
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KATI YAKIT MİKSERLERİNDE PROSES KAZALARININ ÖNLENMESİNE YÖNELİK PROSES TEHLİKE ANALİZİ VE GÜVENLİ PROSES TASARIMI

Oğuzcan TAŞDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KAZALARIN ÇEVRESEL VE TEKNİK ARAŞTIRMASI ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2023

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.

Oğuzcan TAŞDEMİR

20/06/2023

KATI YAKIT MİKSERLERİNDE PROSES KAZALARININ ÖNLENMESİNE YÖNELİK PROSES TEHLİKE ANALİZİ VE GÜVENLİ PROSES TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Oğuzcan TAŞDEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Savunma sanayii ve ilişkili faaliyetler ülkemizde gelişimini hızla sürdürmektedir. Enerjik malzemelerin üretimi, elleçlenmesi, depolanması ve taşınması tehlikeli operasyonlar arasında yer almaktadır. Katı yakıt üretim tesislerinin ve operasyonu yürüten çalışanların korunması bu kapsamda önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, katı yakıt mikserlerinde proses kazalarının önlenmesine yönelik proses tehlike analizi ve güvenli proses tasarımı gerçekleştirmektir. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle kimyasallara, proses ekipmanlarına ve otomasyon sistemine ilişkin veriler, Proses Güvenlik Bilgisi (PSI) içerisinde derlenmiştir. Ardından, prosese ait potansiyel tehlikelerin belirlenmesi ve olasılıklarının değerlendirilmesi amacıyla Yarı-Kantitatif Tehlike ve İşletilebilirlik (HAZOP) Analizi ve Hata Ağacı Analizi (FTA) gerçekleştirilmiştir. Proses ekipmanlarına ait talep anında hata yapma olasılıkları için örnek tesis bakım verileri ve veri tabanlarında yer alan değerler, manuel operasyonları içeren senaryolardaki insan hatalarının sayısallaştırılabilmesi amacı ile Ampirik Teknik Operatör Hatası (TESEO) yöntemi kullanılmıştır. Potansiyel kaza senaryolarının benzer hata olasılıklarına sahip olduğu ve analiz sonuçlarının birbiriyle tutarlı olduğu belirlenmiştir. Son aşamada, katı yakıt mikserlerinde güvenli tasarım konsepti oluşturulmuştur. Proses tasarımlarının, insan gücü gerektiren tüm faaliyetler yerine otomasyon sistemlerinin kullanımı yönünde geliştirilmesinin, insan hayatını tehdit eden risklerin bertaraf edilmesi için oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın, ülkemizde katı yakıt üretim proseslerine ait tehlikelerin belirlenmesi ve güvenli sistem tasarımlarının gerçekleştirilmesi yönündeki boşluğa önemli katkılar sağlayacağı ön görülmektedir.

Bilim Kodu	:	90611
Anahtar Kelimeler	:	Katı yakıt mikserleri, enerjik malzemeler, proses tehlike analizi, risk analizi, HAZOP, FTA, proses güvenliği.
Sayfa Adedi	:	139
Danışman	:	Doç. Dr. Saliha ÇETİNYOKUŞ

PROCESS HAZARD ANALYSIS AND SAFE PROCESS DESIGN FOR PREVENTION OF PROCESS ACCIDENTS IN SOLID PROPELLANT MIXERS

(M. Sc. Thesis)

Oğuzcan TAŞDEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Defense industry and related activities continue to develop rapidly in our country. Energetic materials production, handling, storage, and transportation associated activities are classified as hazardous operations. Within this scope, protection of solid propellant production facilities and employees carrying out production operations is important. The aim of this thesis is to conduct process hazard analysis and safe process design for the prevention of process incidents in solid propellant mixers. For this purpose, information related to chemicals, process equipment, and automation systems were compiled in Process Safety Information (PSI). Then, Semi-Quantitative Hazard and Operability (HAZOP) Analysis and Fault Tree Analysis (FTA) studies were carried out in order to identify the potential hazards of the process and evaluate their probabilities. Sample facility maintenance data and values in databases were used for the process equipment's probability of failure on demand, and the TESEO (Tecnica Empirica Stima Errori Operatori) method was used for scenarios involving manual operations in order to quantify human errors. It has been determined that the potential incident scenarios have similar error probabilities and the analysis results are consistent with each other. In the final stage, the safe process design for solid propellant mixers has been established. It has been determined that the development of process designs towards the use of automation systems instead of all activities that require manpower is very important to eliminate the risks that threaten human life. It is foreseen that the study will make significant contributions to the gap in determining the hazards of solid fuel production processes and realizing safe system designs in our country.

Science Code	:	90611
Key Words	:	Solid propellant mixers, energetics materials, process hazard analysis, risk analysis, HAZOP, FTA, process safety
Page Number	:	139
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Saliha ÇETİNYOKUŞ

TEŞEKKÜR

Çalışma süreci boyunca desteğini esirgemeyen, akademik çalışmalardaki yönlendirmeleri ile farklı bakış açılarına sahip olmamı sağlayan, bilgi birikimi ile araştırmaya katkı sunan, güvenini ve desteğini her daim hissettiğim saygıdeğer Tez Danışmanım Doç. Dr. Saliha ÇETİNYOKUŞ hocama en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca beni destekleyen sevgili anneme, babama ve kız kardeşime teşekkürü borç bilirim. Her konuda olduğu gibi bu zorlu ve stresli süreçte de yanımda olan değerli eşim Seda TAŞDEMİR'e teşekkürü borç bilirim. Proses güvenliği kapsamındaki çalışmalara ilgi duymamı sağlayan ve kariyerimin başlangıcında bu alanda kendimi geliştirebilmem için bana yol gösteren Sayın Mehmet DİLAVER ve Yusuf Mert SÖNMEZ'e teşekkür ederim. Tez çalışması süresince bilgi, destek ve yardımları ile yanımda olan, yoğun iş tempolarına rağmen tez çalışmalarına zaman ayırmamı sağlayan Sayın Öznur UYSAL YILDIZ, Orkun Erdenay DURAN, Çağatay KAYA ve diğer tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. ÇALIŞMANIN KONUSU VE KAPSAMI 5

2.1. Endüstriyel Kazalar 5

2.2. İlgili Mevzuat ve Enerjik Malzemeler 10

2.3. Proses Güvenliği Yönetimi 13

2.4. Proseslerde Risk Analizi 16

2.5. Güvenli Proses Tasarımı 28

2.6. Katı Yakıtlar ve Katı Yakıt Mikserleri 29

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 35

3.1. Proses Kazaları ve Risk Değerlendirmesine Yönelik Araştırmalar 35

3.2. Yakıt Üretim Prosesleri Kazaları ve Risk Değerlendirmesine Yönelik Araştırmalar 41

4. YÜRÜTÜLEN ÇALIŞMALAR 49

4.1. Proses Güvenlik Bilgisi Dokümanlarının Oluşturulması 49

4.1.1. Kimyasal bilgileri 50

4.1.2. Ekipman ve proses bilgileri 53

4.2. Risk Analizi 60

Sayfa

4.2.1. Tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP) çalışması 61
4.2.2. Hata ağacı analizi (FTA) 83
4.3. Katı Yakıt Mikserlerinde Güvenli Tasarım 95
4.4. Katı Yakıt Mikserlerinde Güvenli Tasarım Konsepti 110
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 127
KAYNAKLAR 131
ÖZGEÇMİŞ 139

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Proses güvenliği yönetim sistemleri ve elementlerine ait bilgiler 14
Çizelge 2.2. Jenerik parametreler ve yardımcı kelimeler 21
Çizelge 2.3. Başlatıcı olay frekansları 22
Çizelge 2.4. Aktifleştirici şartlar ve koşullu değiştiriciler tablosu 22
Çizelge 2.5. Risk değerlendirmede kullanılan frekans tanımları ve değerleri 24
Çizelge 2.6. Risk değerlendirmede kullanılan şiddet kategorileri ve tanımları 24
Çizelge 2.7. Risk değerlendirme matrisi 25
Çizelge 2.8. Boole cebri kuralları 27
Çizelge 2.9. Temsili katı yakıt formülasyonu 30
Çizelge 4.1. Hammaddeler ve SOP'de kullanılan miktarlar 50
Çizelge 4.2. Kimyasal malzemelere ilişkin bilgiler 50
Çizelge 4.3. Enerjik malzemelere ilişkin bilgiler 51
Çizelge 4.4. Kimyasal etkileşim matrisi 52
Çizelge 4.5. Örnek tesise ait ekipman bilgileri 55
Çizelge 4.6. Örnek tesise ait enstrüman bilgileri 56
Çizelge 4.7. Örnek tesise ait enstrüman ve otomasyon bilgileri 57
Çizelge 4.8. HAZOP katılımcılarına ilişkin bilgiler 62
Çizelge 4.9. HAZOP oturumlarına ilişkin bilgiler 63
Çizelge 4.10. Node listesi 63
Çizelge 4.11. HAZOP çalışma sayfaları (Node 1) 71
Çizelge 4.12. HAZOP çalışma sayfaları (Node 2) 74
Çizelge 4.13. HAZOP çalışma sayfaları (Node 3) 76
Çizelge 4.14. HAZOP çalışma sayfaları (Node 4) 77
Çizelge 4.15. HAZOP çalışma sayfaları (Node 5) 79
Çizelge 4.16. HAZOP çalışma sayfaları (Node 6) 82

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.17. Hata ağacı analizi ile değerlendirilecek senaryolar 83

Çizelge 4.18. Hata ağaçları kodu ve tepe olay bilgisi..... 84

Çizelge 4.19. Hata ağaçlarında kullanılan bileşenlere ilişkin bilgiler 87

Çizelge 4.20. TESEO hesaplamalarında kullanılan veriler 88

Çizelge 4.21. Tesis verileri kullanılarak olasılık değerleri belirlenen basit olaylar..... 89

Çizelge 4.22. Ekipman hata modları ve kayıt altına alınan hata verileri 90

Çizelge 4.23. Ekipman hatasını içeren basit olaylar için kullanılan tesis verileri 91

Çizelge 4.24. Hata ağaçlarındaki kapılar ve tepe olaylarına ilişkin hesaplanan olasılık değerleri..... 94

Çizelge 4.25. Hammadde besleme sistemi ve güvenli tasarım önerileri 98

Çizelge 4.26. Vakum sistemi ve güvenli tasarım önerileri 101

Çizelge 4.27. Sıcaklık kontrol sistemi ve güvenli tasarım önerileri 103

Çizelge 4.28. Hidrolik kontrol sistemi ve güvenli tasarım önerileri..... 105

Çizelge 4.29. Mikser gövdesi ve karıştırma sistemi için güvenli tasarım önerileri..... 107

Çizelge 4.30. Acil durum ve koruma sistemi için güvenli tasarım önerileri 109

Çizelge 4.31. Hammadde besleme sistemi 115

Çizelge 4.32. Vakum sistemi 118

Çizelge 4.33. Isıtma sistemi..... 119

Çizelge 4.34. Hidrolik sistem..... 120

Çizelge 4.35. Mikser gövdesi ve karıştırma sistemi 121

Çizelge 4.36. Acil durum ve koruma sistemi..... 122

Çizelge 4.37. Örnek tesis ve önerilen konsept tasarımın karşılaştırılması 124

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. 1979-2021 yılları arasında meydana gelmiş kaza ve ramak kala olayları 9

Şekil 2.2. 1979-2021 yılları arasında meydana gelmiş majör kazalar 9

Şekil 2.3. 2010 – 2021 yılları arasında majör kazaların meydana geldiği sektörler 10

Şekil 2.4. Seveso direktiflerinin tarihsel gelişimi 11

Şekil 2.5. HAZOP sistematiği..... 20

Şekil 2.6. Hata ağacı analizinde kullanılan semboller 26

Şekil 2.7. FTA uygulama adımları..... 27

Şekil 2.8. Katı yakıt üretim adımları..... 33

Şekil 4.1 Yürütülen çalışmalara ait akış diyagramı 49

Şekil 4.2. Yerleşim planı (1/50m Ölçek) 53

Şekil 4.3. Yerleşim planı (1/100m Ölçek) 54

Şekil 4.4. Örnek tesise ait borulama ve enstrümantasyon diyagramı (P&ID) 55

Şekil 4.5. Yakıt karışımı operasyon adımları ve üretim parametreleri 58

Şekil 4.6. Şiddet, olasılık ve risk değerlerinin senaryo sayıları ile birlikte gösterimi-Bariyer Öncesi (sol) ve Bariyer Sonrası (sağ) 68

Şekil 4.7. Senaryolara ilişkin sonuç kategorilerinin dağılımı 69

Şekil 4.8. (FTA-1) TK-1001 tankına kimyasalların hatalı sıra ile beslenmesi senaryosuna ilişkin hata ağacı..... 84

Şekil 4.9. (FTA-2) Uygun şekilde temizliğin sağlanmaması senaryosuna ilişkin hata ağacı 85

Şekil 4.10. (FTA-3) AV-1118 aktüatörlü vana hatası için oluşturulan hata ağacı 85

Şekil 4.11. (FTA-4) AV-1116 aktüatörlü vana hatası için oluşturulan hata ağacı 86

Şekil 4.12. (FTA-5) Mikser gövdesi içerisinde yabancı malzeme bulunması senaryosuna ilişkin hata ağacı..... 86

Şekil 4.13. Konsept tasarıma ilişkin borulama ve enstrümantasyon diyagramı 113

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Kazada meydana gelen hasara ait resimler 42

Resim 4.1. Varil boşaltım sistemi 96

Resim 4.2. (sol) Tehlike sınıfına sahip bölgelerde kullanılabilir ve (sağ) çoklu varil boşaltım sistemi..... 96

Resim 4.3. Farklı üreticilere ait IBC boşaltım sistemleri (Keil-Anlagenbau, 2023) 97

Resim 4.4. Alevlenir buhar atmosferine uygun vakum pompası (sol) (DVP Pumps, 2023) ,enerjik malzemeler ile kullanıma uygun vakum pompası (sağ) 100

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
µm	Mikron
°C	Santigrat derece
m^3	Metreküp
mJ	Mili joule
J	Joule
g	Gram

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AG	Ve kapısı
AL	Alüminyum
AP	Amonyum Perklorat
BA	Kürleştirici
BO	Basit olay
BPCS	Temel proses kontrol sistemi
BTTN	Bütantriol Trinitrat
CLP	Sınıflandırma, Etiketleme ve Paketleme
ESD	Elektrostatik deşarj
ETA	Olay ağacı analizi
F	Frekans
FMEA	Hata modları ve etkileri analizi
FTA	Hata ağacı analizi
HAZOP	Tehlike ve işletilebilirlik
HMX	Oktojen
IEF	Başlatıcı olay frekansı
IPL	Bağımsız koruma katmanı
IR	Kızılötesi

Kısaltmalar	Açıklamalar
LEL	Alt patlama limiti
LOPA	Koruma katmanları analizi
NG	Nitrogliserin
OG	Veya kapısı
P	Olasılık
PEG	Polietilen Glikol
SIL	Güvenlik bütünlük seviyesi
SIS	Güvenlik enstrümanlı sistem
Ş	Şiddet
T	Sıcaklık
TE	Tepe olay
UV	Ultraviyole

1. GİRİŞ

Endüstriyel kazalar, kimyasal ve enerjik malzeme içeren proseslerde insan ve çevre için tehlikeli sonuçlar meydana getirebilecek olay olarak nitelendirilebilmektedir. Proses endüstrisinde artan ürün talebine karşılık üretim hacimlerinin de artması ile daha sık kazalar meydana gelmeye başlamıştır. Yaşanan kazalar sonucunda öncelikle tesis yatırımlarının etkilenmesi ve üretim yapamaz hale gelmesi sebebi ile tesislerde güvenlik tedbirleri için yatırım kalemleri oluşmaya başlamıştır.

1976'da İtalya'daki bir tesiste meydana gelen kaza Avrupa yasama organlarını, endüstrilerdeki büyük kaza tehlikeleri için Seveso I direktifini oluşturmaya teşvik etmiştir. Daha sonra meydana gelen endüstriyel kazalar Seveso Direktiflerinde değişikliklere yol açmıştır, Seveso II ve son olarak Seveso III Direktifi bu süreçte kabul edilmiştir. Seveso I belirli endüstriyel faaliyetleri ve tehlikeli maddeleri, Seveso II tehlikeli maddelere ait kategorileri ve eşik değerlerinin yanı sıra proses güvenliği yönetim sistemine ait prensipleri ve son olarak Seveso III ise kimyasal maddelerin CLP tüzüğüne göre sınıflandırılması ve etiketlenmesine ait uyumluluk şemasını içermektedir (Bostanoğlu, 2020).

Küresel ekosistemde enerjik malzemelerin depolandığı, üretildiği veya elleçlendiği tesislerde ise proseslerin güvenliğinin sağlanması amacı ile endüstri toplulukları, ordu, bakanlıklar veya yasa koyucular tarafından oluşturulmuş standartlar veya el kitapları kullanılmaktadır. Bu kapsamdaki standartlar ise belirli istinasların dışında ve ülkeler tarafından kendi standart ve yasalarına özgü şekilde oluşturulmaktadır.

Ülkemizde Avrupa birliğine uyum süreçleri kapsamında “Tehlikeli Maddelerle İlgili Büyük Kaza Risklerinin Kontrolüne İlişkin Direktifin” uygulanması gerekmektedir. Bu sebeple 2004-2006 yıllarında başlayan uyumlaştırma projesi sonucunda 2010 yılında “Büyük Endüstriyel Kazaların Kontrolü Hakkında Yönetmelik” yayınlanmıştır. Son olarak Seveso III direktifine uyum kapsamında 2019 yılında “Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik” oluşturulmuştur. Yönetmelik kapsamında askeri kuruluşlar istisna kapsamında yer aldığı için ilgili tesislerde gerçekleştirilen kimyasal ve enerjik malzemelere ait operasyonlar kapsam dışında bırakılmakta ve ilgili tesislerde proses güvenliğinin sağlanması için gerekli olan asgari şartlar için oluşturulmuş harici bir yönetmelik bulunmamaktadır.

Proses Güvenliği Yönetimi (PSM), proseslerin farklı aşamalarında meydana gelebilecek istenmeyen olayların bertaraf edilmesi veya etkilerinin hafifletilmesi için yürütülen sistematik yaklaşımdır. Bu kapsamda oluşturulmuş ve proses güvenliğini sağlamak için yürütülmesi gereken elementler bulunmaktadır (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2016).

Proses Tehlike Analizi (PHA) proses güvenliği yönetim sistemi elementlerinin en önemlileri arasında yer almaktadır. Prosesin güvenli şekilde yürütülmesi için gerekli olan temel tasarım özelliklerinin, proses şartlarının ve işletim uygulamalarının belirlenmesi bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar ile sağlanmaktadır.

Tesislerde proses güvenliğinin sağlanabilmesi için uygulanabilecek farklı tasarım çözümleri bulunmaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çözümler ise kendinden güvenli veya pasif tasarım çözümleri, aktif tasarım çözümleri ve prosedürel tasarım çözümler olarak 3 ana kategoride yer almaktadır (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 1998).

Katı yakıt üretimi proseste kullanılan hammaddeler, proses şartları ve yüksek itki gücüne sahip olması hedeflenen son ürün sebebi ile doğası gereği potansiyel tehlikeler içermektedir. Temel olarak katı yakıt üretim prosesi hammaddelerin hazırlanması ve şartlandırılması, karıştırma ve döküm operasyonlarını içermektedir. Mikser (karıştırma) operasyonları ise katı yakıt üretim proseslerinde kazaların en sık yaşandığı operasyonların başında gelmektedir.

Geleneksel katı yakıtlarının üretiminde bağlayıcı, oksitleyici, metal tozu, plastikleştirici bulunmaktadır. Kullanılan hammaddelerin belirli koşullar altında kontrolsüz şekilde bir araya gelmesi, farklı konsantrasyonlarda karışım içerisinde yığın oluşturması, toz patlayıcı özellikte olması, yanıcı özellikte olması, kimyasal reaktiviteye eğilimli olması vb. durumlar sebebi ile proses güvenliği için tehdit oluşturabilecek potansiyel tehlikeler barındırmaktadır. Benzer şekilde kürleşmemiş yakıt için sıcaklık, basınç, darbe, sürtünme, elektrostatik deşarj vb. kontrolsüz fiziksel şartlar belirli koşullar altında katastrofik olayları beraberinde getirebilmektedir (Meyer, Köhler ve Homburg, 2007).

Geçmişten günümüze kadar katı yakıt üretiminde farklı mikser tiplerinin kullanımı gerçekleştirilmiştir ancak özellikle yüksek viskozite çevrimlerini sağlayabilmesi ve mekanik

aksamların mikser haznesinin dışında olması sebebi ile dikey tipli katı yakıt mikserleri tercih edilmektedir (Setiles, 1963).

Çalışmanın amacı dikey tipli katı yakıt mikserlerinde katastrofik proses kazalarının yaşanmaması için alınması gereken önlemleri belirlemek ve muhtemel can, mal, çevre ve itibar kayıplarının önüne geçmektedir.

Gerçekleştirilmesi planlanan çalışma için sınırlandırıcı olan en önemli başlık katı yakıt üretim proseslerinin genellikle askeri amaçlı olması, gizlilik içermesi ve ilgili proses hakkında gerçekleştirilen akademik çalışmaların ise gizli tutulmasıdır. Bu sebeple güncel olmayan, çok sınırlı sayıdaki makaleye ve çalışmaya erişim sağlanabilmektedir. Bunun yanı sıra güncel olmayan fakat sayıca fazla olan basılı kaynaklar, sempozyum sunumları, erişime açılmış üretim tesislerine ait eski kayıtlar ve kaza raporları bulunmaktadır.

Enerjik malzeme ve yakıtlara ait geliştirme faaliyetleri dünyada ve ülkemizde hızla ilerlemektedir. Minimum miktar ile maksimum enerji açığa çıkartması amaçlanan bu malzemelerin üretimlerinde ise karşılaşacak risklerin önceden tespit edilerek bertaraf edilmesi gerekmektedir. Ülkemizde gerçekleştirilen akademik çalışmalar, ilgili kimyasalların geliştirilmesi veya performanslarının incelenmesini içerirken üretim faaliyetleri sırasında meydana gelebilecek istenmeyen olaylar veya potansiyel etkilerine ait gerçekleştirilmiş bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Bu sebeple gerçekleştirilecek bu çalışmanın çıktıları ile ülkemizde hızla gelişen savunma sanayisinde meydana gelebilecek katı yakıt üretim faaliyetleri kaynaklı proses güvenliği olaylarının önüne geçilmesi, enerjik malzemeler ve tesisler için proses güvenliği alanında daha fazla araştırma gerçekleştirilmesi ve çeşitli mevzuatlarda ilgili tesislerin asgari şartlarına ait girdilerin sağlanması için farkındalık yaratması amaçlanmaktadır.

2. ÇALIŞMANIN KONUSU VE KAPSAMI

2.1. Endüstriyel Kazalar

Tanımı ve örnekler

Kaza, insanlara, çevreye, tesis varlıklarına zarar veren veya iş kayıpları gibi istenmeyen sonuçlara neden olan bir olay veya olaylar dizisi olarak tanımlanmaktadır. Endüstriyel kazaların ise yangın, patlama ve toksik salınım gibi potansiyel tehlikeler ile sonuçlanması beklenmektedir (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2022).

1 Temmuz 1974 yılında Flixborough'da bulunan bir tesiste, patlama ve yangın ile sonuçlanan büyük bir kaza meydana gelmiştir. Kazanın meydana geldiği tesiste, boru hatları ile seri halde bağlı 6 adet reaktörün içerisinde siklohekzanın, hava varlığında bir katalizör kullanılarak siklohekzanon ve siklohekzanole oksitlenmesinin sağlandığı belirtilmektedir. Beşinci reaktörün devre dışı bırakılarak, dördüncü reaktörün altıncı reaktöre tasarım özellikleri uygun olmayan bir boru ile bağlantısının yapıldığı ifade edilmiştir. Reaktörler arasındaki bu boru hattında tespit edilen bir çatlağa ait onarım ve bakım faaliyetlerinin, proses güvenliği değişiklik yönetiminin etkin uygulanmaması sonucunda sızıntının oluştuğu ve ardından buhar bulutu patlamasının meydana geldiği tespit edilmiştir (Lees, 2012). 28 kişinin yaralandığı ve 36 kişinin hayatını kaybettiği bu kaza sonucunda, tesisin çevresinde bulunan 1800'den fazla evin ve 150'den fazla iş yerinin de çeşitli büyüklüklerde hasar aldığı raporlanmıştır (Parker, 1975).

Kasım 1976'da Long Island Sakız Fabrikası'nda birden fazla patlama meydana gelmiştir (Kleiman, 1978). Kazaya sebep olan magnezyum stearat tozu proseste son ürüne kaygan bir yapı vermesi amacı ile kullanılmaktadır. Magnezyum stearat tozunun üretildiği ekipmanın içerisinde meydana gelen bir toz patlaması ile başlayan kaza, tesiste bulunan diğer toz kalıntılarının atmosferde toz bulutu oluşturması sonucu ikincil bir toz bulutu patlaması ile sonuçlanmıştır (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2010). Kaza sonucunda 6 çalışanın öldüğü, düzinelerce çalışanın ise yandığı belirtilmiştir (Kleiman, 1978).

Kuzey denizinin İngiliz hükümetine ait olan bölümünde bulunan Piper Alpha isimli petrol sondaj tesisinde, 1988 yılında büyük bir felaket yaşanmıştır. Piper Alpha açık denizde petrol

sondajı gerçekleştirmekte ve deniz üstüne çıkarılan ham petrolü Flotta Ada'sına göndermektedir. Körlenen bir boru hattındaki sızıntı ile başlayan olay platforma yayılan alevlenir sıvı ve gazların yanma ve patlaması ile sonuçlanmıştır (Singh, Jukes, Poblete ve Wittkower, 2010). Proses güvenliği yönetim sistemi elementlerinin doğru şekilde kurgulanmaması ve yetersiz uygulanması sonucunda Piper Alpha felaketi meydana gelmiştir. Yaşanan felaket sonucu 167 kişi feci şekilde hayatını kaybetmiştir (Lees, 2012). Dünyanın en büyük açık deniz petrol felaketi, Birleşik Krallık petrol üretiminin %10'unu etkilemiş ve kaynaklarda yer alan verilere göre 2 milyar sterlin (bugün 5 milyar ABD dolarına eşdeğer) mali kayba yol açmıştır. Kaza, Birleşik Krallık topraklarında 1974 yılında meydana gelen Flixborough faciasından sonra etkileri en büyük kazalardan biri olarak kayıtlara geçmiştir (Cullen, 1990).

23 Kasım 1989 yılında Kaliforniya eyaletinin Pasadena kentinde bulunan Phillips 66 Polietilen tesisinde buhar bulutunun tutuşturucu kaynak ile temas etmesi sonucunda büyük bir patlama meydana gelmiştir. Kazanın gerçekleştiği ve Tesis 5 olarak adlandırılan bölümde, katalizör taşıyıcısı olan İzobütan kimyasalı içerisinde etilenin polimerize edilerek polietilen kimyasalının üretimi gerçekleştirilmektedir. Reaktörde meydana gelen bir tıkanıklık sonrası gerçekleştirilen bakım operasyonu ve prosedürlerde yer alan bir dizi önlemin alınmaması, meydana gelen sızıntının buhar bulutu oluşumuna sebep olmuştur. İçeriğinde Etilen, İzobütan, Hekzen ve Hidrojen bulunan 40 tona yakın buhar bulutu atmosfere salınmış ve patlama meydana gelmiştir. Bu kaza sonucunda 23 kişi hayatını kaybetmiş ve 300'e yakın kişi yaralanmıştır (Lees, 2012).

29 Ocak 2003 tarihinde Kuzey Karolina eyaletinin Kinston şehrinde ilaç üretimi gerçekleştiren West Pharmaceuticals tesisinde büyük bir patlama meydana gelmiştir. Amerika'daki Kimyasal Güvenlik Kurulu (CSB) tarafından yürütülen araştırmada sebebi bilinmeyen bir tutuşturucu kaynak veya minör bir parlamanın, tesiste bulunan polietilen tozlarına ait ikincil bir patlamayı tetiklediği belirtilmiştir. Kazada proses güvenliği faaliyetleri arasında yer alan, toz patlayıcı atmosferlerin bertaraf edilmesi ve etkilerinden korunma için oluşturulmuş standart ve iyi uygulama örneklerinin uygulanmadığı değerlendirilmiştir (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2010). Patlamanın, düşen nesneler, çöken duvarlar, yanıklar ve aşırı yüke bağlı travmalar nedeniyle 6 kişinin ölümüne ve 38 kişinin yaralanmasına sebep olduğu bildirilmiştir (CSB, 2004).

7 Şubat 2011 tarihinde Batman'da bulunan Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı'na (TPAO) ait tesiste patlama meydana gelmiştir. Doğalgazın patlaması sonucu açığa çıkan aşırı basınç sebebi ile 3 kişinin hayatını kaybettiği belirtilmiştir (Haber Türk, 2011).

28 Temmuz 2002 tarihinde İzmit körfezinde bulunan Akçagaz LPG dolum tesislerinde yangın meydana gelmiştir. 900 ton LPG'nin depolandığı ve 100 ton/gün dolum kapasitesine sahip tesiste kaza, tanker dolumu esnasındaki aşırı basınç ile gerçekleşmiştir. 100 ton hacme sahip LPG tankları yanmış ve yangın 2.5 saatte kontrol altına alınabilmiştir. Kaza sonucunda ölüm veya yaralanma meydana gelmemiştir ancak 850.000 $ maddi hasar tespit edilmiştir (Çetinyokuş, 2018).

Ülkemizde 1950 yılında kurulan Makine ve Kimya Endüstrisine ait enerjik malzemelerin üretiminin gerçekleştirildiği, elleçlendiği ve depolandığı tesislerde 1986, 1988, 1997, 2008, 2013, 2014, 2018 ve 2023 yıllarında toplam 10 adet kaza meydana gelmiştir. 2023 yılında tezin yazım süreci esnasında meydana gelen 2 farklı kazada ise toplam 5 kişi hayatını kaybetmiş, 4 kişi ise yaralanmıştır. 2018 yılında Ankara Elmadağ'da bulunan barut ve patlayıcı üretimi gerçekleştiren MKE tesisinde patlama meydana gelmiştir. Kazaya ait sebepler arasında sevk barutlarının, sürtünme veya yüzey sıcaklığı ile aktifleşmiş olabileceği, buharlaşan nitrogliserinin aydınlatma bölümünde yer alan ve exproof özelliğini kaybetmiş armatürlerde birikerek tutuşturucu kaynak ile aktifleşmiş olabileceği ancak temel olarak proses güvenliği kapsamındaki faaliyetlerin yetersizliğinden ve güvenlik kültürü eksikliğinden kaynaklı meydana gelmiş olabileceği belirtilmiştir. Kaza sonucunda 1 kişi hayatını kaybetmiş ve 3 kişi ağır şekilde yaralanmıştır (NTV, 2018). 2014 yılında Ankara Elmadağ'da bulunan MKE tesisinde başka bir patlama meydana gelmiştir. Barut ve patlayıcı üretimi gerçekleştiren tesisin nitrogliserin bölümünde meydana gelen patlama sonucunda 3 işçi yaralanmış ve can kaybı meydana gelmemiştir (TRT Haber, 2014). 2013 yılında yine Ankara Elmadağ'da bulunan MKE tesisinde 2 farklı patlama meydana gelmiştir. İlk kaza sevk barutu üretim atölyesinde meydana gelmiş, diğer kaza ise mühimmat depolama tesisinde meydana gelmiştir. Sevk barutu üretim atölyesindeki patlamaya ait gerçekleştirilen araştırma sonuçları, uygun olmayan yapı kullanımı, elleçleme yapılan enerjik malzeme miktarların kabul edilebilir sınırların üstünde olması ve temel seviyede güvenlik önlemlerinin sağlanmadığı (antistatik ayakkabı kullanımı vb.) belirtilmiştir (TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 2018). Sevk barutu üretim atölyesinde meydana gelen patlama sonucunda 2 kişi hayatını kaybetmiş, 4 kişi yaralanmıştır. Mühimmat deposunda meydana

gelen patlama sonucunda ise can kaybı veya yaralanma meydana gelmemiş ancak depolar kullanılmaz hale gelmiştir (Anadolu Ajansı, 2013). 2008 yılında Kırıkkale'de bulunan Makine Kimya Endüstrisine ait barut fabrikasında 2 adet patlama meydana gelmiştir. Patlama sonucunda 3 kişinin hayatını kaybettiği ve 15 kişinin yaralandığı belirtilmiştir (Hürriyet, 2008). 1997 yılında Kırıkkale'de Makine Kimya Endüstrisine ait bir mühimmat fabrikasında patlama meydana gelmiştir. İmla işletmesi olarak adlandırılan tesiste, imlalara TNT (Trinitrotoluen) dolum operasyonları gerçekleştirilmektedir. Olay ile alakalı çeşitli araştırmalarda sebep ile ilgili net bir bulgu sağlanamamıştır. Meydana gelen patlamalar sonucunda 4 kişi hayatını kaybetmiş, tesis çevresindeki 10'larca kişi yaralanmış ve 40 bin konut hasar görmüştür (T.B.M.M., 1998). 1988 yılında Makine Kimya Endüstrisine ait imla tesisinde meydana gelen patlamada ise can kaybı meydana gelmemiş ancak 22 milyon Türk lirası maddi hasar oluştuğu belirtilmiştir (Milliyet, 2008). 1986 yılında Makine Kimya Endüstrisine ait TNT fabrikasına düzenlenen bir sabotaj sonucunda yangın meydana gelmiştir. Yangına müdahale için alana ulaşan 7 itfaiye eri meydana gelen patlama sonucunda hayatını kaybetmiştir (T.B.M.M., 1998).

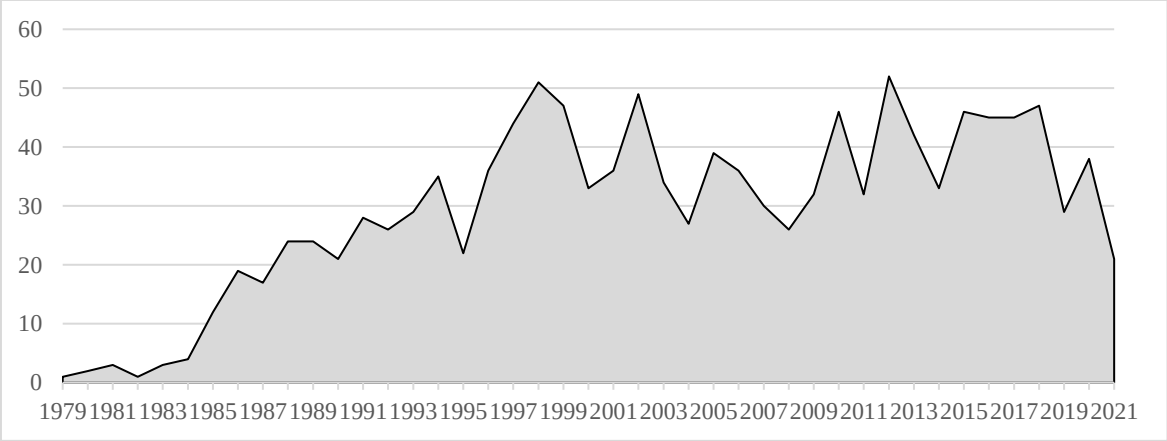
İlgili veri tabanları ve istatistikler

Büyük endüstriyel kazalar veya majör kazalar, tehlikeli madde barındıran tesislerdeki üretim operasyonları sırasında meydana gelen kontrol dışı olaylardan kaynaklanan, insan sağlığı ve çevre için ciddi tehlikelere yol açan ani veya gecikmeli emisyon, yangın veya patlama olayları anlamına gelmektedir (Official Journal of the European Union, 2012). Geçmişte yaşanmış büyük endüstriyel kazalara ve ramak kala olaylarına ait raporlar ve bilgiler proseslerde benzer kazaların tekrar etmemesi için oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda farklı ülkelere ait çeşitli bakanlıklar veya özel kurumlar proses güvenliği ile ilişkili yaşanmış endüstriyel kazalara ve ramak kala olaylarına ait verileri tutmaktadır.

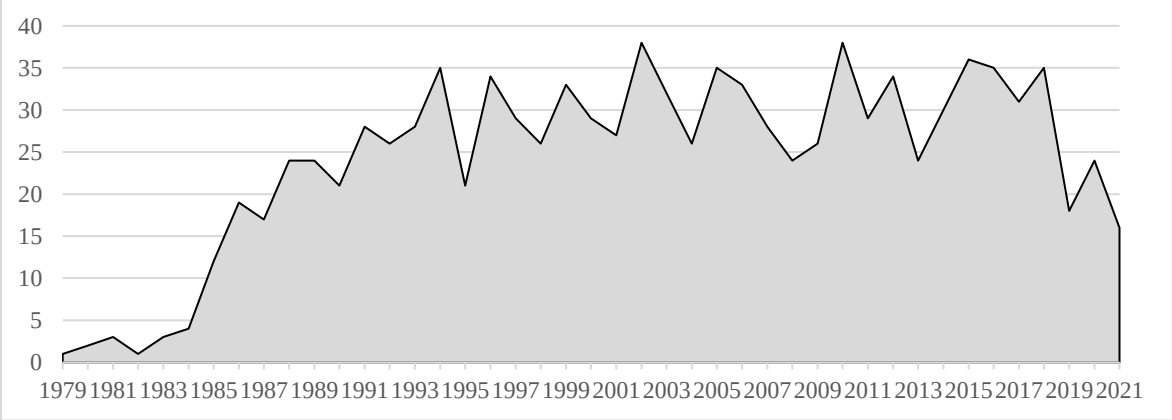
Ulusal müdahale merkezi (NRC) ve kaza raporlama ve bilgi sistemi (IRIS), ABD hükümeti için oluşturulmuş bildirim sistemleridir. Sisteme yasalar gereği küçük sayılabilecek olayların da bildirilebilmesi sebebi ile ölüm, yaralanma, maddi hasar veya çevreye zarar verebilecek vakaların oranı yaklaşık %30 olarak belirtilmektedir (Lees, 2012). ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından oluşturulan risk yönetimi programı kapsamında, belirli alanlarda faaliyet gösteren tesislere ait 5 yıllık kaza geçmişlerinin bildirilmesi ve raporlaması gerekmektedir (U.S. Environmental Protection Agency, 2013). Kimyasal Proses Güvenliği

Merkezi (CCPS) ise Proses Güvenliği Kaza Veritabanı (PSID) isimli özel bir veritabanına sahiptir. Veritabanı kullanımı yalnızca CCPS üyelerine sunulmaktadır (AICHE, 2022).

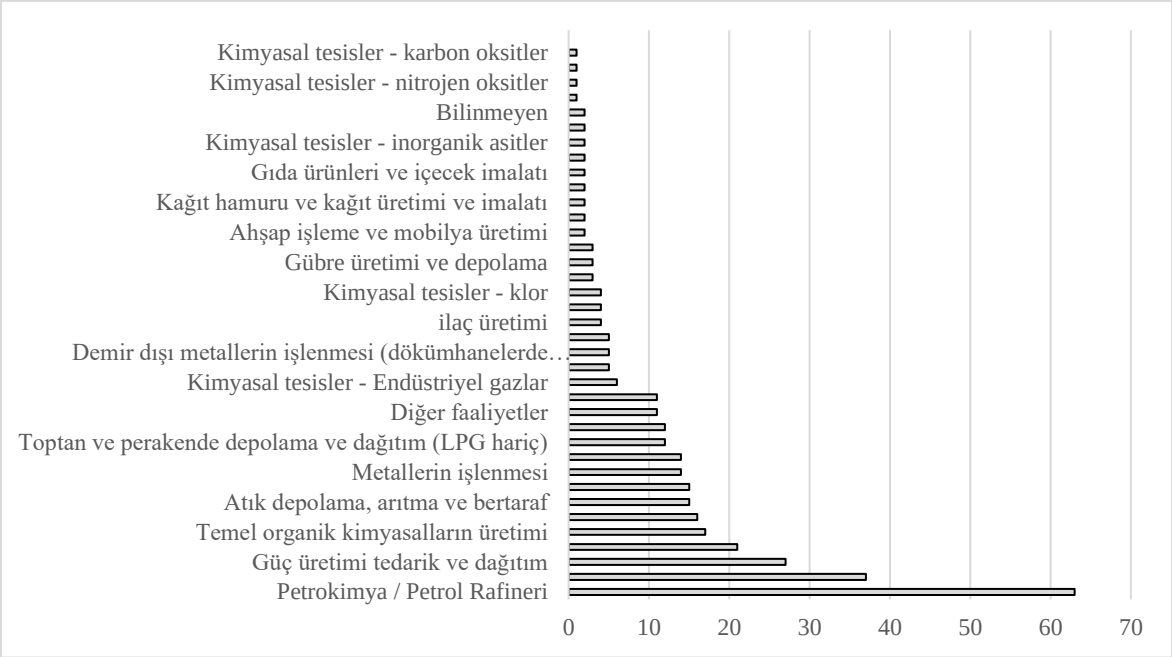
Kimyasal kaza ve ramak kala raporlarının yer aldığı MARS sistemine göre, 1979 – 2021 yılları arasında toplam 1267 kaza ve ramak kala olay meydana gelmiştir. Bu verilerin 1039'unu ise majör kazalar oluşturmaktadır. Son 10 yıl içerisinde en fazla majör kazanın meydana geldiği sektörlerin başında ise petrokimya/rafineri, kimyasal üretim, güç üretimi ve patlayıcı depolama tesisleri bulunmaktadır. Verilere ait gösterimler ise Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3 içerisinde yer almaktadır (European Commision, 2022).



Şekil 2.1. 1979-2021 yılları arasında meydana gelmiş kaza ve ramak kala olayları



Şekil 2.2. 1979-2021 yılları arasında meydana gelmiş majör kazalar



Şekil 2.3. 2010 – 2021 yılları arasında majör kazaların meydana geldiği sektörler

Sanayi devriminden itibaren dünya çapında önemli sayıda majör endüstriyel kaza meydana geldiği görülmektedir. Bu kazalar sonrasında gerçekleştirilecek analizler ile majör kazaların ortak sebeplerini belirlemek ve tekrar etmelerini önlemek mümkün olabilmektedir.

2.2. İlgili Mevzuat ve Enerjik Malzemeler

Endüstri tarihindeki en önemli vakalardan biri olan ve ismini 1976 yılında kazanın gerçekleştiği bölgeden alan Seveso kazası, Avrupa Birliği'nde benzer kazaların önüne geçilmesi ve etkilerinin kontrol edilmesine yönelik bir mevzuatın oluşturulmasına sebep olmuştur. Bu kapsamda 1982 yılında Seveso I direktifi yayımlanmıştır (Shao, Yang, Xiaogang, Ju ve Huang, 2013). Direktifin yayımlanmasından sonra meydana gelen çeşitli kazalar ile birlikte yönetmelik, 1987 ve 1988 yıllarında değişikliğe uğramıştır. Meydana gelen değişikliklerin temel sebebi ise direktifte yer alan yönergelerin kapsamının genişletilmesi olarak belirtilmiştir (Wettig, Porter ve Kirchsteiger, 1999). Direktif, risk analizlerinin iyileştirilmesi ve acil durum yönetimlerinin dahil edilmesi amacı ile 1997 yılında güncellenerek Seveso II adı ile yayımlanmıştır. 1999 yılında ise proses güvenliği yönetim sistemi ve acil durum planlaması ile ilgili yükümlülükler getirilerek güncellenmiştir. Son olarak 2012 yılında kimyasalların CLP tüzüğüne göre sınıflandırılması ve etiketlenmesine yönelik uyum kapsamında güncellenerek Seveso III adında

yayımlanmıştır (European Commision, 2022). Seveso Direktifinin tarihsel gelişimi Şekil 2.4' de sunulmuştur.



Şekil 2.4. Seveso direktiflerinin tarihsel gelişimi

Avrupa birliği kapsamında çalışmalar sürdürülürken, çeşitli ülkeler, tehlikeli kimyasalların meydana getireceği potansiyel tehlikelerin engellenmesi ve etkilerin hafifletilmesi için ulusal mevzuat çalışmaları yürütmüşlerdir. Bu kapsamda A.B.D Çalışma Bakanlığı tarafından oluşturulmuş "OSHA 1910.119 Process Safety Management Of Highly Hazardous Chemicals (Çok Tehlikeli Kimyasallar İçin Proses Güvenliği Yönetimi)" regülasyonu bulunmaktadır. Regülasyonun amacı toksik, reaktif, yanıcı veya patlayıcı kimyasalların katastrofik salınımlarının sonuçlarını önlemeye veya en aza indirmeye yönelik gereksinimleri belirlemektir (Occupational Safety and Health Administration, 2022).

Ulusal mevzuat

Ülkemizde Mart 2019' da "Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik" yayımlanmış olup, tehlikeli maddelerin bulunduğu kuruluşlarda, büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve insan, çevre ve tesis varlıklarına etkilerinin hafifletilmesi amacı ile usul ve esaslar belirlenmiştir. Yönetmeliğe göre "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 olayı" büyük endüstriyel kaza olarak tanımlanmaktadır. Yönetmelik kapsamında yer alan yönergelere göre tesislerdeki kimyasal miktarları göz önünde bulundurularak alt seviyeli kuruluş veya üst seviyeli kuruluş tanımları yapılmaktadır. Tesislere ait kuruluş seviyelerine göre belirlenen sorumlulukların yerine getirilmesi

beklenmektedir. Yönetmeliğe göre alt seviyeli kuruluşlar bildirim yapmaktan, tesislerindeki potansiyel tehlikelerin ve risklerin belirlenmesinden, güvenlik yönetim sistemi kurulumundan ve kazaların raporlanmasından sorumlu iken üst seviyeli kuruluşlar, alt seviyeli kuruluşların sahip olduğu sorumluluklara ek olarak güvenlik raporunun hazırlanmasından, dâhili acil durum eylem planlarının oluşturulmasından ve tesis çevresinde bulunan halkın bilgilendirilmesinden sorumludur (Resmi Gazete, 2019). Yönetmeliğin 3. Maddesine göre kapsam dışında bulunan çeşitli faaliyet alanları yer almakta ve askeri kuruluş, tesis ve depoları da bu madde altında yer almaktadır. 2012 yılına kadar tehlikeli kimyasalların bulunduğu tüm çalışma alanları "Parlayıcı Patlayıcı Tehlikeli ve Zararlı Maddelerle Çalışılan İşyerlerinde ve İşlerde Alınacak Tedbirler Hakkında Tüzük" kapsamında yer almaktadır. Ancak ilgili tüzük 17.07.2014 tarihinde, 29063 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanan tüzük ile yürürlükten kaldırılmıştır. Mevcut durumda ise 6331 sayılı "İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu" askeri kuruluş tesis ve depoları kapsam içerisinde bulundurmaktadır. Kanun kapsamında risklerin analiz edilmesi ve değerlendirilmesi, gerekli iyileştirmelerin yapılması ve önlemlerin alınması, risklerden kaçınılması maddeleri yer almaktadır ancak proses güvenliği ve yönetim sistemi kapsamında spesifik olarak bir yönlendirme bulunmamaktadır. Bu sebeple özellikle enerjik malzemelerin üretildiği, işlendiği veya paketlendiği tesislerde, risklerin yalnızca iş sağlığı ve güvenliği bakışı ile değerlendirilerek proses güvenliği yönetimi için idari bir yaptırımın bulunmaması tesis varlıkları, insan sağlığı ve çevre için potansiyel risk oluşturmaktadır.

Enerjik malzemeler

Kimyasalların endüstriyel tesislerde meydana getirebileceği riskler kadar askeri ve sivil amaçlı kullanılan patlayıcı, piroteknik ve yakıt malzemelerinin de üretimi, transferi ve ürün olarak kullanımları esnasında potansiyel tehlikeler bulunmaktadır. Enerjik malzemeler olarak nitelendirilen bu gruptaki malzemeler, üretim amaçlarının aşırı basınç, yanma, patlama ve itki üretme olması sebebi ile varlığı gereği kimyasallardan farklı şekilde değerlendirilmektedir. Bu sebeple enerjik malzemelerin güvenli şekilde üretilmeleri ve yaşam döngüsünü sürdürebilmeleri için çeşitli standartlar ve kılavuzlar bulunmaktadır.

