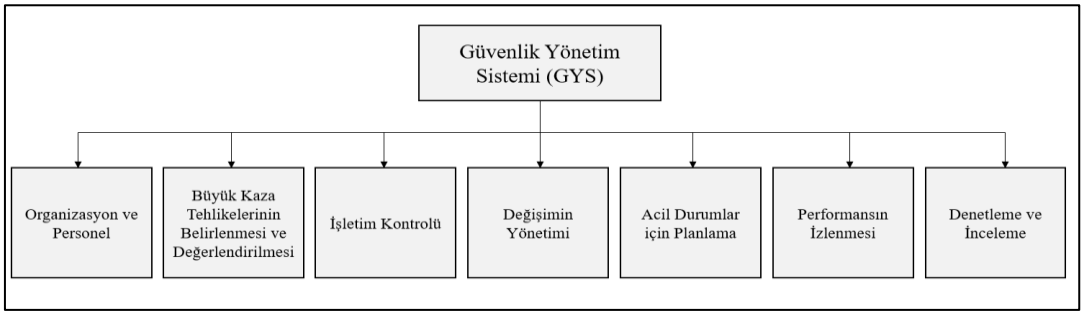
Proses Güvenliği Yönetimi (PSM)	Risk Yönetim Planı (RMP)
Proses güvenliği bilgisi	Proses güvenliği bilgisi
Proses tehlike analizi	Tehlike değerlendirmesi
Operasyonel prosedürler	Standart operasyonel prosedürler
Çalışanların katılımı	Karşılığı/eşdeğeri yok
Eğitim	Eğitim
Alt yükleniciler	Karşılığı/eşdeğeri yok
Başlatma öncesi inceleme	Başlatma öncesi inceleme
Mekanik bütünlük	Bakım
Sıcak çalışma izni	Karşılığı/eşdeğeri yok
Değişimin yönetimi	Değişimin yönetimi
Kaza araştırmaları	Kaza araştırmaları
Acil durum planlaması ve müdahale	Acil müdahale
Uygunluk denetimleri	Güvenlik denetimleri
Ticari sırlar	Karşılığı/eşdeğeri yok
Karşılığı/eşdeğeri yok	Risk değerlendirmesi

Bu standartlar haricinde çeşitli kuruluşlar (ILO vb.) tarafından yayımlanan ve birçok işletme tarafından da uygulamada olan proses güvenliği standartları da mevcuttur [8].

2.3.4. Türkiye'de GYS uygulaması

Ülkemizde ise 'Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik' ile GYS yedi unsur çerçevesinde ele alınmıştır; organizasyon ve personel, büyük kaza tehlikelerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi, işletim kontrolü, değişimin yönetimi, acil durumlar için planlama, performansın izlenmesi, denetleme ve

incelemedir (Şekil 2.6.). Yönetmelik baz alınarak her bir unsurun önemi aşağıda anlatılmaktadır [3,4].



Şekil 2.6. Yönetmelik'e göre GYS'nin yedi unsuru [3]

'Organizasyon ve personel' unsuru ile tesiste mevcut tehlikelerin doğuracağı olası risklerin önlenmesinde görev alan alt yükleniciler de dahil olmak üzere tüm düzeydeki personelin sorumlulukları belirlenerek tesiste güvenlik kültürünün oluşması sağlanmaktadır. Ek olarak mevcut olan tehlike ve risklere karşı gerekli önlemlerin alınmasına yönelik tüm personellere ilgili eğitimler verilerek bu konu hakkında bilinç oluşmasını desteklemektedir.

'Tehlikelerin belirlenmesi ve risk değerlendirmesi' unsuru; proseste depolanan, kullanılan, kimyasalların özelliklerinden kaynaklanan tehlikeler ve tehlikelerin sebep olacağı olası riskler sistematik bir şekilde değerlendirilerek öncelikle bertaraf edilmesi, risklerin bertaraf edilemediği durumlarda kontrol altına alınması, etkilerinin minimum düzeyde tutulması çabasıdır. Prosesteki kimyasal özelinde tehlike ve riskler farklı olacağı için tesisteki her personelin tehlike ve riskleri tanıması, uygun ölçme, kontrol ve güvenlik önlemlerini bilerek zamanında, doğru bir şekilde uygulaması böylelikle kuruluşun prosesi işletirken güvenli tarafta kalması adına bu unsur oldukça önemlidir.

'İşletim kontrolü' unsuru; proseste var olan tehlikeli kimyasalların yaratacağı olası risklere rağmen prosesin güvenli bir şekilde işletilmesini amaçlamaktadır. Kimyasal tesislerde proses parametrelerinin tasarlanan limit değerlerinde kalmasını sağlayarak operasyonel faaliyetleri yürütmektir. Proses parametreleri tasarım limitlerinden saptığı anda yaşanacak ilk problem tesisin üretmeyi hedeflediği ürünü istenilen spesifikasyonda ve verimde üretememesi olacaktır. Bu durum tesise maliyet ve imaj kaybı yaratsa da, asıl kayıp acil ve etkin bir müdahale edemeyip sapmayı durduramazsa ortaya çıkacaktır. Kontrol edilemeyen proses parametrelerindeki sapma sonucunda ekipmanda bütünlük kaybına yol açarak

tehlikeli kimyasalın özelliğine göre patlama, yangın ve toksik yayılım gibi büyük endüstriyel kazaya sebebiyet verebilecektir. Ancak ekipmanların bakım, onarım, yenisiyle değişim faaliyetleri doğru bir şekilde yürütülürse, yapılan değişiklikler parametrelerin limit değerlerini zorlamayacak şekilde uygulanırsa, ekipmanların konumu ve birbirine mesafesi gibi tesisin yerleşimi doğru bir şekilde yapılırsa, tesiste tehlikeli kimyasalın bulunduğu her aşamada olası risklere karşı güvenli işletim için organizasyonel bütünlük sağlanırsa proses tehlikelerini riske dönüştürmeden operasyonel faaliyetleri yürütmek mümkündür. Ek olarak bu unsur ile operasyonel faaliyetlerin güvenli bir şekilde yürütülmesine dair uygulama adımları dokümante edilerek işletmedeki tüm personellerin bu konu hakkında bilgi sahibi olması sağlanmaktadır.

‘Değişimin yönetimi’ unsuruyla tesiste geçici, kalıcı veya acil yapılan organizasyonel ve tasarım aşamasından operasyonel faaliyetlere kadar herhangi bir süreçte, proses, ekipman, kapasite, çevre koşullarındaki değişiklik gibi herhangi bir değişikliğin yeni güvenlik zafiyeti oluşturmaması adına değişiklik yapılmadan önce gerekli risk değerlendirme ve eğitim faaliyetlerinin planlanması önerilmektedir. Genel olarak ifade etmek gerekirse tesiste yapılan değişiklik faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yürütülmesini hedeflemektedir.

‘Acil durumlar için planlama’ unsurunda ise tesiste meydana gelebilecek yangın, patlama ve toksik yayılım gibi büyük endüstriyel kazayı önleme veya kazanın etkisinin azaltılmasına yönelik acil durum önlemlerinin belirlendiğini temin edecek bir acil durum planının hazırlanması gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca belirli aralıklarla tesiste meydana gelebilecek olası kaza senaryolar için tatbikatlar yapılarak hem tesis çalışanları açısından güvenlik bilinci oluşturulması gerektiği hem de prosesin olası kazalara karşı enstrümantasyon açısından hazırlığının yapılması gerektiği belirtilmektedir.

‘Performansın izlenmesi’ unsurunda GYS’nin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için proses bazında uygun hedeflerin belirlenmesi ve bu hedeflere uyumun takip edilip değerlendirilmesinden bahsetmektedir. Böylelikle tesiste kurulan GYS’ nin amacına uygun bir şekilde hizmet edip etmediği test edilebilmekte ve uygunsuzluk tespit edildiği durumda düzeltici faaliyetler ile sistem etkili hale getirilmektedir.

‘Denetleme ve inceleme’ unsurunda ise; tesiste yürütülen güvenlik performanslarının izlenmesi faaliyetleri dışında, GYS’nin sürekli iyileştirilmesi amacıyla periyodik olarak denetimi önerilmektedir.

Proses güvenliğinin işletmelerde etkili bir şekilde uygulanması ve sürekli iyileştirilmesi diğer yönetim sistemlerinde olduğu gibi performans ölçümleri ile sağlanmaktadır [23]. Her işletmenin kendi prosesine has organizasyonel faaliyetleri ve teşkil ettiği riskleri olduğu için tesise özel performans göstergelerinin belirlenmesi gereklidir. Ancak genel olarak belirlenecek performans göstergeleri etkin bir proses güvenliği için net bir zaman dilimini kapsayan anlamlı, hassas, ölçülebilir, doğrulanabilir ve uygulanabilir olmalıdır [3, 26]. Performans göstergelerinden bazıları; haftalık, aylık ve yıllık yapılan saha içi kontroller, denetimler, yapılan risk analizleri, yaşanan ramak kala olayların incelenmesi, bakım planlarının uygulanması, acil durum tatbikatları ve eğitim faaliyetleridir.

Proses güvenliği performans göstergeleri kimya endüstrisinde uygulanan bütünlük kaybının önlenmesi politikasının etkin bir şekilde yürütülmesine oldukça fazla katkı sağlamaktadır. Örneğin tehlikeli bir kimyasal işleten prosesteki pompa arızası, conta sızıntısı günlük yapılan kontroller ve saha denetimleri ile tespit edilip herhangi bir risk oluşturmadan önlemler alınabilmektedir. Benzer şekilde proseste tehlikeli kimyasal içeren kritik bir ekipmanın bakımının uygun bakım standartlarına göre doğru zamanda aksatılmadan yapılması, proseste ekipman değişikliğinin güvenli bir şekilde değişim yönetimi programına uygun olarak yürütülmesi gibi örnekler hem proses güvenliği performans göstergelerinin etkin bir şekilde uygulandığına hem de bütünlük kaybının önlenmesi politikasına uyulduğuna işaret etmektedir [3,27].

Büyük endüstriyel kazaların önlemek ve olası etkilerini minimum düzeyde tutabilmek amacıyla geliştirilmiş GYS; gerekliliklerine uygun bir şekilde uygulanmadığında, tesis çalışanlarında ve alt yüklenicilerde güvenlik kültürü bilinci tam anlamıyla sağlanamadığında elbette ki kazalar yaşanmaya devam edecektir. Yapılan araştırmalar neticesinde tehlikeli kimyasaldan kaynaklı proses kazalarının yaşanmasına en çok katkı sağlayan hatalar sırasıyla ‘işletim kontrolü’ ve ‘büyük kaza tehlikelerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi’ unsuruna ait faaliyetlerde yapılan hatalar olduğu ortaya çıkmıştır. Aynı araştırmada proses parametrelerindeki sapmaları kontrol altına almak için belirlenen güvenlik bariyerleri

sayesinde bir süreliğine kaza sıklıklarında düşüş görülse de genele bakıldığında bu iki unsura yönelik eksiklikler/hatalar nedeniyle yaşanan kazaların sıklığında artış görülmüştür [25].

'İşletimin kontrolü' unsuru ile proses parametrelerinde yaşanan sapmaları fark edip uygun kontrol sistemleri ve güvenlik bariyerleri sayesinde sapmaları geri alarak olağan işletme şartlarına geri dönme yöntemlerini sağlıklı bir şekilde yönetmek, 'büyük kaza tehlikelerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi' unsuru ile de sapmaların bütünlük kaybı ve kazaya götürecek yolu tanımlayıp önlemeye yönelik doğru bariyer seçmek amacıyla doğru bir değerlendirme çalışması yapılmaktadır. Bu değerlendirmelerin yürütüleceği en sağlıklı risk değerlendirme yöntemlerinden biri ise Hazop'tur ve Bölüm 2.4.3'te Hazop metodolojisi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Ek olarak bu iki unsur etkin bir şekilde uygulandığında olası riskler ve etkileri önceden bilineceğinden prosese uygun acil durum planlarının hazırlanması, prosesin ve yönetim sisteminin performansının değerlendirilmesi gibi GYS'nin diğer unsurları da verimli bir şekilde yönetileceği unutulmamalıdır.

2.4. Risk Değerlendirme Yöntemleri

Risk; istenmeyen kazaların meydana gelme olasılığını tahmin etme, sebep olunan zararın şiddeti ve bununla birlikte gelişen sonuçları göz önünde tutan bir süreçtir [8]. Riskin sayısal büyüklüğü; olasılık ve şiddetin çarpımı olduğu hatırlanırsa, yapılan bu hesaplama sonucunda mevcut durumdaki riskin kabul edilebilirlik düzeyi değerlendirilmektedir.

Buradaki olasılık; 'çok küçük' ifadesinden başlayarak 'çok büyük' ifadesine kadar derecelendirilmektedir. Şiddet ise benzer şekilde 'çok hafif' ifadesinden 'çok büyük' ifadesine kadar derecelendirilerek belirlenmektedir [2]. Riskin matematiksel ifadesi ve derecelendirilmesi iş sağlığı ve güvenliği gibi diğer yönetim sistemlerinde de örneklerle karşılığı bulunmakla birlikte büyük endüstriyel kazalar için risk; benzin tankının taşarak tutuşturucu kaynak ile buluşması sonucu patlama olayı, olasılık; benzin tankının taşma ihtimali, şiddet; tank alanındaki personelin ölümü, tankın kullanılamaz hale gelmesi, mali zarar olarak örneklendirilebilmektedir.

Risk analizi; olay sonuçlarının ve sıklıklarının tahminlerini birleştirmek için bir mühendislik değerlendirmesine ve matematiksel tekniklere dayalı nicel bir risk tahmininin geliştirilmesidir. Risk değerlendirmesi ise; göreli sıralaması yoluyla veya risk hedeflerini

karşılaştırma yoluyla risk azaltma stratejilerini belirlemek için risk analizinin irdelendiği süreçtir [8]. Risk değerlendirmesi; kuruluşta olağan işletme koşullarında insan, çevre ve ekonomik kayıplara neden olabilecek potansiyel risklerin tanımlanması, değerlendirilmesi ve risklerin azaltılması/ortadan kaldırılması için sistematik bir metodoloji sağlamaktadır. Ayrıca analiz edilerek derecelendirilen risklerin bertaraf edilmesi için gerekli kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması çalışmalarını barındırmaktadır. Risk değerlendirmesi sonucunda mevcut şartlar altında risk seviyesinin kabul edilebilir veya tolere edilebilir düzeyde olup olmadığını belirlemek ve risk seviyesini düşürülebilmek için kontrol ve güvenlik önlemleri belirlenmektedir. Uygun kontrol ve güvenlik önlemleri uygulanarak risk kaynağının ortadan kaldırılması, kazanın meydana gelme olasılığının büyüklüğünü düşürmeyi amaçlamaktadır.

Risk değerlendirme çalışmaları kalitatif ve kantitatif olmak üzere iki farklı yöntemlerle yürütülmektedir. Kalitatif (nitel) risk değerlendirme yöntemlerinde riskler daha çok önceliklendirilirken, kantitatif (nicel) risk değerlendirme yöntemlerinde ise olasılıklar ve sonuçlar sayısal değerler kullanılarak değerlendirilmektedir [28]. Risk değerlendirmesi Çizelge 2.2'de verilen adımlar izlenerek gerçekleştirilebilmektedir:

Çizelge 2.2. Risk değerlendirme adımları

Risk değerlendirme adımları	Örnekler
1-Tehlike analizi ile sahada mevcut tehlikelerin belirlenmesi	-Kimyasallar (yanıcı, parlayıcı, toksik özellikleri sebebiyle)
2- Mevcut tehlikelerin olası risklere hangi şartlarda (proses parametrelerinde sapma) yol açacağının değerlendirildiği risk analizi	-Yüksek sıcaklıkta beslenen hammaddenin (tetikleyici faktör) reaktörde yüksek basınç oluşturması sonucu reaktörün zayıf yerlerinden patlaması ve tehlikeli kimyasalın çevreye yayılması -Dış etkenler (meteorolojik şartlar sonucu reaktör çevresinde sıcaklık artışı)
3-Kabul edilebilir risk seviyesinin belirlenmesi	-Kalitatif/kantitatif yöntemlerle parametredeki sapma sonucu yaşanacak bütünlük kaybının ve kazanın meydana gelme olasılığının hesaplanması
4-Önlemlerin belirlenmesi ve sahada uygulanması	Reaktör iç basıncın rahatlatma vanası ya da sprinkler sistemi vasıtasıyla rahatlatılması

İlk adımda prosesteki en önemli tehlike olan kimyasalların tehlike kategorisine göre potansiyel etkileri ve tehlikeli kimyasalın bulunduğu ekipmanda sapmaya neden olma eğilimi gösteren fizikokimyasal özellikleri belirlenmektedir. Belirlenen mevcut tehlikelerin bazen tetikleyici faktörler bazen de dış etkenler sebebiyle proses parametresinde sapmaya yol açarak sonucunda doğuracağı olası riskler çeşitli yöntemler kullanılarak analiz

edilmektedir. Analiz sonucunda belirlenen olayların (kaza senaryoları) meydana gelme olasılığı ve meydana geldiğinde maruz kalınabilecek sonuçlar belirlenerek riskler derecelendirilmektedir. Riskin meydana gelme olasılığının düşürülmesi veya riskin yaratacağı hasarın potansiyel şiddet derecesinin azaltılması amaçlanarak aksiyon planları yapılmaktadır. Risklerin önlenmesi/azaltılması için ilave kontrol sistemleri ve bariyerlerin belirlenmesi, belirlenen önlemlerin de riski kabul edilir seviyeye indirip indirmediği değerlendirilmektedir.

Bir kimyasal süreçte işletim kontrolünün sağlanması, sağlanamadığı durumda etkilerinin azaltılması amacına yönelik uygulanan en etkili risk değerlendirme yöntemleri, tesiste yürütüldüğü sırası dikkate alınarak tezin bu bölümünde yer verilmiştir:

- Olursa Ne Olur? Analizi (What If Analysis)
- Neden Sonuç Analizi (Balık Kılçığı Analizi-Fishbone Analysis)
- Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (Hazard and Operability- Hazop)
- Hata ağacı analizi (Fault tree analysis- FTA)
- Olay Ağacı Analizi (Event Tree Analysis-ETA)
- Korunma Katmanları Analizi (LOPA)

2.4.1. Olursa ne olur? analizi (What if ? -WI)

‘Olursa Ne Olur?’ analizi genellikle İş Sağlığı ve Güvenliği’nde sıkça kullanılan bir risk değerlendirme yöntemi olup amacı tesiste gerçekleşmesi istenmeyen bir olayın şiddeti hakkında yorum yapmaktır. Örneğin ‘operatörün bulunduğu ortamda kaynak gazı varsa ne olur?’ sorusu sorularak riskin şiddeti olan ‘operatör boğulur’ cevabına götürmekte ve şiddetin büyüklüğünü ortaya koymaktadır. Bu büyüklükteki şiddete yol açacak istenmeyen durum veya kazanın önlenmesine yönelik öneriler sunulmaktadır. Bu öneriler tehlikenin veya tehlikenin riske dönüşmesine yol açan tetikleyici faktörlerin ortadan kaldırılması gibi basit öneriler olup bu önerilerin proseste nasıl uygulanacağı hakkında detaylı bilgi vermemektedir [29, 30].

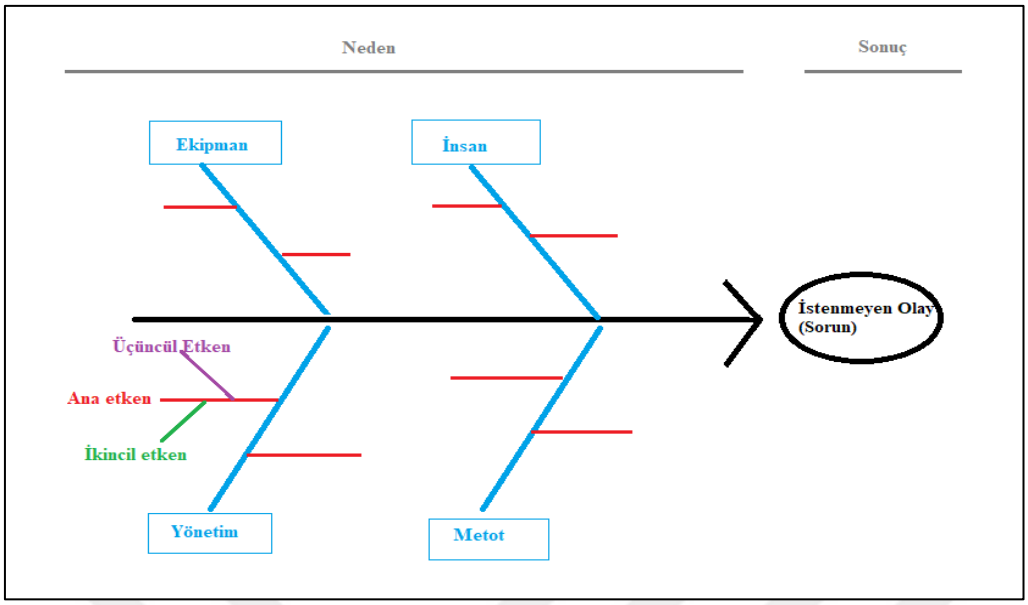
Bu analiz proses güvenliğinde uygulanacak olursa; istenmeyen bir olayın şiddetinin yangın, patlama ve toksik yayılım gibi katastrofik sonuçlar olduğu bilindiği için bu noktada şiddeti sorgulamak anlamsız olacaktır. Ancak bu analiz; proses parametrelerinde yaşanan bir

sapmanın ortadan kaldırılmaması durumunda nelere yol açacağı konusunda bir sorgulama yaklaşımı sunduğu takdirde bir anlam kazanabilir. Bölüm 3.1.1'de analizin bu yaklaşım ile proses güvenliğine uygulanması için bir metodoloji sunulmuştur.

2.4.2. Neden sonuç analizi (Balık kılçığı analizi- Fishbone analysis)

Ishikawa tarafından 1942'de geliştirilen ve bu isimle de anılan Neden Sonuç Analizi; bir proseste var olan sorunun (istenmeyen olayların) nedenlerini araştırmaktadır. Bu araştırma yapılırken de sorun ve sorunun yaşanmasının nedenleri arasındaki ilişkiyi ortaya koyarken bu nedenler arasında bir önceliklendirme de yapmaktadır [31]. Bu önceliklendirme sayesinde istenmeyen olayın meydana gelmemesi için yapılması gereken ilk müdahale yöntemi de belirlenmektedir. Özetle bu analiz, proseste istenmeyen olaylara sebep olan sapmaların (başarısızlıkların) ve bu sapmaların kök nedenlerinin ayrıntılı bir şekilde belirlenmesine yardımcı olan bir metottur [32].

Balık kılçığına benzeyen bir gösterimi olduğu için 'Balık Kılçığı Diyagramı' olarak da anılan bu metotta istenmeyen olay; balığın kafası olarak tanımlanmaktadır. Ardından istenmeyen olaya yol açan ana nedenler sorgulanarak diyagramda 'ana kılçık' olarak ve bu nedenlerin ortaya çıkmasını tetikleyen alt nedenler de 'yan kılçık' olarak gösterilmektedir. Belirlenen bu kılçıklar (kategoriler) genellikle; insan (manpower), ekipman (machines/equipment), yönetim (management), metot (methods/process) başlıkları altında toplanmakla birlikte bazen de çevre (environment) ve materials(malzeme) başlıkları da değerlendirilmektedir (Şekil 2.7.) [31, 33].



Şekil 2.7. Balık kılçığı diyagramı [31, 33].

İş sağlığı ve güvenliğinde istenmeyen bir olayın nedenleri analiz edilirken sıkça kullanılan bu yöntem, proses güvenliği çalışmalarına da katıldığında proses parametrelerinde yaşanan sapmaların çok daha sağlıklı bir şekilde değerlendirileceğinden Bölüm 3.1.2'de 'Neden Sonuç Analizi'nin proses güvenliğine uygulanmasına yönelik bir metodoloji sunulmuştur.

2.4.3. HAZOP analizi (Hazard and operability analysis)

Tehlike ve İşletilebilirlik (Hazard and Operability)'in kısaltması olan HAZOP; Imperial Chemical Industries (ICI) tarafından 1960'ların ortalarında bir tesisin tasarım eksikliklerini gidermek amacıyla formüle edilen bir "eleştirel inceleme" tekniğidir [34]. Prosesteki istenmeyen olayları ve operasyonel sorunları tanımlamak, prosesin tasarım amacından hangi durumlarda sapabileceğini açıklamak için geliştirilen çok disiplinli ve ileri görüşlü olmayı hedefleyen bir beyin fırtınası çalışmasıdır. [34,35].

İngiltere'deki Kimya Endüstrileri Derneği tarafından bir prosesteki mevcut tehlikeleri ve bu tehlikelerin riske dönüştüğü durumda devreye alınması gereken güvenlik bariyerlerini belirlemek için HAZOP kılavuzu yayınlanmıştır [34]. Daha sonrasında Knowlton, Nolan, Kletz, Lees, Wells, EPSC, Macdonald ve Casal gibi daha pek çok önemli isimlerin çalışmalarıyla HAZOP; yıllar içinde diğer tesis türlerindeki operasyonel problemlerden kaynaklanan tehlikeleri belirlemede de başarı sağlamış ve uygulama alanı oldukça genişlemiştir [34, 36]. Günümüzde ağırlıklı olarak akış ve akışkanların mevcut olduğu

sistemlere daha çok uygulanmakla birlikte bir tesisin tasarım aşamasından itibaren devreye alma faaliyetlerinde, rutin operasyon faaliyetlerinde ve elbette proseste yapılacak herhangi bir değişiklik öncesinde tesiste yaşanan sapmalar ve bunun dışında beklenebilecek olası sapmalar ile başa çıkmak için HAZOP analizi kullanılmaktadır.

HAZOP analizi ile proses parametrelerinin tasarım değerinden uzaklaştığı (tasarım değerinin üstüne çıkması ya da altına düşmesi) yani sapmaların yaşandığı tespit edilerek sapmaların nedenleri araştırılmaktadır. Sapmalara müdahale etmek (olağan operasyonel koşullara geri dönmek) için sahada var olan temel proses kontrol sistemleri ile olası kazayı önlemek, önlenemediği durumda kazanın etkilerini azaltmak için kullanılan güvenlik bariyerlerinin yeterliliği sorgulanmaktadır. Bu sorgulamanın yaklaşımı ise aşağıda sıralanmıştır;

i. Sahada bağımsız bir şekilde tehlike analizi yapılır
ii. Ardından mevcut tehlikelerin hangi şartlar altında hangi yolla olası risklere dönüşerek bütünlük kaybına yol açabileceği değerlendirilir.
iii. Bütünlük kaybına yol açtığı durumda kazanın meydana gelme olasılığı ve şiddet düzeyi analiz edilir.
iv. Olası kazanın meydana gelmemesi için gerekli önlemler belirlenir (BPCS ve SIS)

Hazop'un uygulanması

Hazop'un uygulanma yöntemi ilk aşamadan itibaren yukarıda sıralanan maddeler çerçevesinde aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

HAZOP analizinde prosese ve prosesin tehlikelerine hâkim takım lideri ve tesis personelleri tarafından (kimya-elektrik-makine mühendisleri, bakım ve onarım mühendisi-personeli, işletme şefi, saha personeli…vb.) tasarım ve operasyon faaliyetlerinde yaşanabilecek sapmalar tanımlanarak analiz süresince belirlenen sapmaların nedenleri ve önleme çalışmaları yürütülmektedir. İlk olarak oluşturulan ekip tarafından prosesle ilgili Proses Akış Şemaları (Process Flow Diagram, PFD) ve Borulandırma ve Enstrümantasyon Diyagramı (Piping and Instrumentation Diagram, P&ID), ayrıntılı ekipman özellikleri, yapı malzemeleri, sektörde benzer tesislerde yaşanmış kazalara ilişkin dokümanlar değerlendirilmektedir. Ardından parametrelerde sapmaların yaşanması durumunda proses güvenliğini tehdit edecek, içinde tehlikeli kimyasalların bulunduğu tank, reaktör, eşanjör vb.

gibi ekipman ve boru hatlarından oluşan ve güvenli işletim açısından tehlikeli ekipmanlar belirlenerek proses daha küçük parçalara ayrılmaktadır. Çalışmaların daha detaylı bir şekilde yürütülmesi için yapılan bu parçalamaya "düğüm(nod) seçimi" adı verilmektedir [8].