Patlayıcı ve piroteknik üretim tesisleri için A.B.D Çalışma Bakanlığı tarafından oluşturulmuş "OSHA 3912- Process Safety Management for Explosives and Pyrotechnics Manufacturing (Piroteknik ve Patlayıcı Üretimi İçin Proses Güvenliği Yönetimi)", "OSHA

3909-03 Process Safety Management for Storage Facilities (Depolama Tesisleri İçin Proses Güvenliği Yönetimi)" vb. çeşitli kılavuz dokümanlar vardır. A.B.D Savunma Bakanlığı tarafından yayımlanan "Defense Explosives Safety Regulation (Savunma Amaçlı Patlayıcıların Güvenliği Yönetmeliği) (DESR) 6055.09" standardı ciddi yaralanma, can kaybı ve mal hasarını en aza indirmede koruma kriterleri sağlayarak, mühimmat ve patlayıcılarla ilişkili riskleri yönetmek için tasarlanmıştır (DoD Policy on Environmental Safety and Occupational Health Network and Information Exchange, 2019). A.B.D Enerji Bakanlığı tarafından oluşturulmuş "DOE-STD-1212-2019 Technical Standard Explosives Safety (Patlayıcı Güvenliği Teknik Standardı)" standart ise patlayıcıları, piroteknik malzemeleri, yakıtları ve bu malzemeleri içeren düzenekleri kapsayan operasyonların güvenliğini sağlamak için gerekli temel teknik gereksinimleri sağlamaktadır (Department of Energy (DOE) Technical Standards Program, 2019).

Ülkemizde enerjik malzemelerin üretildiği, elleçlendiği ve depolandığı tesisler için uygulanabilecek standart bulunmamaktadır. Bu sebeple ilgili tesisler geçmiş birikimleri, şirket içi standartlar ve uluslararası iyi uygulama örnekleri ile süreçleri yönetmektedir. Savunma Sanayii şirketlerinin hızla büyüdüğü ve üretim kapasitelerinin arttığı bu dönemde ilgili tesislerde meydana gelebilecek tehlikelerin en aza indirilerek insan, çevre, tesis yatırımları ve itibarın korunması amacı ile proses güvenliği faaliyetlerine yönelik standartların oluşturulması için çalışmaya ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

2.3. Proses Güvenliği Yönetimi

Proses endüstrisinde petrol, kimya, ilaç, savunma vb. farklı sektörlerde insan sağlığının, çevrenin, şirket varlıklarının ve marka değerinin korunabilmesi için tehlikeli kimyasalların ve yarattığı risklerin etkin bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir.

Proses Güvenliği Yönetimi (PSM), proseslerin tasarımı, kurulumu, devreye alınması, işletilmesi, muayene, bakım ve değişiklik süreçlerinde meydana gelebilecek, insana, çevreye, işletmenin varlık bütünlüğüne ve işin durmasına sebep olabilecek istenmeyen proses olaylarının bertaraf edilmesi ya da sonuçlarının minimize edilmesi süreçlerinin yönetildiği sistematik bir yaklaşımdır. Bu kapsamdaki yönetilen alt süreçler ise element olarak adlandırılmakta ve tesis, mevzuat veya yönetmeliklere göre değişiklik gösterebilmektedir. Endüstriyel tesislerde proses güvenliğinin kapsamlı şekilde ele

alınabilmesi için ortaya konulmuş farklı yapılar bulunmaktadır. SEVESO, OSHA veya CCPS tarafından oluşturulmuş proses güvenliği yönetim sistemleri en sık kullanılan veya tesislere entegre edilen yapılar arasında yer almaktadır. Ülkemizde de geçerli olan SEVESO direktifi 7, OSHA 14 ve CCPS 20 bileşenli yönetim sistemi yapısına sahiptir. Çizelge 2.1 içerisinde farklı yönetim sistemlerine ait elementler sunulmaktadır.

Çizelge 2.1. Proses güvenliği yönetim sistemleri ve elementlerine ait bilgiler

SEVESO Direktifi BEKÖEAHY	OSHA	CCPS
Organizasyon ve Personel	Çalışan Katılımı Alt Yüklenici Yönetimi Eğitim	Proses Güvenliği Kültürü Proses Güvenliği Yetkinliği İşgücü Katılımı Eğitim ve Performans
Büyük Endüstriyel Kazaların Tanımlanması ve Değerlendirilmesi	Proses Güvenlik Bilgisi (PSI) Proses Tehlike Analizi (PHA)	Proses Bilgisi Yönetimi Tehlike Belirleme ve Risk Değerlendirme
Operasyonel Kontrol	Mekanik Bütünlük (AI) Güvenli Çalışma Uygulamaları İşletme Prosedürleri (SOP) Devreye Alma Öncesi Güvenlik Gözden Geçirmesi (PSSR)	Varlık Bütünlüğü ve Güvenilirlik Güvenli Çalışma Uygulamaları İşletme Prosedürleri Operasyonların Yürütülmesi
Değişiklik Yönetimi	Değişiklik Yönetimi (MoC)	Değişiklik Yönetimi
Acil Durumların Planlanması	Acil Durum Yönetimi (ERPG)	Acil Durum Yönetimi
Performans İzleme	Olay Araştırma	Olay Araştırma Ölçümler ve Metrikler
SEVESO Direktifi BEKÖEAHY	OSHA	CCPS
Denetim ve Gözden Geçirme	Denetim	Standartlara Uyum Yönetim Gözden Geçirme ve Sürekli İyileştirme Denetim
-	Ticari Sırlar	Paydaş Erişimi

Proses Güvenlik Bilgisi (PSI), proses güvenliği yönetiminde bulunan çalışmalara alt yapı oluşturacak bilgileri içermektedir. Bu element proses güvenliği ile ilişkili tüm bilgilerin dokümanlarda saklanmasını, güncel ve ulaşılabilir olmasını sağlamaktadır. Proses Güvenlik Bilgisi kapsamında kimyasallara ait çeşitli özelliklerin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda veritabanları veya kimyasallara ait test verileri kullanılmaktadır. Proseslere ait

detay bilgilerin yer aldığı Proses Teknoloji Bilgisi (PTI) ise P&ID, sebep sonuç matrisi, ekipman işletim bilgileri vb. verileri içermektedir.

Proses Tehlike Analizi (PHA), çeşitli yöntemler kullanılarak proseslere ait tehlikelerin analiz edildiği element olarak nitelendirilmektedir. Proseslerin güvenli işletilebilmesi için gerekli olan temel tasarım özelliklerinin, proses şartlarının ve işletim uygulamalarının belirlenmesini sağlamaktadır.

Değişiklik Yönetimi (MoC), proseslerde meydana gelen değişimlerin proses güvenliğine olan etkilerinin değişiklik uygulanmadan önce değerlendirilmesidir. Bu kapsamda proses tehlikelerinin değerlendirilmesi, değişiklikten etkilenen proseslere ait dokümanların güncellenmesi ve kayıt altına alınması sağlanmaktadır.

Devreye Alma Öncesi Gözden Geçirme (PSSR), yeni bir tesis kurulduğunda, değişiklik sonrası veya uzun bir süre devre dışı kaldıktan sonra devreye alındığında gerçekleştirilen son kontrolleri içeren çalışmalardır.

Varlık Bütünlüğü ve Güvenilirlik (AI), proseslerde kullanılan ekipmanların kullanım ömürleri süresince tasarım, işletim ve bakım faaliyetlerinin doğru gerçekleştirilmesi ve kayıt altına alınması ile ekipmanlara ait verilerin proses güvenliği yönetim sistemi kapsamında kullanılabilmesini sağlamaktadır.

İşletme Prosedürleri (SOP), tesislerde operasyonların güvenli, verimli ve tasarlandığı biçimde gerçekleştirilmesi için kullanılan yazılı materyallerdir. Operasyon prosedürlerinin tesislerde meydana gelebilecek rutin ve rutin olmayan çeşitli operasyon türlerine ait kontrol bilgilerini eksiksiz ve net bir şekilde içermesi gerekmektedir.

Acil Durum Yönetimi (ERPG), tesislerde yer alan çalışanların proses güvenliği kazalarına karşın hazır olmalarını, müdahale planı oluşturmalarını ve tesisin rutin operasyon türüne dönmesi için gerçekleştirilmesi gereken adımları sağlamaktadır.

Eğitim, proses güvenliği yönetim sistemi kapsamında gerekli olan farkındalığın, proseslere ait bilginin, operasyon ve acil durum faaliyetlerinin çalışanlara aktarılmasını sağlamaktadır.

Çalışan Katılımı, proses güvenliği kapsamında yer alan elementlerin uygulanması için gerekli olan iş gücünü ve hassasiyeti sağlamaktadır.

Olay Araştırma, proses güvenliği kapsamında gerçekleştirilen tüm faaliyetlere karşın çeşitli olaylar meydana gelebilmektedir. Bu olayların tekrar etmemesi için ise ilgili olayın sebeplerinin belirlenmesi önemlidir. Bu sebeple ilgili element, yaşanılan olay veya kazaların araştırılmasını, sonuçların değerlendirilmesini, çıkarılacak derslerin ise kayıt altına alınmasını sağlamaktadır.

2.4. Proseslerde Risk Analizi

Tehlikeli kimyasal operasyonlarının tehlikelerinin anlaşılabilmesi ve bu tehlikelerin oluşturduğu risklerin yönetimi, proses güvenliği yönetim sisteminin temel girdilerini sağlayan proses tehlike analizi çalışmaları ile sağlanabilmektedir.

Risk analizleri, proses tehlikelerinin tespit edilebilmesi, değerlendirilmesi ve gerekli aksiyonların alınabilmesi için gerçekleştirilmektedir. Kullanılan metotlar ve kılavuzlar, yayınlarda, el kitaplarında, endüstriyel iyi uygulama örneklerinde veya ulusal ve uluslararası standartlarda yer almaktadır. Örneğin, IEC EN 31010 "Risk Yönetimi – Risk Değerlendirme Teknikleri" standardı kapsamında belirlenmiş birden fazla metot bulunmaktadır. HAZOP, FTA, ETA, FMEA, What If vb. tehlike belirleme metotları bu standart içerisinde belirtilmekte ve belirli metotlar için harici standartlar referans olarak tanımlanmaktadır (The International Electrotechnical Commission (IEC), 2019). Amerika Savunma Bakanlığı tarafından yayımlanmış bir standartta sistem güvenliği kapsamındaki potansiyel riskler yönetilmektedir. Risklerin yönetimi, analizi, değerlendirilmesi ve doğrulanması iş paketleri altında birden fazla metot tanımlanmaktadır (Department of Defense (DoD), 2012).

Risk değerlendirme teknikleri, uygulama kriterlerine göre risklerin tanımlanması, analiz edilmesi ve değerlendirilmesi şeklinde 3 farklı başlık altında incelenmektedir. Teknikler, girdi sağlayan parametreler ve üretebilecekleri çıktıların niteliklerine göre kalitatif, yarı kantitatif veya kantitatif olabilmektedir.

Proseslerde elleçlenen tehlikeli kimyasallar kaynaklı oluşan tehlikelerin, prosese uygun ve anlamlı çıktılar üretecek bir yöntem ile analiz edilmesi gerekmektedir. Güvenli çalışma

ortamının sağlanabilmesi için gerekli çalışmalarda belirli aksiyonların uygulanması önemli rol oynamaktadır. Prosese uygun analiz yönetiminin seçiminde, proses ve operasyonun tipi, elleçlenen kimyasallara özgü tehlikeler, prosesin karmaşıklığı ve büyüklüğü, proses güvenliği bilgisi ve risk değerlendirme deneyimi vb. kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir.

Hata modları ve etkileri analizi (FMEA) veya hata modları, etkileri ve kritiklik analizi (FMECA)

Hata modları ve etkileri analizi (FMEA) veya hata modları, etkileri ve kritiklik analizi (FMECA), risklerin tanımlanması için kullanılan yöntemler arasında bulunmaktadır (International Electrotechnical Commision (IEC), 2019). Proses endüstrisinde sıklıkla kritik ekipmanların belirlenmesi için ekipmanlara ait hata türlerinin ve potansiyel etkilerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. FMEA çalışmalarında öncelikle değerlendirilecek üst sisteme (örneğin ekipman) ait fonksiyon tanımlanmaktadır. Meydana gelebilecek potansiyel hatalar ise hata modları olarak listelenmektedir. Hata mekanizmaları, hata modlarını oluşturabilecek olay, durum veya parametreler şeklinde analize dahil edilmektedir. Tespit edilebilirlik başlığında, ilgili hatanın meydana geldiği varsayılarak nasıl ve hangi aşamada tespit edilebileceği değerlendirilmektedir. Hata meydana geldiğinde oluşacak sonuç belirlenerek, şiddeti tanımlanmaktadır. Son olarak ilgili hataya yönelik alınması gereken önlemler tanımlanmaktadır. FMEA çalışmaları kalitatif, kantitatif veya yarı-kantitatif şekilde gerçekleştirilebilmektedir (International Electrotechnical Commission (IEC), 2018).

Olay ağacı analizi (ETA)

Olay Ağacı Analizi (ETA) risklerin analiz edilmesi ve değerlendirilmesi için kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Grafiksel bir metot olarak uygulanan olay ağacı analizinin temel amacı, istenmeyen olay meydana geldikten sonra sonucu engelleyebilecek veya etkilerini hafifletebilecek bariyerlerin değerlendirmeye katılarak potansiyel sonuç olaylarının tanımlanmasıdır (International Electrotechnical Commision (IEC), 2019). Örneğin, alevlenir bir kimyasalın boru hattından sızıntısı sonucunda havuz yangını, jet yangını veya buhar bulutu patlaması meydana gelebilecek sonuç olayları arasında yer almaktadır. Sızıntının meydana geldiği atmosferik şartlar, sızıntının meydana geldiği alana ait fiziksel koşullar, proseste yer alan koruma katmanları vb. ise istenmeyen sızıntı olayı

sonrası ortaya çıkacak sonuç olaylarının meydana gelme olasılıklarına etki etmektedir. Olay ağacı analizi, soldan sağa doğru başlangıç olayının (istenmeyen olay) belirlenmesi ile başlamaktadır ve her bir kontrol adımı veya bariyer için başarı veya başarısızlık olasılığı tanımlanmaktadır. Sonuç olaylarının ve bariyerlerin tamamı çalışmaya dahil edildiğinde analiz sonlandırılmaktadır (International Electrotechnical Commission (IEC), 2010).

Koruma katmanları analizi (LOPA)

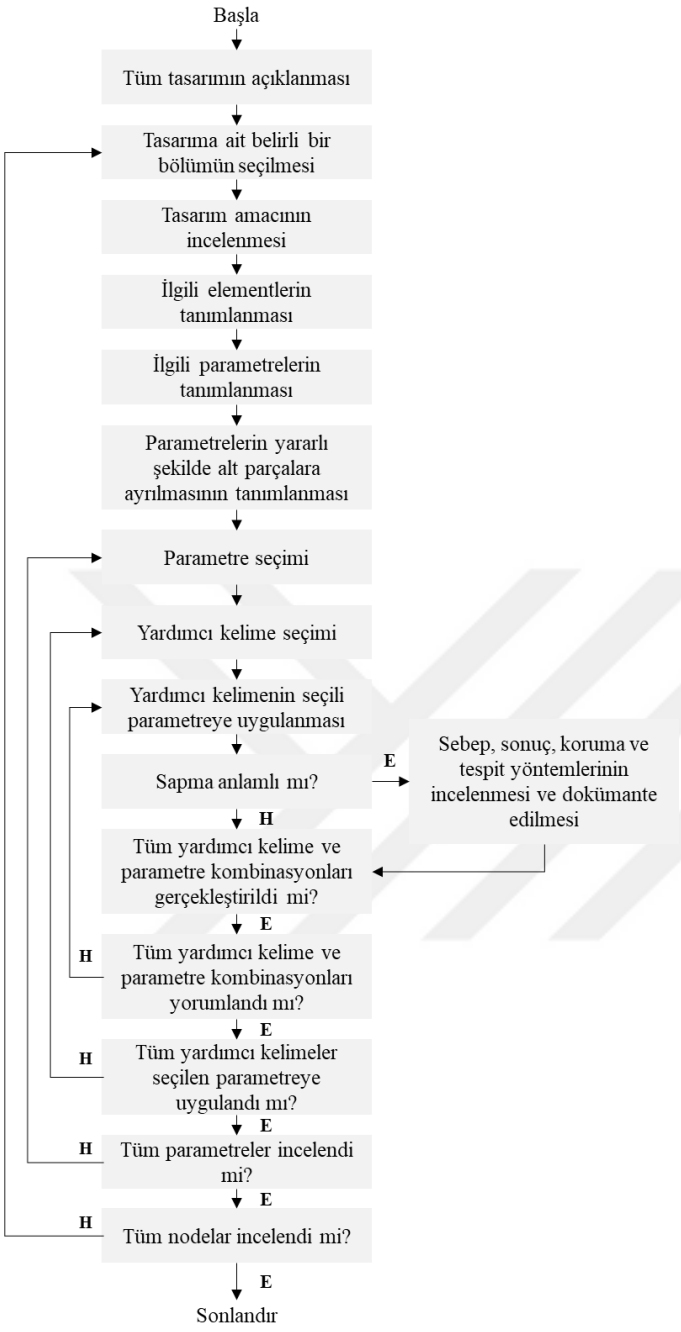
Koruma Katmanları Analizi (LOPA), risklerin azaltılması ve güvenlik bütünlük seviyeleri hedeflerinin hesaplanması için kullanılan yöntemlerden biridir (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2011). Yöntem, CCPS tarafından 90'lı yıllarda geliştirilmiş ve yayımlanmıştır. Analizin temel amacı, değerlendirilen senaryolara ait bariyerlerin veya koruma katmanlarının etkinliğinin ve yeterliliğinin belirlenmesidir. LOPA' da girdileri harici şekilde gerçekleştirilmiş bir tehlike belirleme ve risk değerlendirme çalışmasına ait çıktılar oluşturulmaktadır. Örneğin, HAZOP çalışması kapsamında belirlenmiş senaryolar LOPA'ya girdi sağlayabilmektedir. Senaryolara ait başlatıcı olay ve olasılığının belirlenmesi için, ilgili başlatıcı olay kategorisine göre veri tabanlarından veya tesis verilerinden talep anında hata yapma olasılığı (PFD) değerleri elde edilmektedir. Başlatıcı olay frekansına etki edebilecek koşullu modifiye edici veya etkinleştirici şart mevcut ise ilgili sayısal değerler girdi olarak sağlanmaktadır. Örneğin, senaryoya ait sebep hava şartlarının yalnızca belirli sıcaklıkların altında olması ile sağlanıyor ise mevsim verilerine göre hava sıcaklığının düşük olduğu gün veya ayların istatistiksel verisi etkinleştirici şart olarak girdi sağlayabilmektedir (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2013). Senaryolarda başlatıcı olay ile potansiyel sonuç arasında yer alan bariyerlerin ve bağımsız koruma katmanlarının etkinliği bağımsızlık, bakım, etkinlik ve uygun tasarım kriterleri altında değerlendirilmektedir. Son olarak, başlatıcı olay, etkinleştirici şart, koşullu modifiye edici bariyerler ve bağımsız koruma katmanlarına ait sayısal veriler matematiksel olarak hesaplanarak hedeflenen kabul edilebilir risk seviyesine ulaşılıp ulaşılamadığı analiz edilmektedir (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2014).

Yarı kantitatif tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP) analizi

HAZOP analizi tanımı ile çeşitli kaynaklarda karşılaşılmaktadır. HAZOP tehlike ve işletilebilirlik sorunlarını ve normal proses şartlarından sapmaları belirlemek için belirli

rehber kelimeleri kullanarak proses tehlikelerinin belirlenmesini ve değerlendirilmesini sağlayan sistematik ve yarı nicel bir yöntemdir (International Electrotechnical Commission (IEC), 2016). HAZOP çalışmasının amacı, proseslerin veya operasyonların tasarım/operasyon amacından saptığı durumlarda istenmeyen bir olaya yol açıp açmayacağının sistematik bir şekilde gözden geçirilmesidir (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2008). HAZOP çalışması farklı alanlarda tecrübe sahibi olan kişilerden oluşan bir takım ile beyin fırtınası yapılarak gerçekleştirilmektedir. HAZOP çalışmasında bulunan ekip üyelerinin proses, kimyasal ve tasarım hakkındaki bilgi seviyesi çalışma sonucunda değerlendirilen senaryoların, bariyerlerin ve potansiyel sonuçlarının geçerliliğini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple, etkin bir HAZOP çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için doğru ekip üyeleri ile çalışılması gerekmektedir. HAZOP çalışmalarında "Lider" ve "Yazman" bulunmaktadır. HAZOP Lideri oturumlarda değerlendirilen senaryolar hakkında ekibe liderlik etmektedir. HAZOP Yazmanı ise tüm çalışma ekibinin katkı sağladığı HAZOP oturumuna ait bilgilerin yazılı hale getirilmesini sağlamaktadır.

HAZOP çalışmasına ait sistematik IEC 61882 standardı kapsamında belirtilmektedir. Sistematiğe göre öncelikle prosese ait sınırların ve genel tasarım amacının belirlenmesi gerekmektedir. Sistemin detaylı şekilde değerlendirilebilmesi için anlaşılabilir parçalara ayrılması sağlanmaktadır. Değerlendirilecek prosesin ayrıştırıldığı parçalara veya bölümlere "Node (düğüm noktası)" adı verilmektedir. Belirli bir node seçilmekte ve ilgili node içerisinde geçerli olan parametreler ve yardımcı kelimeler belirlenmektedir. Parametre, proses ile ilişkili fiziksel veya kimyasal özellik olarak tanımlanmaktadır. Yardımcı kelime ise, değerlendirilen prosesin tasarım amacını nitelemek veya ölçmekte kullanılan basit kelimelerdir. Node içerisindeki her bir parametre ile yardımcı kelimelerin bir arada kullanılması ile sapmalar oluşmaktadır. Sapmalar belirlendikten sonra potansiyel sebepler ve bu sebeplere ait sonuçlar değerlendirilmektedir. Sebep – sonuç çiftlerinin değerlendirilmesi sırasında ise koruma sağlayan ve potansiyel sonucun şiddetini hafifletebilecek bariyerler göz önünde bulundurulmaktadır. Tüm sapmalar ve sebep – sonuç çiftlerine ait değerlendirme tamamlandığında ise HAZOP çalışması sonlandırılmaktadır. Şekil 2.5 içerisinde IEC 61882 standardında yer HAZOP sistematiğine ait akış diyagramı bulunmaktadır.



Şekil 2.5. HAZOP sistematiği

HAZOP yöntemi geliştirilerek oluşturulmuş farklı versiyonlar bulunmaktadır. Frekans/olasılık ve şiddet tanımlarının yöntem içerisine dâhil edilmesi bu kapsamdaki geliştirmelerdendir. Tez çalışması kapsamında HAZOP çalışması temel alınarak geliştirilmiş olan “Yarı Kantitatif HAZOP” yöntemi uygulanmıştır. Yarı Kantitatif HAZOP yöntemine ait temel bileşenler ve uygulama adımları maddeler halinde aşağıda açıklanmıştır.

Sapmalar

Yarı Kantitatif HAZOP çalışması kapsamında proses ve node seçimi gerçekleştirildikten sonra sapmalar oluşturulmaktadır. Sapmaların oluşturulabilmesi için parametre ve yardımcı kelimelerin birlikte kullanılması gerekmektedir. Jenerik yardımcı kelime ve parametre tanımları Çizelge 2.2'de belirtilmektedir.

Çizelge 2.2. Jenerik parametreler ve yardımcı kelimeler

Parametre	Akış
	Seviye
	Basınç
	Sıcaklık
	Viskozite
	Yoğunluk
Yardımcı Kelime	Az
	Hiç
	Var
	Aynı Zamanda
	Yanı Sıra
	Erken

Belirlenen her bir sapma için potansiyel sebepler sıralanmaktadır. Senaryoyu meydana getiren sebepler temel olarak üç ana kategori altında (insan hatası, ekipman hatası ve dış faktörler) toplanabilmektedir. Çalışmada belirlenen sapma için birden fazla sebep bulunabilmektedir. Bu gibi durumlarda tüm sebepler gruplandırma yapılmadan ayrı ayrı incelenmektedir.

Başlatıcı olay kategorisi ve hata olasılığı

Senaryoyu oluşturan sebep için başlatıcı olay kategorisi ve frekansı/hata olasılığı seçilmektedir. Frekans/hata olasılığı değerleri için öncelikle ilgili prosese ait mevcut kayıtlar/veriler mevcut değil ise çeşitli kaynaklardan derlenmiş olan Çizelge 2.3 içerisinde yer alan başlatıcı olay frekans verileri kullanılmaktadır.

Çizelge 2.3. Başlatıcı olay frekansları

#	Başlatıcı Olay Kategorisi	Başlatıcı Olay Frekansı (x/yıl)	Referans
1	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1,00E-01	a, b
2	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Bütünlük Kaybı	1,00E-04	a, b
3	Esnek Hortum Bütünlük Kaybı	1,00E-02	a, b
4	Temel Proses Kontrol Sistemi Hatası	1,00E-01	a, b
5	Aktüatörlü Vana Hatası	1,00E-01	a, b
6	Manuel Vana Hatası	1,00E-01	a, b
7	Regülatör Hatası	1,00E-01	a, b
8	Basınç Tahliye Vanası Hatası	1,00E-02	a, b
9	Konveyör Hatası	1,00E-01	a, b
10	Genel Utility Hatası	1,00E-01	a, b
11	Operatör Hatası	1,00E-01	a, b
12	Sızdırmazlık Elemanı (Conta) Hatası	1,00E-02	a, b
13	Isı Değiştirici Hatası	1,00E-02	a, b
14	Nozzle Tıkanıklığı	1,00E-01	a, b
15	Filtre Tıkanıklığı	1,00E-01	a, b
16	Burner Hatası	1,00E-01	a, b
(Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2011) (De Haag, Ale, & Post, 2001)			

Aktifleştirici şart, senaryonun meydana gelmesinde doğrudan etkili olmayan ancak senaryonun istenmeyen bir sonuca gitmesi için mevcut veya aktif olması gereken operasyon veya koşul olarak tanımlanmaktadır. Koşullu değiştiriciler ise sonuca ait etki terimlerinin konuşulduğu durumlarda senaryolara ait risk hesaplamalarına dâhil edilen çeşitli olasılıkları içermektedir. Değerlendirilen senaryo için aktifleştirici şart veya koşullu değiştirici mevcut ise Çizelge 2.4 içerisinde yer alan olasılık değerleri kullanılmaktadır.

Çizelge 2.4. Aktifleştirici şartlar ve koşullu değiştiriciler tablosu

#	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici	Olasılık (P)	Referans
1	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1,00E+00	a
2	Mevsimsel Riskler (Sıcaklık Farkı)	5,00E-01	a
3	Personelin Alanda Bulunma Olasılığı (%100)	1,00E+00	b
4	Personelin Alanda Bulunma Olasılığı (%10)	1,00E-01	b
5	Fiziksel Olarak Erişime Sınırlandırılmış Alan	1,00E-02	a
6	Tutuşma Olasılığı- Proses Alanı (%100)	1,00E+00	a
7	Tutuşma Olasılığı- ATEX Kapsamlı Alan (%10)	1,00E-01	a
(Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2011) (De Haag, Ale, & Post, 2001)			

Bariyerler ve bağımsız koruma katmanları

Değerlendirilen senaryoların sonuçlarına ait tehlikeleri önleyecek ya da etkilerini hafifletecek mühendislik önlemlerinin ve idari kontrollerin belirlenmesi bu aşamada yapılmaktadır. Belirlenen bariyerler ve bağımsız koruma katmanlarının risk düşümlerinin hesaplanması için talep anında hata yapma olasılığı (PFD) değerleri kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında sayısal olarak risk düşümü yapılabilmesi için ise belirlenen bariyer veya koruma katmanının belirli bir amaç için tasarlanmış olması, sapmaya neden olan başlatıcı olaydan bağımsız olması, güvenilir ve bakımlarının sağlanabilir olması, denetlenebilir/muayene edilebilir olması gerekmektedir.

Sonuç ve sonuç kategorisi

Sonuç, değerlendirilen senaryolarda başlatıcı olayın sebebine bağlı olarak ortaya çıkan etkiler olarak tanımlanmaktadır. Senaryoya ait sonuç yangın, patlama veya toksik bir kimyasalın salınmasını gibi tehlikeli durumları içerirken bazı durumlarda ise tehlike yaratmayan etkilere sahip olabilmektedir. Değerlendirilen sonuçlar sağlık ve güvenlik, çevre, maddi hasar ve itibar kategorileri altında değerlendirilmektedir.

Risk değerlendirme

Risk değerlendirme, senaryoların meydana gelme olasılığı ve potansiyel sonuçlarının birlikte göz önünde bulundurulması ile sağlanmaktadır. Yarı Kantitatif HAZOP çalışmalarında bir senaryo için bariyer öncesi, bariyer sonrası ve artakalan risk şeklinde 3 farklı aşamada risk değerlendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Risk değerlendirme kapsamında kullanılan frekans tanımları Çizelge 2.5. şiddet tanımları Çizelge 2.6.ve risk matrisi Çizelge 2.7. içerisinde yer almaktadır.

Çizelge 2.5. Risk değerlendirmede kullanılan frekans tanımları ve değerleri

#	Frekans Tanımı	Açıklama	Frekans Değeri
F0	Neredeyse İmkânsız	Tesiste 10^6 yılda birden az meydana gelmesi muhtemel olay	Olay Frekansı $\leq 10^{-6}$ (olay/yıl)
F1	İhtimal Dışı	Tesiste 10^4- 10^6 yılda bir meydana gelmesi muhtemel olay	$10^{-6}<$ Olay Frekansı $\leq 10^{-5}$ (olay/yıl)
F2	Oldukça Nadir	Tesiste 10^4- 10^5 yılda bir meydana gelmesi muhtemel olay	$10^{-5}<$ Olay Frekansı $\leq 10^{-4}$ (olay/yıl)
F3	Çok Zor	Tesiste 10^3- 10^4 yılda bir meydana gelmesi muhtemel olay	$10^{-4}<$ Olay Frekansı $\leq 10^{-3}$ (olay/yıl)
F4	Nadiren	Tesiste 10^2 - 10^3 yılda bir meydana gelmesi muhtemel olay	$10^{-3}<$ Olay Frekansı $\leq 10^{-2}$ (olay/yıl)
F5	Olası	Tesiste 10 - 10^2 yılda bir meydana gelmesi muhtemel olay	$10^{-2}<$ Olay Frekansı $\leq 10^{-1}$ (olay/yıl)
F6	Sık Sık Yaşanabilen	Tesiste 1-10 yılda bir meydana gelmesi muhtemel olay	Olay Frekansı $> 10^{-1}$ (olay/yıl)

Çizelge 2.6. Risk değerlendirmede kullanılan şiddet kategorileri ve tanımları

#	K1 - Sağlık ve Güvenlik	K2 - Çevre	K3 - Maddi Hasar	K4 - İtibar
S5	Saha İçinde/Dışında Ölüm Bir veya daha fazla saha dışında ölü veya saha içinde birden fazla ölüm veya saha dışında toplu ciddi yaralanma	>ERPG-3 Saha dışına felaket boyutunda etkiler yaratacak kaçak ve uluslararası medya ilgisi	Tesiste veya tesis dışında > $10M değerinde hasar	Firmanın tüm paydaşlarına zarar, uluslararası medya ilgisi
S4	Saha İçinde Ölüm Saha içinde bir ölü veya saha içinde çoklu ciddi yaralanma veya saha dışında bir ciddi yaralanma	ERPG-3 Resmî kurumlara raporlanacak seviyede kaçak. Saha dışına etki. Toplum kaygısı ve medya ilgisi	Tesiste veya tesis dışında $1M - $10M arası değerde hasar	İş ilişkileri ve satış ortaklarına zarar (finansal ve hayat kalitesini etkileyici), ulusal medya ilgisi
S3	Ciddi Yaralanma Tesis içerisinde çalışanların, alt yüklenicilerin veya genel halkın hayatını değiştirebilecek türde yaralanma	ERPG-2 Saha dışına gözle görülür ve etkisi olan sızıntı. Toplum kaygısı ve medya ilgisi	Tesiste veya tesis dışında $100K - $1M arası değerde hasar	Komşu tesisler ve yakın bölgedeki toplum üzerinde zarar (finansal ve hayat kalitesini etkileyici), yerel basın ilgisi
S2	Raporlanacak Yaralanma Ciddi olmayan yaralanmaya sebep olacak, tıbbi müdahale gerektirecek yaralanma veya iş gücü kaybı	ERPG-2 Sızıntının neredeyse tamamının saha içerisinde tutulması, saha dışına çıkmayan etki.	Tesiste veya tesis dışında $10K - $100K arası değerde hasar	Dış şikâyetler, şirket marka değerine etki
S1	İlk Yardım Gerektirecek Yaralanma Gerçek sağlık etkisine neden olmayan ancak belirgin tahrişe neden olan tek veya çoklu aşırı maruziyet	ERPG-1 Sızıntının kolay kontrol edilmesi, saha içerisinde tutulabilir ve saha dışına çıkmayan etki	Tesiste veya tesis dışında < $10K değerinde hasar	Yerleşke içindeki diğer tesislerden gelen kısıtlı şikâyetler
S0	Etki yok	Etki yok	Etki yok	Etki yok

Çizelge 2.7. Risk değerlendirme matrisi

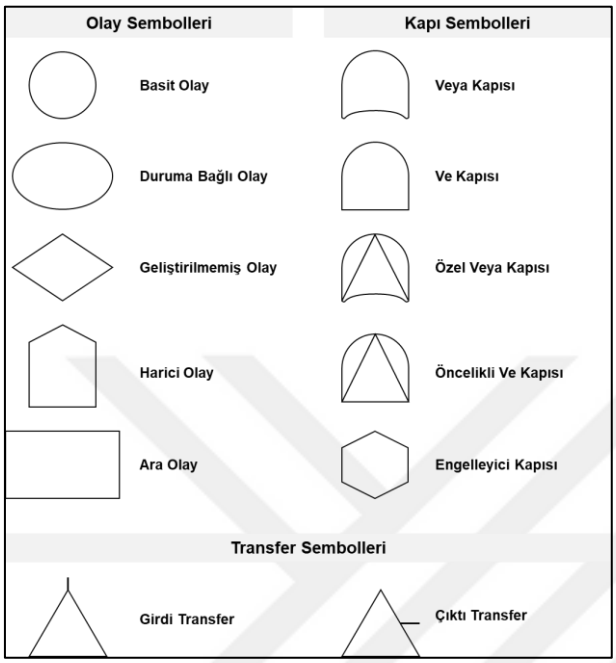
Risk Matrisi Şiddet x Frekans		F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6
		Neredeyse İmkânsız	İhtimal Dışı	Oldukça Nadir	Çok Zor	Nadiren	Olası	Sık Sık Yaşanabilen
S5	Felaket Boyutunda	Düşük	Orta	Orta	Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek
S4	Çok Ciddi	Düşük	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek
S3	Majör	Düşük	Düşük	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek
S2	Minör	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek
S1	İhmal Edilebilir	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Orta	Orta
S0	Etkisi Yok	Geçerli Değil	Geçerli Değil	Geçerli Değil	Geçerli Değil	Geçerli Değil	Geçerli Değil	Geçerli Değil

Hata ağacı analizi (FTA)

Hata ağacı analizi (FTA), sistemin arızalanmasına sebep olan olaylar zincirinin, mantıksal bir metot kullanılarak görsel olarak sunulabilmesini sağlayan kalitatif/kantitatif bir analiz yöntemidir. Değerlendirilen tepe olaya ilişkin olası tüm sebeplerin tek bir yapı içerisinde gösterilebilmesi en büyük avantajları arasında yer almaktadır.

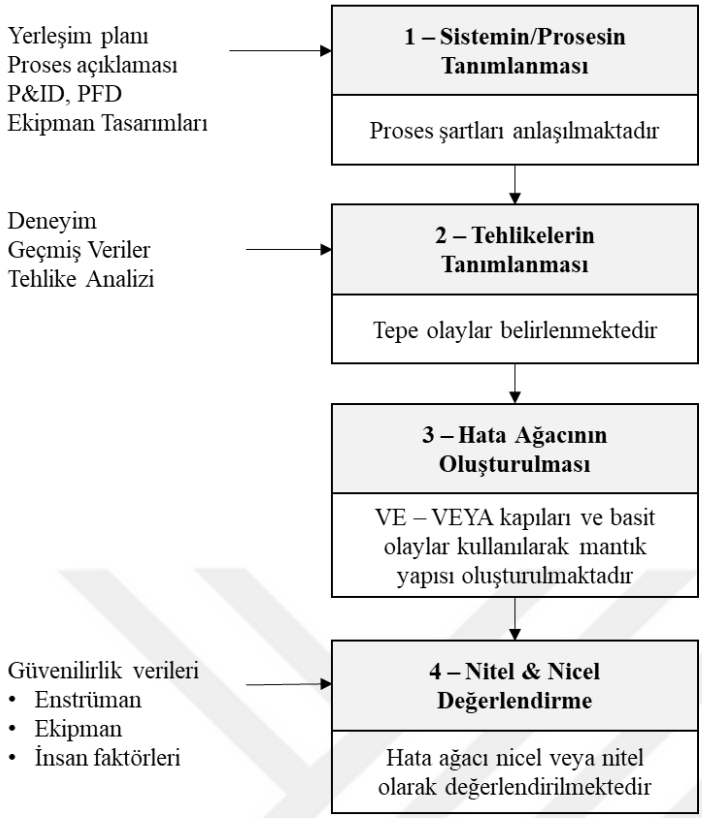
Risk değerlendirme çalışmalarında çevreyi, sistemi (kapsam), sistemin sınırlarını, alt sistemleri ve en küçük alt-alt sistemleri tanımlamak (çözünürlük sınırı) gerekmektedir. Sistem sınırlarının doğru şekilde seçilmesi, planlanan tehlike analizinin kapsamını, alt-alt sistemlerin sınırlarının seçimi ise gerçekleştirilecek analizin detaylarını belirlemektedir (Nuclear Regulatory Commission, 2014).

Hata ağacı analizi çalışmalarında kullanılan çeşitli semboller bulunmaktadır. Şekil 2.6 içerisinde özet şekilde hata ağacı analizinde kullanılan semboller ve açıklamaları yer almaktadır.



Şekil 2.6. Hata ağacı analizinde kullanılan semboller

FTA çalışması temel olarak planlama, tehlikelerin tanımlanması, hata ağacının oluşturulması, kalitatif ve kantitatif değerlendirme adımlarından oluşmaktadır. Çalışma kapsamında uygulanacak adımlar Şekil 2.7 içerisinde belirtilmektedir.



Şekil 2.7. FTA uygulama adımları

Hata ağacı analizinde olasılık ve frekans değerlerinin boole cebri ile ikilemler kullanılarak ele alınması sağlanmaktadır. Nicel değerlendirme için tepe olayın meydana gelme olasılığı hesaplanmaktadır. Yapılan hesaplamalar, hata ağacı için oluşturulan boole tanımlamalarına dayanmaktadır. Temel olarak "U" sembolü toplama ve "∩" sembolü ise çarpma için kullanılmaktadır. Boole Cebri kapsamında kullanılan kurallara ait bilgiler Çizelge 2.8 içerisinde belirtilmiştir (Nuclear Regulatory Commission, 2014).

Çizelge 2.8. Boole cebri kuralları

Matematiksel Gösterim	Mühendislik Gösterimi
X∩Y=Y∩X	X•Y=Y•X
XUY=YUX	X+Y=Y+X
X∩(Y∩Z)=(X∩Y)∩Z	X•(Y•Z)=(X•Y)•Z
XU(YUZ)+(XUY)UZ	X+(Y+Z)=(X+Y)+Z
X∩(YUZ)=(X∩Y)U(X∩Z)	X•(Y+Z)=(X•Y)+(X•Z)
XU(Y∩Z)=(XUY)∩(XUZ)	X+Y•Z=(X+Y)•(X+Z)
X∩X=X	X•X=X
XUX=X	X+X=X
X∩(XUY)=X	X•(X+Y)=X
XU(X∩Y)=X	X+X•Y=X

Hata ağacı yapısı hiyerarşik olarak yukarıdan aşağıya doğru oluşturulmaktadır. Tepe olay olarak tanımlanan ve hata ağacının en üstünde yer alan olayın belirlenmesi sonrasında Şekil 2.6 içerisinde yer alan kapı ve ara olay sembolleri kullanılarak ağaç yapısı detaylandırılmaktadır. Hata ağacının geliştirilmesi ise ilgili yapıya ait kırınımların basit, harici veya geliştirilmemiş olay olarak tanımlanmasına kadar devam etmektedir.

Tepe olaya ait nitel önem, minimum kesim kümeleri kullanılarak belirlenmektedir. Minimum kesim kümesi, hata ağacı içerisindeki tepe olayın gerçekleşmesi için gereken ve basit olaydan başlayan en kısa yol olarak tanımlanabilmektedir (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2010). Ancak, tepe olaya ait en olası sebebin belirlenebilmesi için nicel (kantitatif) değerlendirme yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda ise çizelge içerisinde belirtilen denklemler Çizelge 2.8 kullanılarak tepe olaya ait frekans değeri hesaplanmaktadır.

2.5. Güvenli Proses Tasarımı

Kimyasal proses tasarımı, farklı proses adımlarının seçilmesini ve eksiksiz bir üretim sistemi oluşturmak için sistemin entegrasyonunu gerektirmektedir. Ürün tipi, üretim ölçeği ve ürünün yaşam döngüsü, kimyasal proses tasarımındaki öncelikler üzerinde büyük etkilere sahiptir (Smith, 2015). Bunun yanı sıra tesislerin üretimi ve varlığını devam ettirebilmesi için güvenli şekilde proseslerin sürdürülmesi gerekmektedir. Bu kapsamda proses tasarımlarında farklı alternatifler ve seçim yapma gerekliliği bulunmaktadır (Windhorst, 1995).

Güvenli Proses Tasarımının temelinde risk temelli yaklaşım yer almaktadır. Risk, tehlikeli olayların meydana gelme olasılığı/frekansı ve potansiyel sonuçlarına ait şiddetin birlikte değerlendirilmesi ile belirlenmektedir. Proses tasarımı gerçekleştirilirken tasarımın farklı aşamalarında proses tehlike analizi gerçekleştirilmeli ve prosesin kabul edilebilir güvenlik seviyesine sahip olma durumunun değerlendirilmesi gerekmektedir (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2007).

Proses tasarımlarında kabul edilebilir güvenlik seviyesinin sağlanabilmesi için uygulanabilecek kendinden güvenli, pasif, aktif ve prosedürel tasarım olarak adlandırılan 4 temel tasarım çözüm kategorisi bulunmaktadır. Kendinden güvenli tasarım, tehlikelerin

ortadan kaldırılması veya etkilerin hafifletilmesi için daha az miktarda tehlikeli kimyasal kullanımı, tehlikeli kimyasal kullanımının tamamen ortadan kaldırılarak farklı bir kimyasal ile prosesin yürütülmesi, kimyasalın tehlikeli olmadığı operasyonel koşulların belirlenerek proses şartlarının değiştirilmesi veya prosesin karmaşıklığının azaltılarak işletme hatalarının azaltılmasına yönelik yöntemlerinin kullanılmasını içermektedir. Pasif tasarım, herhangi bir ekipman veya enstrümana ihtiyaç duyulmaksızın, proses parametrelerinin mekanik tasarım ile sağlanması şeklinde tanımlanmaktadır. Aktif tasarımda çeşitli ekipman veya enstrümanlar ile birlikte proses değişkenlerinin ölçülmesi ve gerçekleştirilecek fonksiyonlar ile tehlikelerin azaltılması amaçlanmaktadır. Aşırı basınç meydana gelmesi beklenen bir basınçlı kap üzerinde basınç tahliye vanası veya patlama disklerinin bulundurulması, boru hatları içerisinde geri akış meydana gelmesi beklenen noktalarda çek vana konumlandırılması veya tank dolum operasyonlarında aşırı doluma karşı koruma sağlanması amacı ile seviye sensörü, pompa ve ilgili hat üzerine konumlandırılacak akış kesici vana ile ilişkilendirilmiş bir temel proses kontrol sistemi veya interlok tanımlanması mühendislik kontrolleri veya çözümleri arasında yer almakta ve aktif tasarım olarak nitelendirilmektedir. Prosedürel tasarım ise tehlikelerin önlenmesi için tesis çalışanının bir aksiyonu yerine getirmesi olarak tanımlanmaktadır. Dolum operasyonları öncesinde tank seviyelerinin kontrol edilerek kontrol listesine işlenmesi, topraklama hatlarının rutin kontrolü, alarm sonrası operasyon prosedürlerine göre ilgili aksiyonların sağlanması prosedürel tasarım çözümleri kapsamında yer almaktadır (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 1998).

Tez çalışmasında, dikey tipli bir katı yakıt mikserinin kullanıldığı yakıt üretim prosesi için risk değerlendirme faaliyetleri gerçekleştirilecektir. Risk değerlendirme çıktılarına göre ise bir yakıt mikserinin güvenli tasarıma sahip olması için gerekli olan kriterler belirlenecektir.

2.6. Katı Yakıtlar ve Katı Yakıt Mikserleri

Katı yakıtlar

Katı yakıtlar roket, füze veya uzay araçlarının fırlatılması veya bir noktaya sevk edilmesi için kullanılan enerjik malzemelerdir (Song, ve diğerleri, 2022). Enerjik malzemelerin tarihi 9 ila 11. yüzyıllar arasında geliştirilen kara baruta dayanmaktadır. Ancak, farklı alanlardaki performans taleplerinin ve güvenlik ile ilgili ihtiyaçların karşılanabilmesi için yeni türdeki enerjik malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi hızlanmıştır (Mason ve Rolan, 2019).

Katı yakıtların kullanıldığı mühimmatların güvenilirliğinin ve ürettikleri enerji miktarının, muharebe alanında kullanılan teçhizatların performansına doğrudan etki ettiği bilinmektedir (Song, ve diğerleri, 2022). Tipik bir katı yakıt formülasyonunda oksitleyici, metal tozu, bağlayıcı ve plastikleştirici Çizelge 2.9 içerisinde belirtilen örnek miktar ve oranlarda bulunmaktadır (Penner, 1965). Bunların yanı sıra katı yakıt performansına etki edecek veya yakıtın karıştırılmasını, dökülmesini veya işlenmesini kolaylaştıracak farklı fonksiyonel gruplar da formülasyonlar içerisinde yer alabilmektedir.

Çizelge 2.9. Temsili katı yakıt formülasyonu

Hammadde		Kütle (%)	Hacim (%)
Alüminyum		15	9,4
Amonyum Perklorat		69,8	62,4
Katalizör	Bağlayıcılar	15,2	28,2
Polimer			
Plastikleştirici			
Kürleştirici			

Bağlayıcıların temel fonksiyonu yapısında bulunan tüm bileşenlerin matris bir yapı içerisinde tutulmasını sağlamaktır (Penner, 1965). Bağlayıcılar, yakıtın mekanik ve kimyasal özellikleri yanı sıra üretim ve olgunlaştırma proseslerini de etkilemektedir. Kompozit yakıtlarda en sık kullanılan polimerler arasında HTPB (Hydroxyl-terminated Polybutadiene), HTPE (Hydroxyl-Terminated Polyether), PBAN (polybutadiene-acrylic acid-acrylonitrile), CTPB (Carboxyl-Terminated Polybutadiene) ve NC (Nitrocellulose) bulunmaktadır (Chaturvedi ve Dave, 2019). Polimerler veya diğer adı ile polimerik bağlayıcılar için farklı türlerdeki hidrokarbonlar kullanılabilmektedir. Polimerik bağlayıcı olarak kullanılan kimyasala göre fiziksel ve kimyasal özellikleri değişiklik göstermektedir. HTPB, atmosferik şartlar altında alevlenir olmayan viskoz sıvı olarak tanımlanmaktadır. İçeriğinde ise üretim prosesleri kaynaklı düşük muhteviyatta 1,3-Bütadiene ve Vinylcyclohexene bulunabilmektedir (Elf Atochem North America, 2022). Beyaz renkli bir katı olan NC, 1.1 sınıfına sahip bir patlayıcı olarak nitelendirilmektedir (CAMEO, 2022). Fiziksel darbe, sürtünme veya şok dalgası ile dekompozisyona uğrayabilmekte ve bunun sonucunda yanma/patlama meydana getirebilmektedir. Belirli bir hacimde oluşturacağı toz bulutu ise toz patlayıcı özellik göstermektedir (GESTIS, 2022).

Metal tozları, yakıt karışımları içerisinde sıklıkla kütlece yüksek miktarlarda bulunmaktadır. Metal tozlarının yakıt karışımı içerisinde yer alması ile yanma ısısının, itki yoğunluğunun ve yanma sıcaklığının artması ve buna bağlı olarak açığa çıkan itki kuvvetinin artması beklenmektedir (Chaturvedi ve Dave, 2019). En sık kullanılan metal tozları arasında ise alüminyum, magnezyum, boron, titanyum ve demir bulunmaktadır (Dossi, Maggi, Paravan, ve Galfetti, 2019). Alüminyum tozu açık gri veya gümüş renkli metal tozu olarak tanımlanmaktadır (CAMEO, 2022). Metal tozuna ait tehlikeler saflık, parçacık boyutu ve dağılımına göre değişiklik göstermektedir (Penner, 1965). Herhangi bir ilave enerji olmadan atmosferik şartlar altında kendi kendine tutuşabilmektedir. Ayrıca toz patlayıcı özellik gösteren kimyasalın, havada belirli bir konsantrasyonda oluşturacağı toz bulutu veya sıcak bir yüzey üzerinde oluşturacağı toz katmanı sonucunda yanma ve/veya buna bağlı olarak patlama meydana getirmesi beklenmektedir. Bazı kimyasallar ile (Örneğin: güçlü oksitleyiciler, klorin, iyodin, bromin, florin, su) kontrolsüz şekilde bir araya gelmesi veya temas etmesi sonucunda istenmeyen yanma, patlama veya toksik gaz salınımı vb. olayları meydana getirmesi beklenmektedir (GESTIS, 2022).

Amonyum perklorat beyaz renkli, kristal yapıda ve çeşitli parçacık boyutlarına sahip bir kimyasal tozu olarak tanımlanmaktadır (CAMEO, 2022). Parçacık boyutunun ve dağılımının 15 mikrondan küçük olması durumunda 1.1 patlayıcı olarak sınıflandırılmakta, daha büyük parçacık boyutlarına sahip toz karışımlarında ise normal şartlar altında alevlenmesi veya patlaması beklenmemektedir. Atmosferde oluşabilecek potansiyel toz bulutu kütlesi patlayıcı özellik göstermemesine karşın, uzun süreli açık alev veya ısı maruziyeti sonrası patlayıcı özellik gösterebilmektedir. Fiziksel olarak darbe, sürtünme veya şok maruziyeti sonucu dekompozisyona uğrayabilir, açığa çıkan dekompozisyon gazları sonucu yanma/patlama meydana gelmesi beklenmektedir (GESTIS, 2022).

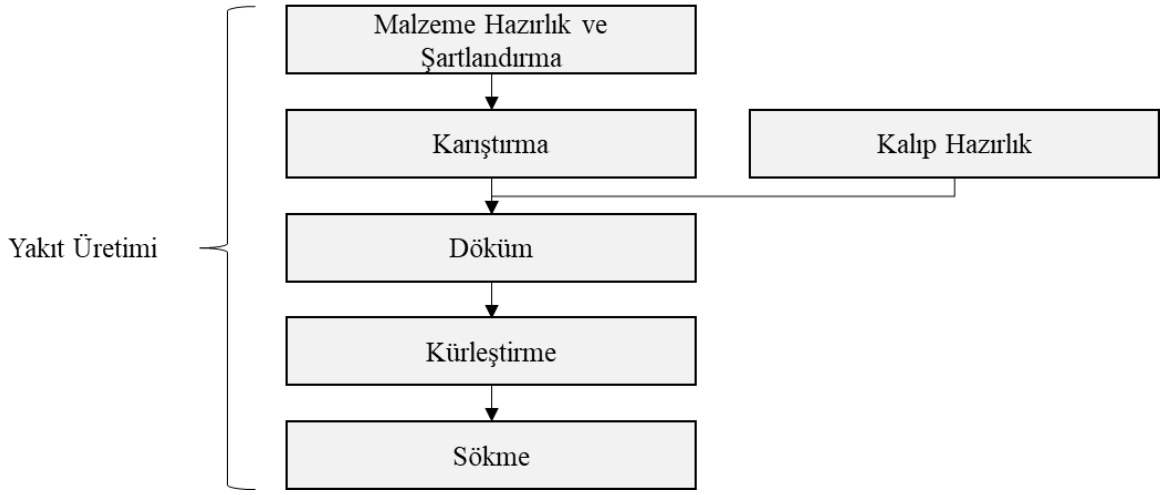
Oksitleyiciler, yanma reaksiyonu için gerekli olan oksijeni sağlamakta ve yüksek enerji üreten bileşenler arasında yer almaktadır (Klager ve Wrightson, 1965). Oksitleyici olarak kullanılan malzemeler arasında; amonyum perklorat (AP), amonyum nitrat (AN), amonyum dinitramit (ADN), siklotrimetilen-trinitramin (RDX), ve siklotetrametilen-tetranitramin (HMX) bulunmaktadır (Beckstead, Puduppakkam, Thakre ve Yang, 2007).

Plastikleştiriciler, yakıtların talep edilen formu koruması ve kürleşmesi için kullanılmaktadır (Mason ve Rolan, 2019). Genellikle düşük viskoziteye sahip bu kimyasalların

oksidasyondaki termal enerjiye katkı sağladığı bilinmektedir. Katı yakıt formülasyonlarında yaygın olarak kullanılan plastikleştiriciler arasında Dioktil adipat (DOA), Dioktil ftalat (DOP), Dibütil sebakat (DBS), nitrogliserin (NG), glycidyl azide polimer (GAP) ve dietil ftalat (DEP) yer almaktadır (Muthiah, Somasundaran, Verghese ve Thornas, 2013). DOA, renksiz ve hafif bir kokuya sahip sıvı kimyasal olarak tanımlanmaktadır (CAMEO, 2022). Atmosferik şartlar altında buharının tutuşturucu kaynak ile temas etmesi sonucu tutuşması beklenmemektedir. Ancak açık ateşe veya ısı enerjisine maruz kalması sonucu yanabilmektedir. DEP, renksiz ve kokusuz bir kimyasaldır ve atmosferik şartlarda tutuşabilir bir buhar oluşturması beklenmemekte ancak açık alev veya ısıya maruz kalması durumunda yanabileceği belirtilmektedir (GESTIS, 2022).

Katı yakıt üretim prosesi ve katı yakıt mikserleri

Katı yakıt üretim prosesi Şekil 2.8'de belirtilen katı yakıt motoru üretim prosesinin ilk 4 adımında gerçekleştirilmektedir (Mathesius, 2019). Üretim prosesi temel olarak kimyasalların hazırlanması, belirli koşullar altında karıştırılması, istenilen form içerisine dökülmesi ve kürleştirilmesini kapsamaktadır. Belirtilen proses adımları genelleştirilmiş olup kullanılan kimyasallara, proses parametrelerine, proses tasarımına ve hedeflenen nihai ürüne göre farklılık gösterebilmektedir. Yakıt formülasyonunda kullanılacak kimyasalların hazırlanması ve şartlandırılması gerekmektedir. Karıştırılacak kimyasalların türleri ve miktarlarındaki sapmalar, ürün kalitesi ve proses güvenliği açısından problemler meydana getirebilmektedir. Şartlandırma işlemi ise homojen bir karışım sağlanması ve nem içeriğinin talep edilen asgari seviyede olması için uygulanmaktadır. Yakıt içerisindeki nem içeriğinin katı yakıt motorunun performansına olumsuz yönde etkisi olmakta ve kurutma işleminin uzun süre gerçekleştirilmesi ise katı yakıtın mekanik özelliklerini olumsuz şekilde etkilemektedir (Iqbal ve Liang, 2006). Kimyasalların hazırlanması için kütle ve hacim ölçüm ekipman/enstrümanları kullanılırken, şartlandırma işlemleri için ısı aktarıcı, sıcaklık ve nem kontrolü ekipman/enstrümanları kullanılmaktadır.



Şekil 2.8. Katı yakıt üretim adımları

Katı yakıt üretimindeki karışım prosesi için özel mikserler ve otomatik/manuel besleme sistemleri kullanılmaktadır. Karışım operasyonunda hammaddeler belirli bir sıra ve kütle kontrolü sağlanarak miksere beslenmektedir. Operasyon güvenli operasyon limitlerindeki sıcaklık, basınç, besleme ve karıştırma hızı parametreleri takip edilerek gerçekleştirilmektedir. Katı yakıt üretiminde işletilebilirlik ve güvenlik kriterleri göz önünde bulundurulduğunda yaygın olarak dikey tipli mikserlerin kullanıldığı görülmektedir. Karışımda ısıtma ve soğutma sağlanabilmesi amacı ile mikser haznesi etrafında bir ceket bulunmaktadır (Penner, 1965). Yakıt formülasyonlarının değişken yapısı karıştırma operasyonunda elde edilen kürleşmemiş yakıtın viskozitesini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple mikserlerdeki karıştırıcı motorunun tork, dönme hızı ve kapasitesi farklılık göstermektedir. Yakıt mikseri içerisine plastikleştirici eklendikten ve homojen bir karışım elde edildikten sonra karıştırma operasyonu sonlandırılmaktadır. Katı yakıt üretim proseslerindeki potansiyel tehlikelerin, yakıt karışımlarında kullanılan kimyasalların özelliklerine göre farklılık gösterdiği görülmektedir. Bu sebeple kimyasallara ait bilgileri içeren proses güvenlik bilgisi çalışmaları, gerçekleştirilecek proses tehlike çalışmaları için oldukça önemlidir. Öte yandan enerjik malzemelerin darbe, sürtünme, ESD ve şok hassasiyeti sebebi ile üretimlerinin gerçekleştirildiği, işlendiği veya elleçlendiği proseslerin kapsamlı olarak değerlendirilmesi ve gerekli noktalarda iyileştirmelerin sağlanması gerekmektedir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Proses Kazaları ve Risk Değerlendirmesine Yönelik Araştırmalar

Proses güvenliği ile ilişkili kazalar yaralanma, ölüm, çevresel etki, tesis hasarı, üretimde aksama, şirket ve endüstri repütasyonunun olumsuz etkilenmesi ile sonuçlanabilir. Bu sebeple geçmişte meydana gelmiş proses güvenliği kazalarının araştırılarak, yaşanılanlardan ders çıkartılması oldukça önemli olmaktadır. Wang, Henriksen, Milind ve Mentzer (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 2010-2019 yılları arasında, Amerika Birleşik Devletleri'nde meydana gelmiş proses güvenliği kazalarına etki eden faktörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kazalara etki eden ve en sık karşılaşılan 18 adet faktör belirlenmiştir. Kuzey Amerika Sanayi Sınıflandırma Sistemine (NAICS) göre sınıflandırılmış, 8 farklı koddan birine sahip tesisler araştırmaya dahil edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre tasarım, önleyici bakım faaliyetleri ve koruma katmanları ilk üç faktör arasında gösterilmiştir. Güvenlik kültürünün ise en yaygın etki eden faktörler arasında 6. sırada olduğu belirtilmiştir. Başarılı bir proses güvenliği yönetim sisteminin, güçlü bir güvenlik kültürü üzerinde kurulu organizasyonel yapının desteği ile sağlanabileceği sonucuna varılmıştır (Wang, Henriksen, Milind ve Mentzer, 2021).

Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG), dünya çapında talep oranı oldukça yüksek olan enerji kaynakları arasında yer almaktadır. LNG'nin üretimi, depolanması veya transferi esnasında meydana gelebilecek hatalar çalışanları, çevreyi, şirket varlıklarını ve enerji piyasalarını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sebeple ilgili sektördeki risk değerlendirme çalışmalarının kritik bir role sahip olduğu görülmektedir. Animah ve Shafiee (2019) tarafından yapılan çalışmanın amacı LNG tesislerindeki risk değerlendirme çalışmaları hakkında literatürde belirtilen problemlerin gözden geçirilmesi ve kategorize edilmesidir. Literatürde yer alan çeşitli kaynaklar araştırılmış ve LNG sektöründeki risk analizleri metot, araç, veri kaynağı, çıktı/amaç ve uygulama alanı ana başlıkları altında değerlendirilmiştir. Son 20 yılda yayınlanan toplam 66 yayın olduğu ve uygulama alanlarının sırası ile taşımacılık, üretim tesisleri, istasyonlar ve deniz aşırı tesislerde yoğunluk gösterdiği belirlenmiştir. Literatür verilerine göre, dinamik risk değerlendirme kullanımı %71 ve geleneksel risk değerlendirme metotlarının kullanımı ise %29 olarak tespit edilmiştir. LNG sektöründe risk analizi ile ilgili oldukça fazla yayın bulunmasına rağmen, ilgili alanda gerçekleştirilecek araştırmalar için hala fırsatlar bulunduğu gösterilmiştir (Animah ve Shafiee, 2019).

Endüstriyel tesislerde, proseslerin varlığını güvenli şekilde sürdürebilmesi amacı ile potansiyel risklerin bertaraf edilmesi önemlidir. Risklerin tamamen ortadan kaldırılması veya tolere edilebilir seviyeye düşürülmesi için risk değerlendirme araçları kullanılmaktadır. Marhavilas ve Filippidis, Koulinas ve Koulouriotis (2019) tarafından yürütülen çalışmada ham petrolün işlendiği bir tesiste çeşitli metotlar bir araya getirilerek risklerin yeni bir yapı ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Tehlike ve İşletilebilirlik (HAZOP) metodu potansiyel sapmaları yardımcı kelimeler kullanılarak belirlenmiş, Karar Tabanlı Risk Matrisi (DMRA) belirlenen riskli senaryolara ait olasılık, şiddet üzerinden risk skoru hesaplanmıştır. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ise senaryoların hiyerarşik bir yapıda organize edilmesini ve kıyaslamalar ile önceliklendirilmesini sağlamıştır. Çalışma sonucunda E-HAZOP ismi verilen risk değerlendirme yapısının kompleks kimyasal üretim tesislerinde uygulanabileceği ve özellikle kaynakların kısıtlı olduğu durumlarda yatırımların doğru/önemli noktalara aktarılmasında karar vericiler için faydalı bir araç olabileceği belirtilmiştir (Marhavilas, Filippidis, Koulinas ve Koulouriotis, 2019).

Teknolojik gelişmeler, endüstriyel tesislerde gerçekleştirilen prosesleri daha kompleks ve katmanlı hale getirmektedir. Proseslerde meydana gelen bu gelişmeler potansiyel risklerin değerlendirilmesi için uygulanan metotların da geliştirilme ihtiyacını ortaya koymaktadır. Ikwan, Sanders ve Hassan (2021), depolama tankında meydana gelen bir sızıntının eş zamanlı risklerinin ve potansiyel tehlikelerinin belirlenmesi amacı ile Hata Ağacı Analizi (FTA) ve çeşitli risk değerlendirme metotları kullanmıştır. Çalışma esnasında sızıntıya sebep olabilecek temel olaylar, istatistiksel veriler ve risk matrisi kullanılarak potansiyel riskler değerlendirilmiştir. Geçmiş ve gerçek zamanlı veriler kullanılarak bir olasılık modeli oluşturulmuştur. Tesisteki mevcut koruma katmanlarının etkisinin belirlenmesi amacı ile dinamik risk modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak Fish Bone Diyagramı (FD), Hata Ağacı Analizi (FTA) ve Gerçek Zamanlı Veri (RTD) kullanılarak geliştirilen yapının yeni ve kapsamlı bir risk değerlendirme yöntemi ortaya koyduğu belirtilmiştir (Ikwan, Sanders ve Hassan, 2021).

Kantitatif veya kalitatif risk değerlendirme çalışmalarında değerlendirmeyi gerçekleştiren uzmanların seçim kriterleri değerlendirmeye ait sonuçları etkilemektedir. Koruma Katmanları Analizi (LOPA), yarı kantitatif risk değerlendirme metotları arasında yer almakta ve çalışma sonuçları uzmanların seçim kriterlerinden etkilenmektedir. Yan, Xu, Cui ve Yao (2017) bulut modeli (CM) ismi verilen bir metot ile koruma katmanları analizini bir

arada kullanarak (CM-LOPA) değerlendirmelerdeki belirsizliklerin önüne geçmeyi amaçlamıştır. Bu sebeple biyokütle gazlaştırma istasyonundaki bir gaz sızıntısı senaryosu için LOPA ve CM-LOPA uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gaz sızıntısı başlatıcı olay olarak ele alınmış ve 6 farklı çıktı koruma katmanlarının talep anında işlevini yerine getirip getiremeyeceği ile ilişkili olarak 4 farklı sonuç kategorisi (insan, ekipman, çevre ve sosyal etki) içerisinde değerlendirilmiştir. CM-LOPA'nın, CM'nin rastgeleliği ve bulanık mantık temeline dayanması sebebiyle değerlendirme aşamasında elde edilen sonuçların tutarlı olduğu ve koruma katmanlarının etkinliğinin daha net şekilde belirlenebileceği belirtilmiştir (Yan, Xu, Cui ve Yao, 2017).

LOPA'da edilen sonuçlar, tasarım hataları, bağımsız koruma katmanının yetersiz olması, talep anında fonksiyonunu yerine getirememe, insan hatası, bakım ve test hataları, proses tipi ve lokasyon vb. faktörlerden etkilenmektedir. Hong, Pasman, Sachdeva, Markowski ve Mannan (2016), tarafından LOPA içerisindeki belirsizliklerin tanımlanabilir ve ölçülebilir olması için bir model kullanımı amaçlanmıştır. Bu kapsamda bağımsız koruma katmanları (IPL) ve talep anında hata yapma olasılıklarının (PFD) belirlenmesi amacı ile bulanık mantık temeline dayanan bir hibrit metot geliştirilmiştir. Çalışma için 40 ton alevlenir n-hekzan kimyasalının bulunduğu bir proses seçilmiştir. Distilasyon kolonu üzerinde bulunan sıcaklık ve basınç transmitteri Dağıtımlı Kontrol Sistemine (DCS) bağlıdır, alarm ile birlikte operatör müdahalesi ve kesme vanası kapatılmaktadır. Operatörün talep anında hata yapma olasılığı için 10^{-1} , SIL2 güvenilirlik seviyesine sahip bağımsız koruma katmanı için ise 10^{-2} frekans değeri PFD kullanılmıştır. Çalışma sonucunda LOPA ve yeni geliştirilen hibrit metot uygulanmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. LOPA ile elde edilen verilerin yeni geliştirilen hibrit yaklaşıma göre daha düşük frekansta sonuçlar ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Geleneksel LOPA uygulamalarında frekans seçimlerinin güvende kalınarak uygulanması ise farklı frekanslarda sonuçlar ortaya koymasının temel sebebi olarak belirtilmiştir. Sonuç olarak çeşitli belirsizliklere dayanan proseslerdeki risk analizlerine ait sonuçların daha güvenilir olması için hibrit metotların kullanımı önerilmektedir (Hong, Pasman, Sachdeva, Markowski ve Mannan, 2016).

Ham petrol depolama tanklarında meydana gelen yangın ve patlama olayları rafineri endüstrisinde en sık görülen kaza türleri arasında yer almakta ve çeşitli kategorilerde olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Hata ağacı analizi (FTA) ise potansiyel tehlikelerin belirlenmesi, bariyerlerin yeterliliği değerlendirilerek ihtiyaç duyulan önlemlerin alınması

için rafineri sektöründe sık şekilde kullanılmaktadır. Wang, Zhang ve Chen (2013), hata ağacı analizindeki belirsizliklerin, bulanık mantık yöntemini ile daha anlamlı hale getirilebilmesini amaçlamıştır. Çalışma kapsamında vaka analizi için ham petrol depolama tankı yangın ve patlama olaylarına ait potansiyel sebepler belirlenerek hata ağacı analizi oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda belirlen en kritik 5 olay için geleneksel FTA metodu ve bulanık mantık ile geliştirilmiş FTA arasında yalnızca bir olay farklılık göstermiştir ancak olayların kritiklik seviyelerinde ise majör seviyede fark bulunmamıştır. Bunun sebebinin hata ağacı oluşturulurken kullanılan basit olay frekans değerlerinin veritabanlarından alınması ve derecelendirilmesine ait verinin bulunmaması olduğu belirtilmiştir. Bulanık mantık ile desteklenen hata ağacı analizi çalışmalarının basit olayların kritiklik seviyesini tanımlamada daha tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır (Wang, Zhang ve Chen, 2013).

W. Wang, Yan, F. Wang ve Li (2020), kömürden metanol elde edilen tesislerdeki proses güvenliği ile ilişkili risklerin belirlenebilmesinde hata modları ve etkileri analizini (FMEA) kullanmıştır. Çalışmayı gerçekleştiren uzmanlara ait seçimlerin ve çeşitli belirsizliklerin risk analizine ait sonuçları etkileyeceği değerlendirilmiş ve belirsizliklerin giderilmesi için bulut modeli temelli hata modları ve etkileri analizi (FMEA-CM) uygulanması amaçlanmıştır. Kömürden metanol üreten bir proses seçilerek FMEA çalışmalarında kullanılan şiddet (S), olasılık (O) ve tespit edilebilirlik (D) parametrelerinin bulut modeli içerisindeki etkileri hesaplanmıştır. FMEA çalışmalarında yer alan parametrelerin belirlenmesinde kullanılan sayısal olmayan verilerin sahip olduğu belirsizliğin çalışmaya ait sonuçları doğrudan etkilediği ve FMEA-CM'nin risk değerlendirme için uygulanabilecek etkin yöntemler arasında yer aldığı belirtilmiştir (Wang ve diğerleri, 2020).

Sultana, Okoh, Haugen ve Vinnem (2019), tehlike belirleme ve güvenilirlik analizi için uygulanan HAZOP ve FMEA gibi geleneksel yöntemlerin kompleks sistemlerde tam olarak etkin şekilde uygulanamayacağını değerlendirmiş; gemiden gemiye LNG transferinin gerçekleştiği bir operasyonu referans alarak sistem teorik proses analizi (STPA) gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. STPA metodunun genellikle otonom füzeler ve araçlardaki sistemlerin değerlendirilmesinde kullanıldığı ve çalışmanın temel amacının endüstriyel sistemlerde STPA metodu kullanımına ait fizibilite olduğu belirtilmiştir. HAZOP ve STPA metotlarının karşılaştırılması için spesifik bir proses adımı belirlenmiş ve 2 farklı metot ile değerlendirme yapılmıştır. Çalışma kapsamında HAZOP ve STPA ile tanımlanan potansiyel sebeplerin genellikle aynı olduğu görülmüştür. Çalışmaya ait sonuçlar

STPA metodunun geleneksel HAZOP için tamamlayıcı olabileceğini ancak bu gözlemlerin yalnızca spesifik bir proses için geçerli olduğu ve farklı akademik çalışmalara ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır (Sultana, Okoh, Haugen ve Vinnem, 2019).

Rafinerilerde ekipman, enstrüman veya kontrol sistemi hatası ile meydana gelen olayların yanı sıra insan hatası kaynaklı oldukça fazla sayıda kazanın meydana geldiği bilinmektedir. İnsan hatası kaynaklı meydana gelebilecek olaylarda başlatıcı olay türü ve frekansının doğru şekilde belirlenmemesi tüm sistemin güvenliğini etkilemektedir. Bu sebeple Fang, Rasel ve Richmond (2020), operasyon prosedürleri olay ağacı (OPET) isimli metot ile standart operasyon prosedürlerinde yer alan adımları değerlendirerek hata yapılması durumunda meydana gelebilecek sonuçların belirlenmesini amaçlamışlardır. Vaka analizi gerçekleştirilerek kimyasal tesisinde bulunan 2 farklı ekipmana ait operasyon prosedürü ele alınmıştır. ASPEN yazılımı kullanılarak her bir hatanın sonucunda meydana gelmesi beklenen olaylar belirlenmiştir. OPET çalışmasının potansiyel hatalara bağlı olarak prosesi kurtaracak adımların belirlenmesine ve operasyon prosedürleri içerisinde yer alan eksik noktaların azaltılması için gereken önemin verilmesine yardımcı olabileceği gösterilmiştir (Fang, Rasel ve Richmond, 2020).

2016 yılında Meksika'da bir petrokimya tesisinde meydana gelen olayda 32 kişi hayatını kaybetmiş ve 100'den fazla kişi ağır şekilde yaralanmıştır. Resmi raporlarda kazaya ait bir kök sebep bulunmamaktadır. Aquino-Gaspar, Diaz-Ovalle, Lopez-Molina, Conde-Mejia ve Valenzuela-Gomez (2021), tarafından gerçekleştirilen çalışmanın amacı, bu kazanın gerçekleştiği rafinerideki potansiyel kök sebeplerin simülasyon tabanlı uygulamalar ve kaza verileri kullanarak belirlenmesidir. Çalışma kapsamında proses simülasyonu için ASPEN Plus® yazılımı, proses tehlikelerinin belirlenmesi için proses hat indisi (PSI) ve potansiyel etkilerin belirlenebilmesi için TNT eşdeğer tabanlı modelleme gerçekleştiren ALOHA® ve ASNSYS FLUENT yazılımları kullanılmıştır. Proses akış indisi (PSI), kimyasal buharlarının patlama olasılıklarına göre potansiyel tehlike seviyelerinin belirlenmesini sağlayan bir metot olarak tanımlanmıştır. Çalışma sonucunda proses güvenliği yönetim sistemi ve bağlı elementlerin yüksek riskli tesislerdeki potansiyel risklerin bertaraf edilmesi için oldukça önemli olduğu, proses tehlike analizi ve etki analizi çalışmaları ile elde edilen simülasyon verilerinin gerçek kazalara ait sonuçları yansıtabileceği belirtilmiştir (Aquino-Gaspar, Diaz-Ovalle, Lopez-Molina, Conde-Mejia ve Valenzuela-Gomez, 2021).

2020 yılında Beyrut'ta amonyum nitratın depolandığı alanda meydana gelen kazada 178'den fazla kişi hayatını kaybetmiş ve 6500'den fazla kişi ağır şekilde yaralanmıştır. Sivaraman ve Varadharajan (2021), tarafından yürütülen çalışmada, bu kaza için araştırma yürütmek ve sonuç modellemesi ile etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle amonyum nitrata ait kimyasal özellikler incelenmiştir. Oksitleyici olan kimyasalın normal şartlar altında alevlenir olmadığı, kaynama noktasında önce dekompozisyona uğradığı ve dekompozisyon ürünleri arasında azot oksit ve su bulunduğu belirtilmiştir. Ancak sınırlı alanda ve yığın haldeki amonyum nitratın yüksek yoğunluktaki tutuşturucu kaynak ile temas etmesi halinde patlayabileceği ifade edilmiştir. Depolama operasyonlarında amonyum nitrat ile uyumsuz kimyasalların bulundurulmaması uygulanması gereken en temel kural olarak belirtilmiştir. Balık kılçığı diyagramı ile potansiyel sebepler malzeme, insan, yönetim, ölçüm ve metot başlıkları altında toplanmıştır. Patlamaya ait modellemeler için hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve depolanan amonyum nitratın TNT eşdeğer kütlesinin yaklaşık 1981 ton olduğu gösterilmiştir. Farklı konumlarda meydana gelen basınç etkisi hesaplanmıştır. Patlamanın insan hayatı ve yapılar üzerindeki etkileri ise probit hesaplaması kullanılarak belirlenmiştir. Kimyasalların depolandığı tesislerde rutin denetimlerin gerçekleştirilmesi, standartlara uygun depolamanın sağlanması ve operasyonu gerçekleştiren tüm personelin gerekli eğitimleri alması gerektiği değerlendirilmiştir (Sivaraman ve Varadharajan, 2021).

23 Mart 2005 tarihinde gerçekleşen Teksas Rafineri kazasının Isimite ve Rubini (2016), tarafından dinamik model ve kaza öncesi proses parametreleri kullanılarak tekrar değerlendirilmesi amaçlanmıştır. 15 kişinin hayatını kaybettiği ve 180 kişinin yaralandığı kaza ile ilgili öncelikle literatür araştırması gerçekleştirilerek kaza öncesine ait çeşitli raporlarda belirtilen veriler elde edilmiştir. Belirlenen parametreler ASPEN yazılımına girdi olarak sağlanmış ve kazanın meydana geldiği ekipman modellenmiştir. ASPEN ile hesaplanan sıcaklık, buharlaşma hızı ve sıvı seviyesi değerlerinin raporlanan değerler ile yakın olduğu gösterilmiştir. Teksas rafinerisinde proses güvenliği kapsamında tehlike analizi çalışmaları gerçekleştirilerek bariyerlerin tanımlanması durumunda kazanın meydana gelmeyeceği veya etkilerinin daha düşük seviyede olacağı tespit edilmiştir (Isimite ve Rubini, 2016).

3.2. Yakıt Üretim Prosesleri Kazaları ve Risk Değerlendirmesine Yönelik Araştırmalar

Katı yakıtların bulunduğu elleçleme operasyonları veya proseslerde yaşanmış çok sayıda kaza bulunmaktadır. Genel hatları ile değerlendirildiğinde kazalar, elleçleme veya proses süreçlerinde meydana gelebilecek işletme limitlerindeki potansiyel sapmalar kaynaklı veya üretimi gerçekleştirilen yakıt kompozisyonuna/hammaddelere ait eksik bilgi veya yeterli bilginin sağlanamaması sebebiyle meydana gelmiştir. Thiokol (U.S Patlayıcı Altyüklenicisi) tarafından oluşturulan dokümanda katı yakıt prosesleri ile ilişkili geçmiş yıllarda meydana gelmiş kazalara ait verilerin paylaşılması ve güvenlik kültürünün arttırılması amaçlanmıştır. Mikserlerde meydana gelen kazaların kimyasal etkileşim kaynaklı reaksiyonlar, uygun olmayan proses ekipmanlarının kullanımı, mekanik bütünlük kaynaklı sürtünme ve darbe oluşumu, bakım ve kalibrasyon eksikliği kaynaklı metal-metal sürtünmesi, hatalı kimyasal kullanımları, hatalı sıralama ile kimyasalların eklenmesi, karıştırmanın verimli sağlanamaması kaynaklı hotspot (sıcak nokta) oluşumu, temizliğin sağlanmaması, tasarım hataları, toz patlayıcı atmosfer oluşumu, yabancı malzeme bulunması (FOD) kaynaklı olduğu belirtilmiştir (Longhorn Army Ammunition Plant, 1964). Sonuç olarak katı yakıt üretiminde bulunan hammadde ve enerjik malzemelerin üretim operasyonlarının farklı aşamalarında potansiyel tehlikeler barındırdığı ve proses güvenliği yönetim sistemi kapsamında faaliyetlerin ilgili proseslerde gerçekleştirilmesi gerektiği görülmektedir.

Yakıt mikserlerinde yanma/patlama meydana gelmiş ve maddi hasar/ölüm ile sonuçlanmış kazalar da vardır. Thiokol Chemical Corp. tesislerinde bulunan 150 galonluk Baker Parkins markalı dikey mikserde 1963 yılında kaza meydana gelmiştir ve kaza/olay araştırma sürecine ait bilgiler bir sempozyumda sunulmuştur. Kazanın yakıt üretimi sırasında küratif malzemenin eklenmesi sonrası meydana geldiği ve mikser üzerinde yer alan güvenlik enstrümanlarının işlevini kısmen yerine getirdiği belirtilmiştir. Mikserdeki karıştırma operasyonun uzaktan gerçekleştirilmesi sebebi ile kaza can kaybı yaşanmadan yalnızca maddi hasar ile sonuçlanmıştır. Kazanın kök sebebi, mikser altında yer alan mekanik aksamın hatalı montajı ve mikser bıçakları ile arasında sürtünme meydana gelmesi ve yakıtın alev alması olarak tespit edilmiştir. Çalışmada kazadan edinilen dersler ise mikser sistemlerinde hava tahliyesinin katastrofik öneme sahip olduğu ve deşarj edebileceği miktarın hesaplanması gerektiği, sönümleme amaçlı kullanılan su tahliye sisteminin kazayı engellemeye değil potansiyel etkilerini hafifletmeye yönelik olduğu, acil durumlarda

sistemin kapalı kap konumundan açık kap konumuna getirilmesini sağlayan sensör ve hidrolik sistemin tespit-müdahale süresinin oldukça önemli olduğu, alınan tüm önlemlere rağmen yakıt üretim operasyonların uzaktan kontrollü gerçekleştirilmesi gerektiği olarak sıralanmıştır (Stuckey, 1963).

Amerika'da 1998 yılında yakıt üretimi denemeleri sırasında, 150 galonluk dikey mikserde meydana gelen kaza için potansiyel sebeplerin bulunması amaçlanmış ve çeşitli çalışmalar ve testler gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Kaza geliştirme aşamasından üretim aşamasına kadar geçen süreçte 4. Üretim ölçekli batch (kesikli reaktör) sırasında meydana gelmiştir. Kalifikasyon çalışmaları kapsamında ilgili operasyonun son batch olduğu belirtilmektedir. Katı RDX'in miksere beslendiği sırada gerçekleşen bir hata sonucu kaza meydana gelmiştir. Kazanın sonucunda operasyonun 30 metre uzaklıktaki kontrol odasından gerçekleştirilmesi sebebi ile yaralanma veya ölüm meydana gelmemiş ancak üretim alanında Resim 3.1 içerisinde belirtildiği üzere maddi hasar meydana geldiği belirtilmiştir.



Resim 3.1. Kazada meydana gelen hasara ait resimler

Üretim operasyonu plastik hammaddenin ve THF içerisinde çözülmesi ile başlamıştır. Ardından mikser içerisine anti oksidan ve kürleştirici eklenmiştir. Besleme işlemleri tamamlandıktan sonra uzaktan kontrollü sistem ile RDX (>5 mikron) mikser içerisine beslenmiştir. İlgili besleme işlemleri gerçekleştirilirken mikser motoru çalıştırılmamış, RDX ekleme işlemi tamamlandığında karıştırma için sistem çalıştırılmıştır. Besleme operasyonunda mikser üzerine konumlandırılmış "hopper" kullanılmış ve hava aktüatörlü vanalar ve titreşim motorları ile kontrol edilmiştir. Gerçekleştirilen araştırmaya göre besleme işleminin rutin operasyona göre daha hızlı gerçekleştiği vurgulanmıştır. Olay araştırma için öncelikle maksimum kimyasal miktarı tayin edilmeye çalışılmış ve 570 pound (260 kg) olarak belirlenmiştir. Olayın alev/tutuşma ile başlayarak detonasyona meydana

geldiği ön görülmüştür ve bu kapsamda sebep-sonuç analizi gerçekleştirilmiştir. Isı, mekanik, kimyasal, elektriksel, sabotaj ve prosedür başlıklarını içerecek şekilde 6 farklı ana başlık altında değerlendirilme sağlanmış ve her bir başlık potansiyel senaryolar ile detaylandırılmıştır. Mikser içi ve dışındaki potansiyel ısı kaynakları belirlenmiştir. Kimyasal İnteraksiyon sonucu ekzotermik reaksiyon şüphesinden dolayı tüm hammadde kombinasyonları için DSC testler gerçekleştirilmiş ve anormal bir duruma rastlanmamıştır. Darbe, sürtünme ve ESD analizleri gerçekleştirilmiş ve anormal bir duruma rastlanmamıştır. Sonuç olarak kazanın ESD kaynaklı meydana geldiği değerlendirilmiştir (Swisdak ve Deschambault, 1998).

Katı yakıtlar doğası gereği yüksek miktarda potansiyel enerjiye sahiptir. Enerjinin kontrolsüz şekilde açığa çıkması ile yanma /patlama gibi istenmeyen olaylar meydana gelebilmekte ve insan, çevre ve tesis varlıklarını olumsuz etkileyecek şekilde kayıplar yaşanabilmektedir. Boggs, Atwood, Lindfors, Mulder ve Pritchard (2000) yaptığı çalışmada katı yakıtlar ile ilgili potansiyel tehlikelerin sınıflandırılması, test türleri ve meydana gelmiş kazalar hakkında bilgi toplanması amaçlanmıştır. Enerjik malzemeler için uygulanabilecek test metotları ve katı yakıtların potansiyel tehlikelerinin değerlendirilmesinde kullanılan metotlar çalışma kapsamında incelenmiştir. Enerjik malzemelere ait tehlike sınıflarının, malzemenin güvenli kullanımı veya ölümcül etkileri için doğrudan bir ölçüt olmadığı belirtilmiştir. Tehlike sınıfı 1.3 olan yakıtların düşünülenin aksine güvenli olmadığı, AP kullanılan standart katı yakıt formülasyonlarının atmosferik şartlar altında kolay şekilde alev alabildiği ve card-gap testinde aktifleştirilemeyen yakıtların daha büyük çaplı örneklerde patlatılabileceği ifade edilmiştir. 1940 – 1999 yılları arasında meydana gelmiş ve katı yakıtlar ile ilişkili 50'den fazla kaza incelendiğinde hammadde üretimi, yakıt üretim prosesi, depolama ve transfer operasyonlarının tamamında proses güvenliği kapsamındaki çalışmalara ihtiyaç duyulduğu ve proses güvenliğinin, insan, çevre, tesis yatırımları ve şirket itibarının korunması için ön planda tutulması gerektiği görülmüştür (Boggs, Atwood, Lindfors, Mulder ve Pritchard, 2015).

Katı yakıt kompozisyonu genellikle oksitleyici, metal tozu, bağlayıcı, stabilizatör ve kürleştiriciden oluşmaktadır. Sırası ile Amonyum perklorat (%60-84), Alüminyum (%2-20), CTPB (%12-16), IDP (%0-1) ve MAPO (%0.2-1) belirtilen yüzdeler içerisinde en sık kullanılan kimyasallar arasında yer almaktadır. Mastrolia ve Klager (2012), tarafından gerçekleştirilen çalışmada katı yakıt kompozisyonunda yer alan farklı bağlayıcıların fiziksel

ve kimyasal etkilerinin incelenmesi amaçlanmış ve literatürde yer alan verilerden yararlanılmıştır. Kullanılan kimyasalın türü, oranı ve proses şartlarının mekanik ve balistik özelliklerini etkilediği gözlemlenmiştir (Mastrolia ve Klager, 2012). Bu sebeple yakıt kompozisyonlarının değişimi ile proseslerde meydana gelebilecek istenmeyen olaylara ait potansiyel etkilerin değişkenlik gösterebileceği, alınacak önlemlerin proses ve yakıt kompozisyonuna göre belirlenmesi gerekmektedir. Oksitleyici kategorisinde yer amonyum perklorat (AP) kimyasalı yakıt üretiminde farklı parçacık boyutlarında kullanılabilmektedir. Bir sempozyum kaydında yer alan bilgilere göre AP için çeşitli testler gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Gerçekleştirilen testler arasında atmosferik basınç ve sıcaklık koşullarında elektrostatik deşarj, yüksek voltajlı kıvılcımlar ve doğrudan açık alev muhteviyatı olduğu belirtilmiştir. Test sonuçları, farklı parçacık boyutlarına sahip AP tozu için tutuşma/patlama meydana gelmediğini göstermiştir (Padgett, 1959).

Yakıt üretiminde kullanılan kimyasalların çoğunun yalıtkan olduğu bilinmekte ve üretimde kullanılan mikserlerde parçacıkların kendi arasında ve ekipman ile arasında yüksek seviyede sürtünme meydana gelmesi beklenmektedir. Yakıt mikseri içerisindeki bu etkileşiminin sonucunda statik elektrik ile yüklenme beklenmektedir. Statik elektrik kaynaklı yanma/patlama ile sonuçlanan kazaların %10-%20 aralığında olduğu göz önünde bulundurulduğunda riskin büyüklüğü görülebilmektedir. Shuiai ve diğerleri (2021), tarafından yapılan çalışma ile yakıt mikserindeki elektrostatik alan dağılımı deneysel ve nümerik metotlar ile değerlendirilmiştir. Sabit bir duvar kalınlığına sahip mikser haznesi içerisindeki 50-290mm yükseklik aralığındaki yakıtlar için elektriksel alan dağılımı ve elektriksel potansiyel dağılımı hesaplanmıştır. Sonuç olarak yakıt mikserlerindeki silindirik yapı göz önünde bulundurulduğunda elektrostatik deşarjın ilk noktasının taban noktası olduğu ve elektriksel alan yoğunluğunun büyükten küçüğe sırası ile taban, yan duvarlar ve üst yüzey olduğu gözlemlenmiştir. Mikser içerisinde yakıt yüksekliğinin artması ile oluşan elektriksel alanın yoğunluğunun da arttığı saptanmıştır (Shuiai, ve diğerleri, 2021).

Farklı tiplerdeki mikserler katı yakıtların üretiminde kullanılmaktadır. Kapasite, verim, güvenlik vb. farklı parametreler göz önünde bulundurularak prosesler için uygun olan yakıt mikseri tercih edilmektedir. Setiles (1963), tarafından yürütülen çalışmada farklı türdeki yakıt mikserlerinin değerlendirilmesi avantaj/dezavantajlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Değerlendirmeler için yakıt mikseri üreticilerinden sağlanan ve mikserlerin kullanıldığı tesislerden elde edilen veriler kullanılmıştır. Yatay veya dikey mikserlerde mikser türünden

bağımsız olarak çeşitli konfigürasyonlarda bıçak türü seçilebildiği belirtilmiştir. Yatay tip sigma bıçaklı mikserlerin en eski ve yaygın olarak kullanılan mikser türü olduğu ifade edilmiştir. Yatay tipli mikserlerde en önemli noktanın, tüm yakıt karışımının mikser hacmini doldurması olduğu ve yakıt karışımı ile hareketli parçaların arasında bulunan salmastraların yakıt karışımının içerisine daldırılarak prosesin sürdürülmesi gerektiği vurgulanmıştır. Dikey tipli mikserlerde ise salmastraların yakıt karışımına temas etmediği belirtilmiştir. Sonuç olarak herhangi bir mikser türünün tüm yakıt formülasyonları için uygun olduğunu veya diğerine göre daha üstün özelliklere sahip olduğunu söylemenin kolay olmadığı, seçim kriterlerinin proses gereklikleri ve formülasyonda kullanılan kimyasallara özgü belirlenmesi gerektiği ve prosese özgü güvenlik önlemlerinin alınması gerektiği belirtilmiştir (Setiles, 1963).

Laboratuvar ölçekli katı yakıt üretim proseslerinde manuel karıştırma işlemlerinin gerçekleştirildiği bilinmektedir. Matthew ve diğerleri (2007), tarafından yürütülen çalışma ile laboratuvar ölçekli üretimde uygulanan manuel karıştırma ve mekanik kontrollü karıştırma sisteminin, güvenlik ve yanma hızı verimi kapsamında kıyaslanması amaçlanmıştır. Manuel karıştırma ile üretilmiş yakıt karışımı ve mekanik kontrollü karıştırma ile üretilmiş yakıt karışımı için yanma hızları analiz edilmiş ve kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda iki farklı üretim metodunun neredeyse benzer yanma hızı grafiğine sahip olduğu ve hatta mekanik üretimde kısmen daha iyi sonuçlar alındığı belirtilmiştir. Sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda mekanik kontrol ile gerçekleştirilen üretimlerin iş yükünü azalttığı, üretimde meydana gelebilecek tehlikeli senaryolarda üretimi sağlayan personelin alanda bulunmaması sebebi ile muhtemel yaralanma ve can kayıplarının önüne geçerek güvenliği arttırdığı ve verimliliği pozitif yönde etkilediği görülmüştür (Matthew, ve diğerleri, 2007).

Risk değerlendirme çalışmaları kimyasalların bulunduğu proseslerde gerçekleşmekte ve geçmişten günümüze kadar giderek yaygınlaşmaktadır. Öte yandan patlayıcı ve yakıt üretim proseslerinin doğası gereği sahip olduğu tehlikeler sebebi ve elleçlenme şekilleri sebebi ile daha az dikkat çektiği görülmektedir. Rajagopal ve Jain (1997), tarafından yürütülen çalışmada öncelikle yakıt üretim prosesi alt bölümlere ayrıştırılarak Yangın, Patlama ve Toksisite Indisi (Fire Explosion and Toxicity Index - FETI) ve Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışması (Hazard and Operability – HAZOP) gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcı maddenin hazırlandığı ve elleçlendiği proseslerin toksik ve alevlenir kimyasallar içerdiği

değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen değerlendirmelerin çıktılarına göre yakıt üretiminde kullanılan ve temel bileşenler arasında yer alan methyl aziridinyl phosphine oxide (MAPO) kimyasalının üretimine ait kritik bir olaya ait nicel değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Tepe olayı MAPO hazırlık odasında yangın olarak belirlenen hata ağacı detaylandırılarak proses güvenliği için kritik öneme sahip ekipman, enstrüman ve fonksiyonlar belirlenerek gerekli öneriler getirilmiştir. Değerlendirilen tepe olaya ait etkilerin belirlenmesi amacı ile ısı radyasyon modeli kullanılmıştır. Sonuç modellemesi, probit verileri ve hata ağacı analizi ile yangına maruz kalan çalışanlar için potansiyel ölüm meydana gelme frekansı 3x10-6 ölüm/yıl olarak hesaplanmış ve bu değerin kabul edilebilir limitler içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, yakıt üretim proseslerinde gerçekleştirilen proses güvenliği çalışmalarında ölüm veya yaralanma ile sonuçlanabilecek olaylara ait risklerin değerlendirilebildiği ve risklerin yönetilebilmesi için alınması gereken önlemler ve iyileştirmelerin sağlanabildiği gösterilmiştir (Rajagopal ve Jain, 1997).

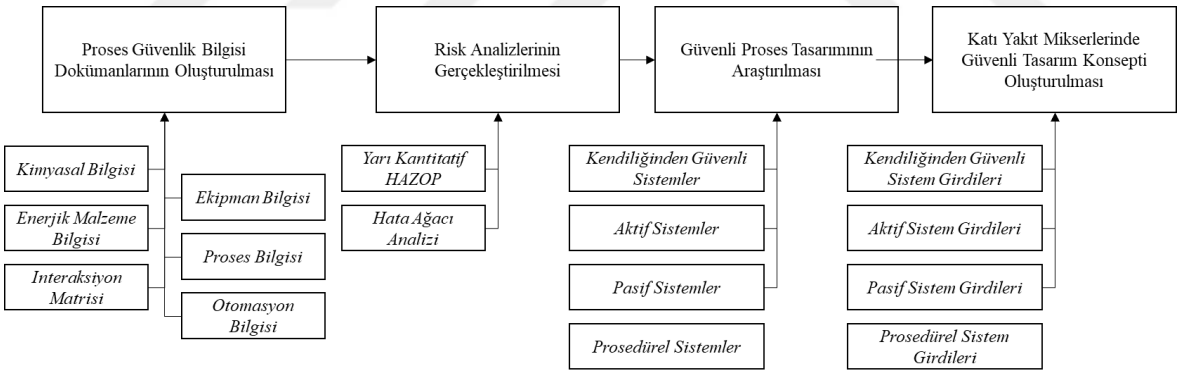
Alevlenir ve patlayıcı özellikteki kimyasalların işlendiği endüstriyel tesislerin hızla büyümesi, insan hayatı, tesis yatırımları ve çevre için potansiyel tehditler oluşturmaktadır. Savunma sanayindeki yakıt ve/veya patlayıcı üreten tesislerde potansiyel tehlikelerin ve olası risklerin sistematik olarak analiz edilmesi ise oldukça kritik hale gelmektedir. Rajagopal ve Jain (1994), tarafından gerçekleştirilen çalışmada karıştırma, nitrasyon, kaynatma, çözme ve kristallendirme adımlarının uygulandığı ve 40 kg patlayıcının üretildiği bir tesiste risk değerlendirme çalışmaları yürütülmüştür. Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışması (Hazard and Operability – HAZOP) ile tesisin farklı bölümleri için potansiyel tüm sapmalar belirlenmiş ve her bir sapmanın olası sebepleri ve sonuçları değerlendirilmiştir. Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis – FTA) ile temel olarak kontrolsüz kimyasal reaksiyon ve potansiyel sebepleri değerlendirilerek sistemin güvenliğine ait geliştirmeye açık noktalar belirlenmiş çeşitli öneriler sunulmuştur. Tesislerde potansiyel tehlikelerin elemine edilebilmesi için tasarım, operasyon ve bakım faaliyetlerinde çeşitli modifikasyonlar gerçekleştirilmekte ve güvenlik amaçlı enstrümanlar ile desteklenmektedir. Çalışma kapsamında ortak mod hatalarının tepe olay frekansına olan majör etkisinin proses güvenliği kapsamında gerçekleştirilen iyileştirmeler ile indirgendiği değerlendirilmiştir (Rajagopal ve Jain, 1994).