HAZOP yaklaşımında değerlendirilen her sapma için; 'neden?, niçin?, ne olursa olur?' soruları sorularak proseste tehlikeli kimyasalların bulunduğu ekipmanlarda işletimin kontrolü sırasında ters gidebilecek durumlar önceden sorgulanmaktadır. Tesisin bu durumu mevcut proses kontrol ve müdahale ekipmanları ile kontrol altına alıp alamayacağı analiz edilmektedir. İlk olarak sapmaların doğru tespit edilebilmesi için her bir parametre için olağan işletme şartları belirtilmektedir. Ardından parametrelerin tasarım limitlerinin dışına çıktığı durumları tespit etmek için prosese ve tasarım amacına uygun kılavuz kelimeler kullanılmakta ve sebepleri araştırılmaktadır. Örneğin depolama tankı, besleme hattı ve çıkış hattından oluşan bir düğümde seviye, akış gibi proses parametreleri için az, çok, hiç gibi kılavuz kelimeler kullanılmakta olup kullanılan bu kılavuz kelimeler ve anlamları Çizelge 2.3'te sunulmuştur [8].

Çizelge 2.3. Hazop analizinde kullanılan kılavuz kelimeler ve anlamları [37]

Kılavuz kelime	Anlamı
Yok ya da Hiç	Tasarım amacını karşılayamama durumu
Fazla	Niceliksel artış
Az	Niceliksel azalış
Yanı sıra	Niteliksel değişiklik/artış
Kısmen	Niteliksel değişiklik/azalış
Ters	Tasarım amacının mantıksal tersi
Diğer	Mevcut kılavuz kelimeleri karşılamadığı durumlar için

Tek bir düğüm için birçok sapmalar tespit edildikten sonra, olası en kötü senaryoların belirlendiği çalışmalara başlanmaktadır (Sapmanın kontrol altına alınamaması ihtimaline karşın yaşanacak senaryolar; üretimin durması, verimin düşmesi vb. şeklinde işletilebilirlik sorunları olabileceği gibi, tehlikeli kimyasalın çevreye yayılması sonucu patlama, yangın, toksik yayılım gibi tehlikeli olaylarla da sonuçlanabilir.). Sapmaları engellemek, işletimi tekrar kontrol altına almak için mevcut kontrol ekipmanları ve sapmalar yaşandıktan sonra proses güvenliğini sağlamak amacıyla mevcut bariyerler tespit edilmektedir. Böylelikle tehlikeli kimyasaldan kaynaklı olası risklere karşı tesisin mevcut kontrol ekipmanları ve bariyerleri ile ne kadar hazır olduğunu tespit edilmektedir. Ek olarak bu aşamada tesisin ölçme, kontrol ve müdahale ekipmanlarının varlığı konusundaki eksiklikler de tespit edilebilmektedir. Sonuçlar ve mevcut ve/veya gerekli güvenlik önlemleri belirlendikten

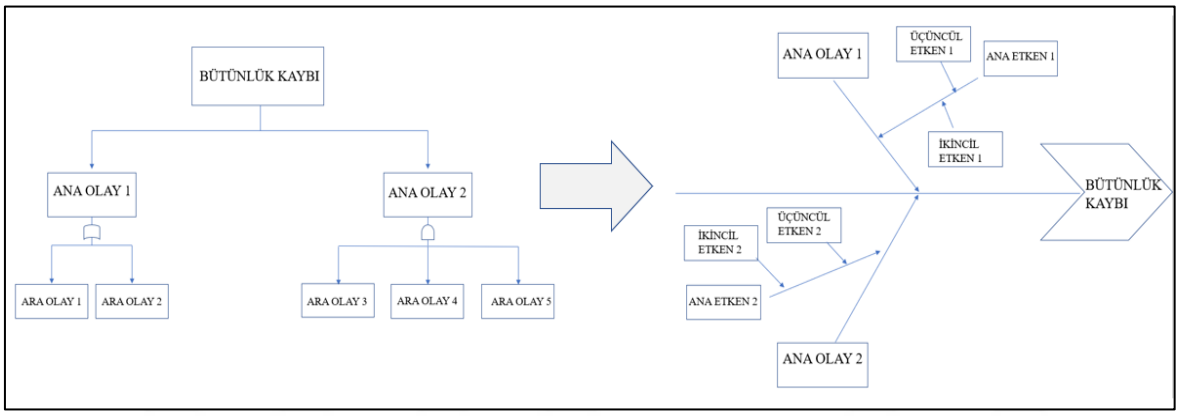
sonra, riskin olasılığın ve şiddetin bir bileşeni olduğu göz önünde bulundurularak, ekip tarafından önce olasılık ve şiddet tayin edilmektedir. Ardından olasılık ve şiddet çarpılarak olası kaza risklerinin sayısal büyüklüğü hesaplanmakta ve belirlenen risklere düşük, orta veya yüksek seviyede şeklinde derecelendirme yaparak HAZOP risk analizi yarı kantitatif olarak tamamlanmaktadır. Sonuç olarak HAZOP çalışması; mevcut tehlikelerin doğuracağı olası riskleri ve insan, çevre, ekipman ve ekonomik kayıpları öngörerek tesisin bu kaza senaryosunda güvenli tarafta olması için güvenlik önlemlerinin gerekliliğini sağlamaktadır [38].

Hazop analizi sonucunda iş sağlığı ve güvenliğinde ilk aşamada kullanılan Kontrol Listesi (checklist) yöntemi kimya endüstrisinde bu aşamada ihtiyaç duyulan BPCS ve SIS ekipmanlarının varlığının kontrolü amacıyla kullanılabilmektedir. Kontrol Listesi analizi kapsamında bir liste hazırlanmakta ve bu listede tehlike türlerini, tasarım eksikliklerini, olası kaza senaryolarını değerlendirmek için spesifik kalemler/sorular yer almaktadır [30]. Buraya kadarki aktarılan risk değerlendirme yöntemleri ile sahada hangi önlemlerin varlığı neticesinde işletimin kontrolü sağlandığı tespit edilmiş olup sonraki adımda da bu önlemlerin sahada var olup olmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir ki bu çalışma da Kontrol Listesi analizi ile yürütülebilmektedir.

Sonuç olarak Hazop yöntemi; bir proseste hem ‘işletilebilirlik(operability)’ hem de ‘tehlike(hazard)’ kısmı kontrol altında tutularak güvenli bir işletim sağlamayı hedeflemektedir. Hazop’un ‘işletilebilirlik(operability)’ yaklaşımıyla proseste bütünlük kaybına yol açacak sapmalar ve nedenleri belirlenerek tekrar tasarım limitlerine çekmek için uygun müdahale yöntemleri ve sıralaması araştırılmaktadır. Bütünlük kaybının yaşandığı durumda da ‘tehlike(hazard)’ yaklaşımıyla prosesteki bağımsız güvenlik bariyerleriyle kazayı önlemeyi ya da kazanın şiddetini azaltmayı hedeflemektedir. Ek olarak Hazop metodu ile olası sapmaların bütünlük kaybı ile sonuçlanma ihtimalinin sorgulamasının yapıldığı kısım FTA analizi; bütünlük kaybı yaşandıktan sonraki sürecin sorgulandığı kısım ETA analizi ile de değerlendirilmekte olup bu analizlere tezde detaylı yer verilmiştir. Hazop analizi ile güvenlik bariyerlerinin tayini yapılırken; bu tez çalışmasında yer verilen LOPA analizi ile de bu bariyerlerin hassasiyetleri belirlenerek tam bir risk değerlendirme çalışması yapılmaktadır.

2.4.4. Hata ağacı analizi (Fault tree analysis- FTA)

Hata ağacı analizi; "önemli olay (top event)" şeklinde tanımlanan bir başarısızlık senaryosunun meydana gelmesine neden olabilecek olayları/durumları değerlendiren bir metottur ve böylelikle belirli bir sistemin ve bileşenin kullanılabilirliği incelenmektedir [30, 39]. Balık kılçığı analizinde soldan sağa doğru parametre sapmalarının nedenlerinin yatay olarak sıralandığı balık kılçığı modelini dik çevirdiğimizde benzer şekilde FTA analizinde yukardan aşağıya doğru değerlendirilen ve bütünlük kaybına sebep olan parametre sapmalarını(olayları) görebiliriz (Şekil 2.8.).



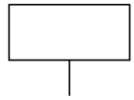
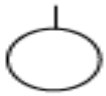
Şekil 2.8. FTA analizi ile balık kılçığı analizinin benzerliği

FTA analizinde parametre sapmaları araştırılırken bu sapmalara sebep olan tasarım eksiklikleri, operasyonel veya çevresel başarısızlıklar, ekipman arızaları, operatör hataları, vb. sorgulanmaktadır. FTA'nın ağaca benzeyen şematik yapısı ise önemli olayın nedenleri, bunları kontrol etmek veya ortadan kaldırmak için gerek duyulan bariyerleri göstermek gibi avantajlar sunmaktadır [30].

Bu analizde Boolean mantık sembolleri (VE / VEYA kapıları) kullanılarak başarısız olması durumunda önemli olayın yaşanmasına sebep olacak ara olaylar (temel olaylar) ifade edilmektedir. Her bir ara olayda da operasyonel veya organizasyonel hatalar, tasarım eksiklikleri, ekipman arızaları, yazılım hataları neticesinde yaşanacak sapmalar tanımlanmaktadır. Sonuç olarak FTA analizinde prosesteki kontrol sistemlerinin ve güvenlik bariyerlerinin başarısızlıkları sebebiyle yaşanacak bütünlük kaybına giden yolu sorgulayarak kazanın (önemli olay) olasılığı hesaplanmaktadır. Dolayısıyla Hazop analizine bütünlük kaybına giden yol hakkında bilgi sağlamaktadır. Analiz ile ihtiyaç anında bu ekipmanların

görevlerinin yerine getirip getirmediği belirlenmekte ve bu amaçla kullanılan semboller ve işlevleri ise Çizelge 2.4'te açıklanmaktadır [39].

Çizelge 2.4. FTA analizinde kullanılan semboller ve anlamları [39]

Sembol	Adı	Tanımı	Örnek
	Önemli olay (Kritik olay)	Tüm başarısızlıklar sonucu meydana gelen istenmeyen olay (bütünlük kaybı, kaza vb)	Boru hattında contadan benzin çıkışı
	Ara olay (temel olay)	Önemli olaya yol açan en düşük seviyeli olay	Boru hattında basınç artışı
	Ve kapısı	Tüm giriş olayları meydana geldiğinde oluşur.	Hem boru hattında tıkanıklık yaşanması hem de pompanın hatta ürün beslemeye devam etmesi eylemleri aynı anda gerçekleştiğinde (Ve kapısı) hatta basınç artışına sebep olur.
	Veya kapısı	Giriş olaylardan herhangi biri meydana geldiğinde oluşur.	Contanın arızası veya operatörün contayı yanlış montaj etmesi sonucu boru hattındaki contanın özelliğinin yitirmesine sebep olur

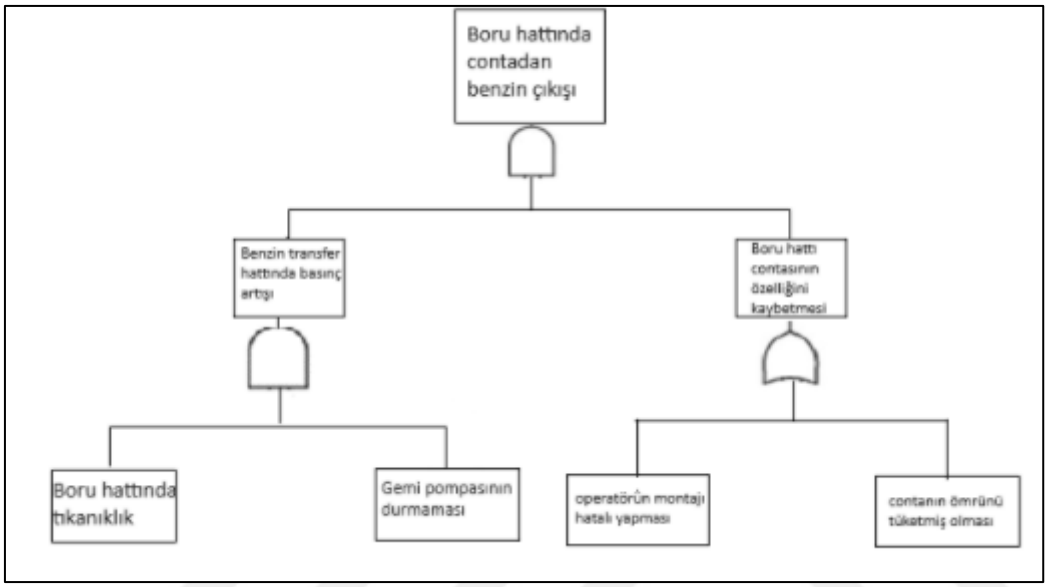
FTA analizi, olası kaza senaryosunun gerçekleşmesine neden olan durumların belirlenmesi ile ilgilenmekte, başka bir deyişle bütünlük kaybına giden yolu belirlemektedir. Böylelikle hangi parametrelerdeki sapmaların önüne geçildiğinde bütünlük kaybına giden yolun kapatılabileceğini göstermektedir. Tabloda 'VE' bağlacı tanımında da açıklandığı üzere tüm giriş olaylarının meydana gelmesi sonucu ana/ara olay gerçekleşeceği için; buradaki alt olayların gerçekleşmesi engellendiğinde ana/ara olayın da önüne geçilmiş olacaktır. Tablodaki örneği ele alalım: Boru hattındaki yüksek basıncın önüne geçmek için boru hattında tıkanıklık yaşandığı anda ilgili pompanın çalışmasının durdurulması yeterli olacaktır.

<u>Örnek FTA çalışması;</u>

Kritik Olay: Boru Hattında Contadan Benzin Çıkışı

Vana arızası sonucu boru hattında tıkanıklık olması VE boru hattına besleme yapan pompanın durdurulamaması durumunda boru hattında basınç artışı yaşanmaktadır. Ancak bu sapma tek başına boru hattında benzin sızıntısına sebep olmayacaktır. Bu hata silsilesine

ek eş zamanlı olarak boru hattındaki contanın da mekanik özelliğini kaybetmesi sonucu tehlikeli kimyasal yayılımı yaşanacaktır. Contanın mekanik özelliğini kaybetme durumu ise conta hatası VEYA operatörün hatalı montaj yapması durumunda meydana gelebilir. Bu iki ihtimalden herhangi birinin gerçekleşmesi durumunda conta arızası yaşanmakta ve bu duruma eş zamanlı hatta basınç artışı ile kritik olay meydana gelmektedir (Şekil 2.9.).



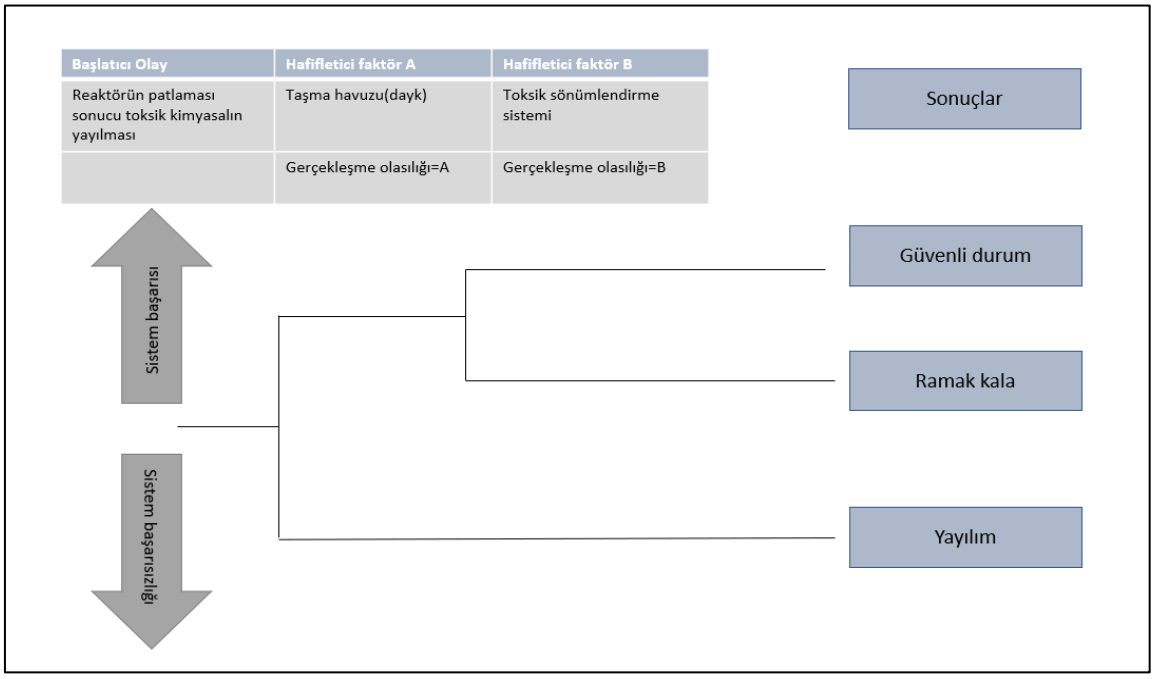
Şekil 2.9. Örnek FTA çalışması

2.4.5. Olay ağacı analizi (Event tree analysis-ETA)

Herhangi bir başlatıcı olayın (genellikle FTA analizi sonucunda belirlenen) çeşitli olası sonuçlarının sıklığını veya olasılığı hesaplanmak için geliştirilmiş bir metottur. ETA analizinde başlatıcı bir olaydan başlanarak, "Eğer..." sorusuyla takip eden olay zincirleri tespit edilmekte ve bir ağaç modellemesi (‘başarı’ veya ‘başarısızlık’ dallarından oluşan) ile tüm olası kaza senaryoları belirlenmektedir. Böylelikle olası kazayı veya kazanın şiddetini önlemeye yönelik bir yaklaşım vermektedir [29, 40]. Diğer risk değerlendirme yöntemlerinde olduğu gibi ETA analizi de bütünlük kaybı yaşandığında devreye alınabilecek bariyerler ve olası kaza senaryosuna karşın acil durum planları açısından Hazop analizine bilgi sağlamaktadır.

ETA analizinde yer alan başarı dalı, hafifletici faktörün amaçlandığı gibi işlemekte olduğunu, başarısızlık ise hafifletici faktörün ihtiyaç duyulduğu anda görevini yerine getirmemesini ifade etmektedir [29, 40]. Buradaki ‘hafifletici faktörler’ ise; tanımlanan

başlatıcı olayın (örneğin basınç artışı sonucu reaktörün patlaması) etkilerini önleyecek/azaltacak faaliyetlerdir. Bu faktörler tasarlanmış sistemlerden (sprinkler) veya kişi eylemlerinden (operatörün köpük tutması) oluşmaktadır. Hafifletici faktörlerin (bariyerlerin) aynı anda başarılı ve başarısız olması durumunda meydana gelebilecek çeşitli sonuçlar (güvenli hal, yangın, toksik yayılım, buhar bulutu patlaması vb. kaza senaryoları, ramak kala) tanımlanmakta ve her bir durum için olasılık hesaplanmaktadır [40]. ETA analizinin gösterim şekli Şekil 2.10.'da verilmiş olup reaktör patlaması sonucu çevre için toksik bir kimyasalın yayılımı üzerinden ETA çizimi verilmiştir.



Şekil 2.10. ETA analizi gösterimi

Örnek ETA Çalışması;

Başlatıcı Olay: Benzin depolama tesisinde gemiden depolama tankına benzin transferi sırasında tanktan benzin taşması

Yanıcı kimyasal olan benzinin tanktan taşması durumunda iki ihtimal vardır: büyük endüstriyel kazaya sebebiyet verecek olan benzinin ani tutuşması ya da tank dibinde yer alan dayk havuzu ile benzinin güvenli alanda birikiminin sağlanmasıdır. Sistemin başarı ve başarısızlık olasılığı 'Var' ve 'Yok' ifadeleri ile değerlendirilmektedir. Ardından dayk havuzunun önlem olarak işe yaramama (yetersiz kalma) ihtimali değerlendirilerek başka bir

güvenlik önlemi değerlendirilmektedir. Bu örnekte ikinci güvenlik önlemi köpük ile döküntüye müdahale etmektir. Yine bu güvenlik önleminin ‘var’ ve ‘yok’ ifadeleri ile uygulanabilirliği değerlendirilmektedir. Köpük sisteminin arızalanma ihtimaline karşı benzinin gecikmeli tutuşma ve gecikmeli tutuşma sonucu patlama durumları dikkate alınmaktadır. Tüm bu güvenlik önlemleri değerlendirilerek kazanın sonuçları sayısal olarak analiz edilmektedir.

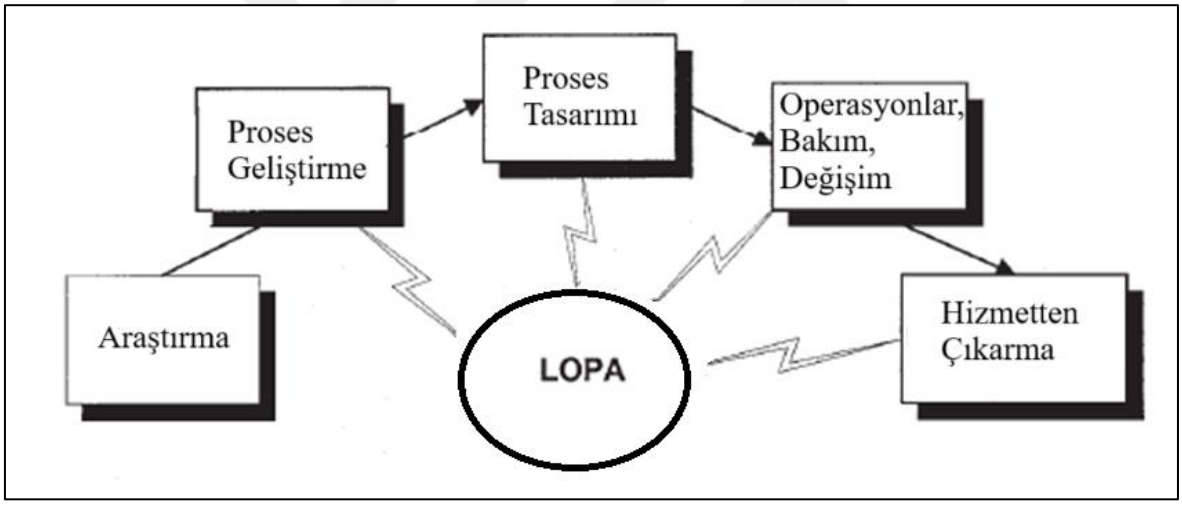
ETA analizi sayesinde bir tesis, olası kaza senaryolarını önceden tanımakta ve bu senaryoların gerçekleşmesi halinde ihtiyaç duyduğu acil durum planlarına karşı hazırlık yapabilmektedir [29]. Bu anlamda ETA analizi ve dolayısıyla ETA analizine bilgi sağlayan (başlatıcı olay) FTA analizi, proseste işletim kontrolü sağlanamadığında yaşanabilecek olası kaza senaryolarını tanımak ve hem olası senaryoların yaşanmaması hem de yaşandığında minimum düzeyde zararla atlatılabilmesi açısından oldukça önemlidir.

ETA analizi, kaza senaryosunun gerçekleştiği durumda bu kazanın etkilerinin önlenmesi ya da sınırlandırılması ile ilgilenmektedir. FTA analizinde bütünlük kaybına giden yolun belirlendiğini hatırlarsak, ETA analizinde de bütünlük kaybı yaşandığında meydana gelecek kazaya giden yol belirlenmektedir. Bu analizleri kullanırken kontrol sistemleri ve güvenlik bariyerleri bir varsayımda bulunularak ihtiyaç duyulduğunda bariyerlerin devreye girmesi ile ilgilenerek olasılık hesabı yapılmakta ve analiz sonucunda prosesi güvenli bir şekilde işletebilmek için uygun olan kontrol sistemleri ve güvenlik bariyerleri belirlenmektedir. Bu sebeple FTA ve ETA analizleri ile olasılık hesaplanabilse de çok sağlıklı bir hesap olmayacaktır. Hazop analizi ile sahaya kurulacak temel proses kontrol sistemleri ve LOPA analizi ile güvenlik bariyerleri seçimi (performans, hassasiyet verileri dikkate alınarak) ve tasarımı belirlendikten sonra olasılık hesaplamalarının yapılması en uygunudur. Yani, proseste uygun ekipman seçimleri yapıldıktan sonra (LOPA analizi ile SIS tasarımı tamamlanıp) FTA, ETA analizleri ile her bir kaza senaryoları (ekipman/kişi başarısızlıkları) gerçek veriler kullanılarak olasılık hesaplanmalıdır. Ya da bu analizlerde literatürde yer alan olasılık verileri kullanılarak kaza senaryoları belirlenmeli ve güvenli işletim kontrolünü sağlayacak uygun olasılığı verebilecek hassasiyette doğru ekipman seçimi yapılmalıdır.

2.4.6. Korunma katmanları analizi (LOPA)

LOPA analizi ile bir proseste yaşanabilecek kazaya karşı prosesin koruma katmanlarının yeterli olup olmadığı belirlenmektedir. Başka bir ifadeyle proses için olası riskin tolere edilebilir olup olmadığı tayin edilmektedir. Bu analiz sonucunda proseste tehlikeli kimyasal içeren ve kritik bulunan ekipmanlar için uygun güvenlik bütünlük seviyeleri (SIL) belirlenebilmektedir [15].

LOPA, bir prosesin kavramsal olarak tasarım aşamasından başlayarak PFD ve P&ID'lerin hazırlandığı tasarlama sürecinde, prosesin kurulumunda, risk değerlendirme aşamasında ve prosesi olağan koşullarda işletirken kontrol veya güvenlik sistemlerinde yapılan herhangi bir değişiklikte (GYS'nin 4. Unsuru 'Değişim Yönetimi') etkili bir şekilde kullanılabilmektedir (Şekil 2.11) [15].

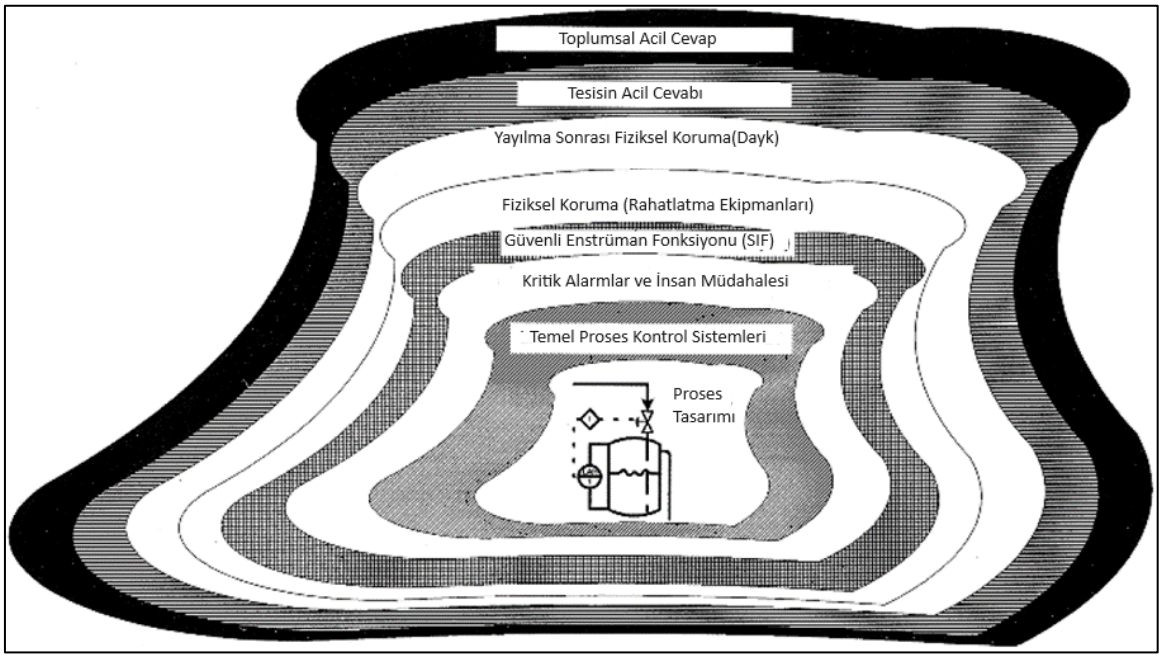


Şekil 2.11. LOPA analizinin kullanım alanını gösteren proses yaşam döngüsü [15]

Lopa analizinin çalışma yaklaşımı maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Önceki bir çalışmada (örneğin Hazop) belirlenen senaryolar değerlendirilir ve kaza senaryosu seçilir
- Tüm kontrol sistemlerinin başarısızlığı sonucunda oluşan başlatıcı olay ve başlatıcı olayın sıklığı tanımlanır
- Mevcut güvenlik önlemleri ve arıza olasılığı tanımlanır
- Matematiksel olarak kazanın olası riski hesaplanır [15].