Singapur'da bir mühimmat üretim tesisinde muayene, test ve bakım operasyonları yürütülmektedir. Tehlikeli operasyonlar sebebi ile kantitatif ve risk tabanlı sistem güvenlik

analizine ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Loi, Bienz ve Tan (2005) tarafından tesiste gerçekleştirilen çalışmada konum, mühimmat, yapı, ekipman, personel ve aktiviteye bağlı veriler kullanılarak kantitatif risk değerlendirmesinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Kantitatif risk değerlendirmesinde sırası ile olay analizi, etki analizi, maruziyet analizi ve risk hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında belirtilen 6 farklı kategorideki veri elde edildikten sonra olay analizi ile potansiyel senaryolar belirlenmiştir. Belirlenen senaryolara ait frekans değerleri ise veritabanından alınmıştır. Etki analizi ile ilgili senaryoların muhtemel sonuçları değerlendirilmiş ve 3 farklı konum için ölümcül oranlara ait olasılıklar kullanılarak alıcı mesafelerindeki etkisi hesaplanmıştır. Maruziyet analizi ile ilgili alanda bulunabilecek çalışan sayısı ve süre vb. parametreler ile ölümcül etkiler dışındaki diğer etkiler de göz önünde bulundurularak hesaplamalar yapılmıştır. Risk değerlendirme hesaplamalarında ise ilgili verilerin tamamı kullanılarak kümülatif risk değeri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen risk verilerinin kabul edilebilir risk seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak gerçekleştirilen risk temelli güvenlik analizlerinin mühimmat üreten tesislerdeki operasyonel güvenliği arttırdığı görülmüştür (Loi, Bienz ve Tan, 2005).

4. YÜRÜTÜLEN ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında çalışmalar, proses güvenlik bilgisi dokümanlarının oluşturulması, risk analizi, güvenli proses tasarımı araştırmaları ve konsept tasarımın oluşturulması üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, yakıt üretimi gerçekleştiren bir tesiste, proses ekipmanlarına ve kimyasallarına ait veriler elde edilmiştir. Elde edilen veriler işlenerek, proses tehlike analizi çalışmaları için anlamlı veri tabloları oluşturulmuştur. İkinci aşamada, yakıt üretim prosesine ait tehlikelerin ve risk seviyelerinin belirlenmesi için önce Yarı Kantitatif HAZOP çalışması yürütülmüştür. Ardından, Yarı Kantitatif HAZOP çalışması ile elde edilen senaryolar içerisinden "Yüksek Seviye" riskli olarak değerlendirilen senaryolar, Hata Ağacı Analizi ile detaylı olarak değerlendirilmiştir. Risk analizleri sonucunda elde edilen ve katı yakıt üretim operasyonları için kritik olan ekipmanlar, parametreler ve proses adımları, güvenli mikser tasarımı için göz önünde bulundurularak aktif, pasif, prosedürel ve kendinden güvenli tasarım önerileri ile birlikte son aşamada konsept bir sistem tasarlanmıştır. Yürütülen çalışmalara ait akış diyagramı Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1 Yürütülen çalışmalara ait akış diyagramı

4.1. Proses Güvenlik Bilgisi Dokümanlarının Oluşturulması

Proses güvenlik bilgisi dokümanları, kimyasal bilgisi ile ekipman ve proses bilgileri kullanılarak oluşturulmuştur.

4.1.1. Kimyasal bilgileri

Katı yakıtların üretimindeki kimyasallar ve enerjik malzemeler, üretim faaliyetleri sırasında çeşitli proses parametreleri (besleme hızı, sıcaklık, basınç vb.) kontrol/takip edilerek elleçlenir. YF-1(Yakıt Formülasyonu) üretimi, standart operasyon prosedürü (SOP) ile gerçekleştirilmektedir. Proses parametreleri kaynaklı meydana gelebilecek sapmalarda, kimyasal ve enerjik malzemelerin açığa çıkartacağı potansiyel sonuçların (tutuşma, ani basınç artışı, kontrolsüz reaksiyon vb.) tespit edilebilmesi için proses güvenlik bilgisine ihtiyaç duyulur. Tez çalışmasında, YF-1, kimyasal oranları referans çalışmadaki formülasyon ile benzer kalacak şekilde kullanılmıştır (Zhang, ve diğerleri, 2021). Formülasyonda kullanılan hammaddeler ve miktarları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Hammaddeler ve SOP'de kullanılan miktarlar

Hammadde	Kısaltma	Parçacık Boyutu (μm)	Hammadde Miktarı (kg)	Oran (%)
Amonyum Perklorat	AP	130 – 13	144	16
Oktojen	HMX	86 – 12	360	40
Alüminyum	AL	28 – 3	162	18
Polietilen Glikol	PEG	-	58,5	6,5
Nitrogliserin	NG	-	81	9
Bütantriol Trinitrat	BTTN	-	81	9
Kürleştirici	BA	-	13,5	1,5

Kimyasalların parçacık boyutları 500 mikronun altındadır ve bu sebep ile kimyasallar "toz patlayıcı" özellik gösterebilecektir. HMX, AP ve AL tozları ise formülasyon içerisinde en yüksek miktarda(kütlece) bulunan hammaddeler arasındadır.

Hammaddelere ait kimyasal bilgileri 3 kategori (alevlenirlik, akut sağlık etkisi ve çevresel etki) altında değerlendirilmiştir. YF-1 üretimi için kullanılan hammaddelerden kimyasallara ait bilgiler Çizelge 4.2'de, enerjik malzemelere ait bilgiler Çizelge 4.3'te sunulmuştur (CAMEO, 2022) (GESTIS, 2022) (Klapötke, 2021).

Çizelge 4.2. Kimyasal malzemelere ilişkin bilgiler

Kimyasal	CAS No	Fiziksel Hal	Parlama Noktası	Alt Patlama Limiti (LEL)	Kendiliğinden Tutuşma Noktası	Minimum Tutuşma Enerjisi	Diğer Tehlikeler
#	#	#	°C	(/g/m^3)	°C	mJ	#
Alüminyum (AL)	7429-90-5	Katı	-	60	560	>10	H250, H261
Poli Etilen Glikol (PEG)	25322-68-3	Sıvı	240	178,21	360	-	-
H250: Hava ile temas ederse alevlenir. H261: Su ile temas halinde yanıcı gaz çıkarır.							

Çizelge 4.2 içerisinde yer alan PEG kimyasalına ait "Alt Patlama Limiti" (LEL) veritabanı kaynaklarda yer almadığı için Eş. 4.1 (Keshavarz, 2022) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$LFL(mol\%) = 519{,}957(1 + 5n_C + 1{,}25n_H - 2{,}5n_O)^{-0{,}70936} n_C^{-0{,}197} T^{-0{,}51536} \quad 4.1$$

Hesaplamada Poli Etilen Glikol kimyasalı için Karbon sayısı (n_C) 2, Hidrojen sayısı (n_H) 6 ve Oksijen sayısı (n_O) 2 alınmıştır. Kimyasala ait parlama noktası 240 °C olduğu için bu değer formüldeki sıcaklık (T) kısmında kullanılmıştır. Yüzde mol cinsinden elde edilen sonuç ile Poli Etilen Glikol kimyasalına ait molekül ağırlığı kullanılarak alt patlama limiti 178,21 g/m^3 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Enerjik malzemelere ilişkin bilgiler

Kimyasal	CAS	Fiziksel Hal	Darbe Hassasiyeti	Sürtünme Hassasiyeti	Tutuşma Sıcaklığı	Dekompozisyon Sıcaklığı	ESD Hassasiyeti	Diğer Tehlikeler
#			Joule	Newton	°C	°C	Joule	#
HMX (Oktojen)	2691-41-0	Katı	3	88	300	207	0,150	H201 H302 H311 H200
Nitrogliserin (NG)	55-63-0	Sıvı	0,2	360	270	218	>12,5	H330 H310 H300 H373 H411
Bütantriol Trinitrat (BTTN)	6659-60-5	Sıvı	1	> 353	230	176	GD	H200 H300 H310 H330 H373 H411
Amonyum Perklorat (AP)	7790-98-9	Katı	5	> 363	240	240	>15,6 J[(a)]	H201 H271 H319 H373

H200: Kararsız patlayıcı.
H201: Patlayıcı; tüm kütlenin patlama tehlikesi.
H250: Hava ile temas ederse alevlenir.
H261: Su ile temas halinde yanıcı gaz çıkarır.
H271: Yangına veya patlamaya neden olabilir; güçlü oksitleyici.
H300: Yutulduğunda ölümcül.
H302: Yutulduğunda zararlı.
H310: Deri ile teması halinde öldürücüdür.
H311: Cilt ile temasında toksiktir.
H319: Ciddi göz tahrişine neden olur.
H330: Solunması halinde ölümcül.
H373: Uzun süreli veya tekrarlanan maruz kalma sonucu organlarda hasara neden olabilir.
H411: Uzun süreli etkilerle sudaki yaşam için toksiktir.

Hammaddelere ait bilgiler incelendiğinde, katı fazdaki AL, HMX ve AP malzemelerinden AL ve HMX'in toz patlayıcı özellik gösterdiği, AP için toz patlayıcılık bulunmadığı görülmüştür. Ancak AP tozunun yüzeylerde belirli süre maruz kalacağı sıcaklığın,

dekompozisyon sıcaklığının üzerinde olması sonucunda yanma / patlama meydana gelmesi olasıdır. Ayrıca AL tozunun su ile temas etmesinin geniş aralıkta alevlenir hidrojen gazı açığa çıkardığı görülmüştür. Kararsız patlayıcı özellik gösteren NG ve BTTN'in yanı sıra HMX ve AP için kütlesel patlama riski bulunmaktadır. BTTN ve NG, yutulması veya solunması halinde kategori 1 seviyesinde ölümcül; deri ile temas etmesi halinde kategori 1 seviyesinde ciddi etkilere sahiptir. Sürekli maruziyette ise NG, BTTN ve AP için kategori 2 seviyesinde spesifik organ toksisitesi vardır. Hammaddelerin farklı seviyelerde elektrostatik deşarj, darbe ve sürtünme hassasiyetleri mevcuttur. HMX'in elektrostatik deşarj ve sürtünme hassasiyetinin, NG'nin ise darbe hassasiyetinin diğer hammaddelere göre daha yüksek (hassas) olduğu tespit edilmiştir. Hammaddelerin tekil olarak yaratabilecekleri potansiyel tehlikeleri yanında kontrolsüz şekilde bir araya gelmeleri sonucu meydana gelebilecek tehlikeleri de bulunmaktadır. Bu kapsamda oluşturulan kimyasal etkileşim matrisi Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Kimyasal etkileşim matrisi

	Alüminyum (AL)				
Poli Etilen Glikol (PEG)	**Uyumsuz** Korozif Patlayıcı Alevlenir Gaz Üretir Isı Üretir Hassas & Patlayıcı Reaksiyon Toksik	**Poli Etilen Glikol (PEG)**			
Oktojen (HMX)	**Uyumsuz** Patlayıcı Alevlenir Gaz Üretir Isı Üretir Hassas & Patlayıcı Reaksiyon Toksik	**Uyumsuz** Gaz Üretir Isı Üretir Hassas & Patlayıcı Reaksiyon Toksik	**Oktojen (HMX)**		
Nitrogliserin (NG)	**Uyumsuz** Patlayıcı	**Uyumlu**	**Dikkat** Gaz Üretir Isı Üretir	**Nitrogliserin (NG)**	
Amonyum Perklorat (AP)	**Uyumsuz** Patlayıcı Alevlenir Gaz Üretir Isı Üretir Hassas & Patlayıcı Reaksiyon Toksik	**Uyumsuz** Korozif Patlayıcı Alevlenir Gaz Üretir Isı Üretir Hassas & Patlayıcı Reaksiyon Toksik	**Uyumsuz** Korozif Patlayıcı Gaz Üretir Isı Üretir Hassas & Patlayıcı Reaksiyon Toksik	**Uyumsuz** Patlayıcı Gaz Üretir Isı Üretir Hassas & Patlayıcı Reaksiyon	**Amonyum Perklorat (AP)**
Bütantriol Trinitrat (BTTN)	**Uyumsuz** Patlayıcı	**Uyumlu**	**Dikkat** Gaz Üretir Isı Üretir	**Uyumlu**	**Uyumsuz** Patlayıcı Gaz Üretir Isı Üretir Hassas & Patlayıcı Reaksiyon

Kimyasal etkileşim matrisleri temel olarak kimyasallara ve enerjik malzemelere ilişkin "fonksiyonel grupları" göz önünde bulundurarak potansiyel tehlikelerin tespit edilmesini sağlamaktadır (CAMEO, 2022). PEG, NG ve BTTN kimyasallarının kendi arasında uyumlu olduğu ancak HMX, AP ve AL ile bir araya gelmeleri durumunda uyumsuz oldukları belirlenmiştir. Proses güvenlik bilgisi kapsamında fonksiyonel gruplar temel alınarak oluşturulan kimyasal etkileşim matrisine Çizelge 4.4 göre patlayıcı/kontrolsüz reaksiyon,

alevlenir veya toksik gaz çıkışı, tutuşma, lokal sıcaklık artışı meydana gelebileceği belirlenmiştir.

4.1.2. Ekipman ve proses bilgileri

Örnek tesiste YF-1 üretimi, YK-1001 kodlu bina içerisinde yer alan dikey tip katı yakıt mikserinde gerçekleştirilmektedir. YKU-1001 yardımcı ünitelere ait ekipmanları içermekte ve UK-1001 kodlu yapıda bulunan sistem ile uzaktan kontrol edilmektedir. YK-1001, DOD-4145.26M standardına uygun şekilde tasarlanmış, hafif malzemelerden üretilmiş, 500 m2 üretim alanına sahip ve çevresinde sütre bulunan bir yapıdır. YK-1001, UK-1001 ve çevresinde yer alan yol ve yapılara ait yerleşim planı Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

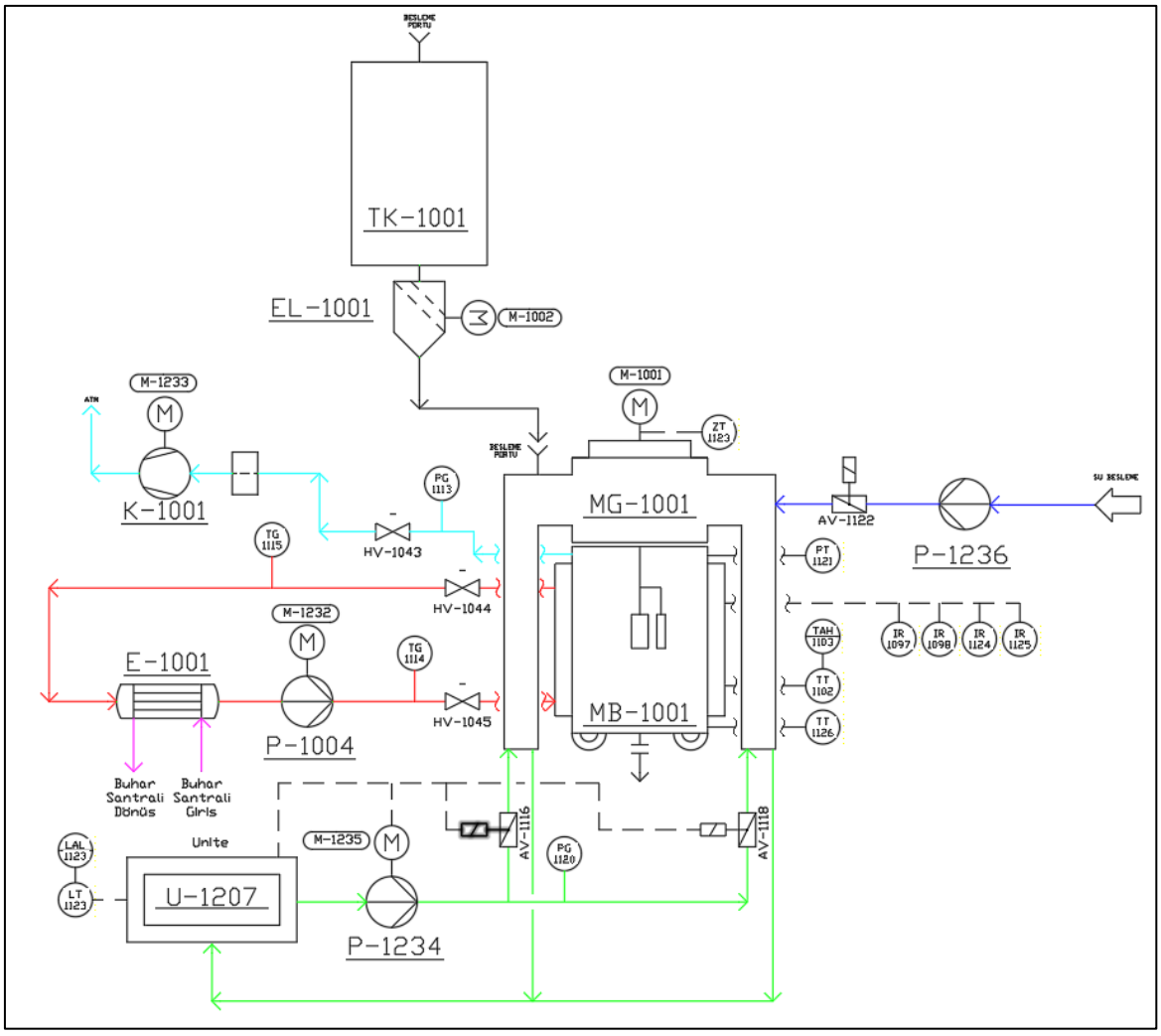


Şekil 4.2. Yerleşim planı (1/50m Ölçek)



Şekil 4.3. Yerleşim planı (1/100m Ölçek)

YK-1001 binasında bulunan sistemde 900 kg üretim kapasitesine sahip mikser haznesi, karışım için hareketi sağlayan mikser motoru ve bıçakları, enstrümanları ve besleme haznelerini barındıran mikser gövdesi, kimyasalların beslenmesini sağlayan titreşimli elek ve yardımcı üniteler bulunmaktadır. Yardımcı üniteler arasında ısıtma sistemi, hidrolik sistem, vakum sistemi ve uzaktan kontrol sistemi yer almaktadır. Sisteme ait borulama ve enstrümantasyon diyagramı (P&ID) Şekil 4.4’ de verilmiştir. YK-1001 binasında bulunan ekipmanlara ve enstrümanlara ilişkin bilgiler sırasıyla Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 içerisinde sunulmuştur.



Şekil 4.4. Örnek tesise ait borulama ve enstrümantasyon diyagramı (P&ID)

Çizelge 4.5. Örnek tesise ait ekipman bilgileri

Ekipman Adı	Ekipman Kodu	Kullanım Amacı
Mikser Gövdesi	MG-1001	Yakıt karışımı için gerekli olan temel ekipmanları gövde üzerinde bulundurur.
Mikser Haznesi	MB-1001	Üzerinde yer alan ceket ile birlikte sıcaklığın kontrol edildiği, ham maddelerin birleşerek yakıt formunu aldığı, karışımın sağlandığı hazne.
Kimyasal Besleme Haznesi	TK-1001	Titreşimli elek üzerinde yer alan ve mikser içerisine beslenecek kimyasalların doldurulduğu hazne.
Karıştırıcı Motor	M-1001	Mikser haznesi içerisinde yer alan kimyasalların yakıt formunu alabilmesi için talep edilen hız değerinde mikser bıçaklarına hareket sağlamaktadır.
Elek Motoru	M-1002	Titreşimli elek için ihtiyaç duyulan hareketi sağlayan motor.
Titreşimli Elek	EL-1001	Kimyasal besleme haznesine konumlandırılan hammaddelerin titreşim sağlanarak mikser haznesi içerisine beslenmesi sağlanmaktadır.

Çizelge 4.5. (devam) Örnek tesise ait ekipman bilgileri

Ekipman Adı	Ekipman Kodu	Kullanım Amacı
Hidrolik Pompa	P-1234	Mikser gövdesi üzerinde yer alan ve mikser haznesinin yukarı – aşağı yönlü hareketini sağlamak için kullanılan pistonların (sağ ve sol) hareketi için hidrolik basınç sağlamaktadır.
Vakum Pompası	K-1001	Yakıt üretim faaliyetleri sırasında mikser haznesi içerisinde ihtiyaç duyulan negatif basıncın sağlanması için kullanılmaktadır.
Isı Aktarıcı Pompası	P-1004	Isı aktarıcıdan geçen suyun (ısıtma & soğutma) kapalı sistem içerisinden geçerek mikser haznesi ceketine ulaşmasını ve devir daim ederek tekrar ısı aktarıcıya beslenmesini sağlamaktadır.
Su Basma Pompası	P-1236	Acil bir durumda devreye girmesi beklenen su basma sisteminde mikser haznesine suyun transfer edilmesi için kullanılmaktadır.
Hidrolik Ünitesi	U-1207	Mikser haznesi hareketi için ihtiyaç duyulan hidrolik yağ sistemine ait ünite, yağ seviyesinin ve hidrolik sistemin kontrolünü sağlamaktadır.
Isı Aktarıcı	E-1001	Mikser haznesindeki karışımın talep edilen sıcaklıkta sağlanabilmesi için ihtiyaç duyulan ısının (ısıtma & soğutma) üretilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.6. Örnek tesise ait enstrüman bilgileri

Enstrüman Adı	Enstrüman Kodu	Kullanım Amacı	Otomasyon Bilgileri
Sıcaklık Transmitteri	TT-1126	MB-1001 haznesindeki sıcaklık değerini ölçmektedir	G/D
Manometre	PG-1113	Vakum hattı üzerindeki negatif basınç değerini göstermektedir	G/D
Termometre	TG-1115 TG-1114	MB-1001 ceketine giren ve çıkan sıcak suyun sıcaklığını göstermektedir	G/D
Manometre	PG-1120	Hidrolik sistemdeki basınç değerini göstermektedir.	G/D
Sıcaklık Transmitteri	TT-1126	MB-1001 haznesindeki sıcaklık değerini ölçmektedir	G/D
Manometre	PG-1113	Vakum hattı üzerindeki negatif basınç değerini göstermektedir	G/D
Termometre	TG-1115 TG-1114	MB-1001 ceketine giren ve çıkan sıcak suyun sıcaklığını göstermektedir	G/D
Manometre	PG-1120	Hidrolik sistemdeki basınç değerini göstermektedir.	G/D

Çizelge 4.7. Örnek tesise ait enstrüman ve otomasyon bilgileri

Enstrüman Adı	Enstrüman Kodu	Kullanım Amacı	Otomasyon Bilgileri
Devir Ölçer	ZT-1123	M-1001 karıştırıcı motor hızının talep edilen değerde tutulmasını sağlamaktadır	M-1001 ile iştirakli şekilde çalışmakta ve set edilen değere göre motor tahrikini ayarlamaktadır
Basınç Transmitteri	PT-1121	MB-1001 hazne basıncını ölçer ve iletimini sağlamaktadır	Yüksek basınç algılanır ise AV-1122 ve P-1236 üzerinden MB-1001 içerisine su basılmakta, P-1234 pompası ve AV-1116 ve AV-1118 ile hidrolik sistem basıncı düşürülerek MB-1001 aşağı indirilmektedir
Sıcaklık Transmitteri	TT-1102	MB-1001 ceket sıcaklığını ölçmektedir	Set edilen sıcaklık değerinin üzerinde TAH-1103 döngüsü ile görsel ve sesli yüksek sıcaklık alarmı vermektedir
Seviye Transmitteri	LT-1123	U-1207 hidrolik sisteminde yağ miktarını ölçmektedir	Düşük hidrolik yağ seviyesi tespit edildiğinde LAL-1123 döngüsü ile görsel ve sesi düşük hidrolik yağ seviyesi alarmı vermektedir
Infrared Sensör	IR-1097 IR-1098 IR-1124 IR-1125	MG-1001 gövdesi iç yüzeyinden MB-1001 karıştırıcı haznesindeki potansiyel dalga boyu değişimlerini tespit etmektedir	1oo4 seçim (voting) ile sensörlerden herhangi biri değişim tespit eder ise AV-1122 ve P-1236 üzerinden MB-1001 içerisine su basılmakta, P-1234 pompası ve AV-1116 ve AV-1118 ile hidrolik sistem basıncı düşürülerek MB-1001 aşağı indirilmektedir
Devir Ölçer	ZT-1123	M-1001 karıştırıcı motor hızının talep edilen değerde tutulmasını sağlamaktadır	M-1001 ile iştirakli şekilde çalışmakta ve set edilen değere göre motor tahrikini ayarlamaktadır
Basınç Transmitteri	PT-1121	MB-1001 hazne basıncını ölçer ve iletimini sağlamaktadır	Yüksek basınç algılanır ise AV-1122 ve P-1236 üzerinden MB-1001 içerisine su basılmakta, P-1234 pompası ve AV-1116 ve AV-1118 ile hidrolik sistem basıncı düşürülerek MB-1001 aşağı indirilmektedir
Sıcaklık Transmitteri	TT-1102	MB-1001 ceket sıcaklığını ölçmektedir	Set edilen sıcaklık değerinin üzerinde TAH-1103 döngüsü ile görsel ve sesli yüksek sıcaklık alarmı vermektedir
Seviye Transmitteri	LT-1123	U-1207 hidrolik sisteminde yağ miktarını ölçmektedir	Düşük hidrolik yağ seviyesi tespit edildiğinde LAL-1123 döngüsü ile görsel ve sesi düşük hidrolik yağ seviyesi alarmı vermektedir
Infrared Sensör	IR-1097 IR-1098 IR-1124 IR-1125	MG-1001 gövdesi iç yüzeyinden MB-1001 karıştırıcı haznesindeki potansiyel dalga boyu değişimlerini tespit etmektedir	1oo4 seçim (voting) ile sensörlerden herhangi biri değişim tespit eder ise AV-1122 ve P-1236 üzerinden MB-1001 içerisine su basılmakta, P-1234 pompası ve AV-1116 ve AV-1118 ile hidrolik sistem basıncı düşürülerek MB-1001 aşağı indirilmektedir

SOP içerisinde kullanılacak kimyasallara ait miktarlar ve proses parametreleri yer almaktadır. Üretim operasyonu manuel ve uzaktan kontrollü gerçekleştirilmektedir. Kimyasallar, SOP içerisinde belirtilen sıra ve miktarlarda beslenmektedir. Yakıt karışım operasyonuna ait bilgiler Şekil 4.5 içerisinde bulunmakta ve aşağıda detaylı şekilde açıklanmaktadır.

	Ön Hazırlık	1. Aşama	2. Aşama	3. Aşama	4. Aşama	5. Aşama	6. Aşama	7. Aşama	Sonlandırma
Hammadde (kg)		PEG 28,5 NG 40 BTTN 41	PEG 30 NG 41 BTTN 40	AL 162		AP 144	HMX 360	BA 13,5	
Basınç (mmHg)					-700			-700	
Hazne Sıcaklığı (°C)		40			60			25	
Karıştırma Hızı (rpm)		10	20	30		50	40		
Süre (dk)		20	25		20			30	

Şekil 4.5. Yakıt karışımı operasyon adımları ve üretim parametreleri

Ön hazırlık

Mikser ve yardımcı ünitelerin fonksiyonları üretim operasyonu öncesinde kontrol edilir. Mikser haznesi 40 °C sıcaklığa ısıtılır. Hazne hidrolik sistem yardımı ile gövdeye yerleştirilir.

1. Aşama

Sıvı kimyasallar manuel olarak tartılır ve mikser haznesine besleme portu üzerinden formülasyonda belirtilen sıra ile boşaltılır. Karıştırıcı motoru 10 rpm değerine getirilir ve karıştırma operasyonu başlatılır. 20 dakika karıştırma sağlanır ve karıştırıcı motoru durdurulur.

2. Aşama

Mikser haznesindeki karışımın üzerine sıvı besleme portundan reçetede belirtilen sıra ve miktarlarda kimyasallar manuel olarak eklenir. Karıştırıcı motoru 20 rpm değerine ayarlanır. 25 dakikalık karıştırma işlemi sonrasında karıştırıcı motor durdurulur. Besleme haznesi, hatlar ve karıştırıcı bıçaklar temizlenir.

3. Aşama

Alüminyum, taşıma haznesinden alınarak titreşimli elek içerisine boşaltılır. Mikser motoru 30 rpm değerine ayarlanır. Titreşimli elek motoru çalıştırılır. Alüminyum malzemesinin tamamı miksere beslendiğinde mikser motoru durdurulur.

4. Aşama

Hazne sıcaklığı 60 °C ayarlanır. Vakum sistemi devreye alınır ve mikser motoru 30 rpm değerine ayarlanır. 20 dakika karışım sağlandıktan sonra mikser motoru ve vakum durdurulur. Besleme haznesi, hatlar ve karıştırıcı bıçaklar temizlenir.

5. Aşama

Amonyum perklorat taşıma kaplarından alınarak titreşimli elek içerisine boşaltılır. Mikser motoru 50 rpm değerine ayarlanır. Titreşimli elek motoru çalıştırılır. Amonyum Perklorat'ın tamamı miksere beslendiğinde karıştırıcı motor durdurulur.

6. Aşama

Oktojen malzemesi, variller ve kaldırma aparatı kullanılarak titreşimli elek içerisine aktarılır. Mikser motoru 40 rpm değerine ayarlanır. Titreşimli elek motoru çalıştırılır. Oktojen'in tamamı miksere beslendiğinde karıştırıcı motor durdurulur. Besleme haznesi, hatlar ve karıştırıcı bıçaklar temizlenir.

7. Aşama

Hazne sıcaklığı 25 °C'ye ayarlanır. Kürleştirici malzeme besleme portundan manuel olarak eklenir. Vakum sistemi devreye alınır. Mikser motoru 40 rpm değerine ayarlanır ve 30 dakika karıştırma sağlanır. Süre tamamlandığında karıştırıcı motor durdurulur.

Sonlandırma

Mikser haznesi, hidrolik pistonlar kullanılarak indirilir. Karışım operasyonu sonlandırılır. Besleme haznesi, hatlar ve karıştırıcı bıçaklar temizlenir.

4.2. Risk Analizi

Amaç

Katı yakıt üretim prosesinde farklı türlerde tehlikelere sahip hammaddeler, çeşitli proses parametrelerinde bir araya gelmektedir. Hammaddeler ve ürüne ait Bölüm 4.1.1'de yer alan özellikler, prosesin tehlikelerine ilişkin bilgi vermektedir. Kullanılan kimyasal ve enerjik malzemeler çevre, insan sağlığı, tesis varlıkları ve şirket itibarını tehdit eden riskler barındırmaktadır. Bu sebeple kimyasal ve enerjik malzemelere ait bilgiler, operasyon prosedürleri, proses parametreleri ve kullanılan ekipmanlara/enstrümanlara ait özellikler göz önünde bulundurularak risklerin değerlendirilmesi, proses içerisindeki mevcut bariyerlerin/koruma katmanlarının etkinliğinin değerlendirilmesi, güvenli bir yakıt üretim prosesi için ihtiyaç duyulan asgari seviyedeki güvenlik kriterlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, kesikli proseslerde uygulanabilmesi, insan, ekipman veya bileşen hatalarına ilişkin senaryo oluşturulabilmesi, farklı disiplinlere ait katılımcılar ile beyin fırtınası gerçekleştirilmesi ve kök sebebe ilişkin alt nedenlerin belirlenebilmesi avantajları ile Yarı Kantitatif HAZOP ve FTA yöntemleri seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Jordi ve arkadaşları (2010), HAZOP metodunun diğer proses tehlike analiz metotları ile birlikte kullanıldığını veya modifiye edildiğini çalışmalarında vurgulamıştır. Özellikle kesikli proseslerde uygulanan HAZOP çalışmalarının geliştirilerek otomatize edilmeye çalışıldığı belirtilmiştir (Dunjó, Fthenakis, Vílchez ve Arnaldos, 2009). Bendixen ve O'Neill (1984) tarafından yürütülen bir başka çalışmada ise bir kimyasal üretim tesisinin olasılık temeline dayanan risk değerlendirme çalışmalarındaki belirsizliğin, HAZOP ve FTA metotları kullanılarak en düşük seviyeye indirgendiği tespit edilmiştir (Bendixen ve O'Neill, 1984).

Varsayımlar

Risk analizleri esnasında kullanılan teknikler ve çalışmanın doğası gereği uygulanan varsayım ve/veya kabuller aşağıda belirtilmiştir:

- Proses Güvenlik Bilgisi bölümünde yer alan tüm verilerin güncel ve doğru bilgileri içerdiği kabul edilmiştir.
- Tesis yatırımının 100 000$ – 1 000 000$ arasında olduğu kabul edilmiştir.
- 1 kafile ürünün maliyetinin 10 000 $'dan düşük olduğu varsayılmıştır.
- Risk analizlerinde normal/rutin operasyonlar değerlendirilmiştir. Bakım kapsamında yürütülen operasyonlar, tesis duruşu ya da devreye alma süreçleri bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.
- Eş zamanlı hata veya arızanın sonucunda oluşabilecek senaryolar (double jeopardy) çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.
- HAZOP ekibinin, çalışma kapsamında katkı sağladıkları noktalarda yetkin oldukları kabul edilmiştir.
- Bakım ve muayene kapsamında faaliyetlerin ilgili tüm ekipman ve enstrümanlar için yetkin personel tarafından uygun şekilde gerçekleştirildiği kabul edilmiştir.
- Etkinliği, güvenilirliği ve/veya tepki/devreye girme süreleri bilinmeyen temel proses kontrol ve acil durum müdahale sistemlerinin, etkin bir bariyer olmadıkları kabul edilmiştir.

Sınırlar

Risk analizi çalışmaları Şekil 4.2'de belirtilen yakıt üretim binası ve binada yürütülen, detayları Bölüm 4.1.2 içerisinde yer alan katı yakıt üretim faaliyetleri ile sınırlandırılmıştır. Çalışmanın amacına uygun olarak mikserde yürütülen proses değerlendirilmiştir. Kimyasal hareketleri (üretim alanına/alanından transfer), tesis içi/dışı popülasyon hareketleri vb., belirlenen sınırların dışında tutulmuştur. Çalışma kapsamındaki analizler, ilgili standartlar ve rehber dokümanlarda yer alan veriler temel alınarak yürütülmüştür (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2008) (International Electrotechnical Commission (IEC), 2016) (International Electrotechnical Commission (IEC), 2010) (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2010).

4.2.1. Tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP) çalışması

Detayları "Proses Güvenlik Bilgisi" başlığı altında verilen yakıt karıştırma prosesi için alanında yetkin çalışanlar ile birlikte tehlike analizi çalışması gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın etkinliği ve elde edilen verilerden anlamlı sonuçlar çıkarılabilmesi için, çalışma Bölüm 4.2 içerisinde yer alan kabuller ile yürütülmüştür. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen faaliyetler, aşağıda sunulan alt başlıklar üzerinden detaylı olarak açıklanmıştır.

HAZOP oturumları ve çalışma ekibi

HAZOP çalışması kapsamında değerlendirilen senaryolara ait potansiyel sebepler ve sonuçlar, katılımcıların görüşlerinden ciddi seviyede etkilenmektedir. Bu sebeple farklı disiplinlere sahip uzmanları içeren bir takımın oluşturulması önem arz etmektedir. HAZOP çalışması kapsamında oluşturulan ekibe ait bilgiler Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. HAZOP katılımcılarına ilişkin bilgiler

#	Katılımcı Kodu	Deneyim Süresi	Uzmanlık Alanı	Çalışmadaki Görevi	Katılım Durumu
-	-	Yıl	-	-	-
1	Katılımcı 1	6	Proses Güvenliği	HAZOP Lideri	Tam Katılım
2	Katılımcı 2	4	Proses Güvenliği	HAZOP Yazmanı	Tam Katılım
3	Katılımcı 3	12	Bakım Onarım	HAZOP Üyesi	Tam Katılım
4	Katılımcı 4	5	Bakım Onarım	HAZOP Üyesi	Kısmi Katılım
5	Katılımcı 5	8	Yakıt Proses	HAZOP Üyesi	Tam Katılım
6	Katılımcı 6	9	Yakıt Üretim	HAZOP Üyesi	Tam Katılım
7	Katılımcı 7	6	Yakıt Tasarım	HAZOP Üyesi	Kısmi Katılım

7 farklı katılımcının yer aldığı tablodan görülmektedir. Çalışmada, proses kapsamında bilgi ve tecrübeye sahip yakıt tasarım, üretim ve proses mühendisleri; alt yapı ve ekipmanlar hakkında deneyim sahibi bakım onarım çalışanları ve risk değerlendirme çalışmalarına liderlik etme/kayıt altına alma amacı ile proses güvenliği çalışanları yer almıştır. HAZOP oturumlarına ait bilgiler ise Çizelge 4.9'de sunulmuştur.

Çizelge 4.9. HAZOP oturumlarına ilişkin bilgiler

#	Oturum Süresi (saat)	Ekip Üye Sayısı	Kapsam
Oturum 1	8	7	PSI Dokümanlarının İncelenmesi ve HAZOP Nodelarının Belirlenmesi
Oturum 2	6	6	HAZOP Çalışması
Oturum 3	7	5	HAZOP Çalışması
Oturum 4	5	7	HAZOP Çalışması ve belirlenen önerilerin gözden geçirilmesi

Çalışma 4 farklı oturum gerçekleştirilerek tamamlanmıştır. 1. Oturum'da bilgi ve belgeler incelenerek çalışma ekibinin güncel proses bilgisine sahip olması sağlanmıştır ve en fazla süre bu oturumda harcanmıştır. 3 farklı oturumda HAZOP çalışması gerçekleştirilmiş ve çalışma tamamlanmıştır.

Düğüm noktalarının (Node) belirlenmesi

Detayları Bölüm 2.4 'de sunulan Yarı Kantitatif HAZOP çalışmasına ait etkinliğin arttırılabilmesi ve senaryolara ait sonuçların daha anlamlı şekilde belirlenebilmesi için proses belirli parçalara ayrılmıştır. İlgili çalışma kapsamında bu parçalar, farklı amaçlara hizmet eden, üretime destek olan sistemlerdir. Çalışma, detayları Çizelge 4.10 içerisinde yer alan 6 farklı düğüm noktasına ayrılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.10. Node listesi

Node Listesi		Node Açıklaması	Teknik Çizimler / Referanslar	Ana Ekipmanlar	
#	Ad			Tag	Açıklama
1	Hammadde Besleme Sistemi	TK-1001 kimyasal besleme haznesine manuel olarak eklenen hammaddeler EL-1001 titreşimli elek kullanılarak esnek borular ile besleme portu üzerinden MG-1001 mikser haznesine aktarılmaktadır.	DRWG-1001-001-R0	MB-1001	Üzerinde yer alan ceket ile birlikte sıcaklığın kontrol edildiği, ham maddelerin birleşerek yakıt formunu aldığı, karışımın sağlandığı hazne.
				TK-1001	Titreşimli elek üzerinde yer alan ve mikser içerisine beslenecek kimyasalların doldurulduğu hazne.
				MG-1001	Yakıt karışımı için gerekli olan temel ekipmanları gövde üzerinde bulundurur.
				EL-1001	Kimyasal besleme haznesine konumlandırılan hammaddelerin titreşim sağlanarak mikser haznesi içerisine beslenmesi sağlanmaktadır.

Çizelge 4.10. (devam) Node listesi

Node Listesi		Node Açıklaması	Teknik Çizimler / Referanslar	Ana Ekipmanlar	
#	Ad			Tag	Açıklama
2	Vakum Sistemi	K-1001 vakum pompası ve HV-1043 vanasının bulunduğu hat üzerinden MB-1001 mikser haznesi vakuma alınmaktadır.	DRWG-1001-001-R0	MB-1001	Üzerinde yer alan ceket ile birlikte sıcaklığın kontrol edildiği, ham maddelerin birleşerek yakıt formunu aldığı, karışımın sağlandığı hazne.
				MG-1001	Yakıt karışımı için gerekli olan temel ekipmanları gövde üzerinde bulundurur.
				K-1001	Yakıt üretim faaliyetleri sırasında mikser haznesi içerisinde ihtiyaç duyulan negatif basıncın sağlanması için kullanılmaktadır.
3	Sıcaklık Kontrol Sistemi	E-1001 eşanjöründe utility sisteminden gelen buhar beslemesi ile P-1004, MB-1001 ceketi içerisinde yer alan kapalı çevrimdeki su ısıtılmaktadır.	DRWG-1001-001-R0	MB-1001	Üzerinde yer alan ceket ile birlikte sıcaklığın kontrol edildiği, ham maddelerin birleşerek yakıt formunu aldığı, karışımın sağlandığı hazne.
				MG-1001	Yakıt karışımı için gerekli olan temel ekipmanları gövde üzerinde bulundurur.
				E-1001	Mikser haznesindeki karışımın talep edilen sıcaklıkta sağlanabilmesi için ihtiyaç duyulan ısının (ısıtma & soğutma) üretilmesini sağlamaktadır.
				P-1004	Isı aktarıcıdan geçen suyun (ısıtma & soğutma) kapalı sistem içerisinden geçerek mikser haznesi ceketine ulaşmasını ve devir daim ederek tekrar ısı aktarıcıya beslenmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.10. (devam) Node listesi

Node Listesi		Node Açıklaması	Teknik Çizimler / Referanslar	Ana Ekipmanlar	
#	Ad			Tag	Açıklama
4	Hidrolik Kontrol Sistemi	U-1207 hidrolik ünite içerisinden sağlanan yağ P-1234 hidrolik pompa ile basınçlandırılarak AV-1116 ve AV-1118 aktüatörlü vanaları kullanılarak MB-1001 mikser haznesinin yukarı-aşağı yönlü hareketi sağlanmaktadır	DRWG-1001-001-R0	MB-1001	Üzerinde yer alan ceket ile birlikte sıcaklığın kontrol edildiği, ham maddelerin birleşerek yakıt formunu aldığı, karışımın sağlandığı hazne.
				MG-1001	Yakıt karışımı için gerekli olan temel ekipmanları gövde üzerinde bulundurur.
				U-1207	Mikser haznesi hareketi için ihtiyaç duyulan hidrolik yağ sistemine ait ünite, yağ seviyesinin ve hidrolik sistemin kontrolünü sağlamaktadır.
				P-1234	Mikser gövdesi üzerinde yer alan ve mikser haznesinin yukarı - aşağı yönlü hareketini sağlamak için kullanılan pistonun (sağ) hareketi için hidrolik basınç sağlamaktadır.
5	Mikser Gövdesi ve Karıştırma Sistemi	MG-1001 mikser gövdesi tüm sistemin bir kaide üzerinde yer almasını sağlamaktadır. Karışım esnasında MB-1001 mikser haznesi ile sızdırmaz bir yapı sağlamaktadır. Üzerinde yer alan M-1001 ve bağlı karıştırıcı bıçaklar ile hazne içerisinde karışım sağlanmaktadır.	DRWG-1001-001-R0	MB-1001	Üzerinde yer alan ceket ile birlikte sıcaklığın kontrol edildiği, ham maddelerin birleşerek yakıt formunu aldığı, karışımın sağlandığı hazne.
				MG-1001	Yakıt karışımı için gerekli olan temel ekipmanları gövde üzerinde bulundurur.
				M-1001	Mikser haznesi içerisinde yer alan kimyasalların yakıt formunu alabilmesi için talep edilen hız değerinde mikser bıçaklarına hareket sağlamaktadır.

Çizelge 4.10. (devam) Node listesi

Node Listesi		Node Açıklaması	Teknik Çizimler / Referanslar	Ana Ekipmanlar	
#	Ad			Tag	Açıklama
6	Acil Durum ve Koruma Sistemi	IR-1097, IR-1098, IR-1124, IR-1125 infrared sensörler ve PT-1121 ile tahrik alınan acil durum sisteminde AV-1122 ve P-1236 üzerinden MB-1001 içerisine su basılmakta, P-1234 pompası ve AV-1116 ve AV-1118 ile hidrolik sistem basıncı düşürülerek MB-1001 aşağı indirilmektedir.	DRWG-1001-001-R0	MB-1001	Üzerinde yer alan ceket ile birlikte sıcaklığın kontrol edildiği, ham maddelerin birleşerek yakıt formunu aldığı, karışımın sağlandığı hazne.
				MG-1001	Yakıt karışımı için gerekli olan temel ekipmanları gövde üzerinde bulundurur.
				P-1234	Mikser gövdesi üzerinde yer alan ve mikser haznesinin yukarı - aşağı yönlü hareketini sağlamak için kullanılan pistonun (sağ) hareketi için hidrolik basınç sağlamaktadır.
				P-1236	Acil bir durumda devreye girmesi beklenen su basma sisteminde mikser haznesine suyun transfer edilmesi için kullanılmaktadır.

Çizelge 4.10 içerisinde, belirlenen nodelara ait bilgiler, ilgili node içerisinde yer alan ana ekipmanlara ait kodlar ve açıklamalar bulunmaktadır. Belirlenen nodeların mikser prosesindeki farklı amaçlarda kullanılan veya devreye giden sistemler olduğu, mikser gövdesi ve karıştırma haznesinin ilgili tüm sistemler ile ilişkili olduğu görülmüştür. Baybutt (2015), proses tehlike analizleri için benzer yaklaşımla prosesleri alt bölümlere ayırmıştır (Baybutt, 2015). Noriyati ve arkadaşları (2015), gübre tesisinde bulunan kükürt fırınındaki güvenlik bütünlük seviyesini belirlemek için HAZOP çalışmasını, borulama ve enstrümantasyon diyagramına dayanarak kükürt fırını ve yardımcı ekipmanlara göre 3 farklı noda ayırıp gerçekleştirmiştir (Noriyati, Rozaaq, Musyafa ve Soepriyanto, 2015).

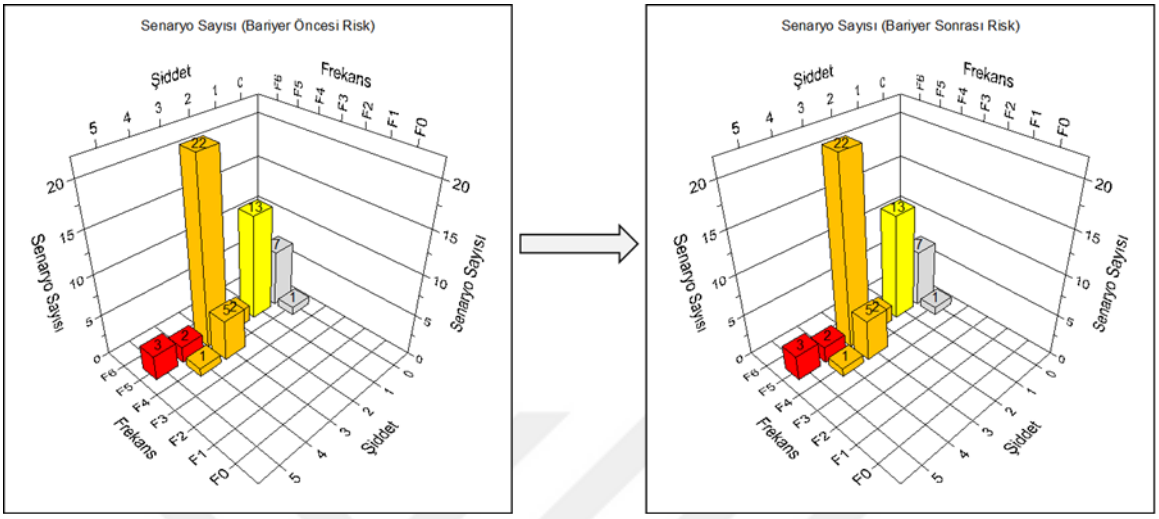
Temel bulgular

Gerçekleştirilen Yarı Kantitatif HAZOP çalışması ile 6 farklı node içerisinde toplam 47 başlatıcı olay ve potansiyel 56 adet sonuç içeren senaryo değerlendirilmiştir. Yarı Kantitatif HAZOP çalışmasına ilişkin çalışma sayfaları Çizelge 4.11'de sunulmuştur.

Hammadde besleme operasyonunda kimyasalların hatalı bir sıra ile beslenmesi veya kontrolsüz şekilde bir araya gelmeleri sonucu kimyasal etkileşim oluşması risk seviyesi yüksek senaryolara ait potansiyel sapmalardır. Çok yüksek riskli senaryoya ilişkin başlatıcı olay kategorisinin operatör hatası olduğu görülmüştür. Vakum sistemindeki sapmaların, mikser ekipmanının yüksek vakum dayanımı sebebi ile bütünlük kaybı meydana getirmeyeceği ancak hazne içerisindeki darbe, sürtünme ve sıcaklığa karşı hassasiyet gösteren yakıt karışımı ve/veya hammaddeler için yüksek seviyede risk barındırdığı tespit edilmiştir. Senaryolara ilişkin başlatıcı olayların ise tasarım ve/veya ekipman hatası kaynaklı olabileceği değerlendirilmiştir. Sıcaklık kontrolünde kullanılan eşanjör sisteminin maksimum kapasitesinin, kullanılan kimyasalların hassasiyet limitinin altında bulunması sebebi ile sıcaklık kontrolündeki potansiyel sapmaların mekanik arızalara sebep olabileceği veya ürün kalitesinde problem yaratabileceği belirlenmiştir. Hidrolik kontrol sistemindeki akışı kontrol eden vanalarda meydana gelebilecek hataların çok yüksek ve yüksek seviyede risk yaratabilecek senaryolar meydana getirebileceği gösterilmiştir. İlgili sistemdeki akış kontrolünün oldukça önemli olduğu ve ek bariyerlere ihtiyaç bulunduğu tespit edilmiştir. Karıştırma sisteminde operatör hatası kaynaklı meydana gelebilecek kontaminasyonların (yabancı madde vb.) çok yüksek seviyede, karıştırıcı motor kaynaklı hataların ise yüksek seviyede risk barındırdığı belirlenmiştir.

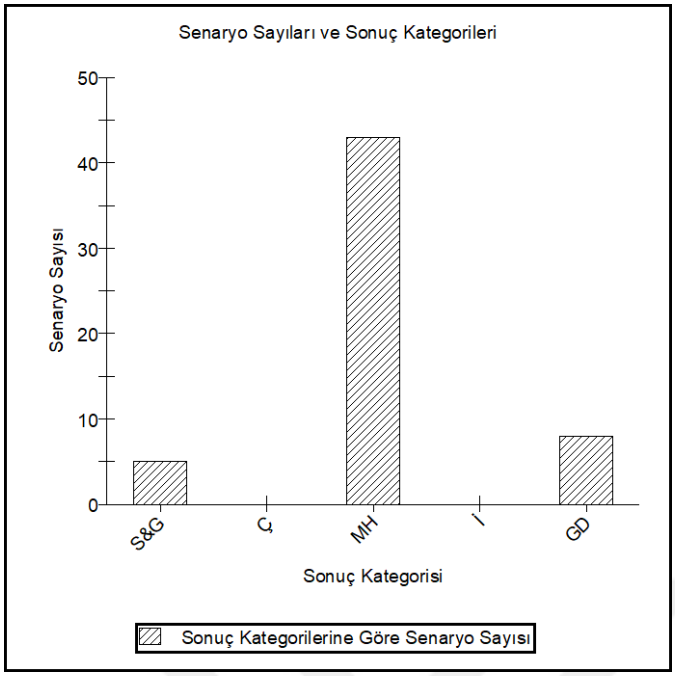
Değerlendirilen prosesteki bariyer öncesi riskler incelendiğinde, 5 adet senaryo "Çok Yüksek Riskli" ve 30 adet senaryo "Yüksek Riskli" olarak bulunmuştur. Mevcut durumda proseste yer alan ve potansiyel tehlikelere sahip senaryoların açığa çıkma olasılıklarını indirgemeyi ve/veya etkilerini hafifletmeyi amaçlayan bariyerler ve/veya koruma katmanları değerlendirmeye dâhil edildiğinde ise "Çok Yüksek Riskli" ve "Yüksek Riskli" senaryo sayılarında değişim meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bariyerlerin ve/veya koruma katmanlarının bağımsızlık, etkinlik, tasarım amacına hizmet etme ve bakım kapsamında yeterliliğe sahip olmamaları sebebi ile senaryolara ait risk kategorilerine etki etmediği

belirlenmiştir. Şiddet, olasılık ve risk değerlerinin senaryo sayıları ile birlikte gösterimi Şekil 4.6' de verilmiştir.



Şekil 4.6. Şiddet, olasılık ve risk değerlerinin senaryo sayıları ile birlikte gösterimi-Bariyer Öncesi (sol) ve Bariyer Sonrası (sağ)

Senaryolara ilişkin sonuç kategorileri değerlendirildiğinde, 43 adet senaryonun "Maddi Hasar" ile sonuçlandığı, 5 adet senaryonun "Sağlık ve Güvenlik" kategorisinde yer alan insan hayatına etki ettiği ve 8 senaryonun "Geçerli Değil" kategorisinde yer alarak etkisinin bulunmadığı gösterilmiştir. Proses parametrelerinde sapma meydana getirebilecek adımların uzaktan kontrollü gerçekleştirilmesi ve alanda çalışan bulunmaması sebebi ile "Maddi Hasar" ile sonuçlanan senaryo sayısının ön plana çıktığı belirlenmiştir. Stephens ve arkadaşları (2007) gerçekleştirdikleri çalışmada, AP/HTPB temelli kompozit katı yakıt formülasyonunun manuel veya mekanik olarak karıştırılmasını/hazırlamasını karşılaştırmıştır. Mekanik sistem kullanılarak gerçekleştirilen karıştırma işleminin, manuel karıştırma işlemine göre daha güvenli olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple uzaktan kontrol ve alanda çalışan bulunmaması kabulünün, çalışmaya ait çıktıları doğrudan etkilediği gösterilmiştir (Stephens, ve diğerleri, 2007). Senaryoların sonuç kategorilerine göre dağılımı Şekil 4.7' te sunulmuştur.



Şekil 4.7. Senaryolara ilişkin sonuç kategorilerinin dağılımı

Kimyasal, enerjik malzeme, proses şartları veya çevresel faktörler kaynaklı meydana gelebilecek tehlikelerin, kabul edilebilir sınırlara (Orta veya Düşük Riskli) indirilebilmesinde potansiyel tehlikelerin etkin şekilde tespit edilmiş olması gerekmektedir. Sonuç olarak, katı yakıt üretim süreçlerinde kullanılan kimyasal ve enerjik malzemelerin doğası gereği ve proses şartlarında meydana gelebilecek sapmalar ile birlikte insan sağlığı ve şirket varlıklarına potansiyel tehdit oluşturduğu gerçekleştirilen Yarı Kantitatif HAZOP çalışması ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. HAZOP çalışma sayfaları (Node 1)

Sapma	Sebep	Başlatıcı Olay Kategorileri		Sonuç	Düzeltici Faktörler		Kat	Bariyer Öncesi Risk			Bariyerler				IPL?				Bariyer Sonrası Risk		
		Açıklama	IEF		Açıklama	P		Ş	F	R	Tag	Açıklama	Tür	PFD	I	E	D	M	Ş	F	R
1. Sıralama Hatalı	1. TK-1001 kimyasal besleme haznesine SOP içerisinde belirtilen sıralamanın dışında malzeme eklenmesi	Operatör Hatası	1.00E-01	1. Kimyasal etkileşim sonucunda (bknz. Kimyasal Etkileşim Matrisi) uyumsuz olan malzemelerin kontrolsüz şekilde bir araya gelmesi sonucunda yanma / parlama / patlama meydana gelmesi, operasyonu gerçekleştiren operatörün hayatını kaybetmesi	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	S&G	S4	F5	ÇY	1. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde döküntü meydana gelmesi durumunda uygulanacak adımlar detaylı olarak açıklanmaktadır	Prosedürel	1.00E+00	E	H	E	E	S4	F5	ÇY
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
2. Miktar Düşük	1. TK-1001 kimyasal besleme haznesine SOP içerisinde belirtilenden daha az miktarda malzeme eklenmesi	Operatör Hatası	1.00E-01	1. Hammaddelerin MG-1001 haznesine talep edilen miktarda beslenememesi sonucunda istenilen özelliklere sahip yakıtın üretilememesi ve maddi kayıp meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	1. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde döküntü meydana gelmesi durumunda uygulanacak adımlar detaylı olarak açıklanmaktadır	Prosedürel	1.00E+00	E	H	E	E	S1	F5	O
3. Miktar Fazla	1. TK-1001 kimyasal besleme haznesine SOP içerisinde belirtilenden daha fazla miktarda malzeme eklenmesi	Operatör Hatası	1.00E-01	1. MG-1001 haznesine fazla miktarda kimyasal beslenmesi sonucunda istenilen özelliklere sahip yakıtın üretilememesi maddi kayıp meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	1. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde döküntü meydana gelmesi durumunda uygulanacak adımlar detaylı olarak açıklanmaktadır	Prosedürel	1.00E+00	E	H	E	E	S1	F5	O
4. Akış Hızlı	1. M-1002 titreşimli elek motoru hatası (yüksek frekansta çalışma)	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. AL tozunun MG-1001 haznesine hızlı beslenmesi sonucunda yüzeyde katı malzeme birikimi meydana gelmesi, mikser iç duvarlarında katı malzeme artışı kaynaklı lokal sıcaklık artışı meydana gelmesi, kontrolsüz reaksiyon/dekompozisyon sonucu mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	2. N/A	Kimyasal besleme ve karışım operasyonları esnasında sistem kamera ile takip edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	E	E	S3	F5	Y
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
				2. HMX tozunun MG-1001 haznesine hızlı beslenmesi sonucunda yüzeyde katı malzeme birikimi meydana gelmesi, mikser iç duvarlarında katı malzeme artışı kaynaklı lokal sıcaklık artışı meydana gelmesi, kontrolsüz reaksiyon/dekompozisyon sonucu mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	2. N/A	Kimyasal besleme ve karışım operasyonları esnasında sistem kamera ile takip edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	E	E	S3	F5	Y
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
				3. AP tozunun MG-1001 haznesine hızlı beslenmesi sonucunda operasyon veriminin etkilenmesi beklenmektedir. Proses güvenliği riski yaratması beklenmemektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	GD	S0	F5	GD	2. N/A	Kimyasal besleme ve karışım operasyonları esnasında sistem kamera ile takip edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	E	E	S0	F5	GD
5. Akış Yavaş	1. M-1002 titreşimli elek motoru hatası (düşük frekansta çalışma)	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. Katı malzemelerin TK-1001 tankına talep edilen sürede beslenmemesi sonucunda TK-1001 tankı içerisinde yığılma meydana gelmesi, tank çıkış ağzında arc/boşluk/köprü oluşumu sonucunda beslemenin sağlanamaması. Operasyonel kayıp meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	GD	S0	F5	GD	2. N/A	Kimyasal besleme ve karışım operasyonları esnasında sistem kamera ile takip edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	E	E	S0	F5	GD

Çizelge 4.11. (devam) HAZOP çalışma sayfaları (Node 1)

				2. Hammaddelerin MG-1001 haznesine talep edilen sürede beslenememesi sonucunda operasyonel kayıp (süre) meydana gelmesi, istenilen özelliklere sahip yakıtın üretilememesi maddi kayıp meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	2. N/A	Kimyasal besleme ve karışım operasyonları esnasında sistem kamera ile takip edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	E	E	S1	F5	O
6. Akış Yok	1. Esnek hortumların yer aldığı besleme hattında tıkanıklık meydana gelmesi	Boru Hatlarında Tıkanıklık (Tesis Verisi)	1.00E-01	1. Hammaddelerin MG-1001 haznesine talep edilen miktarda beslenememesi sonucunda istenilen özelliklere sahip yakıtın üretilememesi ve maddi kayıp meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	2. N/A	Kimyasal besleme ve karışım operasyonları esnasında sistem kamera ile takip edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	E	E	S1	F5	O
	2. TK-1001 tankında hatalı tasarım sebebi ile huni akışı meydana gelmesi	Tasarım Hatası (Tesis Verisi)	1.00E-02	1. TK-1001 tankı içerisinde yığılma meydana gelmesi, tank çıkış ağzında arc/boşluk/köprü oluşumu sonucunda beslemenin sağlanamaması. Operasyonel kayıp meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	GD	S0	F4	GD	2. N/A	Kimyasal besleme ve karışım operasyonları esnasında sistem kamera ile takip edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	E	E	S0	F4	GD
7. Akış Farklı	1. Esnek hortumların yer aldığı besleme hattında sızıntı/kaçak meydana gelmesi	Esnek Hortum Sızıntı/Kaçak (Tesis Verisi)	1.00E-01	1. HMX veya AL hammaddesinin alana kontrolsüz yayılımı, toz patlayıcı atmosfer oluşumu, tutuşturucu kaynak ile temas etmesi halinde patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Tutuşma Olasılığı - ATEX Kapsamlı Alan (%10)	1.00E-01	MH	S3	F4	Y	2. N/A	Kimyasal besleme ve karışım operasyonları esnasında sistem kamera ile takip edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	E	E	S3	F4	Y
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
				2. AP'nin alana kontrolsüz yayılımı, tozların sıcak yüzey ile temas etmesi sonucu bozunma / parlama / patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Tutuşma Olasılığı - ATEX Kapsamlı Alan (%10)	1.00E-01	MH	S3	F4	Y	2. N/A	Kimyasal besleme ve karışım operasyonları esnasında sistem kamera ile takip edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	E	E	S3	F4	Y
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
	2. Sıvı kimyasalların beslenmesi sırasında döküntü meydana gelmesi	Operatör Hatası	1.00E-01	1. Sıvı kimyasalların parlama noktalarının atmosferik şartların üzerinde olması sebebi ile yanma/parlama meydana gelmesi beklenmemektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	GD	S0	F5	GD	1. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde döküntü meydana gelmesi durumunda uygulanacak adımlar detaylı olarak açıklanmaktadır	Prosedürel	1.00E+00	H	H	H	H	S0	F5	GD
8. Kontaminasyon Var	1. Hammaddeler içerisinde yabancı malzeme bulunması	Operatör Hatası	1.00E-01	1. Mikser içerisine yabancı malzeme girişi sonucunda sürtünme meydana gelmesi, mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	3. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde FOD riskleri hakkında uyarılar yer almaktadır	Prosedürel	1.00E+00	H	H	H	H	S3	F5	Y
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
	2. Besleme adımları arasında tank ve boru hatlarında temizliğin sağlanmaması & temizliğin eksik temizlik yapılması	Operatör Hatası	1.00E-01	1. Kimyasal etkileşim sonucunda (bknz. Kimyasal Etkileşim Matrisi) uyumsuz olan malzemelerin kontrolsüz şekilde bir araya gelmesi sonucunda yanma / parlama / patlama meydana gelmesi, operasyonu gerçekleştiren operatörün hayatını kaybetmesi	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	S&G	S4	F5	ÇY	6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E	S4	F5	ÇY
	3. Temizlik operasyonu sırasında kullanılan aparatın veya bir parçasının mikser gövdesine düşmesi	Operatör Hatası	1.00E-01	1. Mikser içerisine yabancı malzeme girişi sonucunda sürtünme meydana gelmesi, mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	3. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde FOD riskleri hakkında uyarılar yer almaktadır	Prosedürel	1.00E+00	H	H	H	H	S3	F5	Y
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			

Çizelge 4.11. (devam) HAZOP çalışma sayfaları (Node 1)

9. Statik Elektrik Var	1. Esnek hortum ile sağlanan besleme hatlarında statik elektrik ile yüklenme meydana gelmesi	Tasarım Hatası (Tesis Verisi)	1.00E-02	1. Elektro statik deşarj hassasiyeti bulunan hammaddelerin transferi esnasında (HMX, NG, BTTN, AP) sırasında parlama / patlama meydana gelmesi, oluşan alevin mikser haznesine ulaşması sonucunda hazne içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F4	Y	7. N/A	Mikser gövdesi, besleme haznesi ve esnek hortum bağlantılarında eş potansiyelleme ve topraklama bulunmaktadır	Topraklama Sistemi	1.00E+00	E	H	E	E	S3	F4	Y

Teknik Çizimler / Referanslar: DRWG-1001-001-R0

Node Açıklaması: TK-1001 kimyasal besleme haznesine manuel olarak eklenen hammaddeler EL-1001 titreşimli elek kullanılarak esnek borular ile besleme portu üzerinden MG-1001 mikser haznesine aktarılmaktadır.

Çizelge 4.12. HAZOP çalışma sayfaları (Node 2)

Sapma	Sebep	Başlatıcı Olay Kategorileri		Sonuç	Düzeltici Faktörler		Kat	Bariyer Öncesi Risk			Bariyerler							Bariyer Sonrası Risk		
		Açıklama	IEF		Açıklama	P		Ş	F	R	Tag	Açıklama	Tür	PFD	IPL? I	IPL? E	IPL? D	IPL? M	Ş	F	R
1. Basınç Düşük	1. Vakuma alma işleminin kademeli gerçekleştirilmemesi (ani şekilde sistemin mutlak vakuma alınması)	Operatör Hatası	1.00E-01	1. Ani vakum artışına bağlı mikser haznesi içerisindeki yakıtın yükselmesi, karıştırıcı bıçak milleri ve mikser gövdesi arasına yakıt karışması, döner ekipman yüzeylerindeki sürtünmeye bağlı mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F5	Y
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
	2. Vakuma alma işleminin kademeli gerçekleştirilmemesi (ani şekilde sistemin mutlak vakuma alınması)	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. Ani vakum artışına bağlı mikser haznesi içerisindeki yakıtın yükselmesi, karıştırıcı bıçak milleri ve mikser gövdesi arasına yakıt karışması, döner ekipman yüzeylerindeki sürtünmeye bağlı mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F5	Y
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
2. Basınç Yüksek	1. PT-1121 basınç transmitteri hatası (hatalı düşük)	Temel Proses Kontrol Sistemi Hatası	1.00E-01	1. PT-1121 basınç transmitterinin hatalı değer okuması sonucunda mikser haznesi içerisinde yer alan yakıt karışımında SOP'de belirtilen vakum sağlanamaz. Üretilen yakıt formülasyonunda hava kabarcığı meydana gelir. ürün kalitesinin etkilenmesi ve işçilik kayıpları meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	8. N/A	Vakum alma operasyonu sırasında PG-1113 manometre operatör tarafından kamera ile kontrol edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	H	H	S1	F5	O
	2. Vakum hattında yer alan filtrenin tıkanması	Filtre Tıkanıklığı	1.00E-01	1. PT-1121 basınç transmitterinin hatalı değer okuması sonucunda mikser haznesi içerisinde yer alan yakıt karışımında SOP'de belirtilen vakum sağlanamaz. Üretilen yakıt formülasyonunda hava kabarcığı meydana gelir. ürün kalitesinin etkilenmesi ve işçilik kayıpları meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	8. N/A	Vakum alma operasyonu sırasında PG-1113 manometre operatör tarafından kamera ile kontrol edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	H	H	S1	F5	O
	3. HV-1043 manuel vananın kapalı unutulması	Operatör Hatası	1.00E-01	1. Mikser haznesi içerisinde yer alan yakıt karışımında SOP'de belirtilen vakum sağlanamaz. Üretilen yakıt formülasyonunda hava kabarcığı meydana gelir. ürün kalitesinin etkilenmesi ve işçilik kayıpları meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	8. N/A	Vakum alma operasyonu sırasında PG-1113 manometre operatör tarafından kamera ile kontrol edilmektedir	Operatör Müdahalesi	1.00E+00	E	H	H	H	S1	F5	O
3. Akış Farklı	1. Toz besleme adımında hatalı şekilde vakum sisteminin devreye alınması	Operatör Hatası	1.00E-01	1. AL veya HMX tozlarının mikser haznesinden vakum pompasına ulaşması, vakum pompası kanatlarında meydana gelebilecek statik elektrik, darbe, sürtünme veya mekanik kıvılcım sonucunda yanma & patlama meydan gelmesi. Vakum hattındaki yangının mikser haznesine ulaşması sonucu hazne içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F5	Y
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			

Çizelge 4.12. (devam) HAZOP çalışma sayfaları (Node 2)

											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
											9. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde vakum uygulanacak adımlar yer almaktadır	Prosedürel	1.00E+00	E	H	E	E			
4. Kontaminasyon Var	1. Vakum filtresinde AL ve AP tozlarının birikmesi	Tasarım Hatası (Tesis Verisi)	1.00E-02	1. Filtrede kontrolsüz reaksiyon sonucu yanma/parlama meydana gelmesi, vakum hattındaki yangının mikser haznesine ulaşması sonucu hazne içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S4	F4	Y	4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E	S4	F4	Y
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
5. Statik Elektrik Var	1. İletken olmayan & topraklama bulunmayan vakum hattı kullanımı,	Tasarım Hatası (Tesis Verisi)	1.00E-02	1. AL ve HMX tozlarının hat içerisindeki transferi esnasında statik elektrik ile yüklenmesi sonucu yanma & parlama meydana gelmesi, alevin mikser haznesine ulaşması sonucu hazne içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F4	Y	4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F4	Y
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
											7. N/A	Mikser gövdesi, besleme haznesi ve esnek hortum bağlantılarında eş potansiyelleme ve topraklama bulunmaktadır	Topraklama Sistemi	1.00E+00	E	H	E	E			

Teknik Çizimler / Referanslar: DRWG-1001-001-R0
Node Açıklaması: K-1001 vakum pompası ve HV-1043 vanasının bulunduğu hat üzerinden MB-1001 mikser haznesi vakuma alınmaktadır.

Çizelge 4.13. HAZOP çalışma sayfaları (Node 3)

Sapma	Sebep	Başlatıcı Olay Kategorileri		Sonuç	Düzeltici Faktörler		Kat	Bariyer Öncesi Risk			Bariyerler								Bariyer Sonrası Risk		
											Tag	Açıklama	Tür	PFD	IPL?						
		Açıklama	IEF		Açıklama	P		Ş	F	R					I	E	D	M	Ş	F	R
1. Yüksek Sıcaklık	1. TT-1102 sıcaklık transmitteri hatası (hatalı düşük okuma)	Temel Proses Kontrol Sistemi Hatası	1.00E-01	1. Operasyonun farklı aşamalarında mikser gövdesi için set edilen sıcaklık değerinin üzerinde proses gerçekleştirilir. Üretimi gerçekleştirilen yakıt ve hammaddelerin kendinden tutuşma sıcaklığının maksimum eşanjör kapasitesi değerinden (100 °C) küçük olması sebebi ile proses güvenliği riski yaratması beklenmemektedir, üretimi gerçekleştirilen ürün kalitesinin etkilenmesi, işçilik kaybı meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	10. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde mikser gövdesi ve ceket sıcaklığının kontrol edilmesi belirtilmektedir.	Prosedürel	1.00E+00	E	H	E	E	S1	F5	O
2. Düşük Sıcaklık	1. TT-1102 sıcaklık transmitteri hatası (hatalı yüksek okuma)	Temel Proses Kontrol Sistemi Hatası	1.00E-01	1. Operasyonun farklı aşamalarında mikser gövdesi için set edilen sıcaklık değerinin altında (proses alanı şartlarında) proses gerçekleştirilir. Yakıt kimyasallarının viskozitelerinde artış meydana gelmesi, karıştırıcı bıçaklarında ve motorunda viskozite sebebi ile sıcaklık artışı, mikser motorunda mekanik arıza ve maddi hasar meydana gelmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O									S1	F5	O
	2. P-1004 pompa hatası	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. Operasyonun farklı aşamalarında mikser gövdesi için set edilen sıcaklık değerinin altında (proses alanı şartlarında) proses gerçekleştirilir. Yakıt kimyasallarının viskozitelerinde artış meydana gelmesi, karıştırıcı bıçaklarında ve motorunda viskozite sebebi ile sıcaklık artışı, mikser motorunda mekanik arıza ve maddi hasar meydana gelmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	10. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde mikser gövdesi ve ceket sıcaklığının kontrol edilmesi belirtilmektedir.	Prosedürel	1.00E+00	E	H	E	E	S1	F5	O
3. Akış Yok	1. HV-1044 manuel vanasının hatalı kapalı kalması	Operatör Hatası	1.00E-01	1. P-1004 ve HV-1045 arasında kalan boru hattı üzerinde basınç artışı, zayıf noktalardan sızıntı meydana gelmesi, proses güvenliği riski meydana getirmesi beklenmemektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	GD	S0	F5	GD									S0	F5	GD
	2. HV-1045 manuel vanasının hatalı kapalı kalması	Operatör Hatası	1.00E-01	1. P-1004 ve HV-1044 arasında kalan boru hattı ve bowl ceketi üzerinde basınç artışı, zayıf noktalardan sızıntı meydana gelmesi, proses güvenliği riski meydana getirmesi beklenmemektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	GD	S0	F5	GD									S0	F5	GD
	3. P-1004 pompa hatası	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. Operasyonun farklı aşamalarında mikser gövdesi için set edilen sıcaklık değerinin altında (proses alanı şartlarında) proses gerçekleştirilir. Yakıt kimyasallarının viskozitelerinde artış meydana gelmesi, karıştırıcı bıçaklarında ve motorunda viskozite sebebi ile sıcaklık artışı, mikser motorunda mekanik arıza ve maddi hasar meydana gelmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S1	F5	O	10. N/A	Operasyon prosedürleri içerisinde mikser gövdesi ve ceket sıcaklığının kontrol edilmesi belirtilmektedir.	Prosedürel	1.00E+00	E	H	E	E	S1	F5	O

Teknik Çizimler / Referanslar: DRWG-1001-001-R0
Node Açıklaması: E-1001 eşanjöründe utility sisteminden gelen buhar beslemesi ile P-1004, MB-1001 ceketi içerisinde yer alan kapalı çevrimdeki su ısıtılmaktadır.

Çizelge 4.14. HAZOP çalışma sayfaları (Node 4)

Sapma	Sebep	Başlatıcı Olay Kategorileri		Sonuç	Düzeltici Faktörler		Kat	Bariyer Öncesi Risk			Bariyerler								Bariyer Sonrası Risk		
											Tag	Açıklama	Tür	PFD	IPL?						
		Açıklama	IEF		Açıklama	P		Ş	F	R					I	E	D	M	Ş	F	R
1. Seviye Yüksek	1. LT-1123 yağ seviyesinin hatalı düşük göstermesi	Temel Proses Kontrol Sistemi Hatası	1.00E-01	1. Manuel yağ dolumu esnasında taşma meydana gelmesi, operasyonel kayıp. Proses güvenliği riski meydana getirmesi beklenmemektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	GD	S0	F5	GD	12. LAH-1123	Yüksek yağ seviyesinde sesli/görsel alarm vermesi beklenmektedir.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	H	E	E	E	S0	F5	GD
2. Seviye Düşük	1. LT-1123 yağ seviyesinin hatalı yüksek göstermesi	Temel Proses Kontrol Sistemi Hatası	1.00E-01	1. Operasyonun ilerleyen adımlarında hazne içerisindeki malzeme miktarının artması, hidrolik yağ seviyesinin düşük olması, mikser haznesi için yeterli hidrolik basıncın sağlanamaması ve gövde ile sızdırmaz bir bileşim oluşturulamaması, AL & HMX tozlarının beslenmesi esnasında alana kontrolsüz yayılımı, toz patlayıcı ortam oluşumu, potansiyel yanma & patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	11. N/A	Operasyon öncesi kontrol listeleri içerisinde yağ seviyesinin kontrolü yer almaktadır.	Prosedürel	1.00E+00	E	H	H	H	S3	F5	Y
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
3. Akış Yok	1. AV-1118 aktüatörlü vana hatası (hatalı kapalı kalma)	Aktüatörlü Vana Hatası	1.00E-01	1. Mikser haznesi sağ-sol taşıyıcı bağlantıları arasındaki eşitliğin bozulması, mikser haznesinin devrilmesi, üretimi tamamlanmış yakıt ve/veya hammaddelerin alana dökülmesi. Potansiyel yanma/patlama meydana gelmesi. Operasyon sırasında alanda bulunan çalışanların hayatını kaybetmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	S&G	S5	F5	ÇY	13. N/A	Yakıt üretim prosesi süresince uzaktan kamera ile takip sağlanmaktadır.	Prosedürel	1.00E+00	E	H	H	H	S5	F5	ÇY
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
	2. AV-1116 aktüatörlü vana hatası (hatalı kapalı kalma)	Aktüatörlü Vana Hatası	1.00E-01	1. Mikser haznesi sağ-sol taşıyıcı bağlantıları arasındaki eşitliğin bozulması, mikser haznesinin devrilmesi, üretimi tamamlanmış yakıt ve/veya hammaddelerin alana dökülmesi. Potansiyel yanma/patlama meydana gelmesi. Operasyon sırasında alanda bulunan çalışanların hayatını kaybetmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	S&G	S5	F5	ÇY	13. N/A	Yakıt üretim prosesi süresince uzaktan kamera ile takip sağlanmaktadır.	Prosedürel	1.00E+00	E	H	H	H	S5	F5	ÇY
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
	3. P-1234 hidrolik pompa hatası (talep anında çalışmama)	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. Mikser haznesi için yukarı kaldırma veya indirme hareketi sağlanamaz, proses güvenliği riski yaratması beklenmemektedir. Operasyonel kayıp meydana gelebilir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	GD	S0	F5	GD									S0	F5	GD
4. Akış Farklı	1. AV-1118 aktüatörlü vana hatası (hatalı açılma/sızdırma)	Aktüatörlü Vana Hatası	1.00E-01	1. Karışım operasyonu sırasında sağ-sol taşıyıcı bağlantıları arasındaki eşitliğin bozulması, karıştırıcı bıçakların mikser gövdesine temas etmesi, sürtünme & kıvılcım kaynaklı yanma & patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	13. N/A	Yakıt üretim prosesi süresince uzaktan kamera ile takip sağlanmaktadır.	Prosedürel	1.00E+00	E	H	H	H	S3	F5	Y
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
	2. 2. AV-1116 aktüatörlü vana hatası (hatalı açılma/sızdırma)	Aktüatörlü Vana Hatası	1.00E-01	1. Karışım operasyonu sırasında sağ-sol taşıyıcı bağlantıları arasındaki eşitliğin bozulması, karıştırıcı bıçakların mikser gövdesine temas etmesi, sürtünme & kıvılcım kaynaklı yanma & patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	13. N/A	Yakıt üretim prosesi süresince uzaktan kamera ile takip sağlanmaktadır.	Prosedürel	1.00E+00	E	H	H	H	S3	F5	Y
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			

Çizelge 4.14. (devam) HAZOP çalışma sayfaları (Node 4)

											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			

Teknik Çizimler / Referanslar: DRWG-1001-001-R0
Node Açıklaması: U-1207 hidrolik ünite içerisinden sağlanan yağ P-1234 hidrolik pompa ile basınçlandırılarak AV-1116 ve AV-1118 aktüatörlü vanaları kullanılarak MB-1001 mikser haznesinin yukarı-aşağı yönlü hareketi sağlanmaktadır

Çizelge 4.15. HAZOP çalışma sayfaları (Node 5)

Sapma	Sebep	Başlatıcı Olay Kategorileri		Sonuç	Düzeltici Faktörler		Kat	Bariyer Öncesi Risk			Bariyerler								Bariyer Sonrası Risk		
											Tag	Açıklama	Tür	PFD	IPL?						
		Açıklama	IEF		Açıklama	P		Ş	F	R					I	E	D	M	Ş	F	R
1. Karıştırma Hızı Fazla	1. ZT-1123 transmitter hatası (hatalı düşük okuma)	Temel Proses Kontrol Sistemi Hatası	1.00E-01	1. M-1001 karıştırıcı hızının artması, maksimum karıştırma hızına (200 rpm) ulaşması, mikser içerisindeki sıvıların yükselmesi, karıştırıcı bıçak milleri ve mikser gövdesi arasında alevlenir kimyasal teması, aşırı ısınma/sürtünme kaynaklı tutuşma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Yakıt karışım operasyonunun 1. veya 2. adımında geçerlidir.	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F5	Y
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
				2. M-1001 karıştırıcı hızının artması, maksimum karıştırma hızına (200 rpm) ulaşması, yüksek viskoziteye sahip yakıt karışımının hazne iç çeperi yüzeyinde aşırı sürtünmeye maruz kalması. Mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Yakıt karışım operasyonunun 3, 4, 5, 6 veya 7. adımında geçerlidir.	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F5	Y
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
				3. Yüksek viskozitede talep edilen dönüş hızının sağlanamaması, karıştırıcı motorunda aşırı yük birikimi, mikser motorunda mekanik arıza ve maddi hasar meydana gelmesi.	Yakıt karışım operasyonunun 3, 4, 5, 6 veya 7. adımında geçerlidir.	1.00E+00	MH	S1	F5	O									S1	F5	O
	2. M-1001 karıştırıcı motor hatası	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. M-1001 karıştırıcı hızının artması, maksimum karıştırma hızına (200 rpm) ulaşması, mikser içerisindeki sıvıların yükselmesi, karıştırıcı bıçak milleri ve mikser gövdesi arasında alevlenir kimyasal teması, aşırı ısınma/sürtünme kaynaklı tutuşma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Yakıt karışım operasyonunun 1. veya 2. adımında geçerlidir.	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	14. ZT-1123	Karıştırma hızının set edilen değerden düşük olması durumunda operatör tarafından tespiti sağlanabilmektedir	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	E	E	S3	F5	Y
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
				2. M-1001 karıştırıcı hızının artması, maksimum karıştırma hızına (200 rpm) ulaşması, yüksek viskoziteye sahip yakıt karışımının hazne iç çeperi yüzeyinde aşırı sürtünmeye maruz kalması. Mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Yakıt karışım operasyonunun 3, 4, 5, 6 veya 7. adımında geçerlidir.	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F5	Y
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			

Çizelge 4.15. (devam) HAZOP çalışma sayfaları (Node 5)

											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
				3. Yüksek viskozitede talep edilen dönüş hızının sağlanamaması, karıştırıcı motorunda aşırı yük birikimi, mikser motorunda mekanik arıza ve maddi hasar meydana gelmesi.	Yakıt karışım operasyonunun 3, 4, 5, 6 veya 7. adımında geçerlidir.	1.00E+00	MH	S1	F5	O								S1	F5	O
2. Karıştırma Hızı Düşük	1. ZT-1123 transmitter hatası (hatalı yüksek okuma)	Temel Proses Kontrol Sistemi Hatası	1.00E-01	1. M-1001 karıştırıcı motor hızının tüm yakıt prosesi boyunca set edilen değerden düşük olması, talep edilen kusursuz karıştırmanın sağlanamaması, AP & HMX tozları ile tam olarak karışıma dahil edilmemiş AL tozunun lokal olarak bir araya gelmesi, hotspot oluşumu, mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Yakıt karışım operasyonunun 5. veya 6. adımında geçerlidir	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F5	Y
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
	2. M-1001 karıştırıcı motor hatası	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. M-1001 karıştırıcı motor hızının tüm yakıt prosesi boyunca set edilen değerden düşük olması, talep edilen kusursuz karıştırmanın sağlanamaması, AP & HMX tozları ile tam olarak karışıma dahil edilmemiş AL tozunun lokal olarak bir araya gelmesi, hotspot oluşumu, mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Yakıt karışım operasyonunun 5. veya 6. adımında geçerlidir	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	14. ZT-1123	Karıştırma hızının set edilen değerden düşük olması durumunda operatör tarafından tespiti sağlanabilmektedir	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	E	E	S3	F5	Y
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
3. Titreşim Yüksek	1. Karıştırıcı bıçak ve mekanik bağlantıların yer aldığı bölümde mekanik hata meydana gelmesi	Mekanik Hata (Karıştırıcı, dişli grubu vb.)	1.00E-02	1. M-1001 karıştırıcı motoruna bağlı bıçakların düzlemselliğinin bozulması, karıştırıcı bıçakların mikser gövdesine temas etmesi, sürtünme & kıvılcım kaynaklı yanma & patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F4	Y	15. N/A	Rutin olarak (8 Ay) mikser klerans ölçümleri sağlanmaktadır	Prosedürel	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F4	Y
											6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E			
											4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			
											5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E			

Çizelge 4.15. (devam) HAZOP çalışma sayfaları (Node 5)

4. Kontaminasyon Var	1. Mikser gövdesi, platform hazne vb. bir alanda bulunan parçaların (vida, kanca, tel, sabitleme aparatları vb.) mikser haznesi içerisine düşmesi	Operatör Hatası	1.00E-01	1. MB-1001 hazne içerisinde yabancı malzeme bulunması, karıştırıcı bıçaklar ile hazne arasında kalan yabancı malzemenin sürtünme meydana getirmesi, mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Tesis varlıklarının kaybı, maddi hasar ile sonuçlanması beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y	6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E	S3	F5	Y
												4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E				
												5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E				
				2. MB-1001 hazne içerisinde yabancı malzeme bulunması, beslenen yakıt kimyasalları ile kimyasal uyumsuzluğu bulunması sonucu mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Operasyon sırasında alanda bulunan çalışanların hayatını kaybetmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	S&G	S5	F5	ÇY	6. Üretim Alanı Yangın Söndürme Sistemi	Alev dedektörlerinin tespiti sonucu sprinkler sistemi devreye girer	Yangın Söndürme Sistemi (Tesis)	1.00E+00	E	H	H	E	S5	F5	ÇY
												4. Deluge Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, acil durum su beslemesi sağlanır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E				
												5. Quick Drop Sistemi	IR-1097,1098,1124,1125 sensörlerinden herhangi biri tarafından alev algılanır & PT-1121 aşırı basınç algılar ise, hidrolik sistem basıncı düşer ve bowl aşağı alınır.	Temel Proses Kontrol Sistemi	1.00E+00	E	H	H	E				

Teknik Çizimler / Referanslar: DRWG-1001-001-R0
Node Açıklaması: MG-1001 mikser gövdesi tüm sistemin bir kaide üzerinde yer almasını sağlamaktadır. Karışım esnasında MB-1001 mikser haznesi ile sızdırmaz bir yapı sağlamaktadır. Üzerinde yer alan M-1001 ve bağlı karıştırıcı bıçaklar ile hazne içerisinde karışım sağlanmaktadır.

Çizelge 4.16. HAZOP çalışma sayfaları (Node 6)

Sapma	Sebep	Başlatıcı Olay Kategorileri		Sonuç	Düzeltici Faktörler		Kat	Bariyer Öncesi Risk			Bariyerler								Bariyer Sonrası Risk		
											Tag	Açıklama	Tür	PFD	IPL?						
		Açıklama	IEF		Açıklama	P		Ş	F	R					I	E	D	M	Ş	F	R
1. Hatalı Okuma	1. IR-1097, IR-1098, IR-1124 veya IR-1125 infrared sensörlerden herhangi birinin "hatalı var" okuması	Hatalı Sinyal	1.00E-01	1. Acil durum sisteminin aktive olması. AV-1122 ve P-1236 üzerinden MB-1001 mikser haznesi içine su basılması, P-1234 pompası ve AV-1116 ve AV-1118 ile hidrolik sistem basıncı düşürülerek MB-1001 aşağı indirilmesi. Üretim ekipmanlarına su teması, ürün ve işçilik kaybı meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S2	F5	Y									S2	F5	Y
	2. PT-1121 hatası (hatalı yüksek okuma)	Hatalı Sinyal	1.00E-01	1. Acil durum sisteminin aktive olması. AV-1122 ve P-1236 üzerinden MB-1001 mikser haznesi içine su basılması, P-1234 pompası ve AV-1116 ve AV-1118 ile hidrolik sistem basıncı düşürülerek MB-1001 aşağı indirilmesi. Üretim ekipmanlarına su teması, ürün ve işçilik kaybı meydana gelmesi beklenmektedir.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S2	F5	Y									S2	F5	Y
2. Akış Yok	1. AV-1122 aktüatörlü vana hatası (talep anında açılmama)	Aktüatörlü Vana Hatası	1.00E-01	1. Mikser haznesi içerisine su basma işlemi sağlanamaz. Mikser gövdesindeki yanma kaynaklı açığa çıkan termal radyasyon engellenemez. Mikser gövdesi ve haznesinde aşırı ısınmaya bağlı bütünlük kaybı. Maddi hasar meydana gelmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y									S3	F5	Y
	2. P-1236 pompa hatası (talep anında devreye girmeme)	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. Mikser haznesi içerisine su basma işlemi sağlanamaz. Mikser gövdesindeki yanma kaynaklı açığa çıkan termal radyasyon engellenmemiz. Mikser gövdesi ve haznesinde aşırı ısınmaya bağlı bütünlük kaybı. Maddi hasar meydana gelmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y									S3	F5	Y
	3. AV-1116 aktüatörlü vana hatası (talep anında açılmama)	Aktüatörlü Vana Hatası	1.00E-01	1. Mikser haznesinin atmosferik şartlara getirilememesi sonucu kapalı alanda yanmanın devam etmesi, patlama sonucu maddi hasar meydana gelmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y									S3	F5	Y
	4. AV-1118 aktüatörlü vana hatası (talep anında açılmama)	Aktüatörlü Vana Hatası	1.00E-01	1. Mikser haznesinin atmosferik şartlara getirilememesi sonucu kapalı alanda yanmanın devam etmesi, patlama sonucu maddi hasar meydana gelmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y									S3	F5	Y
	5. P-1234 pompa hatası (talep anında devreye girmeme)	Motor, Pompa, Kompresör, Fan veya Blower Hatası	1.00E-01	1. Mikser haznesinin atmosferik şartlara getirilememesi sonucu kapalı alanda yanmanın devam etmesi, patlama sonucu maddi hasar meydana gelmesi.	Aktifleştirici Şart veya Koşullu Değiştirici Mevcut Değil	1.00E+00	MH	S3	F5	Y									S3	F5	Y

Teknik Çizimler / Referanslar: DRWG-1001-001-R0

Node Açıklaması: IR-1097, IR-1098, IR-1124, IR-1125 infrared sensörler ve PT-1121 ile tahrik alınan acil durum sisteminde AV-1122 ve P-1236 üzerinden MB-1001 içerisine su basılmakta, P-1234 pompası ve AV-1116 ve AV-1118 ile hidrolik sistem basıncı düşürülerek MB-1001 aşağı indirilmektedir.

4.2.2. Hata ağacı analizi (FTA)

HAZOP çalışması ile bariyer sonrası risk seviyesi "Çok Yüksek" olarak değerlendirilen senaryolar için risk değerlendirme ekibi ile birlikte hata ağacı analizi gerçekleştirilmiştir. Bölüm 2.4 içerisinde yer alan teknik bilgiler üzerinden gerçekleştirilen analize ilişkin detaylar devam eden alt başlıklar ile açıklanmıştır.

FTA Senaryolarının belirlenmesi ve açıklanması

Hata ağacı analizi ile değerlendirilecek senaryolar, HAZOP çalışmasında yer alan sebep-sonuç çiftleri içerisinden seçilmiştir. Risk seviyesi "Çok Yüksek" olarak değerlendirilen ve detayları Çizelge 4.17 içerisinde yer alan senaryolar hata ağacı analizine dâhil edilmiştir.

Çizelge 4.17. Hata ağacı analizi ile değerlendirilecek senaryolar

#	Sapma	Başlatıcı Olay Kategorisi	Sebep	Sonuç
1	Sıralama Hatalı	Operatör Hatası	TK-1001 kimyasal besleme haznesine SOP içerisinde belirtilen sıralamanın dışında malzeme eklenmesi	Kimyasal etkileşim sonucunda uyumsuz olan malzemelerin kontrolsüz şekilde bir araya gelmesi sonucunda yanma / parlama / patlama meydana gelmesi, operasyonu gerçekleştiren operatörün hayatını kaybetmesi
2	Kontaminasyon Var	Operatör Hatası	Besleme adımları arasında tank ve boru hatlarında temizliğin sağlanmaması & temizliğin eksik temizlik yapılması	Kimyasal etkileşim sonucunda uyumsuz olan malzemelerin kontrolsüz şekilde bir araya gelmesi sonucunda yanma / parlama / patlama meydana gelmesi, operasyonu gerçekleştiren operatörün hayatını kaybetmesi
3	Akış Yok	Aktüatörlü Vana Hatası	AV-1118 aktüatörlü vana hatası (hatalı kapalı kalma)	Mikser haznesi sağ-sol taşıyıcı bağlantıları arasındaki eşitliğin bozulması, mikser haznesinin devrilmesi, üretimi tamamlanmış yakıt ve/veya hammaddelerin alana dökülmesi. Potansiyel yanma/patlama meydana gelmesi. Operasyon sırasında alanda bulunan çalışanların hayatını kaybetmesi.
4	Akış Yok	Aktüatörlü Vana Hatası	AV-1116 aktüatörlü vana hatası (hatalı kapalı kalma)	Mikser haznesi sağ-sol taşıyıcı bağlantıları arasındaki eşitliğin bozulması, mikser haznesinin devrilmesi, üretimi tamamlanmış yakıt ve/veya hammaddelerin alana dökülmesi. Potansiyel yanma/patlama meydana gelmesi. Operasyon sırasında alanda bulunan çalışanların hayatını kaybetmesi.
5	Kontaminasyon Var	Operatör Hatası	Mikser gövdesi, platform hazne vb. bir alanda bulunan parçaların (vida, kanca, tel, sabitleme aparatları vb.) mikser haznesi içerisine düşmesi	MB-1001 hazne içerisinde yabancı malzeme bulunması, beslenen yakıt kimyasalları ile kimyasal uyumsuzluğu bulunması sonucu mikser haznesi içerisinde hızlı yanma/patlama meydana gelmesi. Operasyon sırasında alanda bulunan çalışanların hayatını kaybetmesi.

Çizelge 4.17'de yer alan senaryolar incelendiğinde 3 adet senaryonun insan hatası, 2 adet senaryonun ise ekipman hatası kaynaklı olduğu görülmektedir. 1-2 ve 3-4 numaralı senaryo

çiftlerine ait başlatıcı olay kategorisi aynı, sebepler farklıdır. Ayrıca, her bir senaryo çifti ortak sonuca sahiptir.