Prosese özgü belirlenen olası bir kaza senaryosu, o prosesin karmaşıklığına ve olası riskin şiddetine göre bir veya daha fazla koruma katmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Prosese ve mevcut tehlikeli kimyasala göre değişkenlik gösteren koruma katmanlarından bazıları; doğası gereği güvenli tasarım temel proses kontrol sistemleri, alarm sistemleridir ve Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Teorik olarak bir kaza senaryosu için belirlenen koruma katmanlarından yalnızca bir tanesinin başarılı bir şekilde çalışması kazanın önlenmesi veya etkisinden korunmak için yeterli olduğu bilinse de gerçekte hiçbir koruma katmanı mükemmel bir şekilde etkili olamayacağı için riskin olası sonuçlarını kabul edilebilir düzeye indirecek kadar yeterli sayıda koruma katmanlarının devreye alınması gerekmektedir [15].



Şekil 2.12. Olası kazaya karşı koruma katmanları [15]

LOPA analizi sonucunda seçilen bir senaryonun olası riskinin kabul edilebilir düzeyde olması için prosesin mevcut koruma katmanlarının (güvenlik bariyerlerinin) bağımsız olarak çalışması gerekmektedir. Bunu sağlamak için öncelikli olarak bariyerlerin/koruma katmanlarının birbirinden bağımsız olması (bağımsız koruma katmanları-IPL) ve bariyerlere (koruma katmanlarına) ihtiyaç duyulduğu anda çalışması/arızalanmaması (failure on demand) gereklidir. Nitekim Hazop ve LOPA analizleri neticesinde proseste kullanılması belirlenen bariyerlerin seçimi bu yönde olmalıdır. Bariyerlerin bağımsız olması ve talep anında arızalanmaması arasındaki ilişki önceki bölümlerde (Bölüm 2.2'de) açıklanmıştır.

Burada bağımsız koruma hakkında bilgi vermek gerekirse, olası kaza senaryolarına karşı Hazop ve LOPA analizleri ile belirlenen "savunma hatları" olarak tanımlanabilen güvenlik enstrümanlı sistemlerdir [29]. IPL'nin başlatan olaydan ve diğer tüm parametre sapma nedenlerinden bağımsız olması o koruma katmanın etkili bir şekilde görev yapmasına olanak sağlamaktadır [13]. Bu noktada, tüm bağımsız koruma katmanlarının güvenlik önlemleri olduğunu ancak tüm güvenlik önlemlerinin bağımsız koruma katmanı olmadığını unutmamak gerekir [29].

Bir senaryodaki tüm IPL'ler işlevlerini yerine getiremezse parametre sapması ve olası sonuçları engellenemeyerek istenmeyen olay (kaza) meydana gelecektir. Bu sebeple IPL'lerden istenilen etkinliği ve performansı alabilmek adına mekanik bütünlük sürecine IPL'ler dahil edilerek belirli aralıklarda bakımlarının yapılması gereklidir [13]. Bir IPL'nin etkinliği ise, başarısız olma olasılığı üzerinden değerlendirilmekte ve IPL'nin görevini yerine getirememe olasılığı 0 ile 1 dahil olmak üzere bu aralıkta boyutsuz bir sayı olarak ifade edilmektedir [29].

Risk değerlendirme yöntemlerinin uygulama sırası ve girdi çıktılar aracılığıyla birbirileri ile olan ilişkisini şu şekilde özetleyebiliriz:

- Hazop analizi ile birbirini takip eden istenmeyen olaylar belirlenerek istenmeyen olayların önlenmesi için gereken temel proses kontrol sistemleri ve güvenlik bariyerleri tespit edilmektedir.
- FTA ve ETA analizleri ile hangi temel proses kontrol sistemleri ve güvenlik bariyerlerinin başarısızlık durumunda bütünlük kaybı ve sonrasında kazanın yaşanacağı (bütünlük kaybı ve kazaya giden yollar) tanımlanmaktadır.
- Bu aşamada alınması gereken önlemler ise LOPA analizi kullanılarak tespit edilmektedir.
- Belirlenen bariyerler sonucunda güvenlik donanımlı sistemlerin tasarımı tamamlanmaktadır.
- Prosesin akış diyagramı ve borulandırma ve enstrümantasyon diyagramı oluşturularak sahada mevcut PFD ve P&ID'lerle karşılaştırması Kontrol Listesi (Checklist) yardımıyla yapılabilmektedir.

3. HİBRİT HAZOP METODOLOJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

3.1. Hazop Analizini Besleyen Ön Çalışmalar

Proseste kimyasalların, kendilerine özgü özelliklerinin dışında yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gibi zorlu operasyonel şartlarda ve diğer kimyasallarla etkileşim halinde olmaları, proseslerde işletilebilirlikten sapmanın her an yaşanabilmesine yol açabilir. Prosesteki parametrelerin öncelikli olarak limit aralıklarında tutulmaya çalışılması ancak tutulamaması durumunda bütünlük kaybı ve sonrası yaşanan kazanın şiddetini azaltmaya çalışılması gerekmektedir ve bu konuda yardımcı olabilecek en etkili risk değerlendirme yöntemi 'Hazop'tur. Ancak kimyasal proseslerde Hazop analizi ile risk değerlendirme çalışmalarına başlanıldığında bazı noktaların atlanabilmesi söz konusudur. Yaşanan parametre sapmasının temelinde yatan nedenler ve olası sonuçların ne tür bariyerlerle önlenebileceği gibi kritik hususların yeterince irdelenememesi ve beraberinde kök nedeni ortadan kaldıracak hususların değerlendirilmemesi ve bariyerlerin doğru ve kurtarıcı sıra ile yapılamaması gibi eksiklikler yapılabilmektedir. Bunun için Hazop analizinden önce ön bir risk değerlendirme çalışması yapılması çok daha sağlıklı ve etkili olacaktır. Bu çalışmada; önceki bölümde anlatılan 'Olursa Ne Olur?' ve 'Balık Kılçığı' yöntemlerinin, Hazop'u destekleyecek şekilde proses güvenliği kapsamında uygulaması yapılmıştır.

3.1.1. Proses güvenliğinde 'olursa ne olur?' metodu

Proses güvenliğinde bu metot risk değerlendirmenin daha ilk aşamasında uygulanmalıdır. Proseste meydana gelen bir bütünlük kaybı 'istenmeyen durum' yaratacağı şiddet hakkında fikir vermek için uygulanabilir. Şiddetin kabul edilemeyen seviyede olduğu tespit edilirse ileri risk değerlendirme yöntemlerinin uygulanması yani Hazop gereksinimi ortaya çıkar.

Uygulamada kazanın şiddetini sorgulamak yerine bütünlük kaybına yol açabilecek durumların sorgulanması bütünlük kaybına gidiş yolunu verir. 'Proses parametresi (sıcaklık, basınç, akış hızı vb.) saparsa ne olur?' sorusu sorularak basit bir tablo yardımıyla prosesteki hangi parametre değişikliklerinin bütünlük kaybına yol açacağı hakkında fikir sağlanabilir. Örneğin 'Sıcaklık parametresinde sapma olursa ne olur?' sorusuna cevaben 'ekipman içi basınç artar', 'Ne olursa ekipmanda bütünlük kaybına gider?' sorusuna cevaben 'artan iç basınç düşürülemezse', 'Bütünlük kaybı meydana geldiğinde olası kazalar neler olur?'

sorusuna cevaben ‘yanıcı kimyasal çevreye yayılarak tutuşturucu kaynak ile buluşması sonucu yangın meydana gelir/toksik bir kimyasalın salınımı sonucu tesis personelleri zehirlenir’ şeklinde soru-cevaplarla olası kaza senaryosu, senaryoların hangi yollarla meydana geldiği, kazaların sonuçları ve dolayısıyla şiddetin büyüklüğü hakkında ön bilgi vermek için Hazop’u destekleyecek şekilde kullanımı önerildi (Çizelge 3.1).

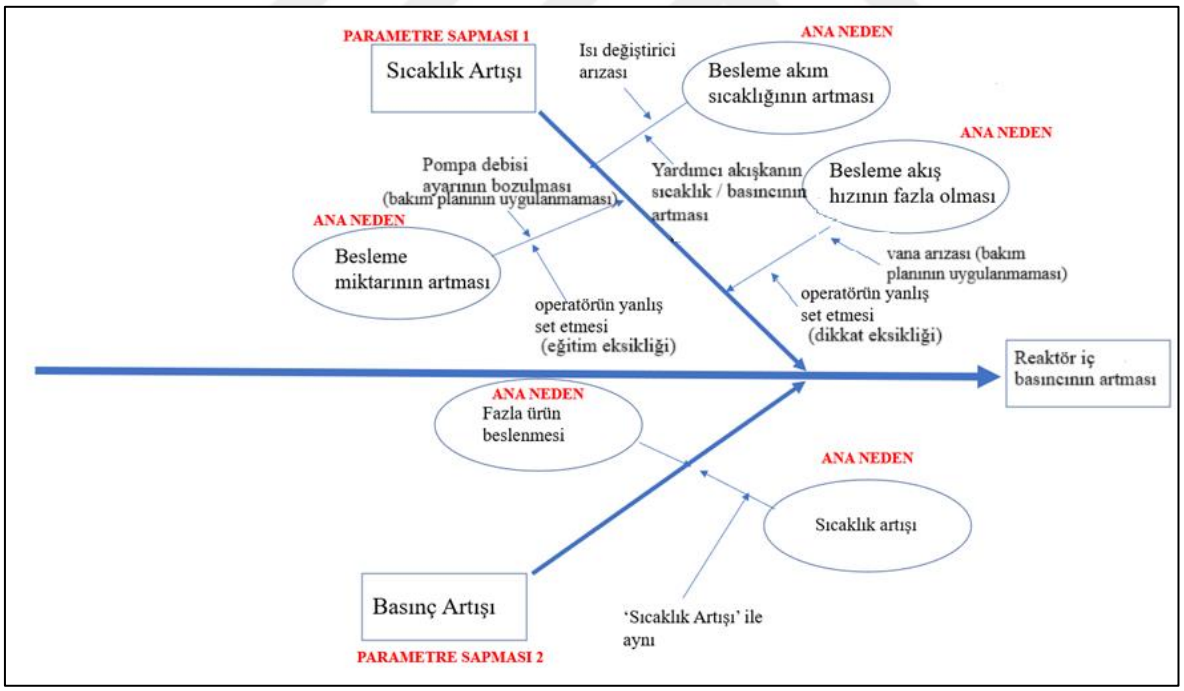
Çizelge 3.1. Proses güvenliğinde olursa ne olur? metodu örnek çalışma

Parametre	Olursa?	Ne olur?	Başka ne olur? (İşletilebilirlik)	Başka ne olur? (Bütünlük Kaybı)	Neden olabilir?	Ne yapılabilir?	
						Bütünlük kaybını önlemek için…?	Kazayı önlemek için…?
Reaktör ön ısıtıcının yardımcı akışkan (buhar) akış hızı	Akış hızı artarsa ne olur?	-Proses akışkanının sıcaklığı reaktör besleme sıcaklığının üstüne çıkar.	-Reaktöre sıcak hammadde beslendiği için reaktör sıcaklığı artar. - Dönüşüm tasarım hedefinden uzaklaşır (artar/azalır)	- Sıcaklık artışı sonucu iç basınç artar.	-Buhar vanasının çok açılması (buhar akış hızının artması) -Buhar basıncının/sıcaklığının artması	Kontrol odasından veya saha denetimleriyle; -buhar sıcaklığı/basıncı/akış hızının izlenmesi -bu parametrelerin düşürülmeye yönelik müdahalelerin yapılması	-Soğutma amaçlı yedek soğutma sistemi/ sprinkler yardımıyla reaktör sıcaklığın düşürülmesi -Basınç rahatlatma sistemi ile basıncın rahatlatılması

3.1.2. Proses güvenliğinde ‘neden sonuç: balık kılçığı’ metodu

Proses parametresindeki sapmanın hangi durumda yaşanabileceği, yaşanan sapma sonucunda hangi kazaların meydana geleceği ve bu kazalara yönelik alınması gereken önlemler, her ne kadar ‘olursa ne olur?’ yönteminde kabaca belirlenmiş olsa da bu soruların en sağlıklı cevapları ‘Balık Kılçığı Yöntemi’nde verilmektedir. Yöntemin uygulaması ise aşağıda açıklanmıştır.

‘Olursa Ne Olur?’ metodu ile proses parametresindeki bir sapmanın bütünlük kaybına götürdüğü tespit edildikten sonra belirlenen bütünlük kaybı balık kılçığının kafası (problem) olarak değerlendirilmesi önerildi. Yöntemi tamamlamak için bütünlük kaybına sebep olan ana kılçıklar sapma olasılığı olan parametreler olarak belirlenir. Bu sapmaların aşağı/yukarı yönde değişimlerinin bütünlük kaybına etkisi değerlendirilir. Bu proses parametre sapmasına neden olabilecek ikincil proses parametreleri ya da hatalar da küçük kılçıklar olarak irdelenir. Bu değerlendirmelerden sonra sapmalar arasında bir önceliklendirme yapılarak sapmalara müdahale konusunda bir sıralama yapılmış olacaktır. Bütünlük kaybı sonrası yaşananları değerlendirmek için, balık kılçığının kafası; en şiddetli kaza olarak belirlenip Hazop’u destekleyecek ön bilgiler tamamlanır. Böylelikle proses güvenliğinde bütünlük kaybına yol açacak sapmaların ve hataların gidiş yolu incelenmiş olacaktır. Bu çalışma, Hazop’a hangi parametrelerin sapabileceği, hangi parametrelerin ölçülmesi gerektiği ve sapma nedenleri hakkında ön bilgi vererek sapmaları önlemek için hangi sırada müdahalelerin yürütülmesi konusunda katkı sağlamaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Proses güvenliğinde neden sonuç metodu örnek çalışma

3.2. Hazop Metodu

‘Olursa Ne Olur?’ ve ‘Neden Sonuç’ analizlerinden sonra uygulanan ve çok daha detaylı bir risk değerlendirme yöntemi olan Hazop ile tesisteki tüm ekipman/sistemlerdeki

parametrelerin olağan çalışma şartlarından uzaklaşması incelenir [33]. Sağlıklı bir Hazop çalışmasının yürütülmesi için Hazop'u destekleyen risk değerlendirme yöntemleri göz önüne alınarak gerekli bilgi, veri toplama ve değerlendirme yaklaşımı aşağıdaki adımlarla oluşturulmuştur.

i. Proses Blok Diyagramı Oluşturulması (Process Block Diagram, PBD): İlk olarak proses; giriş-çıkış akışları ile prosesi oluşturan ana ünitelerin gösterimi ile 'Proses Blok Diyagramı' oluşturulur (örneğin reaktör ünitesi şeklinde bölünür ancak burada üniteyi oluşturan yardımcı ekipmanlara yer verilmez). Bu diyagramda yer alan ünitelerin fonksiyonları ve tasarımcı tarafından belirlenen parametrelerin çalışma şartları (sıcaklık, basınç, akış hızı, dönüşüm vb.) hakkında bilgilere yer verilerek prosesin genel bir özeti sunulur [41, 42].
ii. Proses Akış Diyagramı'nın Oluşturulması (Process Flow Diagram, PFD): PBD'de yer alan tüm ana ekipmanların (tank, reaktör, distilasyon kolonu gibi) ve ana ekipmanların işletme şartlarını sağlayan ara ekipmanların (ısı değiştirici, pompa, kompresör gibi) bilgilerinin yer aldığı, daha detaylı bir 'Proses Akış Diyagramı' oluşturularak tüm proses temel döngüleri (proses akışları) gösterilir. Tüm ekipmanların çalışma şartlarına yer verilebilir ancak bu bilgilerin daha çok proses akış tablolarında verilmesi tercih edilir [41,42].
iii. Proses Kimyasallarının Değerlendirilmesi: Proses akışında yer alan tüm kimyasallar kaza türleri açısından önemli yer tutan tehlike özellikleri göz önüne alınarak değerlendirilir. Kaza türlerinin değerlendirilmesinde, hem 'Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik' hem de Seveso III Direktifi'nde ve 'Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik' Ek'indeki tehlikeli kimyasallar listesi incelenir. Tehlikeli kimyasallar değerlendirmesinde, prosesteki olası sapmaların yol açacağı beklenmeyen yan ürünün oluşması durumu da göz ardı edilmemelidir. SEVESO kazasında yaşandığı gibi sıcaklık parametresindeki artış sonucu reaktör içinde tehlikeli bir yan ürün oluşmasıyla kazanın şiddeti artmıştır.

   Mevzuat gereği tehlikeli kimyasalların değerlendirilmesi zorunlu olduğu için bu husus sağlıklı uygulanırken, tehlikeli kimyasal sınıfına girmeyen kimyasalların da uygun şartlar altında kazaya sebebiyet verebileceği unutulmamalıdır. Hazop, prosesteki olası sapmaların kazaya gidiş yolunu değerlendirdiği için tehlikeli ve tehlikesiz tüm kimyasalların kazaya sebep verebilecek fizikokimyasal özelliklerinin bilinmesi önem

arz etmektedir. Örneğin ısıtma işlemi uygulanan sıcak su kazanı içerisinde bulunan ve tehlikeli olmayan suyun belirli şartlar altına büyük kazalara yol açabileceği durumu değerlendirelim. Kazan içi sıcaklık parametresinin kontrol altında tutulamaması sonucu kazandaki su sıcaklığının artmasıyla beraber buharlaşma miktarı artar ve iç basınç artarak kazan parçalanır. Şarapnel etkisiyle kazanın/tankın parçaları savrulurken basınçlı sıcak su ortama yayılarak çevreye ve insanlara zarar veren şiddetli bir kaza yol açar. Tehlikeli olmayan kimyasalların değerlendirilmesi genellikle ihmal edilmekte olup örnekte de görüldüğü gibi bu kimyasalların kazayı oluşturacak şartları incelenmeli, bu şartların proseste oluşup oluşmayacağı değerlendirilmelidir.

iv. Tehlikeli Ekipmanların Belirlenmesi: Ülkemizde 'Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik' kapsamında uygulanan tebliğe göre tehlikeli ekipman seçimi; ekipmanda bulunan tehlikeli kimyasalın miktarı, niteliği, operasyonel koşulları ve prosesteki konumu itibariyle büyük endüstriyel kazaya yol açacak ya da kazanın etkilerini artıracak ekipmanlar değerlendirilerek yapılmaktadır. Kritik ekipman ise; arızası yaşanması durumunda belirlenen tehlikeli ekipmanda büyük endüstriyel kazaya yol açacak veya kazanın etkisini artıracak ölçme (tespit), kontrol, önleme (BPCS) ve etkisini azaltma (SIS) görevinde olan her türlü ekipmanlardır (enstrüman, sistem, kontrol elemanı/ekipmanı) [43]. Bunlar pompa, vana gibi akışın iletimini sağlayan ara ekipmanlar da olabilmektedir. Tebliğdeki yaklaşım, bu tez çalışmasının önerisi ile benzerlik göstermekte olup tehlikeli ekipman seçim yöntemi için iki kriter dikkate alınmalıdır.

Olası proses kazasının şiddetinin yüksek olacağı ekipmanlar tehlikeli ekipmanlar olup 'Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik'inde kapasitelerinden dolayı bu ekipmanlar SEVESO ekipmanları olarak nitelendirilmektedir. Örnek verilirse; hacimce fazla olan tanklarda seviyenin kontrol edilememesi sonucu yaşanacak bütünlük kaybı ile ortama/atmosfere tehlikeli kimyasal yayılarak tehlike kategorisine göre proses kazası meydana gelir. Ekipman hacmi yüksek olduğu için yüksek miktarda yayılan kimyasal sonucu kazanın şiddeti de fazla olacaktır. Başka bir örnek verilirse, sıvı tankına sahadaki yangın alevinin ulaşması sonucu ısınan tankta artan buharlaşmanın yol açacağı bleve (kaynayan sıvı genleşen buhar patlaması) olayının yaşanmasıdır.

Proses kazasına gidişi kolaylaştıran ekipmanların değerlendirilmesi önemli bir kriter olup SEVESO kapsamında Hazop değerlendirilirken ihmal edilebilmektedir. Bu ekipmanlar sapma sonucunda kolaylıkla bütünlük kaybına gidebilecek olan tüm

ekipmanlar bu sınıfta değerlendirilmelidir. Sıcaklık değişimi ve sıcaklık kontrolünün kritik olduğu reaksiyonların yer aldığı reaktörler, özellikle buhar-sıvı faz dengesinin söz konusu olduğu distilasyon türü olan ayırma üniteleri, içerisinde reaksiyon veya ısıtma işlemlerinin gerçekleştirildiği yüksek enerji gereksinimli fırınlar, ısıtma işleminin uygulandığı sıcak su-buhar kazanı, ısı değiştirici gibi ekipmanların tehlikeli ekipman olarak mutlaka değerlendirilmesi önerilir. Yüksek reaksiyon entalpisine sahip ekzotermik bir reaksiyonun yer aldığı reaktörde sıcaklık artışının kontrol edilememesi beraberinde basınç artışını da getirerek bütünlük kaybına rahatlıkla gidebilecektir. Sıvı buhar dengesinin bozulmasına yol açabilecek sıcaklık, basınç, akış hızı gibi parametrelerde sapmaların yaşanması ayırma ünitelerinde işletilebilirliği direkt olarak sekteye uğrayacağı için kolaylıkla bütünlük kaybına gidecektir. Proseste yaşanan işletilebilirlikten sapma, kazaya sebebiyet verebilecek diğer parametrelerin de sapmasına yol açabilecektir, örneğin distilasyon kolonunda buhar miktarının artışı kolon içi basıncını ani artırabilir.

v. Düğüm Seçimi: İşletilebilirliğin sürdürülmesi ve kazaların önlenmesi/şiddetinin azaltılması için sapmaların yaşandığı bu ekipmanların kontrol altında tutulması gerekmektedir (equipment under control-EUC) [44]. Kontrol altında tutulması gereken tehlikeli ekipmanların dahil olduğu bir düğüm seçimi yapılarak Hazop yöntemi uygulanır. Belirlenen ekipmanın parametrelerinde olası sapmalardan sorumlu olabilecek ilgili ekipman (kontrol altında tutulacak ekipmandan öncesindeki hatlar ve bu hatlar üzerinde yer alan yardımcı ekipmanlar da değerlendirilerek) ve bu ekipmanın çıkış hatları da dahil edilir. Örnek, reaktöre geri beslemenin söz konusu olduğu bir proses akışında geri döngü hattı da reaktör düğümü içinde değerlendirilmelidir.
vi. İşletilebilirliği Sürdürülmesi: Prosesteki sapmaların kontrol altına alınmasını hedefleyen BPCS ile yürütülür (gelişebilecek sapmanın izlenmesi, sapma sebebinin araştırılması, sapmayı ortadan kaldıracak aksiyonun alınması: sensör/algılayıcı-karar verici-aktüatör). [44]. Burada hangi parametre(ler)deki sapmanın kontrolünün önemli olduğu incelenerek ölçülecek/izlenecek parametreler ve sırası belirlenir. Bir örnek ile parametre önceliklendirmesinin önemini açıklayacak olursak bir reaktörde kritik olan parametreler; reaktörün çıkış akımındaki sıcaklık, basınç ve akış hızıdır (Kritik olan parametreler ekipmana göre değişiklik göstermektedir, reaktör için çıkış şartları dikkate alınırken ayırma ünitesi için giriş şartları güvenli işletim için dikkate alınması gereklidir.). Reaktördeki çıkış sıcaklığının limit değerlerin üstüne çıktığı durumda reaktör iç basıncın da artmasına sebep olacak ve kontrol altına alınamadığında bütünlük kaybına

götüreceğinden değerlendirilecek olan ilk parametre sıcaklık olmalıdır. Sapmanın ivmelenme derecesine göre algılayıcı/sensörün hassasiyet seviyesi mutlaka belirlenmelidir (SIL yardımı ile sağlıklı bir şekilde yürütülür). Örneğin, kaynama noktasına yakın bir reaksiyonun yer aldığı reaktörde sıcaklığın hem sıvı-buhar yüzeyine yakın hem de derinlikte ölçülmesi gerekir.

BPCS'nin yetersiz kalması sonucu parametre sapmasının yol açacağı bütünlük kaybının öngörülmesi olası kazanın ne ve nasıl olacağı hakkında bilgi verir. Kazayı önlemek ve etkisini azaltmak için durumu fark edip devreye alınması gereken bariyerler çeşidi ve sırasına karar verilir (SIS).

Bu noktada BPCS ve SIS in kritik elementlerinin hata yapma durumlarının değerlendirilmesi önemlidir. (BPCS ve SIS için detaylı bilgiler örneklerle Bölüm 2.2.1'de verilmiştir.)

vii. Hazop çalışması tamamlandıktan sonra prosesin inşa çalışmalarına yönelik tüm ayrıntıların (prosesteki tüm ekipmanlar ve yedekleme sistemleri, ölçme, kontrol sistemleri, tüm vanalar, borulama sistemleri ve özellikleri) yer aldığı 'Borulandırma ve Enstrümantasyon Diyagramı' oluşturulur [41,42]. Eğer tasarım aşamasında uygulandıysa HAzop bu aşamada tamamlanmış olacaktır.

viii. Saha çalışmasında HAzop uygulandığında, tasarım için hazırlanan Hazop çıktısı P&ID'nin sahadaki P&ID ile kontrol edilmesi önemlidir. Mevcut P&ID'deki eksik/hatalı yerler belirlenerek gerekli değişiklikler yapılır. Risk değerlendirme sürecinin en başında kullanılması alışılagelmiş olan Kontrol Listesi metotu; bu tez çalışmasında önerildiği gibi risk değerlendirme çalışmasının bitiminde uygulandığında, elde edilen sonuçlarla sahada mevcut durumun kıyaslanmasına olanak sağlamaktadır.

Proseste yaşanabilecek sapmayı fark etmek, önlemek, önlenemediğinde gelişen bütünlük kaybı sonrası bariyerlerin sırası ile devreye girmesi için otomasyon sistemi ile yürütülmesi önerilmektedir. Prosesin güvenli bir şekilde işletilebilirliği için otomasyon sistemindeki temel proses kontrol sistemleri ve güvenlik bariyerlerinin etkili şekilde kullanıldığı Hazop metodolojisi aktarılmıştır.

Tehlikeli kimyasalların işletildiği proseste yaşanacak kazaların şiddetleri yüksek olacağından ve günümüz teknolojisinin etkisiyle de, bu proseslerde izleme, ölçme, kontrol ve müdahale sistemleri genellikle otomasyon ile yürütülmektedir. Sistemin otomasyon ile yürütülmesi çoğunlukla sahada uygulanmakla birlikte tamamı veya bir kısmı insan

müdahalesi ile yürütülmesi gerekebilir. İkili kontrolün söz konusu olduğu durumda insanın etkisi Hazop'ta değerlendirilirken otomasyon sistemi içinde insan faktörü değerlendirilmemektedir. Ancak otomasyon sisteminin bileşenlerinden birinin arızası durumlarında prosesteki ilgili otomasyonun görevini (parametre izleme, ölçme, sinyal-alarm verme, müdahale etme) insanın devralması gerekir. Ani olarak gelişebilecek otomasyon görevinin insan tarafından yürütülmesi durumu Hazop çalışmalarında çoğunlukla göz ardı edilmektedir. İnsan faktörünün ani gelişen ihtiyaç sonucu devreye girmesi ile prosesin reaktif kontrolü söz konusudur. İnsan tarafından hızlı ve acil kararların verilmesi gerekip, hazırlıklı olunmadığı için kazalar kaçınılmaz duruma gelebilir. Halbuki proaktif yaklaşım benimsenmiş olsaydı, otomasyon olası devre dışına çıkması göz önünde bulundurularak insanın bu görevi nasıl yerine getirmesi gerektiği de incelenmiş olurdu. İnsan faktörü; hem temel proses kontrol sistemi (BPCS) hem de güvenlik bariyeri (SIS) kapsamında alması gereken aksiyonlar, aksiyonları yürütme şekli ve bu süreçte yapabileceği olası hatalar çerçevesinde detaylı olarak değerlendirilmesi gereklidir. Bu tür durumlar geliştirildiğinde otomasyonun bir kısmının ya da tamamının insan tarafından proaktif yürütülmesi için insan faktörünün detaylı bir şekilde değerlendirileceği Hibrit Hazop (H-Hazop) metodolojisine ihtiyaç duyulmakta olup Bölüm 3.3'te insan hataları ve önleme yöntemleri detaylandırılmıştır.

3.3. Sapmalarda İnsan Faktörü

İnsan faktörü, insanın herhangi bir sistemdeki geri kalan sistem bileşenleriyle (çevre, organizasyon, ekipman vb.) etkileşimini inceleyen bir disiplindir [30, 45]. Proses güvenliğinde, insanın prosesteki ekipmanın/sistemlerin ve prosesin olağan/olağanüstü koşullarda güvenli bir şekilde işletilmesine ve kazayı önleme ve şiddet azaltmadaki katılımı dikkate alınmalıdır. Bu disiplindeki temel amaç, proseste yaşanabilecek insan hatalarının kök nedenlerini ve sonuçlarını belirleyerek olası hataların önüne geçmektir.

Kimyasal tesislerde gelişmiş kontrol sistemlerinin yanı sıra insan faaliyetlerinin etkin olduğu durumlar da mevcuttur. Örnek olarak; kontrol odasındaki insan müdahalesi, sahadaki insan müdahalesi, acil durumda müdahalelerin insan tarafından yürütülmesi ve tüm bu durumların yaşanmaması için bakım ve onarım faaliyetlerinin tespiti ve yürütülmesi sıralanabilir. Manuel bir şekilde işletilen tesislerde insan faktörü kritik bir öneme sahip olmakla birlikte prosesteki tüm işlemler (seviye, sıcaklık, basınç gibi parametre ölçülmesi, vananın

kapatılması vb. müdahalelerin yapılması) operatör tarafından yapılmaktadır. Otomasyon sistemi ile yürütülen tesislerde ise prosesi işletirken yaşanan belirsizlik, aksaklık gibi yeni durumlar söz konusu olduğunda (prosesteki otomasyon arızasında insanın devreye girmesi) operatör; 'aksiyon alan kilit kişi'den ziyade 'karar verici kilit kişi' olarak rol almaktadır. Özetle, ister otomasyon sistemi kurulu bir tesis isterse de manuel yürütülen bir tesis olsun 'insan'sız bir prosesin işletimi söz konusu değildir [45, 46]. Bu bölümde insan hataları tartışılarak kimyasal bir tesisin güvenli bir şekilde işletilebilmesi için insan hatalarının önemi ve önleme politikası yöntemleri verilmiştir.

3.3.1. İnsan hataları

İnsan hatalarını kabaca tanımlamak gerekirse, güvensiz durumlarda güvensiz eylemlerin gerçekleştirilmesi sonucunda meydana gelmektedir. Prosesin güvensiz durumları tasarım aşamasında değerlendirildiği için insan hatalarını önlemek veya en aza indirgemek için güvensiz eylemlerin hangi koşullarda hangi sebepler neticesinde gerçekleştiğinin sorgulanması gerekmektedir [46]. Literatürde insan hatası, pek çok tanımı olmakla birlikte genel olarak 'bireyin kabul edilebilir bir uygulamadan sapması sonucu kabul edilemez/ istenmeyen olayların yaşanması' şeklinde ifade edilebilmektedir [33]. Meister tarafından yapılan tanımda ise; "İnsanın yapması gereken bir işlevi, istenen süre içinde, yerine getirmede başarısız olma olasılığı" şeklindedir. Meister tarafından yapılan sınıflandırmada insan hataları dört ana grupta toplanmıştır [46]:

- Gerekli bir eylemin yanlış gerçekleştirilmesi
- Gerekli bir eylemin gerçekleştirilememesi
- Gerekli bir eylemin sıra dışı performansı
- Gerekli olmayan bir eylemin gerçekleştirilmesi

Bu sınıflandırmaya A. D. Swain tarafından ek bir kategori getirilmiş olup bu kategori 'Ayrılan süre içinde gerekli bir işlemin gerçekleştirilmemesi'dir [46].

Meister tarafından yapılan bu sınıflandırmayı 'prosesin güvenliği için gerekli olan vana müdahalesi' örneği üzerinden inceleyecek olursak; yanlış vananın açılması 'gerekli bir eylemin yanlış gerçekleşmesi', vananın açılamaması 'gerekli bir eylemin gerçekleştirilememesi', vananın devreye girmemesi 'gerekli bir eylemin sıra dışı

performansı', gerek duyulmayan yedek vananın devreye alınması 'gerekli olmayan bir eylemin gerçekleştirilmesi' kategorilerine aittir. Vananın geç açılması durumunu Swain tarafından yapılan ek kategoriye örnek olarak verilebilmektedir.

Bir başka insan hatası sınıflandırması ise; ekipman tasarımı ve yazılımı, çalışma yöntemleri, motivasyon, stres şekildedir. Proseste mevcut ekipmanların arızası ya da bakım-onarım faaliyetlerinin aksatılması sonucu ihtiyaç anında ekipmanların görevini yerine getirememesi, yanlış/eksik çalışma prosedürleri veya eğitim eksikliği gibi etkisiz organizasyonel faaliyetler ve güvenlik kültürü bilincinin oluşmaması (önce güvenlik tutumu yerine önce üretim tutumu), yetersiz ve kötü koşullarda çalışma yöntemleri, çalışanlarda motivasyon eksikliği ve stres faktörünün kişi ya da kurum tutumu sebebiyle doğru yönetilememesi (ağırlıklı olarak üst yönetim politikasının yanlış yürütülmesi) neticesinde de insan hataları gerçekleşmektedir [45, 30].

Ekipman tasarımı ve yazılımı kategorisinde yer alan 'insan ve ekipman (makine) arayüzü' (otomasyon sistemi) hemen hemen çoğu proseste mevcut olup buradaki insan hataları çok sık rastlanan hata türüdür. İnsan-makine arayüzü; proses bilgilerinin (anlık operasyonel şartların) operatöre iletilerek gerekli durumlarda parametrelerin değiştirilebildiği kontrol odasındaki proses kontrol panelidir. Aktarılan proses bilgilerinin içeriği; prosesin durumunun doğru bir şekilde anlaşılıp aksiyon planlarının oluşturulup hızla hayata geçirilmesinde kritik bir yere sahiptir. Bu kategorideki hatalar, üç aşamada gerçekleşmektedir: algılama, karar verme ve kontrol eylemleri olup bunlar proses kontrol sisteminin parçalarıdır. 'Algılama' aşaması duyular, göstergeler, sözlü iletişim ve kontrol odasındaki ekranlar ile proses parametrelerinin doğrudan gözlemini içermektedir. Bu aşamada manuel bir algılamada ya da göstergelerle veri algılamada operatörün yetkinlik ve dikkat düzeyine göre veri okuma konusunda hata yapılabilmekte ve bu durum sonraki aşamaları da etkilemektedir. 'Karar verme' aşamasında, sistemden edinilen veriler çerçevesinde uygun bir eylem planına karar verilmektedir ve operatörün yeteneği ve stres faktörünü doğru yönetebilme becerisi, olabilecek hataları belirlemektedir. Son aşama olan 'kontrol eylemleri' aşamasında ise, belirlenen kontrol eylemi sağlıklı bir şekilde uygulanmakta ve burada da benzer şekilde operatörün yetkinliği devreye girmektedir [46].

İnsan hatalarının sonuçlarının ortaya çıkma süresi açısından 'aktif' ve 'gizli' hata olarak ikiye ayrıldığından da bahsetmek gerekmektedir. 'Aktif hata'; istenmeyen duruma yol açan

olaylar zincirinin doğrudan başlatıcısı olup prosesi kazaya götüren hata iken, ‘gizli hata’; belirli bir zaman sonrasında ya da başka bir hata/sistem arıza ile birleştiğinde prosesi kazaya götüren hata türüdür [46]. Aktif hataya örnek verecek olursak; operatörün reaktörde karıştırıcının durduğunu kontrol etmeden reaktöre besleme yapmaya devam etmesi ile reaksiyon hızlanmasının yarattığı sıcaklık artışı sonucu zararlı bir yan ürün açığa çıkması ile gerçekleşen bir kazadır. Gizli hata da ise; operasyonel ve organizasyonel düzeyde hatalardan kaynaklanmakta olup genellikle bakım onarım faaliyetlerindeki hatalar veya eğitim yetersizliğidir. Boru hattındaki vananın bakımının aksatıldığı durumu örnek olarak inceleyecek olursak; vana bağlantı elemanlarındaki sızıntının fark edilememesi ve yanıcı bir kimyasalın vana bağlantı noktalarından çevreye sızması gizli hataya bir örnektir.

3.3.2. İnsan performansı

Proses parametrelerinin sapması durumunda operatörün fonksiyonu; prosesi olağan koşullardan uzaklaştıran parametre sapmalarını ve sapmaların nedenlerini tespit etmektir [45]. Ölçümün uygun zamanda ve hassasiyette yapılması gereklidir (sıcaklık, basınç ve seviye göstergesini izleme gibi). Sapma nedenleri ekipman arızasından ziyade insan hatası kaynaklı da olabilmektedir. Bu duruma örnek olarak; tank besleme vanasının operatör tarafından kapatılamaması sonucunda beslemenin devam ederek tankta taşmanın meydana gelmesi senaryosu verilebilir. Operatörün sapmanın nedenini tespit ettikten sonra sapmanın kök nedenine uygun bir düzeltme faaliyetini (müdahale etme) acil olarak hayata geçirmesi gerekmektedir (ısı değiştiricisi akış hızına müdahale, vana açma/kapatma vb. müdahaleleri sırasıyla ve zamanında yapması). Aynı zamanda, sapma olasılıklarını ortadan kaldırmak için insan bakım-onarım-değişim faaliyetlerinde de direkt olarak görev almaktadır. Tüm bu süreçte operatörün görevini başarıyla yerine getirebilmesi için ise ‘insan performansı’nın yüksek olması gerekmektedir, bu da operatörün görev yaptığı çalışma ortamlarındaki faaliyetlerinin incelenmesiyle belirlenmektedir [33]. Operatörün performansını etkileyen faktörler (PIF- Performance-Influencing Factors) optimal düzeyde tutulursa operatörün görevini başarıyla yapması sağlanacak ve operasyondaki hata olasılığını en aza indirecektir. Ancak bu durumda bile unutulamamalıdır ki performansta her zaman belirli miktarda değişkenlik mevcuttur ve bir proseste her zaman hata olasılığı olacaktır [46].

Performansa dayalı hata türleri çok çeşitli olmakla birlikte belli başlı örnekleri şunlardır. Prosesin karmaşıklığı, çok sayıda tehlikeli kimyasal mevcudiyeti ve dolayısıyla çok sayıda

tehlikeli ekipman ve kontrol edilememesi durumunda istenmeyen riskli sonuçlara sebep olacak kritik proses parametreleri insan faktörünün performansını etkileyen başlıca etkenlerdendir. Tehlike faktörü ve risk şiddetinin fazla olması çalışanlardaki stres faktörünü de artırarak performanslarını olumsuz etkilemektedir. Bir diğer önemli faktör ise zaman baskıdır. Buradaki zaman faktörünü kritik hale getiren, insan aksiyonu sonrası ekipmanın / prosesin yanıt süresidir (response time), çünkü ekipmanın yanıt süresi, gerekli kararın/aksiyonun alınması için operatöre düşen zamanı sınırlamaktadır. Ayrıca basit bir etken olarak gözükse de çalışma ortamının kalitesi (gürültü, aydınlatma, termal koşullar vb.) de kritik bir anda insan performansına doğrudan etki eder. Son olarak organizasyonel faktörlerden olan doğru personel tayini (işe uygun çalışan seçimi ve çalışana işe yönelik eğitimin verilmesi), güvenlik politikalarının kapsamı ve prosedürlerin etkinliği de insan performansını doğrudan etkilemektedir [46].

3.3.3. İnsan hatalarını önleme politikası

Yukarıda aktarılanlardan görüldüğü üzere insan hatasının sıklığının bu denli fazla olması, özellikle tehlikeli kimyasalların yer aldığı proseslerde kaza şiddetinin de oldukça yüksek olması, insan hatasının olabildiğince önlenmesi gerektirdiği göstermektedir. Bunun için de sağlıklı bir hata yönetimi politikası yürütülmelidir ve önerilen bu politika üç temel adımda gerçekleştirilmelidir [45, 47]:

- Hatanın tespit edilmesi
- Hatanın kök neden analizi
- Hatanın düzeltilmesi

Hatanın tespit edilmesi; otomasyona bağlı tesislerde genellikle izleme sonrası alarm sistemi aracılığıyla yapılırken manuel tesislerde prosesteki hata varlığını tespit eden operatördür. Otomasyona bağlı tesislerde dahi hatanın tespiti için temelde operatörün prosesle etkileşimini incelemek gerekmektedir. Operatörün tecrübesi, prosese ve ekipman görevlerine hâkim olması gibi becerilerini zamanında ve doğru bir şekilde kullanması sonucunda prosesteki yapılan ‘hata’ rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Doğru müdahalenin yapılması için hatanın kök nedeni araştırılmalıdır. Hatanın hangi yollarla, tek tür hata mı yoksa kombine hata silsilesi sonucunda mı gerçekleştiği, ne gibi durumlarda meydana

geldiği sorgulanmalıdır. Ardından ‘hata düzeltme’ aşamasında da hatanın tespit edilen sebeplerine göre uygun aksiyon planları yapılmaktadır [45, 47].

‘İnsan faktörünün’ bir proseste yer aldığı noktaları ve etkilerini açıklamak için ekzotermik bir reaksiyonun gerçekleştiği reaktör örneğini tekrar ele alalım. Reaktördeki sıcaklık parametresi limit değerlerinin dışına çıkıp çıkmadığı gözlemlemek için operatör; daimî bir şekilde ekipman yakınında bulunarak veya saha ziyaretleri yaparak sıcaklık parametresini izlemelidir. Ancak sapmanın gerçekleştiği anda operatörün uyuklaması, yorgun olması sebebiyle dikkatsiz olması, iş yükünün fazla olması sebebiyle zamanında ekipmana ulaşmaması sonucu sıcaklık sapmasını fark edemeyecektir. Operatör sapmayı fark etse bile, aksiyon aşamasında aksaklık/hata yaşanabilir. Örneğin, beslemenin yüksek hızda beslenmesi ile sıcaklık artışı durumunda akış hızını ayarlamak için ilgili vanaya müdahale edecekken gücünün yetmemesi veya bileğinin burkulması, vananın çalışma mekanizmasını bilememesi gibi sebeplerle aksiyonu gerçekleştiremeyebilir. Reaktördeki sıcaklık artışının sonucu olan basınç artışını ortadan kaldırmak için basınç rahatlatma vanasının devreye alınması aynı kişi tarafından yürütülürse benzer hatalar ile sonuca ulaşılmayacaktır. Bu sebeple güvenlik bariyerlerini devreye alma aşamasının farklı bir insan tarafından yapılması önerilmektedir. Proseste birçok görevin aynı insan tarafından yapılması, alınan aksiyonlardan birinde yapılan hatayı başka bir aksiyonda da tekrarlayabileceğinden bağımsız bariyer ilkesini de ortadan kaldıracaktır.

3.4. Hibrit Hazop Metodolojisinin Uygulama Adımları

Otomasyon sistemi ile yürütülen prosesler, otomasyon arızası/aksaklığı sebebiyle insana bağlı halde gelebilmektedir. Bazen de bu süreçler otomasyonla değil, tamamen insan ile yürütülmekte olup insan hatası kaynaklı ekipmanın/sistemin bütünlük kaybına gidebilmektedir. Bu tez çalışmasında, otomasyon sistemi bileşenlerinin arızası sonucu insanın devreye girdiği hem insan müdahalesi hem de otomasyon sistemi bileşenleri ile yürütülen prosesler ‘hibrit’ olarak tanımlanmakta olup bu proseslerdeki insan faktörünün devreye girmesi gereksiniminin sonuçlarının Hazop çalışmasında değerlendirilmesine yönelik Hibrit Hazop (H-Hazop) metodolojisi geliştirilmiştir. Otomasyon sisteminin tüm bileşenlerinin devre dışı kalması durumunda Hazop çalışmasını hantallaştıracağı için olasılığı yüksek devre dışı durumları için mutlaka insanın değerlendirilerek Hazop çalışmasına ilave edilmesi ile H-Hazop metodolojisi oluşturulur.

Geliştirilen H-Hazop metodolojisinde; risk değerlendirme ve GYS çalışmalarının bir bütün olarak yürütülmektedir. Risk değerlendirme aşamasında insan hatalarına yönelik elde edilen sonuçların tesisteki GYS uygulamalarında karşılığı değerlendirilerek eş zamanlı olarak bu noktada da iyileştirmeler yapılmaktadır. Ayrıca bu metodolojide tesisteki ölçme kontrol, bariyer sistemlerinin ve yürütülen organizasyonel faaliyetlerin yeterliliği, GYS'ye ait dokümantasyon çalışmalarındaki eksiklikler de ortaya konmaktadır.

Sağlıklı bir H-Hazop çalışmasının adımları aşağıda verildiği gibi belirlenmiştir.

i. Hazop metodunda olduğu gibi, proses giriş-çıkış akış hatlarının ve tüm ana ekipmanların belirlendiği 'Blok Akış Diyagramı' ve 'Proses Akış Diyagramı' oluşturulur. Ardından kimyasalların değerlendirilmesi ve tehlikeli kimyasalların belirlenmesi işlemleri de benzer şekilde yürütülür. Tehlikeli ve kritik ekipmanlar da Hazop metodunda belirtildiği yaklaşımla (EUC) benzer şekilde seçilir. Bütünlük kaybı, kazanın önlenmesi ve kaza şiddetinin azaltılması için tüm proses için otomasyon sistemleri (BPCS ve SIS) bileşenleri belirlenerek P&ID oluşturulur.
ii. H-Hazop metodolojisinde, olası arızalar sonucu otomasyon sisteminde bileşenlerin devre dışı kalması ile operatörün devreye girmesi değerlendirilir. Prosesteki olağan görevleri, sapmaları kontrol altına alarak bütünlük kaybına giden yolu durdurma ve olası kazayı önlemek, önlenememesi durumunda kaza şiddetini azaltma konusundaki otomasyon sisteminin görevini devralmaktır. Buradaki insan faktörünün prosese müdahalesinin hem olumlu hem de olumsuz sonuçlar doğurabileceği göz ardı edilmemelidir. Otomasyon sistemi arızası ile insana verilen bu izin yanlış müdahalelerle otomasyon sisteminin görevini yerine getiremeyebilir. Mümkünse her bir kontrol bileşeninde olası devre dışı kalma durumu için insan faktörünün nasıl devreye alınacağı belirlenerek H-Hazop çalışması tamamlanmalıdır. İnsan faktörünün gerek temel proses kontrol sistemleri (ölçme-karar verme-müdahale) gerekse de güvenlik bariyerleri (riski farketme-riski elimine/minimize etmek için uygun bariyeri devreye alma) kapsamında aldığı görevler H-Hazopta belirtilir.
iii. H-Hazop Performansının İzlenmesi: Analiz ile belirlenen öneri & önlem planları; uygun araçlar yardımıyla (eğitim, duyuru vb.) tüm tesis çalışanlarına bildirilir. Ek olarak bu planları uygulayacak kişilerin de eğitimlerinin tamamlanması gerekmektedir. Belirlenen öneri & önlem planları uygulandıktan sonra; proses, parametre, insan faktörleri ve çalışmaya entegre edilen GYS sürekli izlenerek metodolojinin performansı

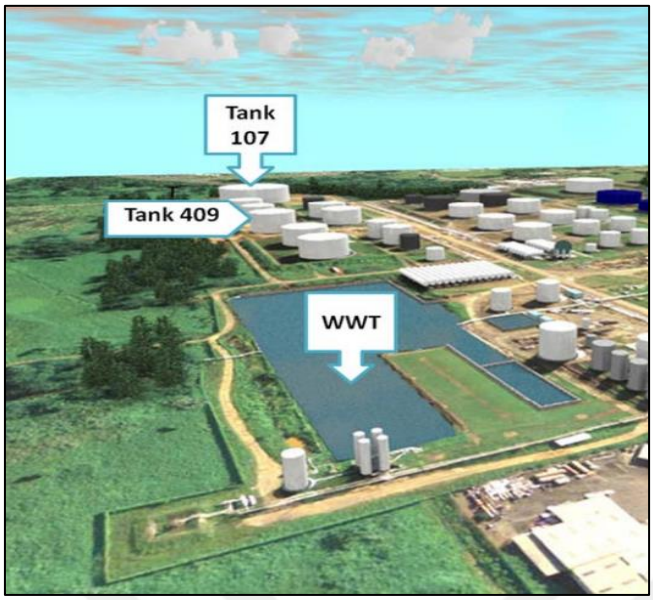
(uygulanabilirliği) da değerlendirilir. Proses güvenliğinin sağlanmasında eksik kaldığı noktalar tespit edildiğinde iyileştirmeler yapılır.

3.5. H-Hazop Uygulama Çalışması

Bölüm 3.4'te anlatılan H-Hazop metodolojisinin uygulama çalışması için 2009 yılında CAPECO isimli petrol ürünleri depolama ve dağıtım tesisinde tank havalandırma deliklerinden benzin sızıntısı sonucu meydana gelen patlama kazası değerlendirilmiştir. Yanıcı sıvıları depolama tesislerinde sıvının taşması sonucu CAPECO prosesinde yaşanan kazaya benzer kazaların meydana gelmesi olasıdır. Örneğin 2005 yılında Buncefield benzin depolama sahasında seviye göstergesi arızası ile tanktan taşma sonucu patlama meydana gelmiş, bu tür tank taşması ile yaşanan patlama kazalarının kimya endüstrisinde yaygın olduğu görüldüğü için CAPECO prosesi değerlendirilmek istenmiştir [48, 49].

3.5.1. Prosesin detayları

CAPECO (Karayip Petrol Şirketi) Porto Riko tesisi haftalık 43,5 litre fazla kurşunsuz benzin ihtiyacını San Juan Körfezi'ndeki rıhtımında Cape Bruny kargo gemisi ile karşılamaktadır. Benzin, akaryakıt, jet ve dizel yakıtı için depolama ve dağıtım tesisi olarak faaliyet gösteren CAPECO tesisi; tank çiftliği, hizmet dışı bırakılan rafineri, yönetim alanı ve atık su arıtma (wastewater treatment-WWT) tesisi alanlarından oluşmaktadır. Gemiden tank çiftliğindeki tanklara transfer operasyonu, tesis alanından 4 mil uzaklıktaki yükleme iskelesi üzerinde gerçekleştirilerek tank çiftliğinde değişik kapasitelerde tanklara transfer yapılmaktadır. WWT alanı ise, prosesteki tank içi temizleme sularını ve yağmur suyunu ilgili boru hatları vasıtasıyla bu noktada biriktirmek amacıyla kurulmuştur (Resim 3.1.)



Resim 3.1. CAPECO tesisi tank çiftliği ve atıksu arıtma alanı görünümü

Olağan koşullarda operasyon şu şekilde gerçekleşmektedir: gemiden yükleme iskelesindeki boru hattına bağlantı yapılarak kimyasallar tesisin yer üstü depolama tanklarına, tankların doluluk oranlarına göre bir ya da birden fazla tanka olacak şekilde pompalar aracılığıyla transfer edilmektedir. Tesiste 3 vardiya ile operasyonlar yürütülmekte olup her sabah vardiyasında operatörler tarafından tank seviyeleri kaydedilmektedir. Ayrıca atıksu arıtma tesisinde, borular aracılığıyla transfer edilen yağmur suyu tutma havuzu bulunmaktadır.

Rutin sevkiyat işleminde, benzin şayet tank boş ise, tam sevkiyatı alabilecek kapasitedeki (21 milyon galon) tek tank olan Tank 107 (T-107)'e yönlendirilmektedir. Gemiden T-107 tankına (gemideki benzinin tamamını alabilen tek tanka) ve bu tanktan diğer tanklara petrol ürünlerinin transferi operasyonu manuel olarak yürütüldüğünden bilhassa önem arz eden iletişim, CAPECO tesisinde telsizler aracılığıyla yapılmaktadır. Operasyonlar sırasında tank çiftliğindeki operatör tarafından manuel olarak seviye göstergesinden saatlik seviye ölçümleri yapılarak bu verilere göre ilgili tanklara yönlendirme işlemleri yapılmaktadır. Ek olarak tanklardaki otomatik bir seviye ölçer ile transferden önce, transfer sırasında ve transferin sonunda tank seviyesi otomatik olarak ölçülmektedir.

3.5.2. Kaza detayları

Kaza günü T-107 kısmen dolu olduğu için gemiden tank çiftliğine dolum operasyonunun, hacimce daha küçük tanklar (T-405, T-504, T-409, T-411) ve geri kalanı da T-107 üzerinden

yürütülmesi planlandı. Kaza gününden önce tank seviye göstergesi arızalanmış ve bakım onarım faaliyetleri yapılmamıştı. Bu sebeple tesisin Planlama Departmanında, boru hattının kapasitesine, gemiden boşaltılan hacme ve boşaltma yapılacak tankların doluluk oranına (seviye) göre işlem süreleri operatörler tarafından hesaplandı. Dolum operasyonunun 24 saati geçeceği belirlendi. Limandaki transfer ve tank çiftliğindeki benzin dağıtım operasyonlarının izlenmesi ve gerekli aksiyonların alınması için birer CAPECO operatörleri tarafından yapılmaktaydı.