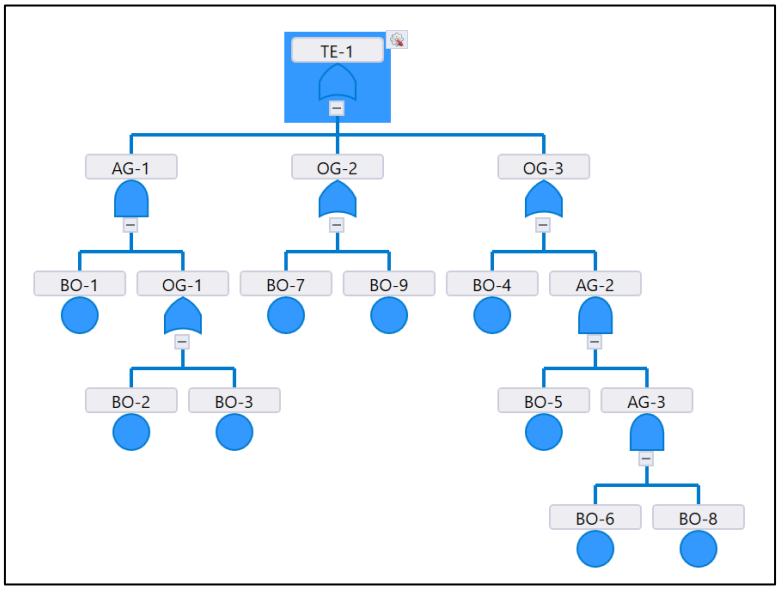
Kalitatif hata ağacının oluşturulması

Belirlenen 5 farklı senaryo için ilk olarak kalitatif hata ağacı oluşturulmuştur. Oluşturulan hata ağaçlarına ait kısaltmalar ve tepe olaylara ilişkin bilgiler Çizelge 4.18 içerisinde yer almaktadır.

Çizelge 4.18. Hata ağaçları kodu ve tepe olay bilgisi

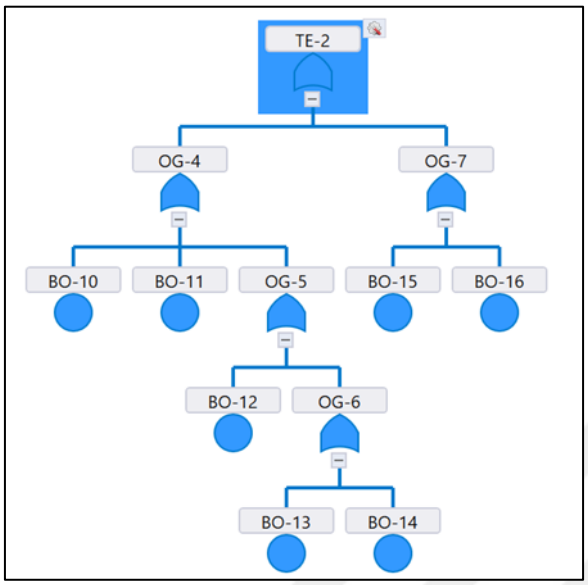
#	Tepe Olay
FTA-1	Kimyasalların TK-1001 içerisine hatalı sıra ile beslenmesi (TE-1)
FTA-2	Uygun şekilde temizliğin sağlanmaması (TE-2)
FTA-3	AV-1118 aktüatörlü vana hatası (hatalı kapalı kalma) (TE-3)
FTA-4	AV-1116 aktüatörlü vana hatası (hatalı kapalı kalma) (TE-4)
FTA-5	Mikser gövdesi içerisinde yabancı malzeme bulunması (TE-5)

Kalitatif hata ağacı oluşturulurken, tepe olayın meydana gelmesini veya oluşmasını sağlayacak olaylar "VE" ve "VEYA" kapıları kullanılarak tanımlanmıştır. Çizelge 4.18 temel alınarak oluşturulan hata ağaçları Şekil 4.8-Şekil 4.12'de belirtilmiştir. Hata ağaçlarında kullanılan tepe olay (TE), basit olay (BO) ve ve/veya kapılarına (AG/OG) ilişkin kısaltmalar ve açıklamalar ise Çizelge 4.19'de verilmiştir.



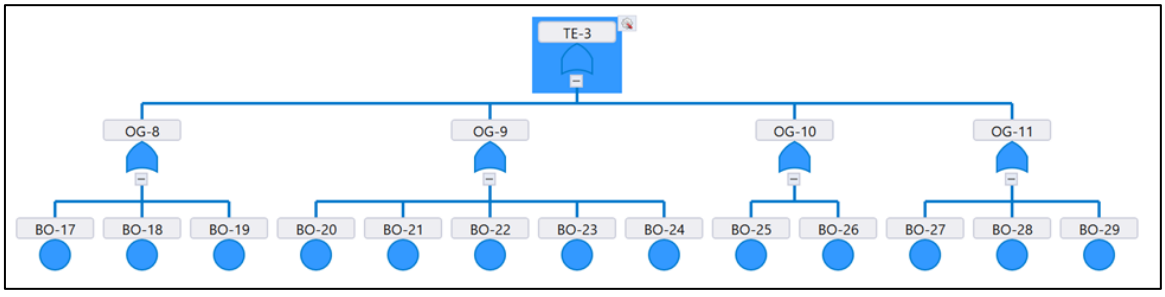
Şekil 4.8. (FTA-1) TK-1001 tankına kimyasalların hatalı sıra ile beslenmesi senaryosuna ilişkin hata ağacı

Kimyasalların hatalı sıralama ile TK-1001 numaralı hazne içerisine beslenmesi tepe olayının temelinde, potansiyel insan hataları ve iyi kurgulanmamış operasyon prosedürleri olduğu görülmüştür.

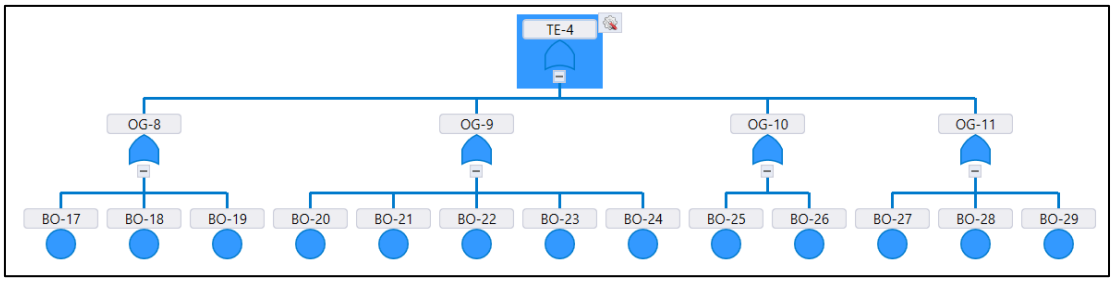


Şekil 4.9. (FTA-2) Uygun şekilde temizliğin sağlanmaması senaryosuna ilişkin hata ağacı

TK-1001 haznesi ve boru hatlarında uygun şekilde temizliğin sağlanamamasına ilişkin değerlendirilen tepe olayında, işe uygun olmayan tasarım, insan hatası ve insan hatasını destekleyecek diğer nedenler kök sebepler arasında yer almıştır.

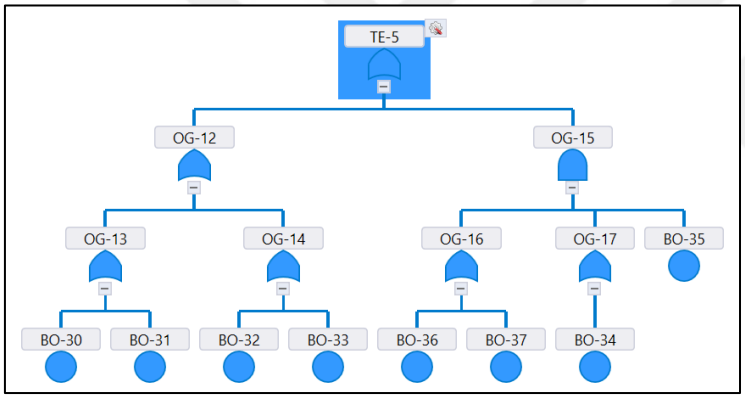


Şekil 4.10. (FTA-3) AV-1118 aktüatörlü vana hatası için oluşturulan hata ağacı



Şekil 4.11. (FTA-4) AV-1116 aktüatörlü vana hatası için oluşturulan hata ağacı

AV-1116 ve AV-1118 aktüatörlü vananın hatalı şekilde kapalı kalması tepe olayında, harici sızıntı, talep anında açılmama, regüle edilememe ve yapısal bozukluk potansiyel hata modları arasında yer almıştır. Korozyon, mekanik hata, malzeme hatası ve yapışma ise en sık görülen kök sebepler olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.12. (FTA-5) Mikser gövdesi içerisinde yabancı malzeme bulunması senaryosuna ilişkin hata ağacı

Mikser gövdesi içerisinde yabancı malzeme bulunabilmesinde çalışanların üzerinden veya tesis alanından kontaminasyonun neden olabileceği tespit edilmiştir. Tasarım hatası, kontrol eksikliği ve prosedürel eksikliklerin kök sebepler arasında yer aldığı görülmüştür.

Çizelge 4.19. Hata ağaçlarında kullanılan bileşenlere ilişkin bilgiler

#	Kod	Bileşen Türü	Açıklama
FTA-1	BO-1	Basit Olay	Operatörün kimyasal kaplarını hatalı etiketlemesi
	BO-2	Basit Olay	Operatörün üretime gelen tüm kimyasal kaplarını kontrol etmemesi
	BO-3	Basit Olay	Operatör tarafından kimyasal kontrol listesinde yer alan adımların atlanması
	BO-4	Basit Olay	Operatörün kap üzerindeki etiketi okumaması
	BO-5	Basit Olay	Fazla miktarda kimyasalın tartılması ve kaplara transfer edilmesi
	BO-6	Basit Olay	İşlemin kısa sürmesi için operatör tarafından dolumun tek seferde gerçekleştirilmesi
	BO-7	Basit Olay	Operatör tarafından uzun süre aynı işin yürütülmesi/iş körlüğü
	BO-8	Basit Olay	İşletme prosedürlerinde net tanımlama bulunmaması
	BO-9	Basit Olay	Eğitim veya kültür eksikliği
FTA-2	BO-10	Basit Olay	Temizlik amaçlı kullanılan kimyasallara ait kapların hatalı etiketlenmiş olması
	BO-11	Basit Olay	İşletme prosedürlerinde temizlik ile ilgili net tanımlama bulunmaması
	BO-12	Basit Olay	Temizlik operasyonlarının yoğun fiziksel güç gerektirmesi
	BO-13	Basit Olay	Uygun KKD kullanımının olmaması
	BO-14	Basit Olay	Havalandırma sisteminin yetersiz olması
	BO-15	Basit Olay	Temizliğe uygun aparat & ekipman bulunmaması
	BO-16	Basit Olay	Manuel temizliğe uygun olmayan, hatalı tasarım
FTA-3 & FTA-4	BO-17	Basit Olay	Sızıntı
	BO-18	Basit Olay	Gevşek Bağlantı
	BO-19	Basit Olay	Malzeme Hatası
	BO-20	Basit Olay	Kontrol Hatası
	BO-21	Basit Olay	Hatalı Sinyal
	BO-22	Basit Olay	Enstrüman Hatası
	BO-23	Basit Olay	Sinyal Gelmemesi
	BO-24	Basit Olay	Aşınma
	BO-25	Basit Olay	Mekanik Hata
	BO-26	Basit Olay	Yapışma
	BO-27	Basit Olay	Kırılma
	BO-28	Basit Olay	Korozyon
	BO-29	Basit Olay	Deformasyon
FTA-5	BO-30	Basit Olay	Üretim alanına giriş ve çıkışlarda yabancı malzeme kontrolünün bulunmaması
	BO-31	Basit Olay	İşletme prosedürlerinde net tanımlamaların bulunmaması
	BO-32	Basit Olay	Yoğun üretim temposu
	BO-33	Basit Olay	Üretim operasyonlarının yoğun fiziksel güç gerektirmesi
	BO-34	Basit Olay	Tasarım hatası
	BO-35	Basit Olay	Üretim operasyonlarının yoğun titreşim üretmesi
	BO-36	Basit Olay	Bakım & inşaat faaliyetleri sonrası alanda yabancı malzeme bırakılması
	BO-37	Basit Olay	Devreye alma öncesi saha kontrollerinin uygulanmaması

Yarı kantitatif hata ağacının oluşturulması

Hata ağacı çalışmalarındaki temel zorluklardan biri, değerlendirilen basit olaylara ilişkin sayısal verilerin elde edilmesidir. Tesis verileri, veritabanları veya basit olayların türüne göre özelleştirilmiş araçlar hata ağaçlarının kantitatif hale getirilmesi için kullanılmaktadır.

Boryczko ve arkadaşları (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada su besleme sistemindeki operatör faaliyetlerine ilişkin güvenilirliğin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda hata ağacı analizi yöntemi kullanılmış ve olasılık değerleri için CREAM (Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi) temel alınmıştır (Boryczko, Szpak, Żywiec, ve Tchórzewska-Cieślak, 2022). Bridges (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise tesisler tarafından tutulan geçmiş verilerin, insan hatasına yönelik olasılık değerlerinin hesaplanmasında kullanılabileceği belirtilmiştir. Prosedür içerisinde yer alan adım sayısı, prosedürün gün içerisindeki kullanım sayısı, tespit edilen hata sayısı, verinin tutulduğu yıl ve potansiyel bir kazaya sebep olabilecek tespit edilen hata sayısı verileri kullanılarak her bir operasyon adımındaki insan hatası olasılığı ve hata frekansı (olasılık/yıl) tespit edilebilmiştir (Bridges, 2010). Bello ve Colombari (1980) tarafından hazırlanan metot (TESEO- Tecnica Empirica Stima Errori Operatori), gerçekleştirilen aktivitenin türü, stres faktörü, operatörün niteliği, operasyon esnasındaki kaygı faktörü ve ergonomi başlıkları kullanılarak sayısal tahmin yapılmasını sağlamıştır. Hata olasılığı, sıralanan faktörlerin çarpımından elde edilmiştir (Bello ve Colombari, 1980).

Gerçekleştirilen çalışmada, insan hatası kaynaklı olaylara ilişkin olasılık değerlerinin hesaplanabilmesi için TESEO yöntemi kullanılmıştır. Hesaplamalara dâhil edilen basit olaylar ve kullanılan veriler Çizelge 4.20 içerisinde bulunmaktadır.

Çizelge 4.20. TESEO hesaplamalarında kullanılan veriler

Hata Ağacı Kodu	Basit Olay Kodu	Basit Olay Açıklaması	Operasyon Tipi	Stres Faktörü		Operatör Nitelikleri	Kaygı Faktörü	Ergonomi Faktörü	Hata Olasılığı
#	#	#	K1	K2 (Rutin)	K2 (Rutin Olmayan)	K3	K4	K5	/1 Üretim
FTA-1	BO-1	Operatörün kimyasal kaplarını hatalı etiketlemesi	0.001	0.5	-	0.5	1	1	2.50E-04
FTA-1	BO-2	Operatörün üretime gelen tüm kimyasal kaplarını kontrol etmemesi	0.001	0.5	-	0.5	1	1	2.50E-04
FTA-1	BO-3	Operatör tarafından kimyasal kontrol listesinde yer alan adımların atlanması	0.001	0.5	-	0.5	1	1	2.50E-04
FTA-1	BO-4	Operatörün kap üzerindeki etiketi okumaması	0.001	0.5	-	0.5	1	1	2.50E-04
FTA-1	BO-5	Fazla miktarda kimyasalın tartılması ve kaplara transfer edilmesi	0.001	0.5	-	0.5	1	1	2.50E-04

Çizelge 4.20. (devam) TESEO hesaplamalarında kullanılan veriler

Hata Ağacı Kodu	Basit Olay Kodu	Basit Olay Açıklaması	Operasyon Tipi	Stres Faktörü		Operatör Nitelikleri	Kaygı Faktörü	Ergonomi Faktörü	Hata Olasılığı
FTA-1	BO-6	İşlemin kısa sürmesi için operatör tarafından dolumun tek seferde gerçekleştirilmesi	0.001	0.5	-	0.5	1	1	2.50E-04
FTA-2	BO-10	Kimyasal kapların hatalı etiketlenmiş olması	0.001	0.5	-	0.5	1	1	2.50E-04
FTA-2	BO-13	Uygun KKD kullanımının olmaması	0.001	0.5	-	0.5	1	1	2.50E-04
FTA-5	BO-30	Üretim alanına giriş ve çıkışlarda yabancı malzeme kontrolünün bulunmaması	0.001	0.5	-	0.5	1	1	2.50E-04
FTA-5	BO-36	Bakım & inşaat faaliyetleri sonrası alanda yabancı malzeme bırakılması	0.1	-	0.1	0.5	1	1	5.00E-03
FTA-5	BO-37	Devreye alma öncesi saha kontrollerinin uygulanmaması	0.1	-	0.1	0.5	1	1	5.00E-03

Çizelge 4.20’ de yer alan veriler incelendiğinde, çalışma alanının elverişli olduğu, kaygı ve stres faktörünün düşük olduğu, operasyon tipinin ise değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Çalışılan örnek tesis verileri kullanılarak değerlendirilen basit olaylara ilişkin bilgiler Çizelge 4.21 içerisinde sunulmuştur. Örnek tesis verileri, tesisteki geçmiş olay araştırmaları ve proje ekibinin uzman görüşlerini kapsamaktadır.

Çizelge 4.21. Tesis verileri kullanılarak olasılık değerleri belirlenen basit olaylar

Hata Ağacı Kodu	Basit Olay Kodu	Basit Olay Açıklaması	Hata Olasılığı
#	#	#	/1 Üretim
FTA-1	BO-7	Operatör tarafından uzun süre aynı işin yürütülmesi	1.26E-05
	BO-8	İşletme prosedürlerinde net tanımlama bulunmaması	3.38E-07
	BO-9	Eğitim veya kültür eksikliği	1.00E-06
FTA-2	BO-11	İşletme prosedürlerinde temizlik ile ilgili net tanımlama bulunmaması	3.38E-07
	BO-12	Temizlik operasyonlarının yoğun fiziksel güç gerektirmesi	2.47E-05
	BO-14	Havalandırma sisteminin yetersiz olması	1.00E-05
	BO-15	Temizliğe uygun aparat & ekipman bulunmaması	1.00E-09
	BO-16	Manuel temizliğe uygun olmayan, hatalı tasarım	1.00E-09
FTA-5	BO-31	İşletme prosedürlerinde net tanımlamaların bulunmaması	3.38E-07
	BO-32	Yoğun üretim temposu	1.00E-04
	BO-33	Üretim operasyonlarının yoğun fiziksel güç gerektirmesi	2.47E-05
	BO-34	Tasarım hatası	1.00E-09
	BO-35	Üretim operasyonlarının yoğun titreşim üretmesi	1.00E-09

Çizelge 4.21'deki veriler değerlendirildiğinde, prosedürlerde yer alan yönergeler kaynaklı hataların, üretim yoğunluğu ve sistemin farklı bölümlerindeki tasarımlar kaynaklı oluşabilecek hatalara göre daha düşük olasılıkta meydana gelebileceği görülmüştür. Ekipman hatasını içeren basit olaylar için örnek tesisin bakım onarım verileri kullanılarak sayısallaştırma yapılmıştır. Tesiste ekipman hatalarına ilişkin veriler 18 yıl boyunca kayıt altına alınarak raporlanmıştır. Bu kapsamda risk değerlendirme çalışmasında yer alan aktüatörlü vana ve hata modlarına ilişkin veriler Çizelge 4.22'de verilmiştir.

Çizelge 4.22. Ekipman hata modları ve kayıt altına alınan hata verileri

Ekipman Adı	Hata Modları	Hata Sayısı	Ekipman Sayısı	Toplam Çalışma Süresi
#	#	#	#	(yıl)
	Sızıntı	220	100	18
	Gevşek Bağlantı	10	100	18
	Malzeme Hatası	10	100	18
	Kontrol Hatası	5	100	18
	Hatalı Sinyal	5	100	18
	Enstrüman Hatası	5	100	18
Aktüatörlü Vana	Sinyal Gelmemesi	5	100	18
	Aşınma	36	100	18
	Mekanik Hata	5	100	18
	Yapışma	5	100	18
	Kırılma	5	100	18
	Korozyon	20	100	18
	Deformasyon	5	100	18

Her bir hata moduna ilişkin hata olasılığının hesaplanması için, hata sayısı ve toplam çalışma süresinin yer aldığı Eş. 4.2 kullanılmıştır.

$$\text{Hata Olasılığı } (\lambda) = \frac{\text{Hata Sayısı}(k)}{\text{Ekipman Sayısı (x)} * Toplam\ Çalışma\ Süresi\ (T)} \qquad 4.2$$

Hesaplamalar sonucunda elde edilen hata olasılığı verileri, Çizelge 4.23 içerisinde sunulmuştur.

Çizelge 4.23. Ekipman hatasını içeren basit olaylar için kullanılan tesis verileri

Hata Ağacı Kodu #	Basit Olay Kodu #	Basit Olay Açıklaması #	Hata Olasılığı /yıl
FTA-3 & FTA-4	BO-17	Sızıntı	1.22E-01
	BO-18	Gevşek Bağlantı	5.70E-03
	BO-19	Malzeme Hatası	5.70E-03
	BO-20	Kontrol Hatası	2.80E-03
	BO-21	Hatalı Sinyal	2.80E-03
	BO-22	Enstrüman Hatası	2.80E-03
	BO-23	Sinyal Gelmemesi	2.80E-03
	BO-24	Aşınma	1.98E-02
	BO-25	Mekanik Hata	2.80E-03
	BO-26	Yapışma	2.80E-03
	BO-27	Kırılma	2.80E-03
	BO-28	Korozyon	1.13E-02
	BO-29	Deformasyon	2.80E-03

Çizelge 4.23'deki verilere göre sızıntı sonucu vananın hatalı kapalı kalması basit olaylar arasında en yüksek olasılığa sahip bulunmuştur. Aşınma ve korozyon ise diğer olasılığı yüksek basit olaylar arasında yer almıştır.

Çizelge 4.20-Çizelge 4.23'de yer alan veriler kullanılarak hata ağaçlarına işlenmiş ve tepe olaylara ilişkin olasılık ve frekans değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar Bölüm 2.4'de yer alan formüller ve aşağıda belirtilen işlem adımları ile yürütülmüştür. FTA-1 numaralı hata ağacı için yürütülen hesaplama aşağıda verilmiştir.

$$P_{AG-3} = P_{BO-6} \times P_{BO-8} = 2.50E-04 \times 3.38E-07 = 8.45E-11$$
$$P_{AG-2} = P_{BO-5} \times P_{AG-3} = 2.50E-04 \times 8.45E-11 = 2.11E-14$$
$$P_{OG-3} = P_{BO-4} + P_{AG-2} = 2.50E-04 + 2.11E-14 = 2.50E-04$$
$$P_{OG-2} = P_{BO-7} + P_{BO-9} = 1.26E-05 + 1.00E-06 = 1.35E-05$$
$$P_{OG-1} = P_{BO-2} + P_{BO-3} = 2.50E-04 + 2.50E-04 = 5.00E-04$$
$$P_{AG-1} = P_{BO-1} \times P_{OG-1} = 2.50E-04 \times 5.00E-04 = 1.25E-07$$
$$P_{TE-1} = P_{AG-1} + P_{OG-2} + PG_{OG-3} = 1.25E-07 + 1.36E-05 + 2.50E-04 = 2.64E-04$$

FTA-1 kodlu hata ağacındaki TE-1 kodlu tepe olay için 1 üretimde hata meydana gelme olasılığı 2.64E-04 olarak hesaplanmıştır. Tesisteki yakıt üretim operasyonu 1 günde maksimum 3 kez gerçekleştirilmekte ve tesis 1 yıl içerisinde 300 gün aktif olarak faaliyet göstermektedir. İlgili veriler kullanılarak kimyasalların hatalı sıra ile beslenmesine ilişkin

olasılık değeri 1 yıllık çalışma süresi için aşağıda belirtildiği şekilde 2.37E-01 olay/yıl olarak hesaplanmıştır.

$$P_{TE-1}\left(\frac{olay}{yıl}\right) = P_{TE-1}\left(\frac{olay}{\text{ü}retim}\right) \times \frac{300 g\text{ün}}{yıl} \times 3\frac{\text{ü}retim}{g\text{ün}} = 2.37E-01$$

$$P_{OG-6} = P_{BO-14} + P_{BO-13} = 1.00E-05 + 2.50E-04 = 2.60E-04$$

$$P_{OG-5} = P_{OG-6} + P_{BO-12} = 2.60E-04 + 2.47E-05 = 2.85E-04$$

$$P_{OG-4} = P_{BO-10} + P_{BO-11} + P_{OG-5} = 2.50E-04 + 3.38E-07 + 2.85E-04 = 5.35E-04$$

$$P_{OG-7} = P_{BO-15} + P_{BO-16} = 1.00E-09 + 1.00E-09 = 2.00E-09$$

$$P_{TE-2} = P_{OG-4} + P_{OG-7} = 5.35E-04 + 2.00E-09 = 5.35E-04$$

FTA-2 kodlu hata ağacındaki TE-2 kodlu tepe olay için 1 üretimde hata meydana gelme olasılığı 5.35E-04 olarak hesaplanmıştır. Tesisteki yakıt üretim operasyonu 1 günde maksimum 3 kez gerçekleştirilmekte ve tesis 1 yıl içerisinde 300 gün aktif olarak faaliyet göstermektedir. İlgili veriler kullanılarak kimyasalların hatalı sıra ile beslenmesine ilişkin olasılık değeri 1 yıllık çalışma süresi için aşağıda belirtildiği şekilde 4.82E-01 olay/yıl olarak hesaplanmıştır.

$$P_{TE-2}\left(\frac{olay}{yıl}\right) = P_{TE-2}\left(\frac{olay}{\text{ü}retim}\right) \times \frac{300 g\text{ün}}{yıl} \times 3\frac{\text{ü}retim}{g\text{ün}} = 4.82E-01$$

$$P_{OG-11} = P_{BO-27} + P_{BO-28} + P_{BO-29}$$

$$P_{OG-11} = 2.80E-03 + 1.13E-02 + 2.80E-03 = 1.69E-02$$

$$P_{OG-10} = P_{BO-25} + P_{BO-26} = 2.80E-03 + 2.80E-03 = 5.60E-03$$

$$P_{OG-09} = P_{BO-20} + P_{BO-21} + P_{BO-22} + P_{BO-23} + P_{BO-24}$$

$$P_{OG-09} = 2.80E-03 + 2.80E-03 + 2.80E-03 + 2.80E-03 + 1.98E-02$$

$$P_{OG-09} = 3.10E-02$$

$$P_{OG-08} = P_{BO-17} + P_{BO-18} + P_{BO-19} = 1.22E-01 + 5.70E-03 + 5.70E-03$$

$$P_{OG-08} = 1.33E-01$$

$$P_{TE-3} = P_{OG-8} + P_{OG-9} + P_{OG-10} + P_{OG-11}$$

$$P_{TE-3} = 1.33E-01 + 3.10E-02 + 5.60E-03 + 1.69E-02 = 1.87E-01$$

FTA-3 kodlu hata ağacındaki TE-3 kodlu tepe olay için 1 yıllık çalışma süresi için hata olasılığı 1.87E-01 olay/yıl olarak hesaplanmıştır.

$$P_{OG-11} = P_{BO-27} + P_{BO-28} + P_{BO-29}$$
$$P_{OG-11} = 2.80E-03 + 1.13E-02 + 2.80E-03 = 1.69E-02$$
$$P_{OG-10} = P_{BO-25} + P_{BO-26} = 2.80E-03 + 2.80E-03 = 5.60E-03$$
$$P_{OG-09} = P_{BO-20} + P_{BO-21} + P_{BO-22} + P_{BO-23} + P_{BO-24}$$
$$P_{OG-09} = 2.80E-03 + 2.80E-03 + 2.80E-03 + 2.80E-03 + 1.98E-02$$
$$P_{OG-09} = 3.10E-02$$
$$P_{OG-08} = P_{BO-17} + P_{BO-18} + P_{BO-19} = 1.22E-01 + 5.70E-03 + 5.70E-03$$
$$P_{OG-08} = 1.33E-01$$
$$P_{TE-4} = P_{OG-8} + P_{OG-9} + P_{OG-10} + P_{OG-11}$$
$$P_{TE-4} = 1.33E-01 + 3.10E-02 + 5.60E-03 + 1.69E-02 = 1.87E-01$$

FTA-4 kodlu hata ağacındaki TE-4 kodlu tepe olay için 1 yıllık çalışma süresi için hata olasılığı 1.87E-01 olay/yıl olarak hesaplanmıştır.

$$P_{OG-17} = P_{BO-34} = 1.00E-09$$
$$P_{OG-16} = P_{BO-36} + P_{BO-37} = 5.00E-03 + 5.00E-03 = 1.00E-02$$
$$P_{OG-15} = P_{OG-16} + P_{OG-17} + P_{BO-35} = 1.00E-02 + 1.00E-09 + 1.00E-09$$
$$P_{OG-15} = 1.00E-20$$
$$P_{OG-14} = P_{BO-32} + P_{BO-33} = 1.00E-04 + 2.47E-05 = 1.25E-04$$
$$P_{OG-13} = P_{BO-30} + P_{BO-31} = 2.50E-04 + 3.38E-07 = 2.50E-04$$
$$P_{OG-12} = P_{OG-13} + P_{OG-14} = 2.50E-04 + 1.25E-04 = 3.75E-04$$
$$P_{TE-5} = P_{OG-12} + P_{OG-15} = 3.75E-04 + 1.00E-20 = 3.75E-04$$

FTA-5 kodlu hata ağacındaki TE-5 kodlu tepe olay için 1 üretimde hata meydana gelme olasılığı 3.75E-04 olarak hesaplanmıştır. Tesisteki yakıt üretim operasyonu 1 günde maksimum 3 kez gerçekleştirilmekte ve tesis 1 yıl içerisinde 300 gün aktif olarak faaliyet göstermektedir. İlgili veriler kullanılarak kimyasalların hatalı sıra ile beslenmesine ilişkin olasılık değeri 1 yıllık çalışma süresi için aşağıda belirtildiği şekilde 3.38E-01 olay/yıl olarak hesaplanmıştır.

$$P_{TE-5}\left(\frac{olay}{yıl}\right) = P_{TE-5}\left(\frac{olay}{\text{üretim}}\right) \times \frac{300 gün}{yıl} \times 3\frac{\text{üretim}}{gün} = 3.38E-01$$

Tüm hata ağaçlarına ilişkin olasılık değerlerine ait özet bilgiler Çizelge 4.24'de sunulmuştur.

Çizelge 4.24. Hata ağaçlarındaki kapılar ve tepe olaylarına ilişkin hesaplanan olasılık değerleri

FTA Kodu	Bileşen Kodu	1 Üretimdeki Hata Olasılığı	1 Yıldaki Hata Olasılığı
FTA-1	TE-1	2.64E-04	2.37E-01
	AG-1	1.25E-07	-
	OG-1	5.00E-04	-
	OG-2	1.36E-05	-
	OG-3	2.50E-04	-
	AG-2	2.11E-14	-
	AG-3	8.45E-11	-
FTA-2	TE-2	5.35E-04	4.82E-01
	OG-4	5.35E-04	-
	OG-5	2.85E-04	-
	OG-6	2.60E-04	-
	OG-7	2.00E-09	-
FTA-3	TE-3	-	1.87E-01
	OG-8	-	1.33E-01
	OG-9	-	3.10E-02
	OG-10	-	5.60E-03
	OG-11	-	1.69E-02
FTA-4	TE-4	-	1.87E-01
	OG-8	-	1.33E-01
	OG-9	-	3.10E-02
	OG-10	-	5.60E-03
	OG-11	-	1.69E-02
FTA-5	TE-5	3.75E-04	3.38E-01
	OG-12	3.75E-04	-
	OG-13	2.50E-04	-
	OG-14	1.25E-04	-
	OG-15	1.00E-20	-
	OG-16	1.00E-02	-
	OG-17	1.00E-09	-

Çizelge 4.24 incelendiğinde, FTA-1, FTA-2 ve FTA-5 numaralı senaryolardaki başlatıcı olay frekanslarının, HAZOP çalışmalarında kullanılan ve literatür ile desteklenen değerden (1.00E-01 olay/yıl) (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2011) daha büyük olduğu ve özellikle insan hatası kaynaklı senaryoların daha yüksek sıklıkta risk barındırdığı tespit edilmiştir. FTA-3 ve FTA-4 numaralı senaryolarda ise HAZOP çalışmasındaki başlatıcı olay frekansı literatür (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2011) ile desteklenen aktüatörlü vana hatası için hesaplanan değer risk değerlendirme çalışmasındaki referans alınan değerden daha büyük ve daha yüksek olasılıkta elde edilmiştir.

4.3. Katı Yakıt Mikserlerinde Güvenli Tasarım

Katı yakıt mikserlerinin ve bağlı sistemlerin tasarımlarında temel olarak farklı kompozisyonlardaki yakıt bileşenleri için üretimi gerçekleştirebilmesi, verimli olması ve prosesin ve çalışanların güvenliğini tehdit etmemesi beklenmektedir. Bu bölümde seçilen örnek tesisteki yakıt mikseri ve alt sistemleri için operasyonel ve proses güvenliği kapsamındaki isterleri karşılayacak potansiyel tasarım çözümleri değerlendirilmiştir.

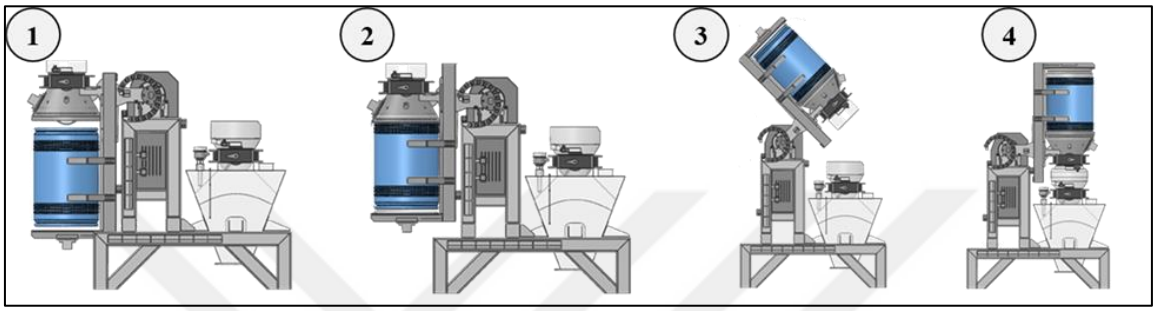
Hammadde besleme sistemi

Hammadde besleme sisteminin tasarımında, yakıt formülasyonunda kullanılacak kimyasallara ilişkin özellikler, kimyasalların temin ve elleçlenme biçimi, kimyasal besleme adımları ve bir kafile üretimdeki mikser kapasitesi en önemli parametreler arasında yer almaktadır.

Sistemde kullanılan kimyasalların katı ve sıvı fazlarda bulunması ve kontrolsüz şekilde bir araya gelmeleri sonucu potansiyel tehlikelere sahip olmaları sebebi ile uygun şekilde beslemeyi sağlayacak özelleştirilmiş ekipman ve enstrümanlara ihtiyaç bulunmaktadır. Alüminyumun (AL) 500 mikron altındaki tozları toz patlayıcı özellik göstermektedir. Öncelikle toz yayılımının kapalı bir sistem tasarımı ile engellenmesi, bu gereklilik sağlanamıyor veya toz oluşumu tamamen bertaraf edilemiyor ise lokal toz emişinin sağlanması gerekmektedir. Enerjik malzemelerin (AP, HMX, NG, BTTN) sahip olduğu darbe, sürtünme, kendiliğinden tutuşma ve ESD hassasiyeti, elleçleme ve transfer operasyonları sırasında proses kaynaklı maruz kalacakları enerjilerin ilgili hassasiyet değerlerinin altında olmasını gerektirmektedir. Yakıt tasarımı kaynaklı besleme hızlarının istenilen değer aralığında tutulabilmesi için ise kontrol edilebilir/düzenlenebilir tasarım önemlidir.

Varil, IBC veya Bigbag ile kimyasalların transfer edildiği/elleçlendiği proseslerde özel mekanik sistemler tasarlanabilir, üreticiler tarafından sağlanan hazır sistemler kullanılabilir veya her ikisi de kullanılarak hibrit bir tasarım değerlendirilebilir. Resim 4.1 (Bulk Handling Equipment, 2023) ve Resim 4.2 (Dust-Tight Drum Dumper Rated for Hazardous Area, 2023) içerisinde farklı üreticilere ait varil boşaltım sistemleri bulunmaktadır. Şekildeki 1 numaralı adımda sistem otomatik olarak varili hazneye yaklaştırmakta ve kapağı

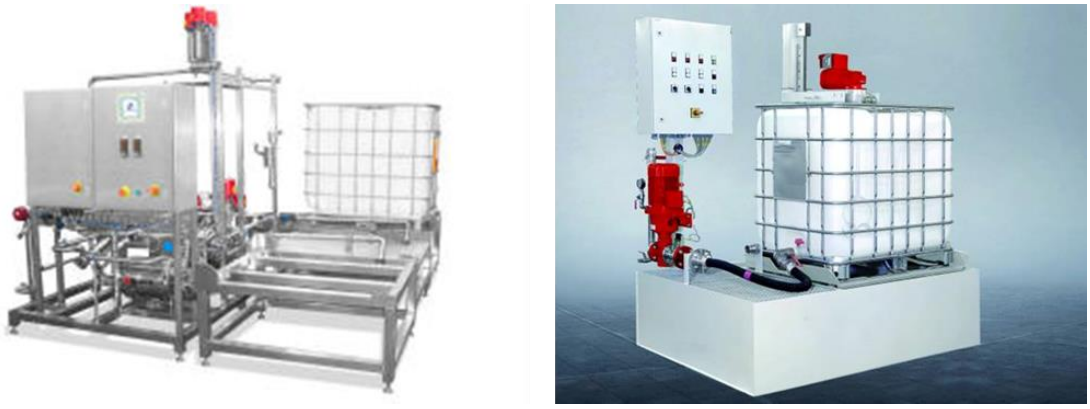
sökülmektedir, 2 numaralı adımda varil mekanik düzenek yardımı ile üst kısmı sızdırmaz olacak şekilde birleşmektedir, 3 numaralı adımda varil cazibe ile akış sağlaması amacı ile boşaltımın yapılacağı hazneye devrilmektedir, 4 numaralı adımda ise varil üst kısmını tutan mekanik sistem vana yapısına sahip mekanik aksam ile sızdırmaz bir yapı oluşturarak varil içerisindeki malzemenin istenilen şekilde hazneye transferi sağlanmaktadır. IBC boşaltım sistemlerine ilişkin sistemler ise Resim 4.3'de (Keil-Anlagenbau, 2023) gösterilmiştir.



Resim 4.1. Varil boşaltım sistemi (Bulk Handling Equipment, 2023)



Resim 4.2. (sol) Tehlike sınıfına sahip bölgelerde kullanılabilir ve (sağ) çoklu varil boşaltım sistemi (Dust-Tight Drum Dumper Rated for Hazardous Area, 2023)



Resim 4.3. Farklı üreticilere ait IBC boşaltım sistemleri (Keil-Anlagenbau, 2023)

IEC EN 60079 standardı alevlenebilir gaz/buhar veya patlayıcı/yanıcı tozların bulunduğu alanların sınıflandırılmasını, ilgili alanlarda kullanılabilecek ekipmanların asgari özelliklerinin belirlenmesini ve potansiyel tehlikelere karşı risklerin değerlendirilerek önlemlerin alınmasını kapsamaktadır. Belirtilen sistemler IEC EN 60079 standardı kapsamındaki tehlikeli alanlarda çalışmaya ve farklı konfigürasyonlarda sisteme uygun şekilde düzenlenmeye imkân sağlamaktadır. Temel olarak kimyasalların bulunduğu kaptan uzaktan kontrolü sağlanabilen mekanik bir sistem ile boru hattına veya boşaltılacağı hazneye bağlantı sağlanabilmektedir.

Hammadde besleme sistemi için yürütülen risk analizlerinde belirlenen potansiyel tehlikelerin bertarafına ilişkin, güvenli tasarım kapsamında girdiler sağlanmıştır. İlişkili HAZOP senaryoları ve güvenli tasarım girdileri Çizelge 4.25 içerisinde belirtilmiştir.

Çizelge 4.25. Hammadde besleme sistemi ve güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Sıralama Hatalı	Çok Yüksek	TK-1001 kimyasal besleme haznesine SOP içerisinde belirtilen sıralamanın dışında malzeme eklenmesi	1. Dolum operasyonlarının otomasyon ve reçete sistemi ile iştiraklendirilmesi. Operatörün temel fonksiyonunun reçete akışı ve alarm takibi olarak tanımlanması. 2. Boşaltım sistemlerinin bağımsız proses kontrol döngülerinden beslenmesi ve kütle takibi (loadcell vb.) ile kontrolün sağlanması. 3. Güvenlik enstrümanlı sistem oluşturulması ve dolum hatlarında akış varlığının kontrol edilmesi. Reçete adımında akış beklenen hat dışında akış varlığı görülmesi halinde güvenlik enstrümanlı sistem (SIS – Safety Instrumented System) ile iştirakli shutoff vanaların kapatılması.
Akış Hızlı	Yüksek	M-1002 titreşimli elek motoru hatası (yüksek frekansta çalışma)	1. Dolum operasyonlarının otomasyon ve reçete sistemi ile iştiraklendirilmesi. Operatörün temel fonksiyonunun reçete akışı ve alarm takibi olarak tanımlanması. 2. Boşaltım sistemlerinin bağımsız proses kontrol döngülerinden beslenmesi ve kütle takibi (yük sensörü (loadcell) vb.) ile kontrolün sağlanması. 3. Boşaltım sistemlerinde kullanılacak loadceller için aktarım hızına bağlı olarak limit değerlerin (düşük (L) / yüksek (H)) set edilmesi ve alt-üst aşım durumlarında alarm alınarak boşaltma operasyonuna bağlı hareketli ekipmanların ve mikser motorunun trip edilmesi. 4. Güvenlik enstrümanlı sistemde sağlanan akış kontrolü için limit değerlerin (düşük düşük (LL) / yüksek yüksek (HH)) belirlenmesi ve aşım durumlarında alarm alınarak sistemin trip edilmesi.
Akış Farklı	Yüksek	Esnek hortumların yer aldığı besleme hattında sızıntı/kaçak meydana gelmesi	1. Hammadde besleme sistemlerinde sabit hat kullanımı, sabit hat geçişlerinin mümkün olmadığı noktalarda ise kuru bağlantı (dry-break) bağlantıya sahip esnek hortumların kullanılması 2. Mikser haznesi üzerine temel proses kontrol sistemi ile iştirakli yük sensörü (loadcell) konumlandırılması. Boşaltım yapılan tanktaki yük sensöründen (loadcelden) eksilen miktarın belirlenen süre içerisinde mikser yük sensöründe (loadcellinde) artış sağlamaması durumunda alarm verilmesi ve besleme sistemindeki hareketli ekipmanların trip etmesi. 3. Otomasyon sistemi içerisine sayaç ile operasyon sayısı ve/veya süre tanımlanarak esnek hortumlar için periyodik kontrollerin gerçekleştirilmesinin sağlanması. 4. Üretim operasyonları öncesinde kontrol listesi (checklist) ile esnek hortumların ve bağlantılarının kontrol edilmesi.
Kontaminasyon Var	Yüksek	Hammaddeler içerisinde yabancı malzeme bulunması	Çalışanlar tarafından elleçlenme gereksinimi bulunmayan hammadde kapalı boşaltım sistemi kullanılması Mikser ve hammadde boşaltım sistemi arasında yabancı malzeme olasılığının azaltması için elek kullanılması

Çizelge 4.25. (devam) Hammadde besleme sistemi ve güvenli tasarım önerileri

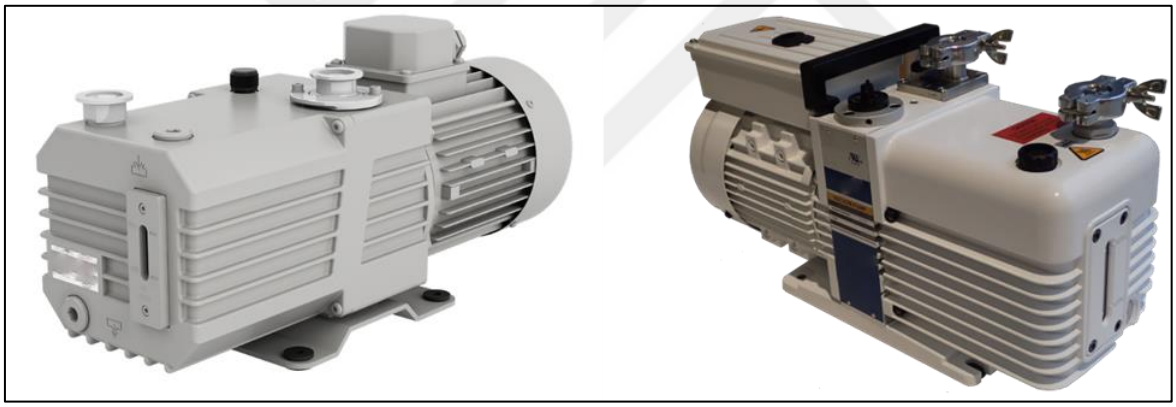
Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Kontaminasyon Var	Çok Yüksek	Besleme adımları arasında tank ve boru hatlarında temizliğin sağlanmaması & eksik temizlik yapılması	Dolum operasyonlarının otomasyon ve reçete sistemi ile iştiraklendirilmesi. Operatörün temel fonksiyonunun reçete akışı ve alarm takibi olarak tanımlanması. Reçete sisteminin tamamlanma öncesi son adımının "temizlik" için tanımlanması. Temizlik adımı için tanımlı vana & enstrüman veya ekipmanların belirlenen adımı gerçekleştirmemesi durumunda, sistemin yeni bir reçeteye geçişinin temel proses kontrol sisteminde tanımlanacak bir interlok ile engellenmesi. Temizlik operasyonunun boşaltım sistemi ve bağlı hatlar için uzaktan kontrollü gerçekleştirilebileceği sistemin entegre edilmesi.
Kontaminasyon Var	Yüksek	Temizlik operasyonu sırasında kullanılan aparatın veya bir parçasının mikser gövdesine düşmesi	Dolum operasyonlarının otomasyon ve reçete sistemi ile iştiraklendirilmesi. Operatörün temel fonksiyonunun reçete akışı ve alarm takibi olarak tanımlanması. Reçete sisteminin tamamlanma öncesi son adımının "temizlik" için tanımlanması. Temizlik adımı için tanımlı vana & enstrüman veya ekipmanların belirlenen adımı gerçekleştirmemesi durumunda sistemin yeni bir reçeteye geçişinin temel proses kontrol sisteminde tanımlanacak bir interlok ile engellenmesi. Temizlik operasyonunun boşaltım sistemi ve bağlı hatlar için uzaktan kontrollü gerçekleştirilebileceği sistemin entegre edilmesi.
Statik Elektrik Var	Yüksek	Esnek hortum ile sağlanan besleme hatlarında statik elektrik ile yüklenme meydana gelmesi	Tesisteki tüm ekipmanların, boru hatlarının, enstrümanların ve bağlı oldukları sabit sistemlerin topraklanması ve eş potansiyellenmesi. Kimyasalların temas ettiği hatların ve bağlantı aparatlarına ilişkin malzemelerin iletken özellikte seçilmesi. Kimyasalların elektriksel özellikleri göz önünde bulundurularak (iletkenlik değeri, rahatlama süresi, yük kapasitesi vb.) transferi sağlanan varil ve/veya IBC'lerin biriken statik yüklerini atabilmesi için operasyon öncesi bekletilmesi gereken sürenin tanımlanması. Mikser ve bağlı tüm bileşenlerdeki eş potansiyel ve toprak bağlantılarının anlık izlenmesini sağlayacak takip sisteminin kurulması. Belirlenecek 2 farklı set değeri ile öncelikle alarm verilmesi daha sonra ise tüm sistemin trip edilerek gücün kesilmesi.

Tablodaki sapma ve HAZOP senaryosu sütunları Bölüm 4.2.1 Tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP) çalışması altında değerlendirilen yüksek ve çok yüksek riskli senaryolara ait bilgileri, güvenli tasarım önerileri sütununda ise ilgili senaryo için sistemde sağlanabilecek potansiyel önlemler yer almaktadır.

Vakum sistemi

Vakum sistemi temel olarak karışımı gerçekleştirilen yakıt içerisindeki boşluklu yapının bertaraf edilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Vakum sisteminin kapasitesinin, vakum süresinin ve kullanılan hammaddelerin buharına ve ince yapılı tozlarına karşı uygun olması gerekmektedir.

Rutin operasyon koşulları altında hammaddelerin vakum sistemine doğru hareket etmesi beklenmemektedir. Ancak alevlenir buhar/toz patlayıcı ve enerjik malzemelerin hassasiyeti kaynaklı potansiyel tehlikelerin bertaraf edilebilmesi için vakum pompası ile mikser gövdesi arasında konumlandırılacak yapı ile kimyasalların vakum pompasına girişinin engellenmesi gerekmektedir. Resim 4.4'de (DVP Pumps, 2023) (Deltima, 2023) farklı üreticilere ait vakum pompaları bulunmaktadır.



Resim 4.4. Alevlenir buhar atmosferine uygun vakum pompası (sol) (DVP Pumps, 2023) ,enerjik malzemeler ile kullanıma uygun vakum pompası (sağ) (Deltima, 2023)

Vakum sisteminde gerçekleştirilen risk analizlerinde yer alan potansiyel tehlikelerin bertarafı için HAZOP senaryoları ve güvenli tasarım girdileri Çizelge 4.26 içerisinde belirtilmiştir.

Çizelge 4.26. Vakum sistemi ve güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Basınç Düşük	Yüksek	Vakuma alma işleminin kademeli gerçekleştirilmemesi (ani şekilde sistemin mutlak vakuma alınması)	Vakum operasyonlarının reçete sistemi ile iştiraklendirilmesi, rutin operasyonlarda gerçekleştirilen reçete takiplerinde sistemin belirlediği operasyon adımı ve koşulları dışında manuel vakum operasyonlarının interlok ile engellenmesi. Vakum sistemindeki motor & redüktör üzerinde devir bekçisi konumlandırılması, set edilen vakum değerine karşılık gelen rpm değerinin aşılması durumunda alarm verilerek vakum sisteminin trip edilmesi. Mikser karıştırıcı haznesi üzerine karışım miktarları ve vortex kaynaklı yükselme payı göz önünde bulundurularak sviç konumlandırılması. Mikser haznesi içerisindeki hammaddelerin belirlenen yüksekliğe ulaşması durumunda mikser sisteminin trip etmesi. Mikser karıştırıcı motoru ve hazne arasında kalan dişli yapının sızdırmazlık elemanlarının kendinden güvenli bir yapı sağlayacak şekilde seçilmesi.
Akış Farklı	Yüksek	Toz besleme adımında hatalı şekilde vakum sisteminin devreye alınması	Manuel veya reçete takipli tüm operasyonlarda hammadde besleme operasyonu esnasında interlok tanımlanarak vakum sisteminin kapalı kalmasının sağlanması. Vakum pompalarına tozların ve kimyasal buharının geçişinin engellenmesi için hat üzerinde filtre grubu konumlandırılması; kimyasal interaksiyon kaynaklı risklerin bertaraf edilmesi için sıvı tipli filtrenin tercih edilmesi; filtrelerdeki birikimin tespit edilebilmesi için hat üzerinde fark basınç sensörü konumlandırılması ve temel proses kontrol sistemi ile ilişkilendirilerek belirlenen set değerinin üzerinde veri okuması durumunda alarm alınması. Üretim operasyonları öncesinde checklist ile filtrelerin kontrol edilmesi. Vakum hatlarındaki boru ve bağlantı elemanlarının antistatik&iletken özellikte seçilmesi.

Çizelge 4.26. (devam) Vakum sistemi ve güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Kontaminasyon Var	Yüksek	Vakum filtresinde AL ve AP tozlarının birikmesi	Manuel veya reçete takipli tüm operasyonlarda hammadde besleme operasyonu esnasında interlok tanımlanarak vakum sisteminin kapalı kalmasının sağlanması. Vakum pompalarına tozların ve kimyasal buharının geçişinin engellenmesi için hat üzerinde filtre grubu konumlandırılması, kimyasal interaksiyon kaynaklı risklerin bertaraf edilmesi için sıvı tipli filtrenin tercih edilmesi, filtrelerdeki birikimin tespit edilebilmesi için hat üzerinde fark basınç sensörü konumlandırılması ve temel proses kontrol sistemi ile ilişkilendirilerek belirlenen set değerinin üzerinde veri okuması durumunda alarm alınması. Üretim operasyonları öncesinde checklist ile filtrelerin kontrol edilmesi. Vakum hatlarındaki boru ve bağlantı elemanlarının antistatik&iletken özellikte seçilmesi.
Statik Elektrik Var	Yüksek	İletken olmayan & topraklama bulunmayan vakum hattı kullanımı	Vakum hatlarındaki boru ve bağlantı elemanlarının antistatik&iletken özellikte seçilmesi. Mikser ve bağlı tüm bileşenlerdeki eş potansiyel ve toprak bağlantılarının anlık izlenmesini sağlayacak takip sisteminin kurulması. Belirlenecek 2 farklı set değeri ile öncelikle alarm verilmesi daha sonra ise tüm sistemin trip edilerek gücün kesilmesi.

Tablodaki sapma ve HAZOP senaryosu sütunları Bölüm 4.2.1 Tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP) çalışması altında değerlendirilen yüksek ve çok yüksek riski senaryolara ait bilgileri, güvenli tasarım önerileri sütununda ise ilgili senaryo için vakum sisteminde sağlanabilecek potansiyel önlemler yer almaktadır.

Sıcaklık kontrol sistemi

Sıcaklık kontrol sistemi karışım operasyonu esnasında meydana gelen reaksiyonların istenilen şartlar altında gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Sıcaklık kontrol sisteminde meydana gelebilecek hatalar, üretimi gerçekleştirilen yakıtın viskozitesini ve kalitesini etkilemektedir. Temel olarak sıcaklık kontrol sistemine ait kapasitenin kullanılan hammaddelerin dekompozisyon ve kendiliğinden tutuşma sıcaklığı gözetilerek belirlenmesi

ve kendiliğinden güvenli bir sistem veya aktif tasarım önlemleri ile güvenliği arttırılmış sistem tasarımının sağlanması gerekmektedir.

Sıcaklık kontrol sistemindeki potansiyel hataların değerlendirildiği HAZOP senaryoları ve güvenli tasarım önerileri Çizelge 4.27 içerisinde belirtilmiştir.

Çizelge 4.27. Sıcaklık kontrol sistemi ve güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Yüksek Sıcaklık	Orta	TT-1102 sıcaklık transmitteri hatası (hatalı düşük okuma)	Sıcaklık kontrol sisteminin maksimum kapasitesinin hammaddelere ilişkin dekompozisyon ve kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları göz önünde bulundurularak belirlenmesi. Sıcaklık kontrol sistemi ve mikser haznesindeki sıcaklık ölçümlerinin, bağımsız proses kontrol döngülerinden beslenmesi ve operasyon süresince sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması, belirlenen fark değer için alt veya üst limitlerin aşılması durumunda alarm verilerek prosesin trip edilmesi.
Düşük Sıcaklık	Orta	TT-1102 sıcaklık transmitteri hatası (hatalı yüksek okuma)	Sıcaklık kontrol sisteminin maksimum kapasitesinin hammaddelere ilişkin dekompozisyon ve kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları göz önünde bulundurularak belirlenmesi. Sıcaklık kontrol sistemi ve mikser haznesindeki sıcaklık ölçümlerinin, bağımsız proses kontrol döngülerinden beslenmesi ve operasyon süresince sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması, belirlenen fark değer için alt veya üst limitlerin aşılması durumunda alarm verilerek prosesin trip edilmesi. Mikser motoru için güvenli akım ve mekanik yük değerinin belirlenerek temel proses kontrol sistemi ile iştiraklendirilmesi, belirlenen değerlerin aşılması durumunda ekipmanın korunması amacı ile motorun trip edilmesi. Mikser motoru üzerinden sıcaklık ölçümünün güvenlik enstrümanlı sistem ile iştiraklendirilmesi, sıcaklığın limit değerleri aşması durumunda sistemin bağımsız bir röle ile trip edilmesi.

Çizelge 4.27. (devam) Sıcaklık kontrol sistemi ve güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Düşük Sıcaklık	Orta	P-1004 pompa hatası	Sıcaklık kontrol sisteminin maksimum kapasitesinin hammaddelere ilişkin dekompozisyon ve kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları göz önünde bulundurularak belirlenmesi. Sıcaklık kontrol sistemi ve mikser haznesindeki sıcaklık ölçümlerinin bağımsız proses kontrol döngülerinden beslenmesi ve operasyon süresince sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması, belirlenen fark değer için alt veya üst limitlerin aşılması durumunda alarm verilerek prosesin trip edilmesi. Mikser motoru için güvenli akım ve mekanik yük değerinin belirlenerek temel proses kontrol sistemi ile iştiraklendirilmesi, belirlenen değerlerin aşılması durumunda ekipmanın korunması amacı ile motorun trip edilmesi. Mikser motoru üzerinden sıcaklık ölçümünün güvenlik enstrümanlı sistem ile iştiraklendirilmesi, sıcaklığın limit değerleri aşması durumunda sistemin bağımsız bir röle ile trip edilmesi.
Akış Yok	Orta	P-1004 pompa hatası	Sıcaklık kontrol sisteminin maksimum kapasitesinin hammaddelere ilişkin dekompozisyon ve kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları göz önünde bulundurularak belirlenmesi. Sıcaklık kontrol sistemi ve mikser haznesindeki sıcaklık ölçümlerinin bağımsız proses kontrol döngülerinden beslenmesi ve operasyon süresince sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması, belirlenen fark değer için alt veya üst limitlerin aşılması durumunda alarm verilerek prosesin trip edilmesi. Mikser motoru için güvenli akım ve mekanik yük değerinin belirlenerek temel proses kontrol sistemi ile iştiraklendirilmesi, belirlenen değerlerin aşılması durumunda ekipmanın korunması amacı ile motorun trip edilmesi. Mikser motoru üzerinden sıcaklık ölçümünün güvenlik enstrümanlı sistem ile iştiraklendirilmesi, sıcaklığın limit değerleri aşması durumunda sistemin bağımsız bir röle ile trip edilmesi. Sıcaklık kontrol sisteminde utility hattı ve proses hatlarında akış varlığını tespit edebilecek akış kontrol sensörü konumlandırılması. Sıcaklık kontrol sistemi devreye alındığında sensörlerin akış okumaması durumunda alarm verilerek prosesin trip edilmesi.

Gerçekleştirilen HAZOP çalışmasında sıcaklık kontrol sistemine ilişkin yüksek veya çok yüksek riskli senaryolar bulunmadığından orta seviye riskli senaryolar için güvenli tasarım önerileri gerçekleştirilmiştir. Tablodaki sapma ve HAZOP senaryosu sütunları Bölüm 4.2.1 Tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP) çalışması altındaki senaryolara ait bilgileri, güvenli tasarım önerileri sütununda ise ilgili senaryo için sıcaklık kontrol sisteminde sağlanabilecek potansiyel önlemler yer almaktadır.

Hidrolik kontrol sistemi

Hidrolik kontrol sistemi mikser haznesinin operasyon süresince yukarı ve aşağı yönlü hareketini sağlama amacı ile kullanılmaktadır. Yakıt karışımı esnasında hidrolik sistemde meydana gelebilecek hatalar veya talep edildiği anda sistemin aşağı/yukarı yönlü hareketinin sağlanamaması potansiyel riskler arasında bulunmaktadır. Hidrolik kontrol sisteminin en önemli bileşenleri arasında tahrik sistemi ve tahriki sağlayan yağ bulunmaktadır. Belirtilen bileşenlerin aktif tasarım önlemleri ile güvenilirliğinin sağlanması gerekmektedir.

Hidrolik kontrol sistemindeki potansiyel hataların değerlendirildiği HAZOP senaryoları ve güvenli tasarım önerileri Çizelge 4.28 içerisinde belirtilmiştir.

Çizelge 4.28. Hidrolik kontrol sistemi ve güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Seviye Düşük	Yüksek	LT-1123 yağ seviyesinin hatalı yüksek göstermesi	Mikser haznesinin aşağı/yukarı yönlü hareketini sağ ve sol pistonlar üzerinden sağlayan tahrik sisteminin mekanik olarak tekil hale getirilmesi. Mikser haznesi tahrik sisteminde kleransın temel proses kontrol sistemi ile takip edilmesi ve limit değerlerin aşılması durumunda alarm verilerek sistemin trip edilmesi. Hidrolik sistem üzerinden basınç ölçümünün gerçekleştirilmesi, sızıntı & kaçak senaryolarında alarm verilerek sistemin trip edilmesi.
Akış Yok	Çok Yüksek	AV-1118 veya AV-1116 aktüatörlü vana hatası (hatalı kapalı kalma)	Mikser haznesinin aşağı/yukarı yönlü hareketini sağ ve sol pistonlar üzerinden sağlayan tahrik sisteminin mekanik olarak tekil hale getirilmesi. Mikser haznesi tahrik sisteminde kleransın temel proses kontrol sistemi ile takip edilmesi ve limit değerlerin aşılması durumunda alarm verilerek sistemin trip edilmesi. Hidrolik sistem üzerinden basınç ölçümünün gerçekleştirilmesi, sızıntı & kaçak senaryolarında alarm verilerek sistemin trip edilmesi.

Çizelge 4.28. (devam) Hidrolik kontrol sistemi ve güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Akış Farklı	Çok Yüksek	AV-1118 veya AV-1116 aktüatörlü vana hatası (hatalı açılma/sızdırma)	Mikser haznesinin aşağı/yukarı yönlü hareketini sağ ve sol pistonlar üzerinden sağlayan tahrik sisteminin mekanik olarak tekil hale getirilmesi. Mikser haznesi tahrik sisteminde kleransın temel proses kontrol sistemi ile takip edilmesi ve limit değerlerin aşılması durumunda alarm verilerek sistemin trip edilmesi. Hidrolik sistem üzerinden basınç ölçümünün gerçekleştirilmesi, sızıntı & kaçak senaryolarında alarm verilerek sistemin trip edilmesi. Hidrolik sistem yağ tankı üzerinde konumlandırılmış seviye transmitterinin yağ miktarında azalma tespit ettiği durumlarda alarm verilmesi ve sistemin trip edilmesi.

Gerçekleştirilen HAZOP çalışmasında hidrolik kontrol sistemine ilişkin yüksek ve çok yüksek riskli senaryolar bulunmaktadır. Tablodaki sapma ve HAZOP senaryosu sütunları Bölüm 4.2.1 Tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP) çalışması altındaki senaryolara ait bilgileri, güvenli tasarım önerileri sütununda ise ilgili senaryo için hidrolik kontrol sisteminde sağlanabilecek potansiyel önlemler yer almaktadır.

Mikser gövdesi ve karıştırma sistemi

Mikser gövdesi temel olarak yakıt karışımları için gerekli olan karıştırma haznesi, karıştırıcı motor ve diğer tüm yardımcı sistemlerin üzerinde konumlandırıldığı bir düzenektir. Temel fonksiyonu karıştırıcı haznesine yüklenen hammaddelerin karıştırılmasını sağlamak ve alt sistemlerin bütünlüğünü korumaktadır. Karıştırma sistemindeki en önemli bileşenler arasında motor ve bıçaklar gelmektedir. Bıçak kleranslarında meydana gelebilecek hatalar darbe ve sürtünme gibi enerji üretebilecek olaylara dönüşebilmektedir. Bu sebeple karıştırıcı motor ve bıçaklarına ilişkin mekanik tasarım yüksek öneme sahip olmaktadır.

Mikser gövdesi ve karıştırma sistemindeki hataların değerlendirildiği HAZOP senaryoları ve güvenli tasarım önerileri Çizelge 4.29 içerisinde belirtilmiştir.

Çizelge 4.29. Mikser gövdesi ve karıştırma sistemi için güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Karıştırma Hızı Fazla	Yüksek	ZT-1123 transmitter hatası (hatalı düşük okuma)	Mikser motoru maksimum kapasitesinin dönüş hızı kaynaklı açığa çıkaracağı enerjinin üretimi gerçekleştirilen yakıta ilişkin hassasiyet değerlerine göre limitlenmesi, tasarım kapasitelerinin kendiliğinden güvenli şekilde seçilmesi. Karıştırıcı mil ile mikser haznesi arasında kalan bölgede yakıt karışımının döner ekipmanlara geçişinin engellenmesi için kendiliğinden güvenli sızdırmazlık elemanlarının tasarlanması. Karıştırıcı mil ile mikser haznesi arasında kalan bölgede yakıt karışımının döner ekipmanlara geçişinin engellenmesi için geçiş bölgelerinde güvenlik enstrümanlı sistem ile iştirakli temas sensörleri konumlandırılarak algılama durumunda prosesin trip edilmesi.
Karıştırma Hızı Fazla	Yüksek	M-1001 karıştırıcı motor hatası	Mikser motoru maksimum kapasitesinin dönüş hızı kaynaklı açığa çıkaracağı enerjinin üretimi gerçekleştirilen yakıta ilişkin hassasiyet değerlerine göre limitlenmesi, tasarım kapasitelerinin kendiliğinden güvenli şekilde seçilmesi. Karıştırıcı mil ile mikser haznesi arasında kalan bölgede yakıt karışımının döner ekipmanlara geçişinin engellenmesi için kendiliğinden güvenli sızdırmazlık elemanlarının tasarlanması. Karıştırıcı mil ile mikser haznesi arasında kalan bölgede yakıt karışımının döner ekipmanlara geçişinin engellenmesi için geçiş bölgelerinde güvenlik enstrümanlı sistem ile iştirakli temas sensörleri konumlandırılarak algılama durumunda prosesin trip edilmesi.
Karıştırma Hızı Düşük	Yüksek	ZT-1123 transmitter hatası (hatalı yüksek okuma)	Mikser motoru maksimum kapasitesinin dönüş hızı kaynaklı açığa çıkaracağı enerjinin, üretimi gerçekleştirilen yakıta ilişkin hassasiyet değerlerine göre limitlenmesi, tasarım kapasitelerinin kendiliğinden güvenli şekilde seçilmesi. Karıştırıcı mil ile mikser haznesi arasında kalan bölgede yakıt karışımının döner ekipmanlara geçişinin engellenmesi için kendiliğinden güvenli sızdırmazlık elemanlarının tasarlanması. Karıştırıcı mil ile mikser haznesi arasında kalan bölgede yakıt karışımının döner ekipmanlara geçişinin engellenmesi için geçiş bölgelerinde güvenlik enstrümanlı sistem ile iştirakli temas sensörleri konumlandırılarak algılama durumunda prosesin trip edilmesi.

Çizelge 4.29. (devam) Mikser gövdesi ve karıştırma sistemi için güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Karıştırma Hızı Düşük	Yüksek	M-1001 karıştırıcı motor hatası	Mikser motoru maksimum kapasitesinin dönüş hızı kaynaklı açığa çıkaracağı enerjinin, üretimi gerçekleştirilen yakıta ilişkin hassasiyet değerlerine göre limitlenmesi, tasarım kapasitelerinin kendiliğinden güvenli şekilde seçilmesi Karıştırıcı mil ile mikser haznesi arasında kalan bölgede yakıt karışımının döner ekipmanlara geçişinin engellenmesi için kendiliğinden güvenli sızdırmazlık elemanlarının tasarlanması. Karıştırıcı mil ile mikser haznesi arasında kalan bölgede yakıt karışımının döner ekipmanlara geçişinin engellenmesi için geçiş bölgelerinde güvenlik enstrümanlı sistem ile iştirakli temas sensörleri konumlandırılarak algılama durumunda prosesin trip edilmesi.
Titreşim Yüksek	Yüksek	Karıştırıcı bıçak ve mekanik bağlantıların yer aldığı bölümde mekanik hata meydana gelmesi	Mikser haznesi tahrik sisteminin mekanik olarak güvenilir bir yapıda tasarlanması, potansiyel arızalar veya mekanik hatalar sonucunda döner bileşenlerin hareketi durdurması veya sürtünme vb. kaynaklı enerji üretemeyecek malzemeden üretilmesi. Mikser haznesi tahrik sisteminde kleransın temel proses kontrol sistemi ile takip edilmesi ve limit değerlerin aşılması durumunda alarm verilerek sistemin trip edilmesi. Mikser motorunun ve gövdesinin farklı noktalardan titreşim değerlerinin ölçülmesi, rutin çalışma frekansı dışında veri üretildiğinde alarm alınarak sistemin trip edilmesi.
Kontaminasyon Var	Çok Yüksek	Mikser gövdesi, platform hazne vb. bir alanda bulunan parçaların (vida, kanca, tel, sabitleme aparatları vb.) mikser haznesi içerisine düşmesi	Yakıt üretim prosesinde kullanılan tüm cıvatalı bağlantı tipleri için standartlara uygun şekilde güvenlik teli ile kilitleme gerçekleştirilmesi. Üretim operasyonları öncesinde checklist ile saha tertip ve düzeninin kontrol edilmesi. Yakıt üretim alanlarında FOD (yabancı madde hasarı) kapsamında analizlerin gerçekleştirilmesi.

Mikser gövdesi ve karıştırma sistemi için oluşturulan tabloda HAZOP senaryolarındaki yüksek ve çok yüksek riskli senaryolara ilişkin sapma, sebepler ve potansiyel güvenli tasarım önerileri bulunmaktadır.

Acil durum ve koruma sistemi

Enerjik malzemelerin üretimi, varlığı gereği potansiyel tehlikelere sahip olmaktadır. Katı yakıt mikserlerinde alınan tüm önleyici önlemlerin yanı sıra acil durum ve koruma sistemi hafifletici bariyer olarak yer almaktadır. Temel fonksiyonu potansiyel hata senaryolarına ilişkin sonuç olayının minimum etki ile sonuçlanmasını sağlamaktadır. Enerjik malzemelerin darbe, sürtünme, ESD vb. potansiyel etkilere karşın aktifleşme sürelerinin çok kısa olması sebebi ile öncelikli olarak acil durum ve koruma sistemlerinin güvenilir olması ve hızlı şekilde tepki vermesi beklenmektedir.

Acil durum ve koruma sistemine ilişkin hataların değerlendirildiği HAZOP senaryoları ve güvenli tasarım önerileri Çizelge 4.30 içerisinde belirtilmiştir.

Çizelge 4.30. Acil durum ve koruma sistemi için güvenli tasarım önerileri

Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Hatalı Okuma	Yüksek	IR-1097, IR-1098, IR-1124 veya IR-1125 infrared sensörlerden herhangi birinin "hatalı var" okuması	IR sensörlerde meydana gelebilecek hatalı sinyallerin azaltılabilmesi ve güvenilir bir operasyonun sağlanabilmesi için ölçümlerin MooN voting ile yapılması. Acil durum ve koruma sistemlerinin temel proses kontrol sisteminden bağımsız, güvenlik enstrümanlı sistem ile iştiraklendirilmesi.
Hatalı Okuma	Yüksek	PT-1121 hatası (hatalı yüksek okuma)	Basınç sensörü kaynaklı meydana gelebilecek hatalı sinyallerin azaltılabilmesi ve güvenilir bir operasyonun sağlanabilmesi için ölçümlerin MooN voting ile yapılması. Acil durum ve koruma sistemlerinin temel proses kontrol sisteminden bağımsız, güvenlik enstrümanlı sistem ile iştiraklendirilmesi.
Akış Yok	Yüksek	AV-1122 aktüatörlü vana hatası (talep anında açılmama)	Tekil hata ile deluge sisteminin devre dışı kalmasının engellenmesi amacı ile paralel besleme hatlarının mikser gövdesi üzerinde konumlandırılması. Deluge hattı üzerindeki tüm pompa vana ve enstrümanların güvenlik enstrümanlı sistem ile iştiraklendirilerek güvenilirlik verilerinin hesaplanması ve sistemin ihtiyaç duyduğu seviyeye getirilmesi.

Çizelge 4.30. (devam) Acil durum ve koruma sistemi için güvenli tasarım önerileri

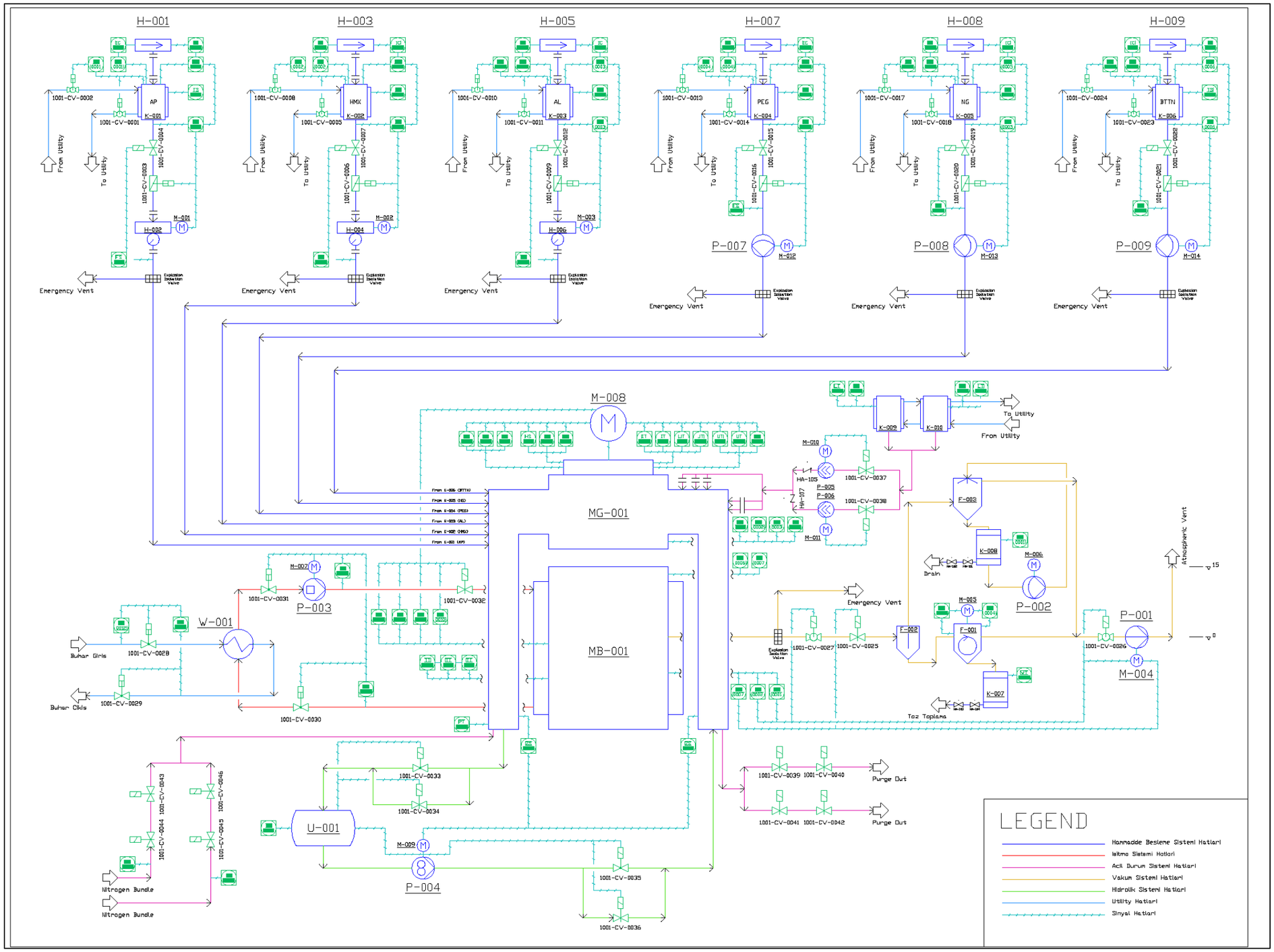
Sapma	Risk Büyüklüğü	HAZOP Senaryosu	Güvenli Tasarım Önerileri
Akış Yok	Yüksek	P-1236 pompa hatası (talep anında devreye girmeme)	Tekil hata ile deluge sisteminin devre dışı kalmasının engellenmesi amacı ile paralel besleme hatlarının mikser gövdesi üzerinde konumlandırılması. Deluge hattı üzerindeki tüm pompa vana ve enstrümanların güvenlik enstrümanlı sistem ile iştiraklendirilerek güvenilirlik verilerinin hesaplanması ve sistemin ihtiyaç duyduğu seviyeye getirilmesi.
Akış Yok	Yüksek	AV-1116 veya AV-1118 aktüatörlü vana hatası (talep anında açılmama)	Mikser haznesinin aşağı/yukarı yönlü hareketini sağ ve sol pistonlar üzerinden sağlayan tahrik sisteminin mekanik olarak tekil hale getirilmesi. Mikser haznesindeki hidrolik hatların bulunduğu bölümde acil durum sistemi ile iştiraklendirilmiş tahliye vanasının konumlandırılması, acil durum sisteminin devreye girmesi ile hat içerisindeki hidrolik basıncın tahliye edilmesi ve mikser gövdesinin karıştırıcı motordan ayrılmasının sağlanması.
Akış Yok	Yüksek	P-1234 pompa hatası (talep anında devreye girmeme)	Mikser haznesinin aşağı/yukarı yönlü hareketini sağ ve sol pistonlar üzerinden sağlayan tahrik sisteminin mekanik olarak tekil hale getirilmesi. Mikser haznesindeki hidrolik hatların bulunduğu bölümde acil durum sistemi ile iştiraklendirilmiş tahliye vanasının konumlandırılması, acil durum sisteminin devreye girmesi ile hat içerisindeki hidrolik basıncın tahliye edilmesi ve mikser gövdesinin karıştırıcı motordan ayrılmasının sağlanması.

Acil durum ve koruma sistemleri için oluşturulan tabloda HAZOP senaryolarındaki yüksek riskli senaryolara ilişkin sapma, sebepler ve potansiyel güvenli tasarım önerileri bulunmaktadır.

4.4. Katı Yakıt Mikserlerinde Güvenli Tasarım Konsepti

James B. Setiles tarafından gerçekleştirilen sunumda hiçbir yakıt mikserinin evrensel olarak kabul edilecek kadar güvenli veya fonksiyonel olmadığı, farklı hassasiyetlere, viskozitelere ve formülasyonlara sahip katı yakıtların proseste güvenli şekilde elleçlenebilmeleri için sahip olunması gereken özelliklerin tamamını taşımayacağı belirtilmektedir (Setiles, 1963). Bu sebeple en önemli nokta gerçekleştirilen tasarımın ele alınan örnek prosese özgü olduğu ve farklı formülasyonlarda ise değişkenlik gösterebileceğidir.

Katı yakıt mikserleri için yürütülen risk analizleri ve potansiyel güvenli tasarım çözümleri ele alınarak konsept bir tasarım oluşturulmuştur. Oluşturulan sisteme ilişkin borulama ve enstrümantasyon diyagramı Şekil 4.13'de bulunmaktadır. Kullanılan enstrümanlar ve kontrol hiyerarşisine ilişkin veriler ise Çizelge 4.36 arasında bulunmaktadır.



Şekil 4.13. Konsept tasarıma ilişkin borulama ve enstrümantasyon diyagramı

Çizelge 4.31. Hammadde besleme sistemi

Alt Sistem	Enstrüman Kodu	Son Kontrol Elemanı/Sistem Kodu	Açıklama	Bariyer & Koruma Katmanı Türü
AP Besleme	WT-0001	IC-0002	Loadcell set edilen miktara ulaştığında H-001 varil aktarma sistemi durdurulur	BPCS
	LS-0001	IC-0001	Level sviç veri okuduğunda H-001 varil aktarma sistemindeki motor gücü kesilir ve alarm alınır	Safety System
	TT-0001	CV-0001 CV-0002	K-001 tankının set edilen değerde tutulması için ölçüm yapar ve utility hattı üzerindeki vanaların regüle edilmesini sağlar	BPCS
	TS-0001	Sıcaklık Kontrol Sistemi	K-001 tankında set edilen HH limit değerin aşılması durumunda utility sistemine bağlı güç kesilir ve alarm verilir	Safety System
	WT-0001 FT-0001	CV-0003 M-001	K-001 tankından transfer edilecek malzeme miktarı loadcell ve akış sensörü ile gerçekleştirilir. Sensörler 1oo2 voting ile çalışır. CV-0003 aktüatörlü vana ve H-002 titreşimli elek motoru kontrol edilir	BPCS
	FS-0001	CV-0004	Besleme hattı üzerindeki reçete adımı dışında kimyasal hareketi meydana gelmesi durumunda CV-0004 shut off vanası kapatılır ve alarm verilir	Safety System
HMX Besleme	WT-0002	IC-0004	Loadcell set edilen miktara ulaştığında H-003 varil aktarma sistemi durdurulur	BPCS
	LS-0002	IC-0003	Level sviç veri okuduğunda H-003 varil aktarma sistemindeki motor gücü kesilir ve alarm alınır	Safety System
	TT-0002	CV-0005 CV-0008	K-002 tankının set edilen değerde tutulması için ölçüm yapar ve utility hattı üzerindeki vanaların regüle edilmesini sağlar	BPCS
	TS-0002	Sıcaklık Kontrol Sistemi	K-002 tankında set edilen sıcaklık HH limit değerin aşılması durumunda utility sistemine bağlı güç kesilir ve alarm verilir	Safety System
	WT-0002 FT-0002	CV-0006 M-002	K-002 tankından transfer edilecek malzeme miktarı loadcell ve akış sensörü ile gerçekleştirilir. Sensörler 1oo2 voting ile çalışır. CV-0006 aktüatörlü vana ve M-002 titreşimli elek motoru kontrol edilir	BPCS
	FS-0002	CV-0007	Besleme hattı üzerindeki reçete adımı dışında kimyasal hareketi meydana gelmesi durumunda CV-0007 shut off vanası kapatılır ve alarm verilir	Safety System

Çizelge 4.31. (devam) Hammadde besleme sistemi

Alt Sistem	Enstrüman Kodu	Son Kontrol Elemanı/Sistem Kodu	Açıklama	Bariyer & Koruma Katmanı Türü
AL Besleme	WT-0003	IC-0005	Loadcell set edilen miktara ulaştığında H-005 varil aktarma sistemi durdurulur	BPCS
	LS-0003	IC-0006	Level sviç veri okuduğunda H-005 varil aktarma sistemindeki motor gücü kesilir ve alarm alınır	Safety System
	TT-0003	CV-0010 CV-0011	K-003 tankının set edilen değerde tutulması için ölçüm yapar ve utility hattı üzerindeki vanaların regüle edilmesini sağlar	BPCS
	TS-0003	Sıcaklık Kontrol Sistemi	K-003 tankında set edilen sıcaklık HH limit değerin aşılması durumunda utility sistemine bağlı güç kesilir ve alarm verilir	Safety System
	WT-0003 FT-0003	CV-0009 M-003	K-003 tankından transfer edilecek malzeme miktarı loadcell ve akış sensörü ile gerçekleştirilir. Sensörler 1oo2 voting ile çalışır. CV-0009 aktüatörlü vana ve M-003 titreşimli elek motoru kontrol edilir	BPCS
	FS-0003	CV-0012	Besleme hattı üzerindeki reçete adımı dışında kimyasal hareketi meydana gelmesi durumunda CV-0012 shut off vanası kapatılır ve alarm verilir	Safety System
PEG Besleme	WT-0004	IC-0007	Loadcell set edilen miktara ulaştığında H-007 varil aktarma sistemi durdurulur	BPCS
	LS-0004	IC-0008	Level sviç veri okuduğunda H-007 varil aktarma sistemindeki motor gücü kesilir ve alarm alınır	Safety System
	TT-0004	CV-0013 CV-0014	K-004 tankının set edilen değerde tutulması için ölçüm yapar ve utility hattı üzerindeki vanaların regüle edilmesini sağlar	BPCS
	TS-0004	Sıcaklık Kontrol Sistemi	K-004 tankında set edilen sıcaklık HH limit değerin aşılması durumunda utility sistemine bağlı güç kesilir ve alarm verilir	Safety System
	WT-0004 FT-0004	CV-0016 M-012	K-004 tankından transfer edilecek malzeme miktarı loadcell ve akış sensörü ile gerçekleştirilir. Sensörler 1oo2 voting ile çalışır. CV-0016 aktüatörlü vana ve pompa ile akış kontrol edilir.	BPCS
	FS-0004	CV-0015	Besleme hattı üzerindeki reçete adımı dışında kimyasal hareketi meydana gelmesi durumunda CV-0015 shut off vanası kapatılır ve alarm verilir	Safety System

Çizelge 4.31. (devam) Hammadde besleme sistemi

Alt Sistem	Enstrüman Kodu	Son Kontrol Elemanı/Sistem Kodu	Açıklama	Bariyer & Koruma Katmanı Türü
NG Besleme	WT-0005	IC-0010	Loadcell set edilen miktara ulaştığında H-008 IBC aktarma sistemi durdurulur	BPCS
	LS-0005	IC-0009	Level sviç veri okuduğunda H-008 IBC aktarma sistemindeki motor gücü kesilir ve alarm alınır	Safety System
	TT-0005	CV-0017 CV-0018	K-005 tankının set edilen değerde tutulması için ölçüm yapar ve utility hattı üzerindeki vanaların regüle edilmesini sağlar	BPCS
	TS-0005	Sıcaklık Kontrol Sistemi	K-005 tankında set edilen sıcaklık HH limit değerin aşılması durumunda utility sistemine bağlı güç kesilir ve alarm verilir	Safety System
	WT-0005 FT-0005	CV-0020 M-013	K-005 tankından transfer edilecek malzeme miktarı loadcell ve akış sensörü ile gerçekleştirilir. Sensörler 1oo2 voting ile çalışır. CV-0020 aktüatörlü vana ve pompa ile akış kontrol edilir.	BPCS
	FS-0005	CV-0019	Besleme hattı üzerindeki reçete adımı dışında kimyasal hareketi meydana gelmesi durumunda CV-0019 shut off vanası kapatılır ve alarm verilir	Safety System
BTTN Besleme	WT-0006	IC-0012	Loadcell set edilen miktara ulaştığında H-009 varil aktarma sistemi durdurulur	BPCS
	LS-0006	IC-0011	Level sviç veri okuduğunda H-009 varil aktarma sistemindeki motor gücü kesilir ve alarm alınır	Safety System
	TT-0006	CV-0023 CV-0024	K-006 tankının set edilen değerde tutulması için ölçüm yapar ve utility hattı üzerindeki vanaların regüle edilmesini sağlar	BPCS
	TS-0006	Sıcaklık Kontrol Sistemi	K-065 tankında set edilen sıcaklık HH limit değerin aşılması durumunda utility sistemine bağlı güç kesilir ve alarm verilir	Safety System
	WT-0006 FT-0006	CV-0021 M-014	K-006 tankından transfer edilecek malzeme miktarı loadcell ve akış sensörü ile gerçekleştirilir. Sensörler 1oo2 voting ile çalışır. CV-0021 aktüatörlü vana ve pompa ile akış kontrol edilir.	BPCS
	FS-0006	CV-0022	Besleme hattı üzerindeki reçete adımı dışında kimyasal hareketi meydana gelmesi durumunda CV-0022 shut off vanası kapatılır ve alarm verilir	Safety System

Hammadde besleme operasyonlarında reçete sistemi kullanılarak yakıt formülasyonunda yer alan her bir kimyasalın belirtilen hız ve miktarda mikser haznesine aktarılması sağlanmaktadır. Bağımsız hatlara ve sistemlere sahip olan sistemde, kimyasal interaksiyon kaynaklı tehlikeler ise bertaraf edilmektedir. Varil veya IBC türünde proses alanına getirilen kimyasalların otomatik sistemler ile kimyasal tanklara aktarımı sağlanmaktadır. Aktarım sistemlerinin güvenilir şekilde tasarlanmış sızdırmaz yapısı, potansiyel toz veya alevlenir sıvı kaynaklı patlayıcı atmosfer oluşma riskini minimuma indirgemektedir. Ayrıca işlemler sırasında çalışanların operasyonu uzaktan kontrol edebilmesi, elleçleme operasyonlarındaki çalışanların risk altındaki süresini ortadan kaldırmaktadır. Dolum miktarları tanklar üzerinde yer alan temel proses kontrol sistemi ile iştirakli loadceller ve seviye transmitterleri ile kontrol edilmektedir. Ayrıca güvenlik enstrümanlı sistemler dolum haznelerine fazla miktarda kimyasalın beslenmesini bağımsız bir katman ile engellemektedir. Şartlandırma operasyonları süresince çalışan maruziyetinin azaltılması ve proses alanının optimum şekilde kullanılabilmesi için depolama tankları, ceketli yapıya sahip şekilde tasarlanmıştır. Tanklar üzerindeki sıcaklık transmitterleri ile set edilen değerde kimyasalların şartlandırılmaları, temel proses kontrol sistemi tarafından sağlanmaktadır. Bağımsız bir koruma ise tank sıcaklığının yükselmesini engellemektedir. Tanklardan alınan kimyasalların mikser haznesine aktarımında, akış transmitteri ve loadcell ile kütle ve akış kontrolü sağlanmaktadır.

Çizelge 4.32. Vakum sistemi

Enstrüman Kodu	Son Kontrol Elemanı/Sistem Kodu	Açıklama	Bariyer & Koruma Katmanı Türü
PT-0001 PT-0002	CV-0026 CV-0027 P-001	Basınç transmitterleri 1oo2 voting ile MB-001 içerisindeki basıncı ölçerek vakum hattındaki vanaların ve vakum pompasının kontrolünü sağlamaktadır	BPCS
LS-0007	CV-0025 P-001	MB-001 içerisindeki yakıt seviyesinde anormal bir yükselme meydan gelmesi durumunda sviç aktifleşerek vakum hattı üzerindeki vana kapanma komutu vermekte ve vakum pompası gücünü pano üzerindeki röle üzerinden kesmektedir.	Safety System
PT-0003 PT-0004	F-001 M-00X	Seperatör içerisindeki filtre içi ve dışındaki basınç farkını ölçerek çırpma motorunun çalıştırılmasını sağlar	BPCS
CT-0001	K-008	F-003 seperatörü çıkışında yer alan K-008 hazne üzerinde iletkenlik değeri ölçülür. Set değerinin üzerinde sprey sistemindeki sıvının değişmesi için alarm alınır.	BPCS
Enstrüman Kodu	Son Kontrol Elemanı/Sistem Kodu	Açıklama	Bariyer & Koruma Katmanı Türü
WT-0007	K-007	F-001 seperatörü çıkışında yer alan K-007 haznesi ağırlığı loadcell ile ölçülür. Set değerinde tozun boşaltılması için alarm alınır.	BPCS

Mikser haznesinde karışım operasyonları sonrasında gerçekleştirilen vakum operasyonlarında, alevlenir kimyasallara ait buharların ve toz malzemelerin küçük partiküllü parçalarının vakum hattına doğru ilerlemesi potansiyel olarak mümkün olmaktadır. Bu sebeple vakum sisteminde yer alan F-001, F-002 ve F-003 seperatörleri ile hammaddelerin pompaya ulaşması engellenmektedir. F-002 seperatörüne giren alevlenir kimyasal buharı ve toz, ağırlık farkına göre ayrılmaktadır. Tozlar aşağı yönlü hareket ile F-001 seperatörüne, gazlar ise yukarı yönlü hareketle F-003 numaralı seperatöre aktarılmaktadır. F-001 numaralı seperatöre biriken tozlar, siklon içerisindeki belirli bir mesh aralığına sahip yüzeyde biriktirilmektedir. Basınç farkına ve timer ile set edilen değere göre belirli aralıklarla çırpma motoru çalıştırılarak tozlar, F-001 filtre haznesine aktarılmaktadır. K-007 numaralı haznenin boşaltılma periyodu için ağırlık ölçümü gerçekleştirilmekte ve timer ile takip edilmektedir. F-003 seperatöre giren gaz fazındaki malzemeler ise sprey ile filtre alt haznesine alınmaktadır. Sistemdeki sıvının değişim periyodu için iletkenlik değeri ölçülmekte ve timer ile takip edilmektedir. Vakum pompasının elleçlenen kimyasallara uygun şekilde ex-proof özellikte seçilmesi ise arızi durumlarda pompa iç aksam ve motoru kaynaklı tehlikelerin bertaraf edilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.33. Isıtma sistemi

Enstrüman Kodu	Son Kontrol Elemanı/Sistem Kodu	Açıklama	Bariyer & Koruma Katmanı Türü
TT-0007 TT-0008 TT-0009 TT-0010 TT-0011	P-003 CV-0030 CV-0031	Mikser haznesi üzerinde sıcaklığın etkin ve verimli şekilde kontrol edilebilmesi için 5 farklı sıcaklık transmitteri kullanılmaktadır. TT-0009/10/11 transmitterleri 3 farklı noktadan hazne üzerinden ölçüm yapmakta, TT-0007/8 ise sıcak su giriş ve çıkış hatları üzerinden ölçüm yapmaktadır. Transmitterler set edilen değere göre ısıtma hattındaki pompa ve vanaları kontrol etmektedir. Sistem kontrol edilemez veya set edilen değer belirli oranda artış/düşüş gösterir ise alarm alınarak hat akışı kesilmektedir.	BPCS
TT-0012 TT-0013	CV-0028 CV-0029	W-001 shell&tube tipli ısı aktarıcının buhar hattı giriş ve çıkış sıcaklıkları kontrol edilerek akış hızları kontrol altına alınmaktadır	BPCS
TS-0007 TS-0008 TS-0009 TS-0010	CV-0032	MB-001 kodlu mikser haznesi üzerinde 4 farklı noktada sıcaklık sviçi (2 adet high, 2 adet low) bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıkta set edilen değerin tespit edilmesi durumunda alarm verilerek besleme hattı üzerindeki akış kesilmektedir. Düşük sıcaklıkta set edilen değerin tespit edilmesi halinde ise alarm verilerek karıştırıcı motor durdurulmakta ve sistem trip edilmektedir.	Safety System

MB-001 haznesinde ısıtma işlemi W-001 shell&tube ısı aktarıcı ile sağlanmaktadır. Isı aktarıcı utility beslemesinde ise buhar hattı bulunmaktadır. Sistemin maksimum kapasitesi

hammaddelerin dekompozisyon ve kendinden tutuşma sıcaklığının altında seçilmesi sebebi ile ekstra güvenlik sağlamaktadır. Buhar hattı giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülerek enerji verimliliği; mikser haznesinde talep edilen sıcaklık rampasının sağlanabilmesi için giriş ve çıkış hatlarındaki aktüatörlü vanalar kontrol edilmektedir. W-001 ile MB-001 arasındaki ısıtma suyu akışı, P-003 numaralı pozitif yer değiştirmeli kategorisindeki pompa ile sağlanmaktadır. Hazne içerisindeki sıcaklığın ideal şekilde kontrol edilebilmesi için hazne üzerinde 3 adet, ısıtma hatlarının giriş ve çıkışlarında ise 1 er adet sıcaklık transmitteri yer almaktadır. Belirlenen mantıksal döngü ile birlikte aktüatörlü vanaların ve pompanın kontrolü, bu transmitterlerden sağlanan veriler ile sağlanmaktadır. Mantıksal döngü içerisinde mikser haznesi üzerindeki transmitterlerde tanımlı offset değeri ve süresi bulunmaktadır. Belirtilen süre veya fark oluşması durumunda, ısıtma sistemi PID döngüsü içerisinde aksiyon almaktadır. Hazne üzerinde 2 adet yüksek sıcaklık, 2 adet ise düşük sıcaklık tespiti için sviç bulunmaktadır. Set edilen değerlerin tespit edilmesi durumunda güvenlik enstrümanlı sistem, tanımlı fonksiyonu gerçekleştirmektedir.