T-409 saat 21.00-22.00 arasında maksimum doluma ulaşacağı için operatör tarafından 18:30'da akış hızının kısılması planlandı. Vardiya değişiminde herhangi bir komplikasyona mahal vermemek için operatör T-409'un vanasını neredeyse kapalı pozisyona getirerek (tanka akışı epey kısarak ama transfer az da olsa devam etmekte) ve T-411'in de vanasını açarak bu tanka transfer operasyonunu başlattı (eş zamanlı iki tanka da transfer yürütüldü.). Seviye ölçüm cihazlarındaki arıza nedeniyle (devre dışı) kontrol odasına seviye parametresine dair bilgi aktarımı olmadığından, operatörler saatlik olarak seviye okumaları (manuel) yapmaktaydı. Okuma verilerinden T-409'un gece 01.00'da dolacağı hesaplandı. Fakat saat 23.00-00.00 arasında T-409'a ait 6 havalandırma deliklerinden taşma ile benzin çıkışı başladı ve 26 °C sıcaklıktaki tanktan sızan benzin alçakta buhar bulutu oluşturarak ilgili tank çevresinde bir sis haline geldi. Gece yarısı operatörün saatlik seviye kontrolü için yaptığı saha ziyaretlerinde daha tanka ulaşmadan buhar bulutunu ve güçlü benzin kokusunu fark etti. Tanka benzin transferi operasyonunu durdurmak için limandaki operatörle iletişime geçip sızıntının kaynağını tespit etmeye çalıştı. Saat 00:23 olduğunda tahminen 26 dakika boyunca taşan benzin, tank daykının tahliye vanası açık olduğu için atık su arıtma alanındaki yağmur suyu tutma havuzuna ulaştı. CCPS raporunda tutuşmanın kaynağı net olarak belirtilmedi. CAPECO'da tahminen atık su arıtma alanında yanıcı kimyasal bulunacağı planlanmadığı için ATEX sınıflandırmasına göre belirtilen tutuşturma kaynaklarından (elektrik vb.) uzak bir ortam oluşturulmadı. Hâlbuki yanıcı kimyasalların salınım alanları içerisinde patlayıcı ortam yaratabileceği düşünülerek bu alanlarda tutuşturucu (ateşleme) kaynaklarının olmaması gerektiği ATEX standardından bilinen bir zorunluluktur [50]. Yanıcı kimyasal buharının/gazının/askıda kalan tozunun tutuşma limitleri dahilinde iken herhangi bir tutuşma kaynağı ile buluşarak tüm kimyasalın hızlı bir şekilde yanmasıyla meydana gelen patlama ATEX (atmosphere explosive, patlayıcı ortam) patlamasıdır. ATEX standardının temel prensibi normal işletme şartlarındaki kimyasal salınımlarının yaratacağı patlayıcı ortamlara karşı uyumlu ekipmanların kullanılmasıdır. Tankın bağlantı yerlerinden

ya da yüzer tavanın contasından sızıntısına karşın tehlikeli alan hesaplaması yapılarak bu alana uyumlu elektrikli ekipmanların seçilmesi mecburidir [50]. Tanktan dayka kimyasal yayılımı ise bir bütünlük kaybı olup dayktan buharlaşmanın yaratacağı patlayıcı ortamdan kaynaklı patlama yaşanmaması için bu alanların da ATEX uyumlu ekipmanlarla donatılması zaruridir. Dayktaki benzin; dayk temizliği için kullanılan dayk tahliye vanasının açık pozisyonda olması sonucu benzin bu alana ulaşarak patlama meydana geldi. Patlama ile hasar alan tanklardaki benzinler de tutuşarak 2 günden fazla süre boyunca yandı ve böylesine büyük bir yangını söndürme operasyonu yaklaşık 66 saat sürdü. Yangın söndürüldükten sonra tesiste mevcut olan 48 tankın 17'sinin yandığı tespit edildi.

3.5.3. Kazanın etkileri

Yangını söndürmek için gelen itfaiye ekipleri tesisin uygun yangın söndürme ekipmanları olmadığı için etkili bir çalışma gerçekleştiremedi. Yangın, ekipman eksikliği ve ekiplerin acil duruma karşı müdahale eğitimlerinin yetersizliğinden dolayı daha da fazla yayılmış olup yaşanan büyük endüstriyel kazanın etkilerini azaltma konusunda tesis başarısız olmuştur.

Kazanın insan sağlığı ve güvenliğine etkisi; herhangi bir ölümle sonuçlanmasa da patlamadan kaynaklı etrafa yayılan şarapnel ve cam parçaları üç kişinin yaralanmasına yol açmıştır.

Kazanın çevresel boyutu; açığa çıkan petrol ürünleri, kullanılan yangın söndürme köpüğü gibi kimyasallar toprağa, sulak alanlara yayılarak çevreye oldukça büyük zararlar vermiştir. Yaklaşık olarak 30 milyon galon petrol ürünleri; yağmur suyu kanalları, tesis içi ve dışına yayılan yüzey suları vasıtasıyla çevreye nüfus etmiştir. 2 günden fazla süren yangının dumanı da atmosferi kirletmiştir.

Kazanın ekonomik etkisi; 2,25 mil uzaklıktaki yaklaşık 300 ev ve işyerleri zarar görmüştür. Patlama sonucu atmosfere yayılan duman bulutu; hava ve kara ulaşımın bir süre kesintiye uğramasına yol açmıştır. Ayrıca bölgedeki birçok turistin de kaçmasına sebep olarak yerel ekonomi de olumsuz etkilenmiştir. İşletme, çevresel yükümlülükleri kapsamında 8,2 milyon dolardan fazla ödeme yapmıştır. Kazanın tüm bu etkileri neticesinde ise, dönemin başkanı Obama tarafından kazadan etkilenen belediyeler için yardım çağrısında bulunulmuştur.

3.5.4. Kazanın bulguları

Kazadan sonra CSB (U.S. Chemical Safety And Hazard Investigation Board) tarafından yapılan araştırmalar ve sorgulamalar neticesinde tanktan taşan benzinin ateşleme kaynağı kesin olarak belirlenemese de birden fazla potansiyel ateşleme kaynağı olabileceği raporlanmıştır. Tanktan benzinin taşma nedenleri; gemiden tanka transfer aşamasında benzin akış hızında artış, seviye göstergesi arızası ve tankın yüzer tavanındaki arıza olarak bulunmuştur. Tanktaki benzinin bütünlük kaybına uğramadan güvenli aralıkta işletilmesi için gerekli izleme sistemi; tanktaki seviye göstergesi ile otomatik izlemedir. Ancak kaza günü bu sistemin arızası sonucu dolum zamanının hesaplanması şeklinde (insana dayalı bir yöntem) seviyenin izlenmesi söz konusu olmuştur. 'Kontrol sistemi' olarak ise; otomatik seviye kontrolü ile kapanarak transferi diğer tanklara yönlendirmektedir. Otomatik seviye kontrol ve izleme sisteminde geçmiş operasyonlarda sık sık arızalanarak uzun süreli hizmet dışı kaldığı bilinmektedir. Ancak kaza günü, dolum zamanı hesaplanarak tank içi seviyenin kontrolü sağlanması planlanmıştır. Gözlem yoluyla takip edilen seviyenin aşırı bir şekilde yükselmesi durumunda, T-409'un besleme vanası kapatılarak akışın kesilmesi, kimyasalın transferinin T-411'e yapılabilmesi için bu tank vanasının açılması şeklinde aksiyonlar alınmıştır. Operasyon sırasında T-409'un vanası tamamen kapanmayıp tanka az da olsa akış devam ederken T-411'e transfer operasyonu başlatıldığı için (böylece her iki tankın vanaları da açık), tanklara giden akış hızları, hesaplama ile belirlenen akış hızlarından farklı olmuştur. Akış hızındaki bu farklılık değerlendirilmediği için hesaplanan tank dolum süresi geçersiz olmuştur. Bunun sonucu olarak tanktaki benzinin seviyesi kontrolsüz bir şekilde artmış ve tankta taşma meydana gelmiştir. Tank taşmasından sonra yayılım, yangın ve patlama gibi şiddetli kazaların oluşmasını engellemek için alınabilecek tek güvenlik bariyeri; tank etrafındaki dayktır. T-409'dan taşan benzinin WWT alanına ulaşmasının temel sebebi ise; daykın tahliye vanasının açık konumda bırakılmasıdır. Bu konu hakkında tesis çalışanları vananın kapalı olduğuna dair ifade vermelerine rağmen, CSB tarafından yapılan araştırmalarda, valfin açık konumda olduğunu tespit edilmiştir. Dayk tahliye vanasının sabit mil yapısı; vananın açık konumda olup olmadığını, gözle inceleyerek değil de elle (açıp kapamayı deneyerek) incelendiğinde anlaşılır kılmaktadır. Yanlış özellikte (ergonomik yetersizlik) vana seçimi ve kaza günü de operatörler tarafından manuel olarak vana konumunun kontrol edilmemesi (vananın açık bırakılması) de tanktan taşan benzinin WWT alanına kolaylıkla ulaşmasına sebep olmuştur. Böylece güvenlik bariyerinin (dayk içinde tutulması) başarısızlığıyla benzin, tutuşturucu kaynakla buluşup patlama meydana gelmiştir.

Bu patlamanın sebebi ise, yayılan yanıcı bir kimyasalın oluşturacağı patlayıcı ortama karşın uygun elektriksel ekipmanların seçilmemiş olmasıdır.

CCPS'in raporundan kazanın kök nedenini belirlemeye yönelik sorgulama yapılacak olursa; otomasyon sisteminin sürekliliğinin sağlanması gerekliliği öne çıkmaktadır. Kazanın kök nedenleri GYS unsurları çerçevesinde gruplandırılarak özetlenmek istenmiş olup aşağıda açıklanmıştır.

'İşletimin kontrolü'ndeki eksiklikler, seviye göstergesi ile otomatik izleme sisteminin sık sık arızalandığı ve uzun süre hizmet dışı kaldığı göz önüne alınarak değerlendirildiğinde; sistemin ihtiyaç duyduğu bakım onarım çalışmalarının yürütülmemesi kazanın yaşanmasında başlı başına büyük bir faktördür. Arızalı seviye göstergesine karşın yedekli bir sistemin olmayışı, bu sistemden bağımsız bir üst seviyeli güvenlik önlemlerinin (alarm, otomatik kapatma/durdurma sistemi) eksikliği kazanın yaşanmasındaki diğer etkili olan faktörlerdendir. Operasyon devam ederken ilerleyen saatlerde havanın kararmasıyla birlikte tesisteki yetersiz aydınlatma (kaza öncesinde de rutinde tesiste el feneri aracılığıyla tank seviye göstergelerinde değer okunmaktaydı); operatörlerin T-409'un taştığını ve atmosfere yayılan benzinin buhar bulutu oluşturduğunu görmelerini engellemiştir. Benzinin taşması durumunda oluşan buhar bulutunu fark edebilmek için gaz dedektörleri ve ilgili alarmın eksikliği de kazayı doğrudan etkileyen eksikliklerdendir. CAPECO'nun geçmiş kaza kayıtları incelendiğinde ise, doldurma & boşaltma & aktarma operasyonlarında pek çok taşmaların meydana geldiği belirlenmiştir. (8 taşma, 7 dökülme olayı). Bu olaylar her ne kadar patlama ve/veya yangınla sonuçlanmasa da Çoğu zaman patlama ve/veya yangına karşı ramak kala olarak değerlendirilse de bu olaylar esasen, tanktan tehlikeli kimyasalın taşması/dökülmesi olduğundan birer kazadır. CAPECO'da geçmişte yaşanan bu kazalardan da ders çıkarılmadığı açıkça görülmektedir. Operatörlerin gemiden ana tanka, ana tanktan diğer tanklara transfer operasyonları, tahliye vanalarını çalıştırmalarına dair prosedürlerde teknik bilgiler (faaliyetlerin nasıl gerçekleştirileceği, sorumlu kişi, acil durumda alınacak aksiyonlar vb.) bakımından eksiklikler bulunmaktadır. Kaza anında da yapılan uygulama olan aynı anda birden fazla tanka transfer operasyonuna dair ise herhangi bir prosedür bulunmamaktadır. Operatörlerin tankların maksimum dolum seviyesine kadar dolum yapmasına yönelik talimatların da verilmesi kazaya yakınlığı kolaylaştırmıştır.

‘Acil durumlar için planlama’ unsurunda ise; benzin buharının patlaması sonucu meydana gelen yangına karşı müdahale sürecindeki eksiklikler sıralanabilmektedir. Tesis personellerinin hem tesis içi hem de yerel acil durum müdahale ekipleriyle olan iş birliği çalışmasına yönelik kaza öncesinde bir planlama yapılmamış ve personellerin bu konuda aldıkları eğitimler oldukça yetersiz bulunmuştur.

Tesiste dolum operasyonunun uygulamasında ‘organizasyonel ve personel’ unsuruna dair hatalar da mevcuttur. Tesis yönetimi personel eksikliğinden dolayı gemiden tanka transfer operasyonunda ilgili tank bölgesinde 2 operatör, gemideki kontroller için ise bir operatör bulundurmaktaydı. CAPECO’da gemiden tanka transfer genellikle birden fazla tank ile yapılmaktaydı ve bu durumda da personel eksikliği, tanklar arası ürün transferi sırasında operasyonu tamamen kontrolsüz ve tehlikeli hale getirmekteydi. Tanklar arası transfer manuel olarak gerçekleştirilirken bazı tanklar (Örneğin T-409 ve T-411) boru hattı üzerinde aynı hattı paylaştıkları için, operatör başka bir tanka ürün transfer etmek istediğinde WWT operatöründen yardım istemekteydi, böylelikle bu alan gözetimsiz kalmaktaydı.

‘Değişimin yönetimi’ unsuru çerçevesinde; otomasyon sistemi devre dışı kaldığında insanın devreye girdiği durumların yaratacağı yeni riskler değerlendirilmemiştir ki kazanın da yaşanması tam olarak bu ihmaller sonucu yapılan hatalarla gerçekleşmiştir. Ayrıca operasyonel prosedürlerde de hem bu değişikliğe hem de birden fazla tanka yapılan transfer operasyonuna dair gerekli revizyonların değerlendirilmesi gerektiği belirlenmiştir.

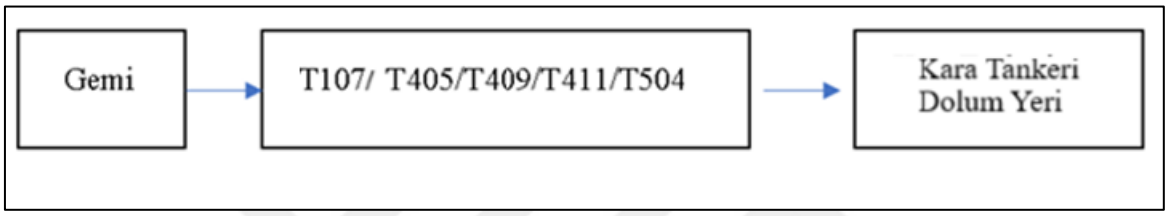
Bu tez çalışmasının temelini teşkil eden ve kazanın gerçekleşmesindeki en önemli eksiklik ise, otomasyon sistemindeki olası arızalara karşı insanın kontrol mekanizması olarak nasıl devreye gireceğinin planlanmamış olması ve bu planlamanın otomasyondaki aksaklıklar yaşandığı anda ani/reaktif olarak yapılmak zorunda kalmasıdır. Reaktif olarak yapılan bu planlama; akış hızına göre dolum zamanının hesaplanması esasına dayanan seviye kontrolünün sağlanması ile tamamen insana dayalı ve hataya oldukça açık bir kontrol mekanizmasının oluşturulmasıdır.

3.5.5. CAPECO tesisinde Hazop çalışması

Yukarıda proses ve kaza detaylarının anlatıldığı kazanın otomasyon sisteminin devre dışı kaldığı durumda devreye giren insan faktörünü değerlendirmeden önce tesisin rutin olarak

işletilmesindeki Hazop analizi Bölüm 3.2'de verildiği gibi aşağıdaki maddeler halinde uygulanmıştır.

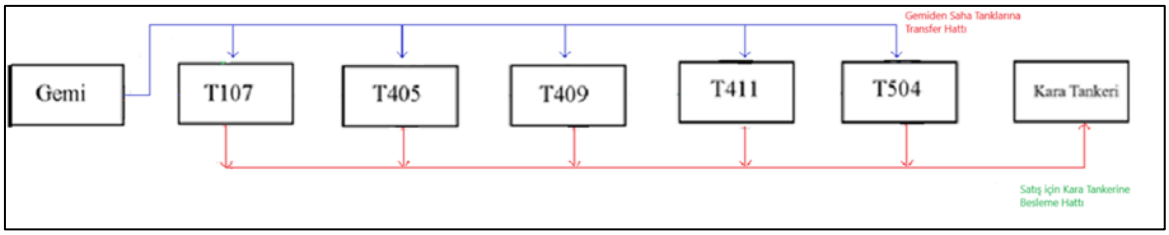
i. Proses Blok Diyagramı oluşturulması (PBD): Benzin depolama ve dağıtım prosesinde; körfezdeki gemiden ilgili tanklara kapasite durumları göz önüne alınarak dolum sırası belirlenerek benzinin transfer işlemi gerçekleşmektedir. Satışın yapılacağı miktara göre de dolum tankından kara tankerine transfer edilmektedir. Bu prosesin en temel gösterimi olan 'Girdi/Çıktı Konsept Diyagramı (Input/Output Concept Diagram)' aşağıdaki Şekil 3.2.'de verilmiştir [41, 42].



Şekil 3.2. CAPECO benzin depolama ve dağıtım tesisi girdi/çıktı konsept diyagramı

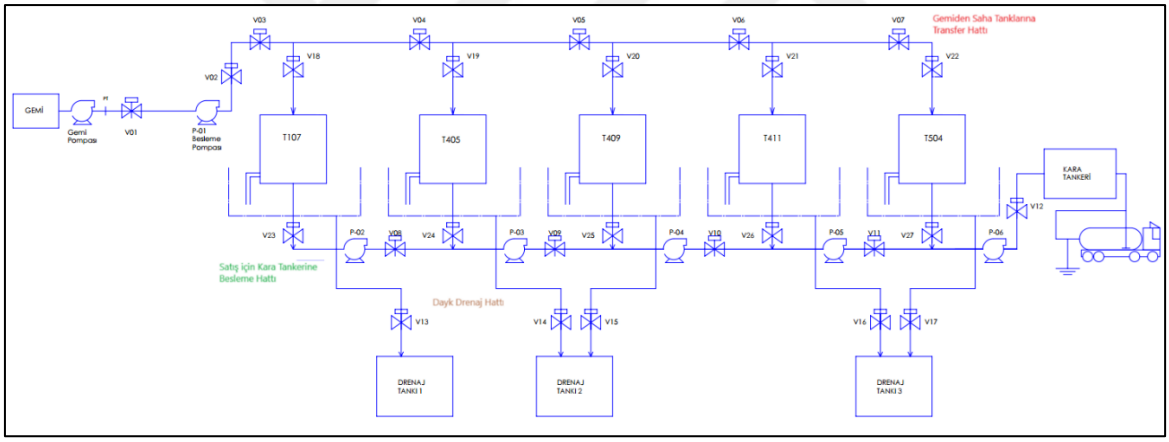
Olağan dolum operasyonunda gemiden transfer öncelikle en büyük kapasiteli T-107 tankına yapılmakta, bu tankın kısmen/tamamen dolu olması durumunda hacim büyüklüğü sırasıyla T-405, T-409, T-411 ve T-504 tanklarına transfer operasyonu yürütülmektedir. Artan benzin varsa T-504'ün besleme vanası kapatılmakta ve T-107 tankı önceliklendirilerek hangi tankın kapasitesi dolum için uygunsa sadece ilgili tankın besleme vanası açılarak akış yönlendirilmektedir.

Gemiden tanka transfer operasyonu; aynı boru hattı üzerinden, hangi tanka transfer yapılıyorsa sadece o tankın transfer vanası açılarak yürütülmekte ve kalan tanklara transferin engellenmesi için hat üzerindeki diğer tankların besleme vanaları kapatılmaktadır. Operasyon esnasında tanklardan birinde izin verilen seviyenin üzerinde (aşırı seviyede) benzin olması ile kontrol kaybı yaşanmaması için sonraki tanka transfer gerçekleşmektedir. Örneğin; T-405'e transfer yapıldığında diğer tanklara giden vanalar kapatılarak sadece T-405'e dolum sağlanmakta, sonraki tank olan T-409'a transfer için ise, T-405'in besleme vanası kapatılarak T-409'un besleme vanası açılıp tanka benzin girişi yapılmakta ve operasyon bu şekilde sırasıyla tanklara dolum yapılarak tamamlanmaktadır. Prosesin işleyişi hakkında bilgiler sağlayan 'Proses Blok Diyagramı' Şekil 3.3.'teki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3.3. CAPECO benzin depolama ve dağıtım tesisi proses blok diyagramı *(mavi renkli hat 'gemiden saha transferine besleme hattı', kırmızı renkli hat 'satış için kara tankerine besleme hattı')*

ii. Proses Akış Diyagramı (PFD)'nın oluşturulması: Yukarıda tarif edilen blok akış diyagramındaki ana ekipmanlarla birlikte ara ekipmanların da yer aldığı daha detaylı bir gösterim olan 'Proses Akış Diyagramı' aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur (Şekil 3.4.). Bu şekilde akışın yönünü değiştirmek ve/veya akışı durdurmak için gerekli olan pompa ve açma-kapatma vanaları sisteme yerleştirilmiştir.



Şekil 3.4. CAPECO benzin depolama ve dağıtım tesisi proses akış diyagramı

iii. Proses kimyasallarının değerlendirilmesi: Tesis kimyasalı olan 'benzin'in fizikokimyasal ve tehlike özellikleri incelenmiştir. Benzin, hem 'Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik'inde hem de 'Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik (BEKRA)' Ek'indeki tehlikeli kimyasallar listesinde yer almaktadır. Ayrıca Alman Sosyal Kaza Sigortası'nın tehlikeli maddelere ilişkin bilgi sistemi olan 'GESTIS Substance Database (GESTIS Madde Veritabanı)' kullanıldığında da benzini SEVESO III kapsamında bir kimyasal olduğu görülmektedir [51]. Bu kapsamda 'P5a- Alevlenebilir sıvılar' ve 'E2- Sucul ortamlar için zararlı' zararlılık kategorilerine girmektedir. BEKRA Yönetmelik

Ek'inde tehlikeli kimyasalların proseste bulunması gereken miktarların belirtildiği tablo incelenerek prosesin (tesisin) alt ya da üst seviyeli kuruluş olduğu belirlenir ve yaşanabilecek büyük endüstriyel kazanın şiddetine yönelik de ön bir fikir elde edilmiş olunur.

Tanktan taşıp daykta (atmosfere açık bir halde) biriken benzinin yanma riskinin değerlendirilmesi için parlama noktasının (flash point) dikkate alınması gerekmektedir. 35°C'den düşük sıcaklıklarda parlama noktasına ulaşan ve atmosferik şartlarda uçuculuğu yüksek olan benzinin dayktan hızlı bir şekilde buharlaşması kaçınılmaz bir durum olup oluşan buhar bulutunun tutuşturucu kaynakla buluşup ATEX patlamasına yol açmaktadır. Bu sebeple alevlenme limitleri içerisinde bir benzin buhar bulutu oluşmasından kaynaklanacağı için alt ve üst tutuşma limitleri bilinmesi gereklidir.

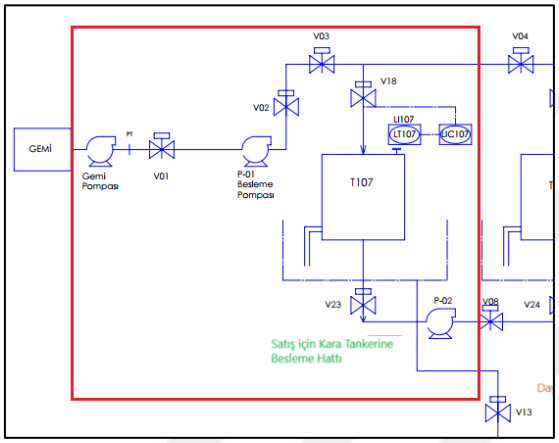
Benzini bulunduğu tank içinde güvenli bir şekilde muhafaza etme durumu değerlendirildiğinde; tehlike kategorisinin yanı sıra kaza yolunu kolaylaştıran bazı fizikokimyasal özelliklerin de değerlendirilmesi gerekir. İncelenen patlama, bütünlük kaybı sonucu tanktan taşan benzinin buharlaşarak atmosferde buhar bulutu oluşturmasıyla gerçekleştiği için kimyasalın faz değişim sıcaklıkları da göz önüne alınmalıdır. Tankta benzin seviyesi normal düzeyde olsa dahi şayet kaynama noktasına ulaşmış ise, artan iç basınç ile tankın mekanik bütünlüğü bozulacaktır. Sahada çıkan bir yangın alevinin tanka ulaşmasıyla benzinin buharlaşarak tank içinde iç basıncı artarak BLEVE (Kaynayan Sıvının Genişleyen Buhar Patlaması, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) türü patlamaya giden kazanın yolu da benzinin buharlaşma davranışıyla ilgilidir. Bu sebeple mutlaka kaynama noktasını dikkate almak gerekmektedir. Benzin için bu değer GESTIS Madde Veritabanı'nda 30-215 °C (CAS Number:8006-61-9) aralığındadır. Tartışılan bu kritik tehlike özellikleri de dahil olmak üzere benzinin bazı fizikokimyasal ve tehlike özelliklerine dair bilgiler aşağıdaki Çizelge 3.2.'de verilmiştir [51].

Çizelge 3.2. Benzinin fizikokimyasal ve tehlike özellikleri [51]

Kimyasal	Fizikokimyasal özellikler			Tehlike özellikleri			
	Kaynama noktası	Donma noktası	Yoğunluk	Tehlike kategorisi:	Parlama noktası	Alt Alevlenme Limiti (hacimce)	Üst Alevlenme Limiti (hacimce)
Benzin (8006-61-9)	30-215 °C	-90,5 - 95,4 °C	0,78 g/cm^3	-Yanıcı sıvılar (P5a) -Su ortamına zararlı (E2)	< - 35 °C	% 0,6	% 8

iv. Tehlikeli ekipmanların belirlenmesi: Bölüm 3.2'de açıklanan kriterler değerlendirilmiştir. 'Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik'te belirtilen tehlikeli ekipman seçim yöntemi dikkate alındığında kaza şiddeti yüksek olacağı için her bir tank tehlikeli ekipman olarak değerlendirilmelidir. T-107 tankı yüksek depolama kapasitesinden dolayı kritik önem arz etmektedir.

v. Düğüm seçimi: Bu çalışmada; hacimce daha fazla benzin içerdiği ve gemiden ilk transfer tankı olması sebebiyle T107 tankı ve tanka besleme hattı düğüm seçilmiştir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. CAPECO tesisi Hazop çalışması için seçilen düğüm

vi. İşletilebilirliğin sürdürülmesi: T-107'de prosesin güvenle işletilebilmesi için en önemli parametre seviyedir. Tanktaki benzin seviyesi; olağan işletme şartlarında değişebilecek bir parametre olmamakla birlikte (tank hacmine göre sıvı dışında boşluk hacmi de belirlenerek tank seviyesi güvenli limit aralığında tutulduğu için) bir hata sonucu (seviye ölçme sisteminin arızası, seviyeyi gözetleme camından kontrol eden operatörün hatası vb.) sapma yaşanabilecek bir parametredir. Burada tank seviyesinin olağan limit aralığından bahsederken, benzin depolama tankının doğası gereği güvenli tasarım yaklaşımı ile iç yüzer tavanlı tank seçimine vurgu yapılması gereklidir. Benzin gibi düşük kaynama noktasına sahip alevlenebilir sıvılarda buharlaşmayı sınırlandırmak amacıyla yüzer tavanlı tank tipinin kullanılması gerekmektedir [52,53]. Tank içindeki sıvı seviyesinin artması/azalması ile birlikte yüzer tavan sıvı üzerinde boşluk bırakmadan hareket etmektedir. Bu tasarım sıvı buharlaşmasını engellemekle birlikte yüzer tavanın tank iç cidarına temas ettiği yerdeki contalardan da buhar yayılımı söz konusudur. Bu yüzden düşük kaynama noktasına sahip alevlenebilir sıvılar için iç yüzer tavan tank kullanılmaktadır. Tankın dış tavanı, yüzer

tavanın tam doluluk oranındaki seviyesinin üzerinde emniyetli bir mesafe bırakılarak genellikle konik yapıda monte edilmektedir. Dolum seviyesinin kontrol edilememesinde yüzer tavanın dış tavana çarpması ile tankın mekanik bütünlüğü bozularak kaza meydana gelebilmektedir. Bu durumu önlemek amacıyla yüzer tavanın konik tavana ulaşmadan önceki bir seviyede yüzer tavan hareketi sınırlandırılması gereklidir. Belirlenen seviyenin üzerine çıkılmasını önleyecek fiziksel önlemler ve uyarı sistemi ile tankın donatılması tankın bütünlüğünün korunması konusunda büyük önem taşımaktadır. Atmosfere yüksek derişimde kimyasalın salınmaması için de hava emişi ile tank içindeki kimyasal seyreltildikten sonra nefeslikten salınım gerçekleştirilmektedir. Bunun için, konik tavana yakın mesafede havalandırma boşluklarının bulunması gerek toksik etkiye gerek de ATEX patlamasına yönelik bir önlem gibi düşünülebilir. Tankın maksimum hareket edilebileceği yer bu havalandırma deliklerinin aşağısındaki güvenli mesafede seçilmelidir.