Çizelge 4.34. Hidrolik sistem

Enstrüman Kodu	Son Kontrol Elemanı/Sistem Kodu	Açıklama	Bariyer & Koruma Katmanı Türü
ZS-0001 ZS-0002	P-004	Mikser haznesi tahrik sistemi üzerindeki klerans 1oo2 voting ile ölçülür, belirlenen offset değerin üzerinde fark oluşması halinde alarm verilerek P-004 pompa ve M-008 mikser motoru trip edilir.	Safety System
PT-0005	P-004	Hidrolik hattındaki sızıntı veya kaçakların tespit için hidrolik sistem üzerinde basınç ölçümü gerçekleştirilmektedir. Basınç farkı tespitinde alarm verilerek sistem trip edilmektedir.	Safety System
LT-0001	P-004	U-001 kodlu hidrolik sistemindeki yağ tankı seviyesi ölçülür, fark değer meydana gelmesi durumunda sesli ve görsel alarm alınır ve pompa trip edilir	BPCS
U-001	CV-0033 CV-0034 CV-0035 CV-0036 P-004	U-001 hidrolik sistemi proses fazlarına göre yukarı / aşağı yönlü hareketi sağlamak için hat üzerinde pozitif basınç oluşturur. Aktüatörlü vanalar ve pompanın tahrik edilmesi ile ilgili kontrol sağlanmaktadır. CV-0034 ve CV-0036 vanaları ise hat üzerindeki CV-0033 ve CV-0035 numaralı vanaların talep anında açılmaması durumunda sistemin sürekliliğinin sağlanabilmesi amacı ile paralel hat üzerinde konumlandırılmıştır.	BPCS

Mikser haznesi hareketi için tahrik sağlayan hidrolik sistem mekanik olarak yekpare bir yapıya sahiptir. Mikser haznesindeki tahrik U tipli düzenek üzerinden sağlanmakta ve hidrolik yağı giriş ve çıkış hatları bu sistem üzerinde bulunmaktadır. Hidrolik sistemin sağ-sol şeklinde ikili düzenek ile sağlanmaması, hazne ve mikser gövdesi arasındaki denge problemlerini ortadan kaldırmaktadır. Tahrik sisteminin klerans hatası kaynaklı sistemdeki potansiyel sürtünme kaynaklarının ve mekanik bütünlük kayıplarının bertaraf edilmesi amacı ile klerans ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Belirlenen değer aralığının dışına çıkıldığında ise alarm verilerek tahrik sistemi trip edilmektedir. Hidrolik sistemindeki en önemli bileşenler arasında yer alan yağ varlığı, seviye ve basınç ölçümleri ile kontrol altında tutulmaktadır.

Çizelge 4.35. Mikser gövdesi ve karıştırma sistemi

Enstrüman Kodu	Son Kontrol Elemanı/Sistem Kodu	Açıklama	Bariyer & Koruma Katmanı Türü
UT-0001 UT-0002 UT-0003	M-008	Mikser motoru, gövde bağlantısı ve gövde 3 farklı noktadan titreşim transmitteri ile takip edilmektedir. Rutin çalışma frekansı dışında veri üretildiğinde alarm alınarak M-008 motoru trip edilmektedir.	BPCS
HS-0001 HS-0002 HS-0003	M-008	Karıştırıcı mil ile mikser haznesi arasında kalan bölgede sızdırmazlığın garanti altına alınması amacı ile bulunan 3 adet temas sensörü 1oo3 voting ile çalışmakta ve sıvı/toz algılanması durumunda M-008 motor gücü pano üzerinden kesilir	Safety System
IT-0001 IT-0002 JT-0001 JT-0002	M-008	M-008 mikser motoru üzerinde 1oo2 voting ile akım ve güç takibi gerçekleştirilmektedir. Motor için belirlenen güvenli akım ve mekanik yük değerinin aşılması durumunda ekipmanın korunması amacı ile M-008 motoru trip etmektedir.	BPCS
TT-0014 TT-0015 TT-0016	M-008	Mikser motoru, redüktör ve gövde mili üzerinden 3 farklı noktadan sıcaklık ölçülmektedir. Sıcaklığın belirlenen set değerinin üzerinde veya altında olması durumunda M-008 motor gücü pano üzerinden kesilmektedir.	Safety System

Yakıt üretimi operasyonlarında viskozite proses süresince değişkenlik göstermektedir. Katı beslemeleri sonrası viskozitesi artış gösteren yakıt karışımının etkin şekilde karışımının sağlanması, en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Bu sebeple mikser motorunun ilgili proses şartlarının tamamında güvenli şekilde operasyonu yürütmesi beklenmektedir. Karıştırıcı motor üzerindeki hız kontrolü 1oo2 voting ile çalışan akım ve güç transmitterleri ile sağlanmaktadır. Farklı noktalara yerleştirilmiş titreşim sensörleri ise mikser motorunda meydana gelebilecek potansiyel hataların erken tespit edilmesi amacı ile yer almaktadır. Mil ile hazne arasında yer alan bölgede sızdırmazlık çok katmanlı sürtünme yaratmayan mekanik bir sistem ile sağlanmaktadır, ancak sistemin garanti altına alınabilmesi amacıyla 1oo3 voting ile güvenliği sağlayan temas sensörleri bulunmaktadır. Sensörlerin sıvı veya toz ile

teması sonrasında darbe/sürtünme kaynaklı potansiyel senaryoların engellenmesi, mikser motorundaki güç pano üzerinden yapılmaktadır. Karışım verimi için mikser bıçağı ve hazne arasındaki klerans boşluğunun minimum seviyede olması gerekmektedir. Aksi durumlarda viskoz karışım hazne çeperine sürünerek mikser bıçaklarında sürdürülen karışıma dahil olmamaktadır. Klerans boşluğunun minimum seviyede olması ise metal-metal sürtünme kaynaklarını beraberinde getirmektedir. Bu sebeple ilgili tasarımda mikser bıçaklarının kıvılcım çıkartmaz bir kaplamaya sahip olacağı değerlendirilmiştir. Ayrıca motor sistemi ve bağlı bileşenlerdeki lokal sıcaklık artışlarının bertaraf edilmesi amacı ile motor, redüktör ve gövde mili üzerinde 3 farklı noktadan sıcaklık ölçülmekte ve set edilen değerin üzerinde motor trip edilmektedir. Karışım operasyonlarının kapalı çevrim bir sistem ile sağlanması ise potansiyel yabancı madde hasarı (FOD) senaryolarına ilişkin riskleri indirgemektedir.

Çizelge 4.36. Acil durum ve koruma sistemi

Enstrüman Kodu	Son Kontrol Elemanı/Sistem Kodu	Açıklama	Bariyer & Koruma Katmanı Türü
PT-0006 PT-0007	-	MB-001 mikser haznesi limit değeri üzerindeki basınç artışının tespit edilmesi amacı ile 2 adet 1oo2D voting ile çalışan basınç transmitteri bulunmaktadır. Aşırı basınç tespit edilmesi halinde acil durum durdurma sistemi devreye girmektedir.	Safey System
NT-0001 NT-0002 NT-0003 NT-0004	-	MB-001 mikser haznesindek alev, kıvılcım vb. ısı kaynaklarının tespit edilmesi amacı ile 4 adet 2oo4D voting ile çalışan UV/Infrared sensör bulunmaktadır. Dalga boyunun tespit edilmesi halinde acil durum durdurma sistemi devreye girmektedir.	Safey System
-	P-005 P-006 CV-0037 CV-0038	Acil durum sistemi devreye girdiğinde pompa ve vana aktifleşir. Sistemde pompa veya vana kombinasyonundan dönüş sağlanamaz ise diğer pompa ve vana devreye girerek akışın gerçekleştirilmesini sağlar	Safey System
LT-0002 LT-0003 LT-0004 LT-0005	-	K-009/10 acil durum su tankları üzerinde yer alan seviye transmitterleri 1oo2 voting ile çalışmaktadır. Mikser operasyonları öncesinde reçete sistemi tarafından otomatik olarak su seviyeleri kontrol edilmektedir. Düşük seviye tespit edilmesi durumunda alarm verilmekte ve sistem devreye alınamamaktadır	BPCS
-	CV-0043 CV-0044 CV-0045 CV-0046 CV-0039 CV-0040 CV-0041 CV-0042	Sistem tarafından acil durum senaryosu devreye alındığında hat içerisindeki hidrolik basıncının tahliye edilmesi ve mikser gövdesinin karıştırıcı motordan ayrılması sağlanır. CV-0043/44/45/46 vanaları bağlı bulundukları tüplerideki yüksek basınçlı azot ile MB-001 mikser haznesi ve hidrolik hattının purge edilmesini, CV-0039/40/41/42 vanaları ise akışın tahliye edilmesini sağlamaktadır.	Safey System
PT-0006 PT-0007	-	Azot besleme hattı üzerinde yer alan basınç transmitterleri mikser operasyonları öncesinde reçete sistemi tarafından otomatik olarak kontrol edilmektedir. Düşük basınç tespit edilmesi durumunda alarm verilmekte ve sistem devreye alınamamaktadır	BPCS

Yakıt üretim mikserleri ve alt sistemlerinde alınan tüm önlemlere rağmen prosesin varlığı gereği sahip olduğu belirsizlikler sebebi ile acil durum sistemleri oldukça önemlidir. Acil durum sistemlerinin devreye girdiği tüm senaryolarda sırası ile erken tespit, kapalı hacimde meydana gelebilecek basınç artışının engellenmesi ve tutuşma başlaması durumunda mikser gövdesinin ve diğer bileşenlerin korunması yer almaktadır. Erken tespit sisteminin etkin şekilde çalışması için ise kullanılan sensör, mantıksal çözümleyici ve son kontrol elemanı arasındaki döngünün hızlı şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Acil durum ve koruma sisteminin temel görevi acil durum senaryolarında tanımlı aksiyonlar yerine getirilerek prosesin güvenli işletme koşulları altında kalmasını sağlamaktadır. Temel olarak acil durum sistemi tespit etme, atmosferik şartlara getirme ve soğutma fonksiyonlarını yürütmektedir. Tespit işlemleri için basınç ve UV/IR şeklinde 2 farklı parametre takip edilmektedir. Sensörlerden sağlanacak veri ile öncelikli olarak MB-001 mikser haznesinin atmosferik şartlara getirilmesi sağlanır. Tüplerden sağlanan yüksek basınçlı azot, MB-001 içerisine ve hidrolik hatlarına beslenerek vanalar aracılığı ile tahliye edilir. Azot tüplerinin doluluğu hat üzerinde yer alan basınç transmitterleri ile kontrol edilmektedir. K-009/10 tanklarında şartlandırılarak 5 °C'de tutulan su, 6 farklı noktadan yüksek basınç gözleri ile MB-001 haznesinin içerisine beslenir. Acil durum soğutma suyunun varlığı, tanklarda yer alan seviye transmitterleri ile kontrol edilmektedir.

Örnek tesisteki proses kurgusu ve konsept tasarımdaki kurgu arasındaki temel farklar Çizelge 4.37 içerisinde belirtilmiştir.

Çizelge 4.37. Örnek tesis ve önerilen konsept tasarımın karşılaştırılması

Alt Sistem	Örnek Tesis	Konsept Tasarım
Hammadde Besleme Sistemi	Kullanılacak hammaddeler operatörler tarafından karıştırma işleminin ara fazlarında kimyasal besleme haznesine manuel olarak eklenmektedir. Titreşimli elek kullanılarak esnek borular ile besleme portu üzerinden mikser haznesine aktarılmaktadır. Besleme sisteminde titreşimli elek motoru dışında beslemeyi kontrol edecek bir ekipman veya enstrüman bulunmamaktadır. Gerçekleştirilen tartım, transfer ve boşaltma operasyonları yoğun kimyasal maruziyet içermekte ve kapalı devre bir sistem olmaması sebebi ile toz patlayıcı atmosfer tehlikesi bulunmaktadır. Karıştırma işleminin ara fazlarında üretim alanına giren personel için ilgili süre risk altındaki zaman olarak tanımlanabilmekte ve mevcut prosesin tasarımının doğası gereği sınırlandırılamamaktadır.	Hammaddelere ait IBC veya variller besleme sistemlerine ait ilgili bölmelere yerleştirilir. Operasyon esnasında tüm taşıma kapları kapalı olduğu için kimyasal maruziyet ve potansiyel tehlikeler ortadan kaldırılır. Otomatik besleme sistemleri hammaddeleri ilgili kimyasala ait besleme tanklarına transfer eder ve kimyasal interaksiyon kaynaklı tehlikeler bertaraf edilir. Güvenli tasarıma sahip sistemlerin kullanılması sebebi ile toz atmosfer oluşumu veya ESD/darbe/sürtünme vb. kaynaklı senaryoların oluşmaması beklenmektedir. Sistem üzerinde kütle, akış, sıcaklık ve seviye parametreleri temel proses kontrol sistemi ve güvenlik enstrümanlı sistem ile iştiraklendirilmiştir. Mikser haznesi ve besleme hatları arasında konumlandırılan acil durum izolasyon vanaları ise aşırı basınç ve yanma senaryolarında etkinin besleme hatlarına ulaşmasını engelleyerek güvenli bir alana tahliye edilmesini sağlamaktadır.
Vakum Sistemi	Vakum pompası ve manuel vananın bulunduğu hat üzerinden mikser haznesi vakuma alınmaktadır. Vakum operasyonları öncesinde karıştırma işleminin ara fazlarında operatörler alana girerek vakum hattı manuel vanasını açmakta ve alanı terk etmektedir. Vakum sisteminde yer alan tek bir filtre ile alevlenir kimyasallara ait buhar ve ince toz malzemeler tutulmaya çalışılmaktadır. İlgili sistemde rutin operasyonlarda dahi vakum pompasına taşınabilecek hammaddelerin yanma/parlama meydana getirme potansiyeli bulunmaktadır. Ayrıca çalışanların ilgili sürelerde üretimi tamamlanmamış olan enerjik malzeme ile aynı alanda bulunmaları en önemli tehlikeler arasında yer almaktadır.	Yakıt üretiminin doğası gereği bulunan çeşitli belirsizlikler sebebi ile karışım istenilen şekilde gerçekleştirilememektedir. Bu sebeple vakum operasyonunda hammaddelerin vakum pompasına ulaşma potansiyeli bulunmaktadır. Etkin bir kontrol sağlanması amacı ile temel olarak sistemde yer alan 3 adet ayrıştırıcı ile gaz/buhar ve tozların vakum pompasına ulaşması engellenmektedir. Basınç, iletkenlik ve kütle kontrolü temel proses kontrol sistemi ile seviye kontrolü ise bağımsız enstrümanlı sistem ile sağlanmaktadır. Gerçekleştirilen konsept tasarım ile vakum hattında meydana gelebilecek potansiyel tehlikelerin bertaraf edilmesi ve insan müdahalesine ihtiyaç duymaması sebebi ile risk altındaki zamanın ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır.
Sıcaklık Kontrol Sistemi	Eşanjöre utility sisteminden gelen buhar beslemesi ile sıcaklık artışı sağlanmakta ve pompa yardımı ile sıcak su mikser haznesine ait ceket içerisinden geçerek tekrar eşanjöre ulaşmaktadır. Örnek sistem tasarımındaki sıcaklık kontrol sisteminin maddi hasar kaynaklı orta seviyede tehlikeleri bulunmaktadır. Temel olarak manuel müdahalelere ihtiyaç bulunması ve yedekli olmayan kontrol sistemlerinin kullanımı geliştirmeye açık noktalar arasında yer almaktadır.	Konsept tasarımı gerçekleştirilen sıcaklık kontrol sisteminde manuel müdahaleler ortadan kaldırılarak çalışanların üretim alanında geçirdikleri süre ortadan kaldırılmıştır. Ölçüm hatalarının, belirsizliklerin ve optimum sıcaklık kontrolünün sağlanması için mikser haznesi üzerinde 3 adet sıcaklık transmitteri ve 4 adet sıcaklık sviçi bulunmaktadır. Gerçekleştirilen kontroller sayesinde mikser haznesinde meydana gelebilecek yüksek veya düşük sıcaklık senaryolarının bertaraf edilmesi amaçlanmaktadır.

Çizelge 4.37. (devam) Örnek tesis ve önerilen konsept tasarımın karşılaştırılması

Alt Sistem	Örnek Tesis	Konsept Tasarım
Hidrolik Kontrol Sistemi	Hidrolik ünite içerisinden sağlanan yağ, hidrolik pompa ile basınçlandırılmakta ve aktüatörlü vanalar kullanılarak mikser haznesinin yukarı-aşağı yönlü hareketi sağlanmaktadır. Mikser sistemindeki en önemli alt bileşenler arasında yer alan sistemdeki hatalar katastrofik sonuçlara sebep olabilmektedir. Özellikle operatörlerin üretim alanında bulunduğu aşamalarda mikser haznesi dengesinde meydana gelebilecek hatalar insan hayatının kaybedilmesi ile sonuçlanan senaryolara sebep olabilmektedir. Mevcut sistemdeki en önemli geliştirilmeye açık nokta ise acil durum ve rutin operasyonlarda aynı enstrüman ve ekipmanların kullanılmasıdır.	Hidrolik kontrol sistemine ilişkin konsept tasarımında öncelikli olarak acil durum ve koruma sistemi ile rutin operasyonlarda kullanılan sistem bağımsız hale getirilmiştir. U tipli mekanik düzeneğe sahip kaldırma sistemi ise sağ ve sol denge problemini ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca bağımsız bir sistem tarafından ölçülen klerans değerleri ile hidrolik sistemde ek bir koruma yer almaktadır. Hidrolik sistemdeki yağ varlığı ise seviye ve basınç ölçümleri ile kontrol edilmektedir. Hidrolik akışının giriş ve çıkış hatlarında yer alan yedekli vanalar ile vanalardan herhangi birinin talep anında hata yapması durumunda güvenliği sağlaması amaçlanmaktadır.
Mikser gövdesi ve karıştırma sistemi	Mikser gövdesi işlevi gereği prosesin merkezinde yer almaktadır. Karışım esnasında mikser haznesi ile sızdırmaz bir yapı sağlanarak proses gerçekleştirilmektedir. Üzerinde yer alan karıştırıcı motoru ve bıçaklar ile hazne içerisinde karışım sağlanmaktadır. Sistemde karıştırıcı motoru üzerinde yer alan devir ölçer ile kontrol sağlanması amaçlanmaktadır. Sistemde meydana gelebilecek klerans, yabancı malzeme vb. hatalar sonucunda motor sistemini devreden çıkartacak bir yapı bulunmaması gelişime açık noktalar arasında yer almaktadır.	Yakıt formülasyonlarındaki karışım yoğunluklarının değişken olması sebebi ile motorun ilgili tüm şartlar altında çalışabilmesi gerekmektedir. Motor ömrünün korunması ve prosesin güvenliğinin sağlanması amacı ile mikser gövdesi üzerinde 3 farklı noktadan titreşim ölçümü alınarak temel proses bileşenleri ile kontrol edilmektedir. Konsept tasarım ile akım ve güç ölçümleri gerçekleştirilerek proses ve motorun korunması amaçlanmaktadır. Önemli parametreler arasında yer alan mikser gövdesi ve mekanik aksam arasında kalan sızdırmazlık için ise mekanik önlemlere ek olarak konumlandırılan güvenlik sistemine bağlı temas sensörleri bulunmaktadır. Klerans hatası veya diğer parametreler kaynaklı lokal sıcaklık artışlarının engellenmesi için motor, redüktör ve mil üzerinden sıcaklık ölçümü alınarak güvenlik enstrümanlı sistem ile aksiyon alınmaktadır.
Acil Durum ve Koruma Sistemi	Sistem farklı parametreler ile acil durum ölçümü ve müdahalesi için bulunmaktadır. Infrared sensörler ve basınç transmitteri ile tahrik alınan acil durum sisteminde hazne içerisine su basılmaktadır. Ayrıca hidrolik sistem basıncı düşürülerek mikser gövdesi aşağı indirilmektedir. Sistem kapsamındaki geliştirmeye açık noktalar arasında kullanılan enstrüman ve ekipmanlar veri işleme/tepki sürelerinin belirsiz olması, bağımsız olmaması (proses kontrol veya utility bileşenlerine bağlı olması) ve yedekli olmaması yer almaktadır.	Acil durum sisteminde emre amadelik, bağımsızlık ve etkinlik konsept tasarımının merkezinde yer almaktadır. Alev ve kıvılcım ölçümleri için IR sensör yerine UV/IR sensör kullanılarak etkinliğinin artması amaçlanmıştır. Sisteme ait tüm bileşenler temel proses kontrol sisteminden bağımsız, güvenlik enstrümanlı bir sistem ile kontrol edilmektedir. Deluge (su basma) sisteminin kaynaklardaki belirsizlikten etkilenmemesi amacı ile 2 adet 5 °C'de şartlandırılan su tankları bulunmaktadır. Hidrolik hatlarına iştiraklendirilen bağımsız inert gaz purge sistemi ile hızlı ve etkin şekilde mikser haznesi karıştırıcı sistemden ayrılabilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde savunma sanayii ve bağlı endüstrilerin hızla büyüdüğü ve gelişmeye devam ettiği görülmektedir. Savunma sanayiinde kullanılan en önemli bileşenlerin patlayıcılar, katı veya sıvı bazlı yakıtlar ve piroteknik malzemeler olduğu bilinmektedir. Enerjik malzemeler olarak adlandırılan bu ürünlerin üretimleri, taşınması, elleçlenmesi ve proseslerde kullanımlarının ise potansiyel tehlikeleri bulunmaktadır.

Geçmiş kaza verileri incelendiğinde katı yakıt üretimlerinde kullanılan geleneksel yöntemlerin insan sağlığı ve tesis yatırımları için yıkıcı etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Yakıt formülasyonlarında ve üretim metotlarındaki bilginin gizliliği prensibi sebebi ile geçmişten günümüze aktarılan akademik kaynaklarda yer alan bilginin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

Enerjik malzemelerin ve üretim proseslerinin proses güvenliği kapsamında değerlendirilmesine ilişkin literatürde sınırlı sayıda kaynak bulunması ve gizlilik sebepleri ile katı yakıt mikserlerinde proses tehlike analizi ve güvenli proses tasarımına ilişkin mevcut bir çalışma tespit edilmemiştir. Bu tez çalışmasında, dikey katı yakıt mikserlerinde proses kazalarının önlenmesine yönelik proses tehlike analizi ve güvenli proses tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, kompozit katı yakıt üretimi gerçekleştiren örnek bir tesis ve katı yakıt formülasyonu ele alınarak potansiyel tehlikeler belirlenmiş ve katı yakıt üretiminin güvenli şekilde sağlanabilmesi için konsept bir tasarım oluşturulmuştur.

Tez çalışması, proses güvenlik bilgisi, risk analizi ve güvenli proses tasarımı olmak üzere üç aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, proses güvenlik bilgisi (PSI) dokümanları oluşturulmuştur. İkinci aşamada, potansiyel tehlikelerin belirlenmesi için Yarı Kantitatif HAZOP çalışması yürütülmüştür. Senaryolara ilişkin elde edilen sonuçların anlamlı hale getirilmesi ve sayısallaştırılması için ise hata ağacı analizi (FTA) kullanılmıştır. Risk değerlendirme çalışmalarındaki senaryolardan ve geçmiş kazalardan elde edilen veriler kullanılarak yakıt mikserleri ve alt bileşenleri için güvenli tasarım girdileri sağlanmıştır. Son aşamada, katı yakıt üretim operasyonları için kritik olan ekipmanlar, parametreler ve proses adımları dikkate alınarak güvenli mikser tasarımı için aktif, pasif, prosedürel ve kendinden güvenli tasarım önerileri ile birlikte konsept bir sistem tasarlanmıştır.

Yürütülen çalışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Katı yakıt üretim prosesinde üretimi gerçekleştirilen enerjik malzemenin tehlikelerinin yanı sıra hammadde olarak kullanılan kimyasalların ve enerjik malzemelerin de potansiyel tehlikeleri bulunmaktadır. AP'nin sıcak yüzey maruziyeti kaynaklı dekompozisyon sıcaklığına ulaşma potansiyeli mevcut iken AL'nin toz patlayıcı özellik gösterdiği değerlendirilmiştir. Kararsız patlayıcı özellik gösteren NG ve BTTN'in yanı sıra HMX ve AP için kütlesel patlama riski bulunmaktadır. Elde edilen veriler sebebi ile proseslerin ve proses ekipmanlarının ilgili kimyasal ve enerjik malzemelere ait parametreler göz önünde bulundurularak tasarlanması gerekmektedir.
- HAZOP metodunun yarı kantitatif şekilde modifiye edilerek kullanılması ile çalışma ekibinin başlatıcı olay frekanslarının belirlenmesi ve bariyerlere ilişkin etkinliğin değerlendirilmesi aşamalarındaki görüşleri kaynaklı belirsizliğin ortadan kaldırıldığı tespit edilmiştir.
- HAZOP çalışmasında değerlendirilen parametreler incelendiğinde sıralama, miktar, akış, kontaminasyon, statik elektrik, basınç, sıcaklık, seviye, karıştırma hızı ve titreşimin, işletilebilirlik ve proses tehlikeleri açısından önemli oldukları görülmüştür.
- Değerlendirilen yakıt mikserinde proseslerin manuel ağırlıklı yürütülmesi, proses kontrolüne ilişkin yeterli kontrol alt yapısının bulunmaması, bağımsız güvenlik fonksiyonunu yerine getirecek sistemlere sahip olmaması, acil durum sistemlerinin talep anında istenilen fonksiyonu yerine getirebilme kapasitesinin ispat edilememiş olması sebepleri ile hesaplanan ham risklerin, bariyer sonrası risk hesaplamalarında da değişiklik göstermediği tespit edilmiştir.
- Yarı Kantitatif HAZOP ve FTA çalışmaları sonucunda senaryoların benzer hata olasılıklarına sahip olduğu ve iki farklı analiz yönteminden elde edilen sonuçların birbiri ile tutarlı olduğu belirlenmiştir.
- Katı yakıt mikserleri ve bağlı alt sistemlerdeki tekli hataların, tesis yatırımlarının veya insan hayatının kaybı ile sonuçlanabileceği değerlendirilmiştir. Bu sebeple yakıt proseslerinin tasarımında, yardımcı sistemler de dahil olmak üzere potansiyel tüm senaryoların etkin şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.
- Proses güvenliği çalışmalarında, kimyasalların tehlikelerinin belirlenmesi için kullanılan verilerin yanı sıra enerjik malzemelerde darbe, sürtünme, termal ve ESD hassasiyetlerine yer verilmiştir. Enerjik malzemelerin miktarı ve yaratacağı etki ilişkisinin endüstriyel

kimyasallara göre daha etkili olması sebebi ile proses güvenliği çalışmalarında kullanılan yöntemlerin enerjik malzemelerin elleçlendiği veya üretildiği proseslerde yeterli hassasiyeti sağlamadığı ve muhafazakâr bir yaklaşım ortaya koyduğu görülmüştür.

Güvenli tarafta kalınarak elde edilen sonuçların proses güvenliği yaklaşımı açısından pozitif etkilere sahip olduğu ancak fayda – maliyet, işletilebilirlik ve optimizasyon alanlarında ise negatif etkilere sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple enerjik malzemelere ilişkin proses tehlike analizi çalışmaları için özelleştirilmiş metotlara ve bu alanda yürütülecek çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Geleneksel katı yakıt üretim proseslerinde kontrolün insan gücü ve uzaktan kontrol ile yarı yarıya sağlanması, operasyonu yürüten çalışanların tesiste geçirdikleri süre içerisinde risk altında olduğunu göstermektedir. Bu sebeple proses tasarımlarının, insan gücü gerektiren tüm faaliyetler yerine otomasyon sistemlerinin kullanımı yönünde geliştirilmesi insan hayatını tehdit eden risklerin bertaraf edilmesi için oldukça önemlidir. Temizlik, eleme, tartım ve hammadde besleme gibi önemli proses adımlarının uzaktan kontrollü şekilde gerçekleştirilebileceği tasarım önerilerinde ele alınmıştır.

Ülkemizde endüstriyel tesislerdeki risklerin yönetilmesi amacı ile kullanılan “Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik”, enerjik malzemelerin üretimlerini gerçekleştiren savunma sanayii tesislerini kapsam dışında tutmaktadır. Diğer ülke uygulamalarında, enerjik malzemelerin üretimlerini yürüten tesisler için kimyasal üretimi gerçekleştiren tesislerden ayrıştırılarak oluşturulmuş standartlar, el kitapları ve yönetmelikler bulunmaktadır. Ülkemizde ise bu kapsamda rehber doküman veya standart bulunmamaktadır. Ülkemizdeki savunma sanayii kuruluşlarında geçmiş yıllarda yaşanan kazalara ilişkin veriler, bu alanda iyileştirmeye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Hızla büyüyen savunma sanayimizdeki potansiyel tehlikelerin etkin şekilde değerlendirilebilmesi için güvenlik ile ilişkili yürütülen çalışmaların ortak bir dil oluşturularak standart haline getirilmesi gerekmektedir. Endüstrinin güvenli proses kapsamında gelişimi için ise meydana gelen kazalara ilişkin bilgilerin ve olay araştırma raporlarının paylaşılması ve bilgi paylaşımını sağlayabilecek bir alt yapının oluşturulması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, katı yakıt mikserlerindeki potansiyel tehlikelerin ve potansiyel güvenli tasarım seçeneklerinin oluşturulması amacı ile yarı kantitatif HAZOP ve FTA yöntemleri kullanılmıştır. Araştırmaların devamında enerjik malzemelere ilişkin özelleştirilmiş metotların oluşturulması veya oluşturulan uzaktan kontrollü sistemin güvenlik bütünlük seviyelerinin değerlendirilmesine ilişkin çalışmalar yürütülebilir; oluşturulan güvenlik katmanlarının gerekliliği değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

Animah, I. and Shafiee, M. (2019). Application of risk analysis in the liquefied natural gas (LNG) sector: An overview. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2(3), 103980.

Aquino-Gaspar, H. M., Diaz-Ovalle, C. O., Lopez-Molina, A., Conde-Mejia, C. and Valenzuela-Gomez, L. M. (2021). Incident analysis of the "Pajaritos" petrochemical complex. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 3(2), 10404.

Baybutt, P. (2015). A critique of the Hazard and Operability (HAZOP) Study. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, 8(1), 52-58.

Beckstead, M. W., Puduppakkam, K., Thakre, P. and Yang, V. (2007). Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients. *Progress in Energy and Combustion Science*, 5(2), 497-551.

Bello, G. and Colombari, V. (1980). The human factors in risk analyses of process plants: The control room operator model 'TESEO'. *Reliability Engineering*, 1(16), 3-14.

Bendixen, L. M. and O'Neill, J. K. (1984). Chemical Plant Risk Assessment Using HAZOP and Fault Tree Methods. *Plant/Operations Progress*, 6(2), 179-184.

Boggs, T. L., Atwood, A. I., Lindfors, A. J., Mulder, E. J. and Pritchard, R. W. (2015). Hazards Associated with Solid Propellants. *Solid Propellant Chemistry*, 2(1), 221-264.

Boryczko, K., Szpak, D., Żywiec, J. and Tchórzewska-Cieślak, B. (2022). The Use of a Fault Tree Analysis (FTA) in the Operator Reliability Assessment of the Critical Infrastructure on the Example of Water Supply System. *Energies*, 1(3), 16-22.

Bostanoğlu, M. (2020*). Sanayi-çevre ilişkisi: AB ve Türkiye'de büyük endüstriyel kazaların önlenmesi yönergesi.* İstanbul: İktisadi Kalkınma Vakfı, 16-22.

Bridges, W. (2010). *LOPA and Human Reliability – Human Errors and Human.* Spring Meeting 6th Global Congress on Process Safety. Texas: Process Improvement Institute, Inc., 88-92.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (1998). *Guidelines for Design Solutions for Process Equipment Failures.* New York: American Institute of Chemical Engineers, 85-92.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2007). *Guidelines for Risk Based Process Safety*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 12-15.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2008). *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*. New York: Wiley-AIChE, 45-52.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2010). *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. Hoboken, NJ: Wiley, 112-115.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2010). *Guidelines for Safe Handling of Powders and Bulk Solids.* Hoboken, NJ: Wiley, 66-82.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2011). *Layer of Protection Analysis. Hoboken,* NJ: Center for Chemical Process Safety (CCPS), 12-18.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2013). *Guidelines for Enabling Conditions and Conditional Modifiers in Layer of Protection Analysis*. Hoboken, NJ: Center for Chemical Process Safety (CCPS), 102-105.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2014). *Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis*. Hoboken, NJ: Wiley-AIChE, 45-62.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2016). *Guidelines for implementing process safety management.* New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 23-32.

Chaturvedi, C. and Dave, P. N. (2019). Solid propellants: AP/HTPB composite propellants. *Arabian Journal of Chemistry*, 2(1), 2061-2068.

CSB. (2004). *Investigation Report Dust Explosion. Kinston,* North Carolina: U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, 45-62.

Cullen, W. D. (1990). *The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster*. London: Department of Energy, 15-18.

Çetinyokuş, S. (2018). Consequences Modeling of the Akçagaz Accident through Land Use Planning (LUP) Approach. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering,* 2(2), 253-264.

De Haag, P., Ale, B. and Post, J. (2001). *The 'Purple Book'.* Stockholm: Elseviler, 32-35.

Department of Defense (DoD). (2012). Department of defense standard practice system safety. *DoD,* New York, 1-104.

Dossi, S., Maggi, F., Paravan, C. and Galfetti, L. (2019). *Mechanically Activated Al/Mg Powders for Solid Rocket.* European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EACASS). Milan: EUCASS, 45-62.

Dunjó, J., Fthenakis, V., Vílchez, J. A. and Arnaldos, J. (2009). Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. *Journal of Hazardous Materials,* 2, 19-32.

Fang, Y., Rasel, M. and Richmond, P. C. (2020). Consequence risk analysis using operating procedure event trees and dynamic simulation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 2(6), 104235.

Hong, Y., Pasman, H. J., Sachdeva, S., Markowski, A. S. and Mannan, M. S. (2016). A fuzzy logic and probabilistic hybrid approach to quantify the uncertainty in layer of protection analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 13(5), 0-17.

Ikwan, F., Sanders, D. and Hassan, M. (2021). Safety evaluation of leak in a storage tank using fault tree analysis and risk matrix analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 5(2), 104597.

International Electrotechnical Commision (IEC). (2019). *IEC 31010:2019 Risk Management- Risk Assessment Techniques.* Washington: American National Standards Institute (ANSI), 36-42.

International Electrotechnical Commission (IEC). (2010). *IEC 62502:2010 Analysis techniques for dependability - Event tree analysis (ETA).* Washington: American National Standards Institute (ANSI), 112-115.

International Electrotechnical Commission (IEC). (2016). *IEC 61882 Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide.* Washington: American National Standards Institute (ANSI), 46-48.

International Electrotechnical Commission (IEC). (2018). *IEC 60812:2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).* Washington: American National Standards Institute (ANSI), 92-105.

Iqbal, M. M. and Liang, W. (2006). *Modeling the moisture effects of solid ingredients on composite propellant properties.* Washington: Aerospace Science and Technology, 695-699.

Isimite, J. and Rubini, P. (2016). A dynamic HAZOP case study using the Texas City refinery explosion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2(3), 496-501.

İnternet: U.S. Environmental Protection Agency. (2013). *CHAPTER 3: Five-Year Accident History.* Web: https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-10/documents/chap-03-final.pdf, Son Erişim Tarihi: 28/03/2023.

İnternet. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası. (2018). *Barutsan'da ölümü, işçi sağlığı ve güvenliği'ne aykırı talimat ve koşullar getirdi.* Web: https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=123807, Son Erişim Tarihi: 12/03/2023.

İnternet: AICHE. (2022). *PSID: Process Safety Incident Database. AICHE:* Web: https://www.aiche.org/ccps/resources/psid-process-safety-incident-database, Son Erişim Tarihi: 06/03/2023.

İnternet: Anadolu Ajansı. (2013). *Kırıkkale'de mühimmat deposundaki patlama.* Web: https://www.aa.com.tr/tr/pg/foto-galeri/muhimmat-deposunda-patlama/0/100004, Son Erişim Tarihi: 06/03/2023.

İnternet: Bulk Handling Equipment. (2023). *Palamatic Process:* Web: https://www.palamaticprocess.com/en-us/bulk-handling-equipment/drum-discharging/confined-tipping, Son Erişim Tarihi: 03/02/2023.

İnternet: CAMEO. (2022). *CAMEO Chemicals.* Web: https://cameochemicals.noaa.gov/, Son Erişim Tarihi: 17/12/2022.

İnternet: Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2022). *Center for Chemical Process Safety Glossary*. Web: https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary?title=accident#views-exposed-form-glossary-page, Son Erişim Tarihi: 26/03/2023.

İnternet: Deltima. (2023). *Vacuum Pump:* Web: https://www.deltima.eu/en/products-menu-catalogue/product/80-vacuum-pump-65-l-min-ul-ce, Son Erişim Tarihi: 16/03/2023.

İnternet: Department of Energy (DOE) *Technical Standards Program*. (2019). DOE-STD-1212-2019, Explosives Safety. Department of Energy Technical Standards Program: Web: https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1200/1212-astd-2019/@@images/file, Son Erişim Tarihi: 16/06/2023.

İnternet: DoD Policy on Environmental Safety and Occupational Health Network and Information Exchange. (2019, 01 13). *DOD 6055.09-M, Volume 1 DoD Ammunition And Explosives Safety Standards: General Explosives Safety Information And Requirements.* Web: https://denix.osd.mil/ddes/home/home-documents/desr-6055-09/, Son Erişim Tarihi: 11/04/2023.

İnternet: Dust-Tight Drum Dumper Rated for Hazardous Area. (2023). *Flexicon:* Web: https://www.flexicon.com/Products/159/EE-0798/Dust-Tight-Drum-Dumper-Rated-for-Hazardous-Area, Son Erişim Tarihi: 17/0372023.

İnternet: DVP Pumps. (2023). *Ex Vacuum Pump:* Web: https://www.dvppumps.com/en/products/dc-16dex-high-vacuum-pump-atex-zone-2, Son Erişim Tarihi: 17/03/2023.

İnternet: Elf Atochem North America. (2022). *Material Safety Data Sheet*. Web: http://edge.rit.edu: /edge/P07105/public/Documents/Safety%20Docs/MSDS%20Sheets/HTPBMSDS.pdf, Son Erişim Tarihi: 24/03/2023.

İnternet: European Commision. (2022). *The Major Accident Reporting System*. EMARS: Web: http://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content, Son Erişim Tarihi: 21/03/2023.

İnternet: GESTIS. (2022). *GESTIS Substance Database*. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Web: https://gestis-database.dguv.de/search, Son Erişim Tarihi: 23/03/2023.

İnternet: Haber Türk. (2011). *Batman'da Patlama.* Web: https://www.haberturk.com/yasam/haber/601969-batmanda-patlama, Son Erişim Tarihi: 26/03/2023.

İnternet: Hürriyet. (2008). *Kırıkkale MKE'de patlama.* Web: https://www.hurriyet.com.tr/gundem/kirikkale-mkede-patlama-9777844, Son Erişim Tarihi: 22/03/2023.

İnternet: Kleiman, D. (1978). *Gum Plant Cleared Of Crimes in a Blast Killing Six in 1976.* Web: https://www.nytimes.com/1978/02/16/archives/gum-plant-cleared-of-crimes-in-a-blast-killing-six-in-1976-gum.html, Son Erişim Tarihi: 23/03/2023.

İnternet: Longhorn Army Ammunition Plant. (1964*). Historical Summary Safety Data Pertinent to Manufacture and Loading of Solid Propellant.* Web: https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0642407.pdf, Son Erişim Tarihi: 23/03/2023.

İnternet: Milliyet. (2008). *MKE'de patlama: 3 ölü.* Web: https://www.milliyet.com.tr/gundem/mke-de-patlama-3-olu-984642, Son Erişim Tarihi: 01/03/2023.

İnternet: NTV. (2018). *MKE barut fabrikasında patlama: 1 ölü, 4 yaralı.* Web: https://www.ntv.com.tr/turkiye/son-dakikamke-barut-fabrikasinda-patlama,Py4q-8evfkCZeBjJCZ1NBA, Son Erişim Tarihi: 27/03/2023.

İnternet: Occupational Safety and Health Administration. (2022). *1910.119 - Process safety management of highly hazardous chemicals.* Web: https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.119, Son Erişim Tarihi: 25/03/2023.

İnternet: Official Journal of the European Union. (2012). Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council. Web: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0018&from=EN, Son Erişim Tarihi: 31/02/2023.

İnternet: T.B.M.M. (1998). *T.B.M.M. Tutanak Dergisi 56 ncı Birleşim.* Web: https://www5.tbmm.gov.tr/tutanak/donem20/yil3/bas/b056m.htm, Son Erişim Tarihi: 03/03/2023.

İnternet: TRT Haber. (2014). *Elmadağ MKE'de patlama*. Web: https://www.trthaber.com/haber/turkiye/elmadag-mkede-patlama-132220.html, 05/06/2023.

İnternet: Keil-Anlagenbau. (2023). *Offloading Stations.* Web: https://www.keil-anlagenbau.de/en/products/offloading-stations, Son Erişim Tarihi: 17/0372023.

Keshavarz, M. H. (2022). *Combustible Organic Materials: Determination and Prediction of Combustion Properties.* Berlin: De Gruyter, 105-136.

Klager, K. and Wrightson, J. M. (1965). *Recent Advances in Solid Propellant. Mechanics and Chemistry of Solid Propellants Proceedings of the Fourth Symposium on Naval Structural Mechanics.* Indiana: Elsevier, 47-74.

Klapötke, T. M. (2021). *Energetic Materials Encyclopedia*. Berlin: Walter de Gruyter, 93-105.

Lees, F. F. (2012). *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control* (3 Volumes), 4th Edition. Butterworth-Heinemann, 115-116.

Loi, F., Bienz, A. F. and Tan, A. (2005). *Quantitative Risk-based System Safety Assessment for Ammunition Process Facility.* Proceedings of the 23rd International System Safety Conference, Boston, 1-102.

Marhavilas, P. K., Filippidis, M., Koulinas, G. K. and Koulouriotis, D. E. (2019). The integration of HAZOP study with risk-matrix and the analytical-hierarchy process. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 16(2), 103981.

Mason, B. P. and Rolan, C. M. (2019). Solid Propellants. Solid Propellants, *Rubber Chemistry and Technology*, 92, 1-24.

Mastrolia, E. J. and Klager, K. (2012). Solid Propellants Based on Polybutadiene Binders. Propellants Manufacture, Hazards and Testing, *Advances in Chemistry Series*, 4(7), 221-261.

Mathesius, K. J. (2019). *Manufacturing Methods for a Solid Rocket Motor Propelling a Small, Fast Flight Vehicle.* Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 102-105.

Matthew, S., Thomas, S., Alexander, L., Rodolphe, C., Kareem, M. and Eric, P. (2007). *Comparison of Hand and Mechanically Mixed AP/HTPB Solid Composite Propellants.* AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cincinnati, 102-115.

Meyer, R., Köhler, J. and Homburg, A. (2007). *Explosives.* Essen: Wiley, 45-48.

Muthiah, R., Somasundaran, U., Verghese, T. and Thornas, V. (2013). Energetics and Compatibility of Plasticizers in Composite. Solid Propellants. *Defence Science Journal*, 3(2), 147-155.

Noriyati, R., Rozaaq, W., Musyafa, A. and Soepriyanto, A. (2015). Hazard & Operability Study and Determining Safety Integrity Level on Sulfur Furnace Unit: A Case Study in Fertilizer Industry. *Procedia Manufacturing*, 32, 231-236.

Nuclear Regulatory Commission. (2014). *Fault Tree Handbook.* Rockville: Nuclear Regulatory Commission, 17-26.

Padgett, H. L. (1959). *Ammonium Perchlorate Dust.In Explosive Safety Seminar on High-Energy Solid Propellants.* Maryland: Explosive Safety Seminar on High-Energy Solid Propellants, 34-35

Parker, R. J. (1975). *The Flixborough Disaster*. London: Department of Employment, 102-126.

Penner, S. S. (1965). *Advances in Tactical Rocket Propulsion.* California: Technivision Services Maidenhead, 145-152.

Rajagopal, C. and Jain, C. A. (1994). Hazard Assessment of a Nitration Plant using Fault Tree Analysis. *Defence Science Journal*, 8(2), 323-330.

Rajagopal, C. and Jain, A. K. (1997). Quantitative Risk Assessment in a Process Plant. *Defence Science Journal*, 1(47), 197-205.

Resmi Gazete. (2019). *Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik.* Ankara: Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve İçişleri Bakanlığı, 8-16.

Setiles, J. B. (1963). *Propellant Mixers. Explosive Safety Seminar on High-Energy Solid Propellants.* California: Armed Services Explosives Safety Board, 114-135.

Shao, C., Yang, J., Xiaogang, T., Ju, M. and Huang, L. (2013). Integrated Environmental Risk Assessment and Whole-Process Management System in Chemical Industry Park. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2, 1609-1630.

Shuiai, W., Chunhua, B., Lei, S., Wenhai, L., Jian, Z., Chunguang, L. and Jian, Y. (2021). Study on the electrostatic field distribution in a typical propellant production process. *Journal of Electrostatics*, 3(113), 103617.

Singh, B., Jukes, P., Poblete, B. and Wittkower, B. (2010). 20 Years on lessons learned from Piper Alpha. The evolution of concurrent and inherently safe design. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 5(2), 936-953.

Sivaraman, S. and Varadharajan, S. (2021). Investigative consequence analysis: A case study research of beirut explosion accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 6(2), 104387.

Smith, R. (2015). Chemical Process Design. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 3(5), 1-29.

Song, X., Gao, X., Kou, Y., Yu, Z., Wang, Y., An, C. and Li, F. (2022). Thermolysis and sensitivities of solid propellants using characterized nano oxidizers involving energy performance evaluation. *FirePhysChem*, 3(5), 12-16.

Stephens, M., Sammet, T., LePage, A., Carro, R., Moslehy, K. and Petersen, E. L. (2007). Comparison of Hand and Mechanically Mixed AP/HTPB Solid Composite Propellants. *AIAA*. Ohio, 87-92.

Stuckey, M. T. (1963). *Fires During Mixer Operations. Explosive Safety Seminar on High-Energy Solid Propellants.* Californioa: Armed Services Explosives Safety Board, 87-112.

Sultana, S., Okoh, P., Haugen, S. and Vinnem, J. E. (2019). Hazard analysis: Application of STPA to ship-to-ship transfer of LNG. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 5(2), 241-252.

Swisdak, M. M. and Deschambault, E. J. (1998). *A Brief discussion of a recent explosive accident at the naval surface warfare center*. DoD Explosives Safety Seminar. Orlando: DoD.

The International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). IEC 31010 Risk management — Risk assessment techniques. Risk management — Risk assessment techniques. *IEC*, Geneva, 17-22.

Wang, D., Zhang, P. and Chen, L. (2013). Fuzzy fault tree analysis for fire and explosion of crude oil tanks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 5(6)1-9.

Wang, L., Yan, F., Wang, F. and Li, Z. (2020). FMEA-CM based quantitative risk assessment for process industries - A case study of coal-to-methanol plant in China. *Process Safety and Environmental Protection*, 2(5), 22-36.,

Wang, Y., Henriksen, T., Milind, D. 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*, 17(2), 104512.

Wettig, J., Porter, S. and Kirchsteiger, C. (1999). Major Industrial Accidents Regulation In The European Union. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2(4), 19–28.

Windhorst, J. A. (1995). Application of Inherently Safe Design Concepts, Fitness for Use and Risk Driven Design Process Safety Standards to an LPG Project. *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, 13(2), 26-32.

Yan, F., Xu, K., Cui, Z. and Yao, X. (2017). An improved layer of protection analysis based on a cloud model: Methodology and case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 4(2), 17-32.

Zhang, B.-C., Xu, J., Feng, Y., Zhang, A., Chen, X., Cai, W. and Zhu, M. (2021). Experimental Investigation on Combustion Characteristics and Agglomeration of Al/NEPE Propellants. Propellants, Explosives, *Pyrotechnics*, 1(2), 12-16.



Gazili olmak ayrıcalıktır