Gemiden tanka benzin boşaltma ve saha tanklarına benzin transferinden oluşan temelde birbirine ardışık bağlı iki kesikli proses olduğu için tanktaki sıvı seviyesinin kontrol edilmesinde zorluk yaşanabilmesi ve kazaya yatkınlığın yüksek olması beklenen bir durumdur. Bu sebeple her iki kesikli sistem için de doğası gereği güvenli tasarım için pompalar, tank doldurma/boşaltma vanaları, akışı kesme vanaları ile çevrilmiştir. Gemiden transfer operasyonunda; gemiden gelen transfer hattı tesis tankına transferi için bağlantısı yapılarak gemideki mevcut pompa ve kesme vanası ile akışı sağlanmaktadır. Transfer operasyonu başlangıç ve bitiş aşamlarında kesme vanası ile tanka besleme hattındaki pompa aracılığıyla da akış sağlanıp kesilerek operasyon sonlandırılır. Benzin transferi yapılan tankta seviyenin kontrol edilememesi durumunda pompa durdurularak gemiden gelen hattan akışın kesilmesi sağlanmaktadır. Gemiden tanka besleme hattı üzerinde pompanın durdurulamama ihtimaline karşın pompa önüne akış kesme vanası konularak güvenli bir işletim sağlanmaktadır. Tanka dolum operasyonu tamamlanırken kesme vanası manuel olarak kapatıldığından vananın yetkin bir operatör tarafından yaklaşık 10 saniyede kapatıldığı düşünülmektedir. Vana kapatıldığında, vana ile tanka besleme hattı içerisinde mevcut benzinin tanka transferi devam edeceği için bu akışın da hacmi değerlendirilerek tank seviyesinin güvenli limit aralığında olup olmadığı incelenmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme için, öncelikle gemiden gelen benzin transferi boru hattının çapı, uzunluğu, pompanın basma debisi, motor gücü, tankın çapı ve yüksekliği gibi verilerinin elde edilmesi gereklidir [54-56].

Endüstriyel tesislerde özellikle petrokümya endüstrisinde yüksek tank kapasitelerinde haftalık ya da aylık gemi sevkiyatı ile hammadde depolama operasyonu gerçekleştirildiğinden, değerlendirilmek üzere ele alınan tankın kapasitesi saha uygulamaları da göz önüne alınarak 20 000 m^3 olarak varsayımda bulunulmuştur [54-56]. Gemiden tanka dolum ooperasyonu 24 saatten fazla süreceği bilindiğinden 26 saat olarak varsayılmıştır. Bu durumda gemiden beslenen benzinin debisi;

$$Q = \frac{20\,000\ m^3}{26\ saat} = 770\ m^3/saat \tag{3.1}$$

Belirlenen debi için uygun boru çapı seçiminde,

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi * V}} \tag{3.2}$$

Burada,

V=akış hızı (m/s),
Q=debi (m3/s)
D=boru çapı (m)

Borudan geçen alevlenir sıvının akış hızının belirlenmesinde; şayet düşk akış hızı seçilirse büyük boru çapı ve operasyon süresi demektir. Yüksek akış hızı ise, hat içi akış hızı parametresinin işletiminin kontrolünde zorluk yaşanmasına yola açabileceğinden ve boyut için de önerilen hız tablolarından yararlanılarak akış hızı 2 m/s seçilmiştir [57].

Buradan boru çapı,

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0{,}214\ m^3/s}{\pi * 2\ m/s}} \tag{3.3}$$

yaklaşık 0,369 m olarak bulunmuştur.

0,37 m çapındaki borunun uzunluğunu 20 m olarak ele alalım ve buradaki basınç kaybını hesaplayarak boru hattı tasarımında hat üzerindeki pompanın gücü ve verimliliği hakkında

ön bilgi edinilecektir. Bu noktada benzinin yoğunluğu, viskozitesi gibi fizikokimyasal özellikleri de GESTIS Madde Veritabanı kullanılarak ele alınmıştır.

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} = 1\ 332\ 000 > 4\ 000 \text{ , türbülanslı akış} \quad (3.4)$$

$$f = 0{,}079 * Re^{-0{,}25} \quad (3.5)$$

$$\Delta P = f * \left(\frac{L}{D}\right) * \frac{\rho * V^2}{2} \quad (3.6)$$

0,37 m çapındaki ve 20 m uzunluğundaki boru hattındaki basınç kaybı yaklaşık 0,307 kPa bulunmuş olup Bu hat üzerindeki pompanın gücü ve verimliliğini hesaplamak gereklidir. Bunun için pompa verimliliği genellikle üretici tarafından sağlanan değer olmakla birlikte endüstride yaygın kullanılan %80 verimlilik olarak kabul edelim.

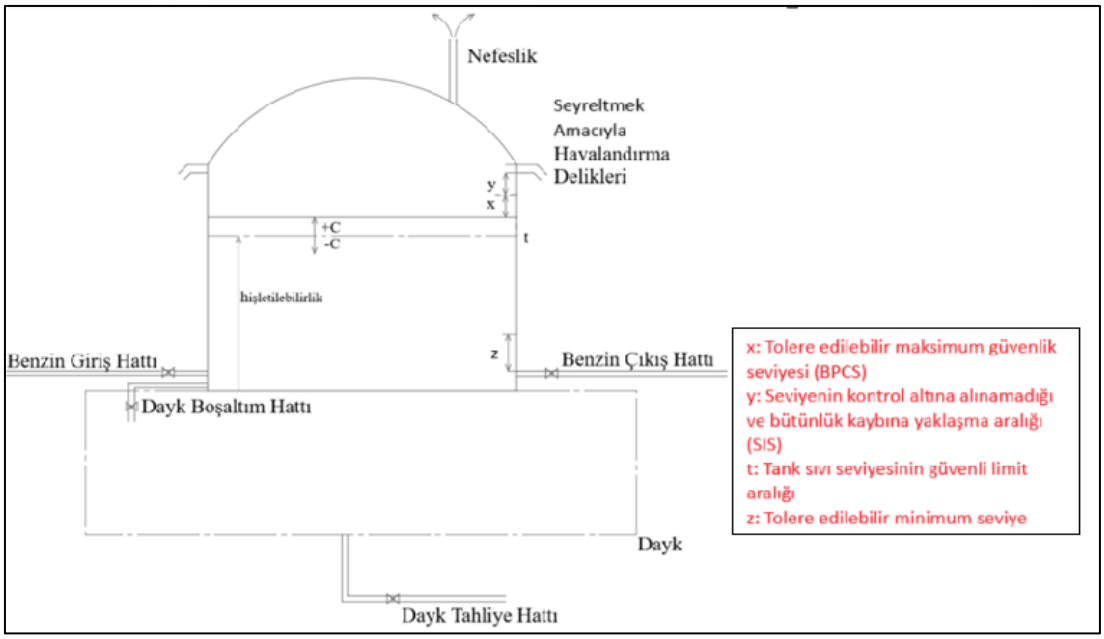
$$Ppompa = \frac{\Delta P * Q}{\eta} = 82{,}23 \text{ W} \quad (3.7)$$

%80 verimlilikte bir pompanın hidrolik gücü 82,23 W bulunmuş olup motor gücünün biraz daha yüksek olacağı düşünülmektedir.

Elde edilen bu veriler ışığında, tanktaki seviye sapmasını kontrol altına alabilmek için, 20 m uzunluğundaki boru hattındaki kesme (açma kapama) vanası kapatıldığı anda, boru hattı içindeki kalan benzin hacminin tanka eklenmesi ile tankın seviye limitini ne kadar etkileyeceği değerlendirilmesi de gereklidir. Bunun için ilk olarak tank tasarımına ve boyutlandırılması ile beraber belirlenen güvenli limit aralıklarını incelemek ve tanka besleme prosesinin detaylarının bilinmesi gereklidir.

Tanktaki sıvı seviyesini kontrol edebilmek hem operasyonun devam ettirilmesi hem de kazanın önlenmesi açısından önemli olduğu için sıvı depolama tankları seviye kontrol sistemi ile donatılmıştır. Bu sistem, tank içi sürekli seviye ölçümü yapılarak yüksek seviye durumunda otomatik olarak besleme pompasını durdurmaktadır. Tanka dolum operasyonunda pompalara ek olarak akışın sağlanması ve başka bir tanka transferin engellenmesi için hat üzerinde iki yollu manuel açma kapama vanaları bulunmaktadır. Tanka dolum tamamlanmasına rağmen başka tanka transfer edilemeyip tank seviyesinin aşırı artması durumunda taşma şeklinde gerçekleşecek bütünlük kaybına karşı ya da tankın tam hacmini alabilecek büyüklükte bir dayk (pasif bariyer) ile tankın etrafı çevrilmiştir. Aynı

bariyer, benzer şekilde tankta seviye artışını kontrollü bir boşaltım ile azaltmak amacıyla da kullanılabilmektedir. Daykta biriken benzin sistemde geri kullanılmak (drenaj tanklarına iletilerek) ya da bertaraf edilmek suretiyle dayk tahliye hattı üzerinden boşaltıldıktan sonra su ile daykın temizliği yapılmaktadır. Tarifi yapılan tankın detaylı gösterimi Şekil 3.6.'da verilmiştir [56-58].



Şekil 3.6. CAPECO tesisinde kullanılan benzin depolama tankı

Yukarda tasarımı anlatılan bir tanktaki sıvı seviyesinin belirlenen güvenli aralığı $h_{işletilebilirlik}$ olarak tanımlanmış olup bu nokta tankta t olarak ifade edilmiştir. t noktası; tankın %100 dolum oranındaki iç yüzer tavanın konumudur. Bu limit değerinin üstünde (+C: kontrol kaybı, aşırı yüksek seviye) seviyenin aşırı artışı yaşanmakta olup x seviyesine kadar yüzer tavanın tolere edilebilir maksimum seviyeye ulaşacaktır. Bu seviye, sapmanın kök nedenini sorgulayarak operatörün gerekli aksiyonu almaya fırsat bırakacak düzeyde belirlenir ve genellikle tank hacminin %60'ı şeklinde set edilir [58]. %60'ın altındaki sıvı seviyesi olağan işletilebilirlik seviyesi olarak kabul edilir. x seviyesinde iken (sıvı seviyesi tank hacminin %60'ını geçtiğinde), temel proses kontrol sistemleri (BPCS) ile tanktaki sapmayı kontrol altına almak ve tekrar güvenli limit aralıklarına çekmek amaçlanır. Sıvı seviyesindeki artış kontrol edilemeyerek tankın %80 seviyesine ulaştığında (y seviyesi) ise bütünlük kaybı yaşanacaktır. Bu noktada, üstte bulunan 6 adet havalandırma deliklerinden taşma olayı değerlendirilir ve güvenlik bariyerleri (SIS) devreye girer. Bunun için tank besleme vanası kapatılması, transfer hattındaki vananın açılarak seviyenin düşürülmesi ya da dayk tahliye

hattındaki vananın kapalı pozisyonda olduğu belirlenerek dayka kontrollü boşaltımın yapılması gerekir. İncelenen tankın kapasitesi 20 000 m^3 olarak varsayımda bulunulmuştur. Tanktaki sıvı seviyesi bu hacimlerin %80'ine ulaştığında havalandırma deliklerinden hava girişi sağlanarak olası sapma sonrası benzin buharının tank üzerinde bulunan nefeslikten ortama seyreltilerek yayılmasına ve toksik yayılımın azaltılmasına olanak sağlar. t limit seviyesinin altındaki (-C: kontrol kaybı, aşırı düşük seviye) aralık seviye düşük olarak belirlenmiştir ancak burada sadece işletilebilirliği etkileyeceğinden değerlendirilmeye alınmamıştır. Dikkate alınacak minimum seviye, en az bir kara tankerinin dolum hacmi kadar olup bu da işletmede tank hacminin %20'sinin altına düşmesi demektir ve tankta z noktası olarak belirlenmiştir.

Tarif edilen detaylar ve güvenli limit yüzdelerine göre kapasitesi 20 000 m^3 olan tankın çapı 25 m, yüksekliği de yaklaşık 41 m olarak varsayılmıştır. Vananın tamamen açık pozisyondayken kademeli olarak 10 saniyede kapatıldığı varsayılmıştır. Vananın kapanma süresince her saniyedeki fazla akan benzin miktarı; başlangıç akış hızından yola çıkılarak kapanma oranına göre hesaplanmıştır. Vana kapanana kadarki sürede boru hattından tanka fazladan beslenen benzin miktarı 1,195 m^3 olarak bulunmuştur. Tankın boyutları göz önüne alınarak yapılan hesaplamada tanka beslenen 1,195 m^3 lük benzin tanktaki seviyenin yaklaşık olarak 1 mm artmasına sebep olmuştur [56].

Güvenli tasarım gereği iç yüzer tavanlı tank tercihi ile seviye parametresi kontrol edilmeye çalışılırken tanktaki diğer parametrelerin de incelenmesi gereklidir. Sıvı depolama tankları atmosferik depolama sağladığı için sıvı üzeri oluşan buharın basıncı belirgin değişim göstermeyeceğinden seviye değişimi üzerinde etkili değildir. Tank içi sıcaklık yani başka bir deyişle benzin depolama sıcaklığındaki değişiklik, dış ortamda gelişen olağanüstü sıcaklık artışı (ortamda yaşanan herhangi bir yangın alevinin tanka sıçrayarak tank çeperinde sıcaklığın artması) sonucu olabilecektir. Kazanın oluşma sebebi sahada çıkan yangın alevi sonucu tank içi sıvı sıcaklığının artması ile söz konusu olabilir. Böyle bir durumda, tankta aşırı buharlaşma meydana gelecek ve sıvı üzerindeki basınç parametresi artacak ve mekanik bütünlük kaybıyla yaşanacak kaza olasıdır. Sonuç olarak, sadece depolamanın yapıldığı ve sıcaklığın da yaz aylarına göre baz alındığı tankın basıncının kolaylıkla değişmesi söz konusu değildir.

Yukarıda değerlendirilen sıcaklık, basınç parametrelerinin dışında, seviye parametresinin değişmesindeki en önemli etkiye sahip parametre tanka besleme akış hızı ve tanktan diğer tanka/kara tankerine beslenmek üzere çıkış akış hızıdır. Akış hızı, gemiden çıkış pompasının debisindeki aşağı/yukarı yönlü değişim ile etkilenecek olup bu durum bir hata sonucu (gemi pompasının arızası) meydana gelebilmektedir. Yüksek akış hızı, dolum sırasında tank içi benzin seviyesinin hızlı bir şekilde artmasına yol açacağı için bu yolla meydana gelen kontrol kaybını önlemek için seviye artışı üzerinde dolum zamanının sağlıklı değerlendirilmesi gerekmektedir. Gemi pompası ya da besleme pompasının durdurmak ve tanka akışın kesilmesi alınacak ilk aksiyondur ancak pompa durdurulamazsa ikinci bir açma kapama vanası ile akışın durdurulması gerekmektedir. Düşük akış hızında transfer ise; tankta düşük miktarda benzinin bulunmasına ve satış için kara tankerine az miktarda benzin transfer edilmesine sebep olur. Detaylı değerlendirmenin yapıldığı Hazop çalışması aşağıdaki Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. CAPECO tesisi için Hazop çalışması

PARAMETRE	OPERASYONEL KOŞULLAR	İŞLETİLEBİLİRLİK/İŞLETİMİN KONTROLÜ					BÜTÜNLÜK KAYBI	KAZA	TEHLİKENİN KONTROLÜ	
				Müdahale sistemi (BPCS)					Güvenlik Bariyeri (SIS)	
Seviye	$h_{işletilebilirlik}$+%60	Sapma / Tespit Yöntemi	Sonuç (İstenmeyen Olay)	Sapma Nedeni	Müdahale	BPCS'nin Elemanları			Bariyer	
Seviye fazla / Seviye Ölçümü			Ardışık olarak; -Tank sıvı seviyesi kontrol limitlerinin üzerine çıkması ($h_{işletilebilirlik}$ +C 'nin üzerine) -Yüzer tavanın tasarım sınırının üzerindeki seviyeye çıkması (havalandırma deliklerinin seviyesi)	Tanka besleme akış hızının artması 1. Tank besleme pompasının fazla basması 2. Gemi pompasının fazla basması	Akış hızının kısılması 1.Tank besleme pompası akış hızının azaltılması/ durdurulması 2.Gemi hattı transfer pompası akış hızının azaltılması/ durdurulması 3.Diğer tanka transfer	1.Tank besleme pompası, pompa önü açma kapama (kesme) vanası 2.Gemi pompası, pompa önü açma kapama (kesme) vanası 3.Diğer tanka beslemenin aktive edilmesi (ilgili vananın açılması) 4.Drenaj tankı ve bu tanka transferin aktive edilmesi	Yüzer tavanın havalandırma deliklerine ulaşması ile tanktan taşma	1.Tanktan taşma sonucu ortama benzinin yayılımı (benzinin dayka döküllmesi ve kısmi buharlaşma 2.Yüzer tavanı sabit tavana ulaşarak mekanik bütünlüğün bozulması ve sonrası -Daykta fazla benzin birikimi -Daha büyük buhar bulutu oluşumu 3.Daykta flash yangını 4.Dayktan benzinin sahaya yayılımı 5.Sahada patlama ve patlama yangını	1.Tank tahliye vanası ile fazla benzinin kontrollü olarak dayka/ boşaltılması ile tankın rahatlatılması 2.Dayk tahliye vanası (dayktan benzinin sahaya yayılımının önlenmesi) 2.i-Sıvı damlacık tespiti (sıvı dedektörü) 2ii.buhar/ gaz dedektörü ile benzin yayılımının tespit edilmesi 3.Köpüklü söndürme sistemi ile flash yangınına müdahale 4.Daha geniş alana yayılması durumunda saha organizasyonu (su ile benzin buharının seyreltilmesi, taşınabilir ATEX yönetmeliğine uyumsuz ekipmanların uzaklaştırılması, taşınamayan ekipmanların devre dışı bırakılması, statik elektrik tehlikesinden dolayı insan girişinin yasaklanması) 5.Yangın söndürme sistemi GÜVENLİ TASARIM: Dayk alanında tutuşturucu kaynak özelliğine sahip olmayan ekipman seçimi (ATEX UYUMLU)
				Tank dolumu tamamlandığında-besleme akışının devam etmesi 1. Seviye transmiteri yanlış değer göstermesi	Besleme akışının kesilmesi 1. Vanaya müdahale (tank besleme vanasının kapatılması) 2.Besleme pompasına müdahale (pompanın durdurulması) 3.Diğer tanka transfer	1.Yedek seviye kontrol sistemi 2.Besleme pompası önüne kesme vanası 3.Bir diğer tanka transfer hattı ve besleme vanası 4.Drenaj tankı ve bu tanka transferin aktive edilmesi				
				Sonraki tanka besleme operasyonunun başlatılmaması	Benzin transferinin sağlanması 1.Transfer vanasının aktivasyonuna müdahale	1.Yedek tank besleme vanası 2.Bir diğer tanka transfer hattı ve besleme vanası				

Çizelge 3.3. (devam) CAPECO tesisi için Hazop çalışması

Akış hızı	Seviye							
İşletme akış hızının X+%10 üstünde	Tank hacminin %20 sinin altı	Akış fazla / Akış hızı kontrolörü	Kara tankerine ürün beslenmesindeki kesinti	1.Transfer hattındaki vananın devreye girmemesi	2.Bir diğer tanka transfer 3.Drenaj kontrollü tankına boşaltım	3.Drenaj boru hattı ve besleme vanası	Kara tankeri transfer hattı üzerindeki ekipmanlara hava girişi olması	Pompanın bozulması	Kara tankeri transfer hattı üzerindeki tank çıkışına kesme vanası konularak hat üzerindeki diğer ekipmanların durdurulması
		Sevige az/ Sevige Ölçümü		Tanka besleme akış hızının azalması 1.Tank besleme pompasının az basması 2.Gemi pompasının az basması	Akış hızının artırılması 1.Tank besleme pompası akış hızının artırılması 2.Gemi hattı transfer pompası akış hızının artırılması	1.Akış ölçer, Tank besleme pompası açma kapama vanası 2.Akış ölçer, Gemi pompası açma kapama vanası 3.Yedek tank besleme / gemi pompası			
			Ardışık olarak; -Tank sıvı seviyesi kontrol limitlerinin üzerine çıkması ($h_{işletilebilirlik}$ +C 'nin üzerine) -Yüzer tavanın tasarım sınırının üzerindeki seviyeye çıkması (havalandırma deliklerinin seviyesi)	Tanka yüksek akış oranında besleme 1.Vananın fazla açılması 2.Tank besleme pompasının fazla basması 2.Gemi pompasının fazla basması	Akış hızının kısılması 1.Tank besleme pompası akış hızının azaltılması/ durdurulması 2.Gemi hattı transfer pompası akış hızının azaltılması/ durdurulması 3.Diğer tanka transfer	1.Tank besleme pompası, pompa önü açma kapama vanası 2.Gemi pompası, pompa önü açma kapama vanası 3.Diğer tanka beslemenin aktive edilmesi (ilgili vananın açılması) 4.Drenaj tankı ve bu tanka transferin aktive edilmesi	Yüzer tavanın havalandırma deliklerine ulaşması ile tanktan taşma	1.Tanktan taşma sonucu ortama benzinin yayılımı (benzinin dayka dökülmesi ve kısmi buharlaşma 2.Yüzer tavanı sabit tavana ulaşarak mekanik bütünlüğün bozulması ve sonrası -Daykta fazla benzin birikimi -Daha büyük buhar bulutu oluşumu 3.Daykta flash yangını 4.Dayktan benzinin sahaya yayılımı 5- Sahada patlama ve patlama yangını	1.Tank tahliye vanası ile fazla benzinin kontrollü olarak dayka/ boşaltılması ile tankın rahatlatılması 2.Dayk tahliye vanası (dayktan benzinin sahaya yayılımının önlenmesi) 2.i-Sıvı damlacık tespiti (sıvı dedektörü) 2ii.buhar/ gaz dedektörü ile benzin yayılımının tespit edilmesi 3.Köpüklü söndürme sistemi ile flash yangınına müdahale 4.Daha geniş alana yayılması durumunda saha organizasyonu (su ile benzin buharının seyreltilmesi, taşınabilir ATEX yönetmeliğine uyumsuz ekipmanların uzaklaştırılması, taşınamayan ekipmanların devre dışı bırakılması, statik elektrik tehlikesinden dolayı insan girişinin yasaklanması) 5.Yangın söndürme sistemi GÜVENLİ TASARIM: Dayk alanında tutuşturucu kaynak özelliğine sahip
				Tank dolumu tamamlandığında-besleme akışının devam etmesi 1.Seviye transmiteri yanlış değer göstermesi	Besleme akışının kesilmesi 1.Vanaya müdahale (tank besleme vanasının kapatılması) 2.Besleme pompasına müdahale (pompanın durdurulması) 3.Diğer tanka transfer	1.Yedek seviye kontrol sistemi 2.Besleme pompası önüne kontrol/kesme vanası 3.Bir diğer tanka transfer hattı ve besleme vanası 4.Drenaj tankı ve bu tanka transferin aktive edilmesi			
				Sonraki tanka besleme operasyonunun başlatılmaması	Benzin transferinin sağlanması	1.Yedek tank besleme vanası			

Çizelge 3.3. (devam) CAPECO tesisi için Hazop çalışması

Akış hızı		Transfer hattındaki vananın devreye girmemesi	1.Transfer vanasına müdahale 2.Diğer tanka transfer 3.Drenaj tankına kontrollü boşaltım	2. Diğer tanka transfer hattı ve besleme vanası 3.Drenaj boru hattı ve besleme vanası			olmayan ekipman seçimi (ATEX UYUMLU)
Akış yok / Akış hızı kontrolörü		Kara tankerine ürün beslenememesi	Akış hızının artırılması 1.Tank besleme pompası akış hızının artırılması 2.Gemi hattı transfer pompası akış hızının artırılması	1.Akış ölçer (tespit) 2.Yedek gemi / tank besleme pompası 3.Akış ölçer(tespit), Tank besleme pompası açma kapama vanası 4.Akış ölçer, Gemi pompası açma kapama vanası	-Hatta basınç artışı sonucu hattın zayıf noktalarından mekanik bütünlüğünün kaybolması (parçalanması)	1.Hattın mekanik bütünlük kaybına yol açması 2.Ortama benzinin yayılımı ve büyük buhar bulutunun oluşumu 3.Daykta flash yangını, 4.Buhar bulutunun patlaması ve/veya yangın	1&2.Basınç Vakum Rahatlatma vanası 2&4.Sıvı/Gaz dedektörleri ile benzinin tespit edilmesi 3.Köpüklü söndürme sistemi ile flash yangınına müdahale 4.Yangın söndürme sistemi Daha geniş alana yayılması durumunda saha organizasyonu (su ile benzin buharının seyreltilmesi, taşınabilir ATEX yönetmeliğine uyumsuz ekipmanların uzaklaştırılması, taşınamayan ekipmanların devre dışı bırakılması, statik elektrik tehlikesinden dolayı insan girişinin yasaklanması) GÜVENLİ TASARIM: Alanda tutuşturucu kaynak özelliğine sahip olmayan ekipman seçimi (ATEX UYUMLU)
Akış hızı		Tanka düşük akış oranında besleme 1.Tank besleme pompasının az basması 2.Gemi pompasının az basması	Akış hızının artırılması 1.Tank besleme pompası akış hızının artırılması 2.Gemi hattı transfer pompası akış hızının artırılması		Operasyon süresinde uzama	-	-
İşletme akış hızının X-%10 altında		Tanka beslemenin yapılamaması 1.Tank besleme pompasının çalışmaması 2.Gemi pompasının çalışmaması					
Akış hızı	Akış azl/ Akış hızı kontrolörü	Kara tankerine ürün beslenmesindeki kesinti					

Çizelge 3.3. (devam) CAPECO tesisi için Hazop çalışması

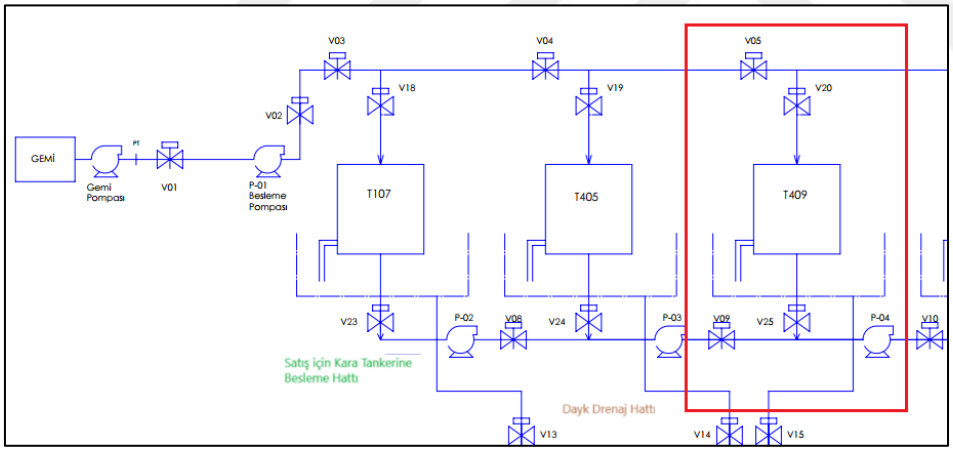
Sıcaklık							
Meteorolojik yaz ve kış sıcaklık aralıkları							
Sıcaklık yüksek / Sıcaklık Ölçer	Yüzer tavan üzerinde artan benzin buharı	Sahada yangın alevinin /ısısının tanka ulaşması	--	--	Yüzer tavan üzerindeki basıncın artması sonucu tankın parçalanması	1.Tankın zayıf noktasından parçalanarak mekanik bütünlük kaybı ile ortama benzinin yayılımı 2.Benzinin tutuşması 3.Benzin buhar bulutu oluşması 4.Buhar bulutunun patlaması ve/veya yangın	1.Tankın soğutulması (sprinkler sistemi) 1.Basınç rahatlatma vanası 2&3.Sıvı/Gaz dedektörleri ile benzinin tespit edilmesi 4.Yangın söndürme sistemi 4&5.Daha geniş alana yayılması durumunda saha organizasyonu (su ile benzin buharının seyreltilmesi, taşınabilir ATEX yönetmeliğine uyumsuz ekipmanların uzaklaştırılması, taşınamayan ekipmanların devre dışı bırakılması, statik elektrik tehlikesinden dolayı insan girişinin yasaklanması) GÜVENLİ TASARIM: Alanda tutuşturucu kaynak özelliğine sahip olmayan ekipman seçimi (ATEX UYUMLU)
Sıcaklık düşük / Sıcaklık Ölçer	Benzinin donma noktası düşük olduğu için (90.5-95.4 °C) işletilebilirlik ve kaza sonuçları üzerinde etkili değildir.	--	--	--	--	--	--
							4&5.Daha geniş alana yayılması durumunda patlayıcı ortama uygun ekipmanların seçilmesi ve sahada organizasyonu (su ile benzin buharının seyreltilmesi, taşınabilir ATEX yönetmeliğine uyumsuz ekipmanların uzaklaştırılması, taşınamayan ekipmanların devre dışı bırakılması, statik elektrik tehlikesinden dolayı insan girişinin yasaklanması

3.5.6. CAPECO tesisinde H-Hazop çalışması

Kaza günü otomasyon sisteminde yaşanan aksaklıklar sonucunda prosesteki temel proses kontrol sistemleri ve güvenlik bariyerlerinden bazıları veya tüm kontrollerin insan tarafından yürütülmesi ile kaza gerçekleştiği için proseste insan faktörünün doğru bir şekilde devreye alınması konusunda H-Hazop çalışması yürütülmüştür.

Otomasyon sisteminin gerekliliklerinin belirlendiği ve Bölüm 3.5'te detaylandırıldığı tüm adımlar (i.-iv.), varsayımlar ve öneriler; yapılan Hazop çalışmasında belirtildiği şekilde burada da geçerlidir. H-Hazop çalışmasında; otomasyon sistemindeki aksaklıklara insanın doğru bir şekilde entegre edilmesi için sadece insan faktörünün ilavesi yapılmıştır.

v. Düğüm seçimi: Tesiste yaşanan kazanın incelemesi yapıldığından, tanktan taşmanın yaşandığı T-409 ve bu tankın besleme-çıkış hatları düğüm olarak seçilmiş olup Şekil 3.7'da gösterilmiştir.



Şekil 3.7. CAPECO tesisi H- Hazop çalışması için seçilen düğüm

vi. İnsan faktörünün değerlendirilmesi: Proseste kazanın yaşandığı tank düğüm olarak seçildikten sonra burada insan faktörü değerlendirmesi yapılır. CAPECO tesisi yarı insan yarı otomasyon sistemi ile operasyonel faaliyetler yürütülmekte olup yaşanan kaza, her iki sistemin de hatası/arızası sonucu meydana gelmiştir. Patlama kazasının yaşandığı gün operasyonel faaliyetlerdeki 'insan'ın yeri; limandan tanklara benzin transfer operasyonunda gözlemci rolünde; seviye parametresinin ölçülmesinde izleyici rolünde; seviyenin kontrolünü sağlama rolünde, gerekli durumda hat yön değiştirme gibi işletilebilirliğin

sağlanması yani BPCS görevini yerine getirmenin yanı sıra dayka taşmayı önleme, dayka taştıktan sonra dayk dışına benzin salınımını sınırlama(tahliye vanasını kapalı konumda tutma), olası kazaları (flash yangını/patlama/yangın) önlemek/şiddetini azaltmak için SIS görevlerini de devralabilmektedir. Ayrıca insan faktörü bir karar verici olarak proaktif yaklaşımı (bakım onarım, işletme talimatları, acil durumlara müdahale vb.) gereksinimlerinin organizasyonunu zaten üstlendiğini de belirtmek gerekir.

Yukarıdaki rollere sahip operatörün kaza günü yaptığı hataların olay akışına göre şu şekilde irdelenmiştir. Proseste otomasyon sistemine bağlı olan seviye transmiterinin gerekli proaktif bakım onarım faaliyetlerinin operatör tarafından yapılmaması, kazaya sebep olarak sıralanabilecek ilk insan hatasıdır. Seviye transmiteri devre dışı kalarak operatör tarafından akış hızından yola çıkılarak yapılan manuel seviye hesaplaması durumu hatanın yaşanmasını oldukça elverişli hale getirmiştir. Bu aksaklıkların sebebini 'insan performansı' açısından değerlendirecek olursak, prosesteki yanıcı bir kimyasal olan benzinin tehlike faktörü ve risk şiddetinin yüksek olması operatörün operasyon esnasında stres seviyesini artırmış olabilir. Operasyon devam ederken T-409'un vanasını tamamen kapatmadan hem T-409 'a hem de sonraki tanka eş zamanlı akışın yürütülmesi operatörün T-409'un kalan hacminin benzinle dolma süresini yanlış hesaplamasına sebep olmuştur. Hat yönlendirme planlanmasında zaman parametresi öne çıkmaktadır. Dolum operasyonu sırasında alınan bu yanlış kararların temelinde; operasyona dair kritik bilgilerin prosedür bazında eksiklikleri ve tesis içi iletişimin olmaması yatmaktadır. Operatörlere maksimum seviyeye kadar benzin dolumunun yapılmasına yönelik izin verilmesi, insan hatasının asla sıfırlanamadığı bir proses için operasyonu daha da tehlikeli hale getirmiştir. Zamanlamada yaşanan sapma, taşmayla sonuçlanan bütünlük kaybına yol açmıştır. Çalışma ortamının kalitesinin düşük olması (yetersiz aydınlatma) operatörlerde saha ziyaretlerinin daha uzun aralıklarda yapılma isteği uyandırmış olabilir. Böylece havalandırma deliklerinden ilk sızıntının fark edilmesi ihtimalini düşürmektedir. Daykta sınırlandırılması planlanan benzin, sabah saha ziyaretinde dayk tahliye vanasının konumunun kontrol edilmediği için, dayktan WWT alanına ulaşmasına yol açmıştır. Burada meydana gelen buhar bulutu da patlamaya sebep olmuştur.

Bu kazada yapılan insan hataları; Bölüm 3.3'te verilen Meister'ın sınıflandırmasındaki şu gruplara girmektedir:

- Gerekli bir eylemin yanlış gerçekleştirilmesi (tanka beslenen benzinin akış hızını dikkate alarak zamana dayalı hesaplamanın hatası ile tank seviyesinin yanlış hesaplanması)
- Gerekli bir eylemin sıra dışı performansı (otomasyona sistemine bağlı olan seviye transmiterinin bakım planının ihmal edilmesi sonucu transmiterin devre dışı kalması)

Bunlara ek olarak yapılan hataları gruplandıracak olursak; tank tahliye vanasının açık/kapalı pozisyonda olduğu dışarıdan bakıldığında anlaşılamayacak şekilde ekipman tasarımı/seçiminin yapılması, çalışma yöntemlerinde operasyona ve acil durumlara karşı açık talimatların bulunmaması, kötü çalışma koşulları (yetersiz aydınlatma) ve güvenlik kültürü bilincinin oturmaması (geçmiş ramak kala ve kazalardan ders çıkarılmaması) şeklinde sıralanabilmektedir.

Yapılan hataları aktif ve pasif hata olarak gruplandıracak olursak; operatörün seviye ölçümünü akış hızından yola çıkarak tahmin etmeye çalışması ancak yanlış hesaplaması, prosesi doğrudan tehlikeye sürükleyen bir hata türü olduğu için aktif bir hatadır. Dayk tahliye vanasının açık konumda kalması ve operatörün vanayı kontrol etmemesinin sonucu ise, tanktan taşma yaşandığında ortaya çıktığı için gizli hatadır.

vii. İşletilebilirliğin sürdürülmesi: T-409 tankına transfer operasyonundaki kaza gününde yapılan insan hataları sıralanarak parametre sapması değerlendirmesi yapılır. Tankın bütünlük kaybına gitmesine sebep olan dolayısıyla kazanın yaşanmasındaki parametre sapması seviyenin kontrol dışına çıkmasıdır. H-Hazopta değerlendirildiğinde, ilk sorgulanacak şey tank seviyesinin çalışma şartları başka bir deyişle güvenli limit aralıklarıdır. Aralığın dışına çıkma sebebi operasyonel hata ve insan faktörü olarak sebepleri belirlenir. Kazadaki sapma nedeni; hem operatörün bakım planını aksatması sonucu seviye transmiterinin arızası hem de akış hızından yola çıkarak tanktaki seviye parametresinin manuel olarak yanlış hesaplanmasıdır ve her iki durum da insan hatası kaynaklıdır. Seviye transmiterindeki arıza ‘operasyonel sapma nedenleri’ olarak değerlendirilirken, tesisteki bakım planlarına uyulmaması ve seviyenin manuel olarak yanlış hesaplanması ise insan hatalarındandır. Tartışılan seviye parametresine dair sapma nedenleri, sonuçları, gerekli müdahale sistemleri Çizelge 3.4’de detaylıca irdelenmiştir.

Çizelge 3.4. CAPECO tesisi kaza günü için H-Hazop uygulaması eklentisi

PARAMETRE	İŞLETİLEBİLİRLİK/İŞLETİMİN KONTROLÜ							BÜTÜNLÜK KAYBI	KAZA	TEHLİKENİN KONTROLÜ		
		Sapma Nedeni								Güvenlik Bariyeri (SIS)		
	Sonuç (İstenmeyen Olay)	Operasyonel Arıza	İnsan Faktörü			Müdahale sistemi (BPCS)				Bariyer	GYS Çalışması Ve Öneriler
			Devreye Giren İnsan Hatası	Hatanın Nedeni	Kök						
Seviye	Sapma / Tespit Yöntemi										
Seviye fazla / Seviye Ölçümü											
$h_{işletilebilirlik}$ +%60											
OPERASYONEL KOŞULLAR											
	Yüzer tavanın tasarım sınırının üzerinde seviyeye çıkması	Seviye transmitteri arızası	a.Tasarımda yetersiz enstrüman (seviye transmitteri) seçimi b.Transfer operasyonu sırasında T-409'un besleme vanasının tamamen kapatılmaması ve tanka akışın devam etmesi c.Tank dolum zamanının yanlış hesaplanması d.Tank dolum operasyonun maksimum seviyeye göre ve aynı anda birden fazla tanka yapılması	a.Tasarım hatası b&d.Uygunsuz operasyonel davranış(güvenlik kültürü eksikliği) c.Bilgi/yetkinlik eksikliği Yapılan hesaplamaların birden fazla kişi tarafından kontrol edilmemesi		Tank besleme/gemi pompası akış hızının manuel olarak azaltılması Tank besleme/gemi pompası önündeki açma kapama vanasının manuel olarak kapatılması Tank besleme vanasının manuel olarak kapatılması Fazla benzinin diğer tanka transferi için ilgili vananın manuel olarak açılması	Yüzer tavanın havalandırma deliklerine ulaşması ile tanktan taşma	1.Tanktan taşma sonucu ortama benzinin yayılımı (benzinin dayka dökülmesi ve kısmi buharlaşma 2.Ortama yayılan benzinin ATEX'e göre uyumsuz ortama (WWT alanına) ulaşarak patlama/yangın	-Dayk çıkış vanasının yedekli ve kapalı şekilde kilitli olması -Dayk çıkış vanasının iki ayrı kişi tarafından kontrol edilmesi -Dayk tahliye hattına akış kontrol sistemi (akış transmitteri-açma kapama vanası) -Saha ziyaretlerinin sıklığının artırılması ve farklı kişiler tarafından organize edilmesi -Tank çiftliğinde yeterli düzeyde aydınlatma -Sıvı/gaz dedektörü ile benzin yayılımının tespit edilmesi -Yangın söndürme sistemi -Yayılan benzin buharının su ile seyreltilmesi, taşınabilir ATEX	-Yüksek seviye kontrol sistemi-operasyonunun tamamen durdurulması elemanlarından oluşan sistemin kurulumu -Dayk tahliye hattına akış kontrol sistemi-dayk çıkış vanasının kapatılması -Güvenilirliği yüksek enstrüman seçimi (yedekli, SIL seviyesi yüksek) -İşletme talimatlarının yenilenmesi, -Çalışmaların talimatlara uygun yürütülmesi -Ekipman bakım planlarının zamanında ve etkili bir şekilde uygulama -Talimatların personelin anlayabileceği açıklıkta ve güvenli işletilebilirlik

Çizelge 3.4. (devam) CAPECO tesisi kaza günü için H-Hazop uygulaması eklentisi

PARAMETRE	OPERASYONEL KOŞULLAR	İŞLETİLEBİLİRLİK/İŞLETİMİN KONTROLÜ							BÜTÜNLÜK KAYBI	KAZA	TEHLİKENİN KONTROLÜ	
		Sapma / Tespit Yöntemi	Sonuç (İstenmeyen Olay)	Sapma Nedeni				Müdahale sistemi (BPCS)			Güvenlik Bariyeri (SIS)	
				Operasyonel Arıza	İnsan Faktörü						Bariyer	GYS Çalışması Ve Önerileri
					Devreye Giren İnsan Hatası	Hatanın Nedeni	Kök					
											yönetmeliğine uyumsuz ekipmanların uzaklaştırılması, taşınamayan ekipmanların devre dışı bırakılması, statik elektrik tehlikesinden dolayı insan girişinin yasaklanması)	prensibine göre hazırlanması -Personellere riskler ve güvenlik kültürüne yönelik eğitim verilmesi -Çalışma alanına yetkin personellerin atanması

İnsan hataları kaynaklı yaşanan seviye sapmasını önlemek, kontrol altına almak ve bütünlük kaybına giden yolu durdurmak için yapılan H-Hazop çalışması, GYS ile ilişkilendirilir. Seviye transmiteri arızası kaynaklı oluşan seviye sapmasının 'insan hataları'na dayalı kök nedenlerine karşın yapılması gereken GYS kapsamlı faaliyetler temelde 'işletim kontrolü' ve 'eğitim' unsurlarına dairdir. Seviyenin kontrolsüzce artmasındaki temel 'insan kaynaklı hatalar'; güvenli ve doğru işletilebilirlikten uzak, kontrol sistemlerinin insana bağlı olması, uygun bakım politikasının izlenmemesi, prosesi güvenli işletebilmek için kritik olan proses ekipmanlarının (seviye transmiteri) düzenli kontrollerinin yapılmaması, doğru olmayan işletme talimatlarıyla prosesin tehlikeli bir şekilde işletilmesi, kuruluşta güvenlik kültürünün oluşturulmaması ve doğru personel seçimi ile prosese ve içerdiği tehlike/risklere dair etkili eğitimin ve yetkinliklerin verilmemesidir. 'Bariyerin insan olduğu durumlardaki hatalar'a dair incelenen GYS faaliyetleri ise; benzer şekilde 'işletim kontrolü', 'eğitim', 'değişimin yönetimi' ve 'acil durumlar için planlama' unsurlarıdır. Seviyenin kontrol altına alınamadığı andan itibaren yapılan bu insan hataları; tanktaki fazla benzinin diğer uygun tanka boşaltılamaması, proses ekipmanlarının (tank çıkış vanası, dayk drain vanası) düzenli kontrollerinin yapılmaması, güvenilirlik seviyesi çok daha yüksek (SIL seviyeleri) müdahale sistemlerinin olmaması, kuruluşta güvenlik kültürünün oluşturulmaması , yanlış/yetersiz işletme talimatlarıyla prosesin işletilmesi, operatörlerin acil durumlara karşı müdahalelere dair yetkinliklerinin olmaması, ekipman seçiminin doğru yapılmaması (elektrikli ekipman seçimlerinin patlayıcı ortamlar göz önüne alınarak seçilmemesi). Hem 'insan kaynaklı hatalar' hem de 'bariyerin insan olduğu durumlardaki hatalar'a dair sıralanan bu sebepler H-Hazop çalışmasında ' 'GYS Önerileri' başlığında değerlendirilmiştir.

Yapılan H-Hazop ile ortaya çıkan sonuç; ölçme ve müdahale sistemlerinin yedekli olmaması ve otomasyon sistemindeki yaşanan arıza kaynaklı seviye parametresinin ölçülememesi ile insanın devreye girmesi sonucu kök neden olarak seviyeyi yanlış tespit ederek dolum operasyonuna devam edilmesine izin verdiği için bütünlük kaybı (tanktan taşma) yaşanmıştır. Ek olarak insanın müdahale sistemi olarak devreye girdiği (BPCS) durumda da tank çıkış vanasının açılarak tank hacminin boşaltılması yapılamamış ve tanktan benzin taşmıştır. Daykta biriken benzin, yine insanın müdahale sistemi olarak devreye girdiği (SIS) durumda dayk tahliye vanasının açık bırakılması sonucu benzinin tutuşturucu kaynakla buluşmasına sebep olmuştur.

H-Hazop tamamlandıktan sonra H-Hazop performansının izlenmesi için; belirlenen öneri & önlem planları; eğitimler, bilgilendirme toplantıları, sahada operatörlerin en çok bulunduğu alanlarda ve tehlikeli ekipmanların çevresinde afişler/duyurular yardımıyla tüm çalışanlara bildirilir. Performansın izlenmesi için düzenli aralıklarla hem operasyonel hem de organizasyonel açıdan iç denetim yapılmalıdır. Acil durum planlarını belirlenerek tatbikatlar yapılmalı ve hem işletimin kontrolü hem de acil durumlara karşı müdahale açısından H-Hazop'un uygulanabilirliği ve performansı değerlendirilmesi gereklidir.

4. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında geliştirilen H-Hazop metodolojisi ile otomasyon sisteminin bileşenlerinden birinin arızası sonucu insanın ani bir şekilde devreye girdiği proseslerdeki 'insan faktörü' hem sapmaların kök nedeni hem de güvenlik bariyerlerindeki etkileri açısından araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Uygulama çalışması için seçilen tesis; alevlenebilir özelliğinden dolayı tehlikeli kimyasal sınıfına giren benzini depolayan bir akaryakıt depolama tesisidir. Bu tesiste mevcut ekipmanlar; olası bütünlük kaybı sonrası kazanın kolay yaşanması ve yaşanacak kazanın şiddetinin fazla olması çerçevesinde değerlendirilerek, prosesteki benzin depolama tanklarının her biri tehlikeli ekipman olarak belirlenmiştir. Geliştirilen H-Hazop çalışmasını da desteklemek için olağan koşullarda yaşanabilecek sapmalar ve bu sapmaların doğurabileceği bütünlük kaybı öncesi (BPCS) ve sonrasında (SIS) uygulanan güvenlik bariyerlerinin sorgulandığı Hazop yöntemi uygulanmıştır.

Tehlikeli ekipman üzerinden düğüm seçimi yapılırken, gemiden tanka benzin transfer operasyonu da dahil olacak şekilde ilk transferin yapıldığı, kaza günündeki tank dışında tanklardan biri olan T-107 değerlendirmeye alınmıştır. Tanktaki tüm parametreler göz önüne alınarak; sapma sonucu proseste işletilebilirliği bozarak bütünlük kaybına önemli etkisi olabilecek parametreler olarak; seviye, akış hızı ve tank içi sıcaklık seçilmiştir.

Tank içi seviyenin fazla olduğu sapma değerlendirildiğinde; beslenen benzinin akış hızının fazla olması (i.), tank dolum operasyonunun tamamlanmasına rağmen tanka beslemenin devam etmesi (ii.) veya sonraki tanka besleme operasyonun başlatılmaması (iii) ile gerçekleşebileceği belirlenmiştir. Tanka besleme akış hızının artmasının (i) sebepleri; besleme veya gemi pompasının fazla basmasından kaynaklanacaktır. Bu duruma müdahale olarak tank besleme pompası ve gemi pompasının akış hızının azaltılması veya durdurulması veya diğer tanka transferin gerçekleştirilmesi gereklidir. Mevcut durumda her iki pompanın önlerinde bulunan açma kapama vanaları, pompanın fazla basması sebebiyle gelen yüksek akış hızındaki benzini doğrudan transfer etmektedir. Pompa kaynaklı akış hızındaki artışa karşın açma kapama vanalarının önüne akış hızı kontrol vanası konulması önerilir. Böylece yüksek akış hızında gelen benzin kontrollü bir akış hızı oranında tanka transfer edilecektir. Akış hızının kontrol edilemediği durumda ise, uygun olan diğer tankın besleme vanası

açılarak transferin sağlanması gereklidir. Tank dolum operasyonunun tamamlanmasına rağmen seviye transmitterinin yanlış değer göstermesi(ii) sonucu beslemenin devam etmesinde ise; besleme akışını kesmek amacıyla tank besleme vanasının kapatılması, besleme pompasının durdurulması ve diğer tanka transfer operasyonunun başlatılması gereklidir. Bunun için de yedek seviye kontrol sisteminin bulunması ile doğru tank seviyesi tespit edilerek besleme pompası önüne konulması önerilen akış hızı kontrol vanası ile besleme akışı kesilecek ve diğer tanka transfer edilecektir. Sonraki tanka besleme operasyonunun başlatılamaması(iii), transfer aktivasyonun sağlanamaması (seviye ölçümü-vana arası aksaklık) değerlendirilmiştir. Benzin transferinin sağlanması amacıyla belirlenen müdahale yöntemleri; transfer vanasının aktivasyonuna müdahale edilmesi, bir diğer tanka akışın sağlanmasıdır. Sonraki tanka transfer hattında yedek vananın bulunması ile akışın sağlanması önerilmiştir. Sıralanan her üç kök nedenin kontrolü için devreye alınması önerilen BPCS elemanlarının görevini gerçekleştirememesi de söz konusu olabilir. Bu durumda bir sonraki tanka değil bir başka tanka transferin aktive edilmesi ya da tanktan taşmaya giden yolu durdurmak için sahada drenaj tankı bulundurularak bu tanka kontrollü boşaltılması ile aşırı seviyenin limit aralıklarına çekilmesi önerilmiştir.

Tüm bu müdahale yöntemleri etkili olmadığında ve tank içi seviye giderek arttığında benzinin havalandırma deliklerine ulaşmasına ve buradan (üst seviye) aşağıya ani dökülme ile statik elektriklenme yaşamasına izin vermeden tankın dibindeki dayka (sınırlı bir alana) kısmen ve kontrollü bir boşaltım yapılması daha güvenli bir yayılım olacağı için birinci bariyer olarak düşünülmüştür. Bu müdahalenin yapılamaması/etkisiz olması durumunda, yüzer tavan sabit tavana ulaşarak tankın mekanik bütünlüğü bozulacak ve daha fazla benzin yayılımı ile daykta daha fazla benzin birikimi yaşanacaktır. Benzin yayılımı olurken eş zamanlı olarak kısmi buharlaşma da yaşanacağı için ortamda daha büyük bir buhar bulutu oluşacaktır. Bu duruma yönelik dayk tahliye vanası kapatılarak sahaya benzin yayılımının önüne geçilmesi ve sıvı/buhar-gaz dedektörleri ile yayılan benzin ve buharının tespit edilmesi gereklidir. Tespit edilemeyip yayılım devam ettiği takdirde yaşanacak flash yangınına karşın üçüncül müdahale yöntemi olarak köpüklü söndürme sistemi, patlama ve yangına karşın ise yangın söndürme sistemi ile müdahale edilmelidir. Son müdahale olarak benzinin sahada daha geniş alana yayılabileceği düşünülürse, saha organizasyonunun çok iyi yapılması gereklidir. Örneğin; yayılan benzin buharının su ile seyreltilmesi, ortamda bulunan ve ATEX yönetmeliğine uyumsuz ekipmanlardan seyyar olanların uzaklaştırılması,

taşınamayanların devre dışı bırakılması, statik elektrik tehlikesinden dolayı insan girişinin yasaklanması bu saha organizasyonu kapsamındadır.

Tank içi seviyenin az olduğu sapma değerlendirildiğinde; kaza yaşanmayacak olup işletilebilirlik problemi olan kara tankerine ürün beslenmesindeki kesinti yaşanacak ve hat üzerindeki ekipmanlara hava girişi olarak ekipmanlar bozulacaktır. Sapmanın nedeni; tank ya da gemi besleme pompasının az basması sonucu tanka besleme akışında azalma kaynaklıdır. Müdahale yöntemi; bu pompaların akış hızlarının artırılması olarak belirlenmiştir. Sıralanan müdahale yöntemleri (BPCS) görevini yerine getiremediği durumda hat üzerinde (gemi pompası ve tank besleme pompası öncesi) akış ölçer konularak hangi pompa öncesi akış ölçerden akışın azaldığına yönelik veri/uyarı alındığında ilgili pompaya yönelik aksiyonlar alınması tavsiye edilmiştir. Buna yönelik, tank besleme ve gemi pompası açma kapama vanalarının önüne akış kontrol vanası konularak akışın kontrollü şekilde beslenmesi sağlanmalıdır. Ek olarak yedek pompaların kurulup devreye alınması da diğer tavsiye edilen müdahale yöntemlerindendir. Tüm bu müdahale yöntemleri etkili olmayıp kara tankerine benzin transfer edilemeden hat üzerindeki ekipmanlarda hava girişi kaynaklı bozulma yaşanacaktır, buna dair hat üzerine kesme vanası konulması tavsiye edilmiştir.

Akış parametresinin fazla ya da az olduğu durumlar için; seviye parametresinde ilk sebep olarak değerlendirilen akışın fazla ya da az olması burada parametre sapmasıdır. Dolayısıyla, seviye parametresinde akışın fazla olmasına sebep olan kök nedenler burada da geçerlidir. Kök nedenlerin kontrol altına alınması için belirlenen müdahale yöntemleri (BPCS) ve öneriler ile bu yöntemlerin etkisiz olması sonucu yaşanacak bütünlük kaybı, kaza ve beraberindeki güvenlik bariyerleri (SIS) benzer olarak belirlenmiştir.

Akışın hiç olmadığı senaryo değerlendirildiğinde; tank besleme ya da gemi pompasının çalışmaması sonucu tanka besleme yapılamayacaktır. Akış hızının artırılması amacıyla tank besleme ve gemi pompasının akış hızının çalıştırılması/artırılması belirlenmiştir. Tanka akışın sağlanması için, akış ölçerden aldığı veri ile (fark etme) tank besleme vanasının açılması, tank besleme/gemi pompasının (ya da yedeklerinin) çalıştırılması, pompaların önlerine konulan akış kontrol vanasının açılması önerilmiştir. Müdahale yöntemleri (BPCS) etkisiz kaldığında, gemiden tank besleme pompasına kadarki hatta bulunan benzin, tank besleme pompası arızası ile hattan iletilemeyeceği ve hat içinde git gide basınç artışı

yaratarak hattın zayıf noktalarından mekanik bütünlüğün bozulmasına sebebiyet vereceği belirlenmiştir. Bu duruma müdahale olarak hatta basınç artışının rahatlatmak için basınç rahatlatma vanasının açılması önerilmiştir. Ortama benzin yayılımı ve kısmi buharlaşma da yaşanacağı için tıpkı seviye parametresindeki sonuçlar yaşanacak olup önerilen bariyerler de aynıdır.

Sıcaklık parametresinin düşük olduğu durum; benzinin donma noktası düşük olduğu için (90.5-95.4 ˚C) işletilebilirlik ve kaza sonuçları üzerinde etkili olduğu düşünülmemiş olup değerlendirilmemiştir. Sıcaklığın yüksek olması ise, tanka sahadan yangın alevi/ısının gelmesi ile yaşanabileceği düşünülerek sonucunda yüzer tavan üzerinde basıncın artmasıyla tankın zayıf noktasından parçalanması değerlendirilmiştir. Tanka ısı kaynağının ulaşmasıyla ilk olarak hızla etki etmesi açısından tankın soğutulması gereklidir (sprinkler sistemi). Ardından sıcaklığın yaratmış olduğu basıncı rahatlatmak için basınç rahatlatma vanası açılmalı ve buna rağmen tankın parçalanması ile ortama benzin yayılımı olduğunda yine diğer parametrelerde belirlendiği gibi, sırasıyla sıvı/gaz-buhar dedektörlerle tespit ve etkili yangın söndürme sistemlerin devreye alınması önerilmiştir. Yine ortamın ATEX'e uyumlu hale getirilmesi de diğer bariyerler arasındadır.

Basınç parametresi ise, seviye artışı ile artacağı bilindiğinden tank tasarım çalışmalarında bu durum göz önüne alınarak yapıldığı varsayılmıştır. Bu sebeple sıvı depolama tanklarında basınç parametresini ayrıca değerlendirmeye gerek görülmemiş olup diğer parametrelerdeki değişiklikler incelenirken basınca etkisi de değerlendirilmiştir.

Genel olarak alanda tutuşturucu kaynak özelliğine sahip olmayan ekipmanların seçilmesi güvenli tasarım ilkesi gereği tüm parametre sapmaları için uygulanması önerilmektedir. Proaktif önlem olarak ise; senaryolarda konu olan tüm vana, pompa ve enstrümanların bakım onarım çalışmalarının düzenli olarak yürütülmesi gereklidir. Sapmanın yaşandığı ve kontrol altına almaya çalışıldığı, bütünlük kaybını önlemeye yönelik çalışmaların yapıldığı aşamada uygulanmasa da tesisi işletirken belirli periyotlarla uygulanması gerektiği unutulmamalıdır.

Hazop çalışması sonucunda otomasyon sisteminde yaşanan herhangi bir aksaklık/devre dışı kalma durumunda insanın hangi görevi devralacağı ve bu esnada yapabileceği hatalar değerlendirilmediği belirlenmiştir. Bu kapsamda insan faktörlerini göz ardı etmemek ve insanın devreye girdiği senaryoda hem kök neden hem de güvenlik bariyerleri (BPCS ve

SIS) açısından yapılan insan hatalarını değerlendirmek üzere H-Hazop çalışması yürütülmüştür.

Proses akım şemasının oluşturulması ve tehlikeli kimyasalların değerlendirmesi aşamaları Hazop çalışması ile aynı şekilde ilerlemiştir. Benzer şekilde, prosesteki tüm tanklar kontrol altına alınması gereken ekipmanlar (EUC) yani tehlikeli ekipman olarak değerlendirilmiştir ancak kaza günü değerlendirmesi yapıldığından kaza anında taşmanın yaşandığı T-409 tankı ve besleme-çıkış hatları düğüm olarak seçilmiştir. Hazop çalışmasından farklı olarak bu noktada 'insan faktörü' belirlenmiştir. Hem insan hem de otomasyon sistemi ile yürütülen bir tesis olan CAPECO'da kaza günü otomasyon sistemi bileşenlerinden birinin arızası sonucu devre dışı kalan seviye transmiterinin yaptığı seviye ölçme görevini insanın devraldığı belirlenmiştir. Ayrıca kaza günü yapılan tüm operasyonel faaliyetlerdeki insan hatası belirlenerek hatanın kök nedenleri sorgulanmıştır. Belirlenen insan hatalarından; operasyonel hata/arıza; kaza gününde yaşanan seviye transmiterinin arızasıdır. Bu arıza sonucunda gerekli bakım onarım çalışmalarının da yapılmamasıyla proses insana daha çok bağlı hale gelmiş ve insan hatalarının meydana gelme olasılığı artmıştır. Burada yapılan insan hatası ise; seviye transmiteri bakımının yapılmayıp tank seviyesinin operatör tarafından hesaplanması da kazaya yönelik yapılan en büyük organizasyonel hata olmuştur. Operasyonu işletirken, T-409 besleme vanasının tam olarak kapatılmadan tanka akışın devam ettirilmesi ve tank kapasitesinin tamamı baz alınarak dolum operasyonunun gerçekleştirilmesi (güvenli limit aralıklarında kalınmaması) de tankın ağzına kadar dolup taşmasına sebep olan insan hatalarındandır. Ek olarak böylesine güvensiz bir dolum operasyonu gerçekleştirilirken operatörlerin aynı anda birden fazla tanka transfer operasyonuna dair hem prosedür bazında hem de eğitim/yetkinlik açısından eksik olmaları da kazanın yaşanmasına adeta destek olmuştur. Belirlenen bu hataların yaşanmasındaki kök nedenler; tasarım hatası (yetersiz enstrüman seçimi), uygunsuz operasyonel davranış ve güvenlik kültürü bilincinin oluşmaması, bilgi/yetkinlik eksikliği, yapılan hesaplamaların birden fazla kişi tarafından kontrol edilmemesi olarak tanımlanmıştır. Ardından belirlenen müdahale yöntemleri 'insan faktörü' açısından değerlendirilmiştir. Müdahale yöntemleri; tank besleme ya da gemi pompasının akış hızının operatör tarafından azaltılması, azaltılamadığında operatör tarafından tank besleme/gemi pompası önündeki açma-kapama vanalarının insan tarafından kapatılması, tank besleme vanasının insan tarafından kapatılması ve gazla benzinin diğer tanka transferi için ilgili vananın açılması olarak belirlenmiştir. Böylece insan hataları ve insanın bariyer olduğu kurtarıcı durumlar göz önüne

alınarak prosesteki insan faktörünün önemi vurgulanmıştır. Tüm müdahale yöntemlerinin etkili olmaması durumunda mekanik bütünlük kaybı yaşanarak tanktan benzin taşmış ve taşan benzin açık olan dayk çıkış vanasından tutuşturucu kaynağın bulunduğu ortama yayılmış ve 'patlama' meydana gelmiştir. Belirlenen kaza gerçekleştiğinde etkisini/şiddetini azaltmak için ise güvenlik bariyerleri öncelik sıralaması yapılarak listelenmiştir. Tanktan taşan benzinin ortama yayılmadan tek bir yerde toplanması açısından etkin bir dayk ve elbette dayk tahliye vanasının kapalı pozisyonda olması oldukça önemlidir. Bunun kontrolü için saha ziyaretlerinin sık aralıklarla ve farklı kişiler tarafından yapılması gereklidir. Dayk tahliye vanasının yedekli ve kapalı olarak kilitlenmesi önerilmiştir. Yine de vananın açık kalması ve kontrol edilmemesi ihtimaline karşın dayk tahliye hattına akış ölçer konulması önerildi ve hatta akış tespit edildiğinde dayk tahliye çıkış vanasının (açma kapama vanası) kapatılması belirlenmiştir. Saha kontrolleri ile benzinin tank havalandırma deliklerinden ilk sızıntısı gerçekleştiği anda operatörün fark edebilmesi açısından sahada yeterli düzeyde aydınlatmanın sağlanması, sıvı/gaz-buhar dedektörleri ile benzinin tespit edilmesi ve yangın söndürme sistemi ile yangına müdahale edilmesi, taşan benzin buharının yayılacağı alanlarda ATEX'e uygun elektrikli ekipman seçiminin yapılmış olması şeklinde bariyerler sıralanmıştır. Ayrıca sıvıların boru hattında akışı ile oluşan statik elektrik yüküne yönelik önlemler de belirlenmiştir. Oluşan statik elektrik yükü boşalırken oluşan kıvılcım; alevlenir buharı, gazları veya yanıcı toz bulutunu tutuşturabilecek bir enerjiye sahiptir. Özellikle tanktan kara tankerine dolum sırasında tanktaki seviye transmitterinin (tankın) ve tankerin topraklamasının yeterli düzeyde olmadığı durumda statik elektrikten kaynaklı patlama, yangın meydana gelmektedir. Bu durumun önüne geçmek için, alevlenir sıvı bulunan tankın, tankere doldurma/boşaltma operasyonları sırasında tankerin ve hortumların bağlantı noktalarının yeterli düzeyde topraklanması, operasyon öncesi kontrollerin yapılması ve bu ekipmanların (topraklama ve bağlantı elemanları) düzenli olarak test ve muayenelerinin yürütülmesi gerekmektedir. İnsanlardan kaynaklanan statik elektrik akışına karşın ise, uygun malzemeden yapılmış kişisel koruyucuların giyilmesi oldukça önem arz etmektedir.

GYS'nin yedi unsuru göz önüne alındığında, yapılan hataların en çok 'işletim kontrolü', 'değişimin yönetimi' ve 'acil durumlar için planlama' unsurlarıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bu kapsamda yapılan GYS öneriler ise; ekipman tercihinin operatörün vananın pozisyonunu net görebilecek şekilde seçilmesi (dayk çıkış vanasının sabit mil seçimi), proseste insana bağlı ölçme ve kontrol sistemlerinden ziyade bağımsız koruma katmanlarının (algılayıcı-karar verme mekanizması-aksiyon) tercih edilmesi, güvenilirlik

seviyesi yüksek enstrüman seçimi, dayk çıkış hattında akış ölçerin varlığı ile hatta akışın fark edilmesi ve böylece tank tahliye vanasının kapatılması, dayk tahliye vanasına kapalı kilit uygulanması, yüksek seviye ölçüm sistemleri ile set edilen limit değerlere ulaşıldığında operasyonun tamamen durdurulması, işletme talimatlarının proses güvenliğini destekleyici şekilde yeterli ve anlaşılır olması, özellikle kritik operasyonlardan sorumlu personellerin riskler ve güvenlik kültürüne yönelik eğitimi olması, bakım planlarının yeterli olması ve bu planlara sadık kalınması, olası acil durumlara karşın tüm personelin eğitiminin verilmesi, tesiste her bir operasyon için ayrı ve yetkin personelin atanması, sahada yeterli aydınlatmanın sağlanması şeklinde sıralanabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında önerilen H-Hazop yöntemi ile, otomasyon sisteminin olası aksaklığı sonucu devreye giren insan müdahalesiyle birlikte hem insan hem de otomasyon sisteminin yer aldığı proseslerde insan faktörü detaylı olarak sistematik bir şekilde irdelenmiştir. Seçilen tesiste, mevcut otomasyon sisteminde yaşanan arızaya doğrudan müdahale etmek yerine ilgili aksiyon (otomasyon sisteminin görevi) insan tarafından yürütüldüğünden geliştirilen H-Hazop çalışmasının etkili bir şekilde değerlendirilmesi için uygun bir tesis olarak düşünülmüştür. Devreye giren insan faktörü ile meydana gelen kazaya yönelik uygulanan H-Hazop çalışmasının sonuçları özetle şunlardır:

Benzin kimyasalı alevlenebilir özelliğinden dolayı tehlikeli kimyasal olarak belirlenmiş ve benzin bulunduran tüm tanklar tehlikeli ekipman olarak bulunmuştur. Düğüm seçiminde ise, kaza incelemesi yapıldığından taşmanın yaşandığı T-409 tankı ve besleme-çıkış hatları göz önüne alınmıştır. Kaza günü tesiste yapılan tüm faaliyetler değerlendirilerek ‘insan faktörü’ belirlenmiştir. Hem kazaya sebep olan kök neden açısından hem de kazayı önlemek/etkisini azaltmak için bariyer olarak insanın etkisi sıralanmıştır. Bunlar; seviye transmiteri bakımının yapılmaması, tanktaki seviyenin insan tarafından hesaplanması, tanka akışın tamamen kesilmeden (besleme vanası kapatılmadan) diğer tanka operasyonun başlatılması, tankların maksimum seviyesine (tam kapasiteye) göre dolumun yapılması olarak sıralanmıştır. Yapılan hatalara yönelik müdahale yöntemleri belirlenmiş ve insan tarafından tanka akışın besleme vanası, pompası aracılığıyla azaltılması ve tankta bulunan fazla benzinin uygun tanka transferinin sağlanması olmuştur. Kaza meydana geldiğinde etkisini/şiddetini azaltmaya yönelik; dayk, kapalı pozisyonda dayk tahliye vanası, sık sık saha ziyaretleri, yeterli düzeyde aydınlatma/dedektörlerle benzinin tespiti ve yangın söndürme sistemi şeklinde bariyerler önceliklendirilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde kaza günü; ‘işletim kontrolü’, ‘değişimin yönetimi’ ve ‘acil durumlar için planlama’ unsurlarına ait insan faktörlerinin kazanın gerçekleşmesinde etkisinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan değerlendirmede çıkan sonuçta; hata sebeplerinin genellikle bilgi/eğitim eksikliği, yanlış operasyonel davranış, yapılan işe özgü risklerin bilinmemesi şeklindedir. H-Hazop çalışması ile kazanın yaşanmasında belirlenen temel sebepler; seviye transmiterinin bakımının ertelenmesi ve tank seviyesinin insana dayalı hesaplama yapılarak yanlış belirlenmesi ile tank hacminin üstünde dolum yapılması, aynı anda birden fazla dolum

operasyonuna dair operatörlerin bilgilerinin olmamasına karşın bu dolum operasyonun tank hacminin maksimum seviyesine kadar yürütülmesi ve tank daykının tahliye vanasının açık unutulmasıdır. Görüldüğü gibi tüm bu sebepler bilgi ve eğitim eksikliği ile güvenlik kültüründen yoksun yanlış operasyonel davranışlardan kaynaklanmaktadır.

Geliştirilen H-Hazop ile Hazop yaklaşımında tespit edilen bazı hatalar/eksikliklere yönelik yenilikler getirilmiştir. İlk olarak; prosesteki kimyasalları değerlendirirken, genellikle sadece tehlikeli kimyasallar (tehlike kategorisinde yanma, patlama, toksik yayılım özelliği bulunan) üzerinden yapılan değerlendirme yerine tehlikeli olmayan kimyasalların da tehlikeli hale gelebileceği uygun şartlar göz önüne alınarak bu şartların proseste oluşup oluşmayacağı incelenmiş ve elde edilen sonuca göre tehlikesiz kimyasalın da değerlendirmeye alınması önerilmiştir. Bir diğer öneri ise; prosesteki düğüm seçiminin sadece ilgili ekipman ya da hat üzerinden parçalar halinde belirlenmesinden ziyade her bir tehlikeli ekipmanın görev tanımı göz önüne alınarak sapması durumunda bütünlük kaybına götürebilecek parametreler üzerinden kontrol altında tutulması gereken ekipmanın (EUC) belirlenmesi olmuştur. Bu parametrelerin de başka hangi parametrelerden kaynaklanabileceği ya da başka hangi parametreleri etkileyebileceği incelenerek tehlikeli ekipmanın önü ve arkasındaki ekipmanları da içerecek şekilde düğüm seçilmiştir. Böylece daha detaylı, akıştan kopmayarak herhangi bir detayı atlamayacak şekilde düğüm belirlenmiştir. Bir diğer husus ise, bu tez çalışmasının da konusu olmakla birlikte prosesteki otomasyon sisteminde olası aksaklıkta insanın devreye girmesi ve aldığı aksiyonlarla işletilebilirlik ve kazaya giden yolda yaptığı hata ya da iyileştirme durumu değerlendirilmiştir. H-Hazop ile otomasyon sistemi yerine devreye giren insan müdahalesinin ne olduğu ve detayları incelenerek insanın prosese katkısı ortaya çıkarılmıştır. Bunlara ek olarak H-Hazop çalışmasında tank dayk tahliye hattında yedek vananın olması ve kapalı bir şekilde kilitli tutulması gerektiği belirlenmiş ve buna yönelik faaliyetlerin hayata geçirilmesi önerilmiştir. Ayrıca hat üzerinde akış ölçer konularak akışın varlığında daykın tahliye çıkış vanasının kapatılması aksiyonu önerilmiştir. GYS'ye dair sunulan öneriler ise; doğru ve ergonomik ekipman seçimi, güvenilirlik seviyesi yüksek bağımsız koruma katmanları (algılayıcı-karar verme mekanizması-aksiyon), öncelikli olarak dayk tahliye vanasının kapalı kilitli olması, kapalı olmama ihtimaline karşın dayk çıkış hattında akış ölçer ile tank tahliye vanasının kapatılması, işletilebilirliğin kontrol edilmediği durumda kazayı engellemek adına operasyonun tamamen durdurulması, kuruluştaki tüm

çalışanlara güvenlik kültürü bilincinin verilmesi, ekipmanların bakım onarım faaliyetlerinin yürütülmesi, acil durumların tanımlanarak planlanması şeklinde belirlenmiştir.

Tez çalışmasının çıktıları yukarıda verilmiş olup özetle, insan ve otomasyon sisteminin yer aldığı bir proseste işletimin kontrolü daha çok insana bağlı olduğu için bu kontrolün çok daha titizlikle yapılması vurgulanmıştır. Geliştirilen metodolojinin saha uygulamalarında, üst/alt seviye fark etmeksizin özellikle yarı insan yarı otomasyona dayalı tesislerde daha etkili olacağı beklenmektedir. Tamamen insan müdahaleleri ile yürütülen proseslerde H-Hazop'un uygulanması durumunda insan hatalarına yönelik bariyer ve öneriler de yine operatör aksiyonları üzerine olacağı için oldukça kısıtlı çalışma sonuçları elde edileceği düşünülmektedir. Tesisteki saha ziyaretlerinin, periyodik ekipman kontrolleri ve bakım planlarının çok daha sık aralıklarla ve yetkinlikleri, bilgi birikimi yüksek kişilerce yapılması, ölçme kontrol sistemi olarak insana dayalı yürütülmesi durumunda da, bu ölçümlerin birden fazla kişiler tarafından özenle yapılması gerektiği belirlenmiştir. Elbette ki işletim kontrolünün en etkili şekilde sağlanması, ölçme kontrol ve müdahale sistemlerinin otomasyonla yürütülmesi ile olacaktır. Bu sebeple, proses parametrelerinin izleme, ölçme ve kontrol sistemlerinin insana dayalı olmasından ziyade otomasyonla (algılayıcı-karar verme mekanizması-aksiyon) yürütülmesi sağlanmalıdır. Bu önerinin yapılamadığı durumlarda ise, prosese ve risklere hâkim, acil durumda alınacak aksiyonları bilen ve stres yönetimini doğru bir şekilde yaparak bu aksiyonları alabilecek ve mümkünse de bu yetkinliklere sahip birden fazla kişiler tarafından prosesteki her bir adım ayrı ayrı yürütülmelidir. Herhangi bir proses otomasyonla yürütülse dahi, proseste insanın rolünü tamamen sıfıra indirgemek mümkün olmayacağı için işletimin kontrolü, değişimin yönetimi ve acil durumlar için planlama unsurlarında insan faktörü hala oldukça büyük bir yere sahiptir. Bu sebeple ister otomasyon sistemi ile yürütülsün isterse tamamen insana bağlı bir proses olsun her proseste insan faktörü H-Hazop çalışmasında değerlendirilerek kaza yaşanmadan önce proaktif (önleyici) bir yaklaşımla gerekli aksiyonlar belirlenmeli ve uygulanmalıdır. Yapılan uygulamalar ve H-Hazop çalışmasının performansı denetlenerek sık sık incelenmeli ve gerek görüldüğünde revizyon çalışmaları yürütülmelidir.

KAYNAKLAR

1. Ünal, H. (2011). *Kimyasal risklerin sınıflandırması ve işaretlenmesi: İşaret sistemleri.* Ankara: ÇSGB, 12-22.

2. Ceylan, H., Başhelvacı, V. S. (2011). Risk değerlendirme tablosu yöntemi ile risk analizi: Bir uygulama. *International Journal of Engineering Research and Development,* 3(2), 25-33.

3. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, İçişleri Bakanlığı. (2019). Büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması hakkında yönetmelik. *Resmi Gazete,* 30702, 02/03/2019.

4. Ayanoğlu, C. C. (2014). Seveso II direktifi kapsamında güvenlik yönetim sistemleri. *Çalışma Dünyası Dergisi,* 2, 66-83.

5. Dunjó, J., Fthenakis, V., Vílchez, J. A., Arnaldos, J. (2010). Hazard and operability (HAZOP) analysis: A literature review. *Journal of Hazardous Materials*, 173, 19-32.

6. Baybutt, P. (2002). Layers of protection analysis for human factors (LOPA-HF). *Process Safety Progress,* 21(2), 119-129.

7. İnternet: Atatürk Kültür, Dil ve Tarih Yüksek Kurumu. (2022). *Türk dil kurumu sözlük*. Web: https://sozluk.gov.tr, Son Erişim Tarihi: 28/10/2024.

8. Crowl, D. A., Louvar, J. F. (2002). *Chemical process safety fundamentals with application.* New York: Prentice Hall PTR, 45-52.

9. European Commission. (2017). Report on the application in the member states of directive 96/82/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances for the period 2012-2014, *EU*, Brüksel, 22-36.

10. Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2016). *Introduction to process safety for undergraduates and engineers.* New York: John Wiley & Sons Inc, 85-93.

11. European Industrial Gases Association Aisbl. (2014). Process safety management framework guidance document. *EIGA*, Brüksel, 78-93.

12. İnternet: Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2011). *Process safety leading and lagging metrics: Guide for selecting leading and lagging metrics.* An AIChE Industry Technology Alliance, Web: https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/pages/CCPS_ProcessSafety_Lagging_2011_2-24.pdf, Son Erişim Tarihi: 27/10/2024.

13. Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2007). *Guidelines for safe and reliable instrumented protective systems.* New York: John Wiley & Sons Inc, 78-82.

14. Hale, A. (2003). *Note on barriers and delivery systems.* PRISM Conference, Athens, 45-52.

15. Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2001). *Layer of protection analysis: Simplified process risk assessment.* New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 85-93.

16. Kletz, T. A. (1999). The origins and history of loss prevention. *Process Safety and Environmental Protection*, 77(3), 109-116.

17. Eskenazi, B., Warner, M., Brambilla, P., Signorini, S., Ames, J. and Mocarelli, P. (2018). The Seveso accident: A look at 40 years of health research and beyond. *Environment International*, 121, 71-84.

18. Macza, M. (2008). A *Canadian perspective of the history of process safety management legislation.* 8th International Symposium on Programmable Electronic Systems in Safety-Related Applications, Köln, 12-36.

19. Mitchison, N., Porter, S. (1998). Guidelines on a major accident prevention policy and safety management system, as required by Council Directive 96/82/EC (SEVESO II). *European Commission, Joint Research Centre, Institute for Systems Informatics and Safety, Report EUR, 18123.*

20. Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2007). *Guidelines for risk based process safety.* New York: John Wiley & Sons Inc, 48-63.

21. Olewski, T., Snakard, M. (2017). Challenges in applying process safety management at university laboratories. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 209-214.

22. Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2008). *Guidelines for hazard evaluation procedures* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons Inc, 32-38.

23. Shariff, A. M., Aziz, H. A., Majid, N. D. A. (2016). Way forward in process safety management (PSM) for effective implementation in process industries. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 14, 56-60.

24. Majid, N. D. A., Shariff, A. M., Loqman, S. M. (2016). Ensuring emergency planning & response meet the minimum process safety management (PSM) standards requirements. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 248-258.

25. Wang, Y., Henriksen, T., Deo, M. and Mentzer, R. A. (2021). Factors contributing to US chemical plant process safety incidents from 2010 to 2020. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 71, 104512.

26. Webb, P. (2009). Process safety performance indicators: A contribution to the debate. *Safety Science*, 47(4), 502-507.

27. White Queen, V. B., Health and Safety Laboratory, RIVM. (2012). *The major accident failure rates project concept phase (RR 915 Research Report).* HSE.

28. Rausand, M. (2013). *Risk assessment: Theory, methods, and applications* (Vol. 115). New York: John Wiley & Sons, 78-93.

29. Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2014). *Guidelines for enabling conditions and conditional modifiers in layer of protection analysis.* New York: John Wiley & Sons Inc, 102-108.

30. Center for Chemical Process Safety (CCPS). (1995). *Guidelines for process safety documentation.* Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers.

31. Luo, T., Wu, C., Duan, L. (2018). Fishbone diagram and risk matrix analysis method and its application in safety assessment of natural gas spherical tank. *Journal of Cleaner Production*, 174, 296-304.

32. Center for Chemical Process Safety (CCPS). (1996). *Guidelines for integrating process safety management, environment, safety, health, and quality.* New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 108-112.

33. Nolan, D. P. (2014). *Handbook of fire and explosion protection engineering principles: For oil, gas, chemical and related facilities* (3rd ed.). New York: William Andrew, 36-42.

34. Dunjó, J., Fthenakis, V., Vílchez, J. A., Arnaldos, J. (2010). Hazard and operability (HAZOP) analysis: A literature review. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 19-32.

35. Zhao, J., Cui, L., Zhao, L., Qiu, T., Chen, B. (2009). Learning HAZOP expert system by case-based reasoning and ontology. *Computers & Chemical Engineering*, 33(1), 371-378.

36. Kletz, T. A. (1997). Hazop—past and future. *Reliability Engineering & System Safety*, 55(3), 263-266.

37. Standard, B., IEC 61882, B. S. (2001). Hazard and operability studies (HAZOP studies)–Application guide. *Hazard and Operability Studies (HAZOP studies)-Application Guide.* London: British Standards Institution, 1-8.

38. Rossing, N. L., Lind, M., Jensen, N. and Jørgensen, S. B. (2010). A functional HAZOP methodology. *Computers & Chemical Engineering*, 34(2), 244-253.

39. İnternet: Standard, G., IEC 61025, G. S. (2006). *Fault tree analysis (FTA)- European Standard.* European Committee for Electrotechnical Standardization. Web: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/12812/5a2b487cba2344309309a9d4fc72b2b9/IEC-61025-2006.pdf, Son Erişim Tarihi: 28/10/2024.

40. İnternet: Standard, G., IEC 62502, G. S. (2010). *Analysis techniques for dependability-Event tree analysis (ETA)- European Standard.* European Committee for Electrotechnical Standardization. Web: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/15633/5dae463a751d4304be8089056141d071/IEC-62502-2010.pdf, Son Erişim Tarihi: 28/10/2024.

41. Seider, W. D., Lewin, D. R., Seader, J. D. and Widagdo, S. (2009). *Product and process design principles: Synthesis, analysis, and evaluation.* New York: John Wiley & Sons, Inc, 45-52.

42. Turton, R., Shaeiwitz, J. A., Bhattacharyya, D. and Whiting, W. B. (2008). *Analysis, synthesis and design of chemical processes.* New York: Pearson Education, Inc, 85-93.

43. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı. (2020). Büyük endüstriyel kazalarla ilgili hazırlanacak büyük kaza senaryo dokümanı tebliği. *Resmi Gazete*, 31171, 30/06/2020.

44. Macdonald, D. (2004). *Practical HAZOPs, trips and alarms.* Amsterdam: Elsevier, 102-108.

45. Sam, M. (2014). *Lees' process safety essentials: Hazard identification, assessment and control.* Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 32-38.

46. Center for Chemical Process Safety (CCPS). (1994). *Guidelines for preventing human error in process safety.* New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 102-108.

47. Aspinall, P. (2006). *HAZOPs and human factors.* Institution of Chemical Engineers Symposium Series (Vol. 151). Institution of Chemical Engineers, Warwickshire, 122-136.

48. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2015). Caribbean petroleum tank terminal explosion and multiple tank fires final ınvestigation report, *CSB*, Puerto Rico, 108-112.

49. Crawley, F. (2020). *A guide to hazard identification methods.* New York: Elsevier, 85-93.

50. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2016). Muhtemel patlayıcı ortamda kullanılan teçhizat ve koruyucu sistemler ile ilgili yönetmelik (2014/34/AB). *Resmi Gazete*, 29758, 30/06/2016.

51. İnternet: Institute für Auslandsbeziehungen. (2024). *GESTIS Substance Database.* Web: https://gestis-database.dguv.de/data?name=531390, Son Erişim Tarihi: 27/10/2024.

52. Er, A., Bozdağ, O. (2020). Petrol ve petrol ürünlerinin güvenli depolanması. *Koç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 170-179.

53. Moran, S. (2016). *Process plant layout.* Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 98-103.

54. Sotoodeh, K. (2024). *Storage Tanks Selection, Design, Testing, Inspection, and Maintenance: Emission Management and Environmental Protection.* Amsterdam: Elsevier, 102-108.

55. Nayyar, M. L. (1992). *Piping handbook* (Vol. 6). New York: McGraw-Hill, 45-63.

56. Karre, A. V. (2023). *Piping and Instrumentation Diagram: A Stepwise Approach.* New York: Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 112-115.

57. Hall, S. (2017). *Rules of thumb for chemical engineers.* Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 45-63.

58. Sanders, R. E. (2015). *Chemical process safety: Learning from case histories.* Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 68-72.

Gazili olmak ayrıcalıktır