



The evaluation of vapor cloud explosion risk through consequence analysis approach for an LPG filling terminal in Turkey

Ferdi Çalık^{1*}, Gökçen Alev Çiftçiöğlü², Mehmet Arif Neşet Kadırgan²

¹Department of Work Safety, Institute of Pure and Applied Sciences, Marmara University, 34722, Kadıköy, İstanbul, Türkiye

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Marmara University, 34722, Kadıköy, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- A comprehensive method proposal for the evaluation of LPG vapor cloud explosion risk
- The damage estimation by ALOHA and GIS-based MARPLOT Software Integration
- The estimation of vulnerability levels caused by vapor cloud explosions

Keywords:

- Vapor Cloud Explosion
- Chemical Process Safety
- Consequence Analysis
- Damage Probability
- Probit Functions

Article Info:

Research Article

Received: 09.02.2022

Accepted: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1070431

Correspondence:

Author: Ferdi Çalık

e-mail:

ferdicalik@marun.edu.tr

phone: +90 533 765 0813

Graphical/Tabular Abstract

Unlike other consequence analysis studies in the literature, Figure A shows that the main steps of proposed method is based on a truth near-miss LPG (Liquified Propane Gas) dispersion event. Systematic consequence analysis is shown for 5 different leakage scenarios defined according to the geometric diameter approach. The leakage duration time is taken as 15 minutes (near-miss LPG dispersion duration) for each scenario where an LPG vapor cloud is formed. Then ALOHA© (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) v5.4.4 software is used to model the LPG vapor cloud explosion. The sensitive areas in and around the LPG facility were marked on the Marplot mapping software and the damage probabilities were analyzed and shown on the map.

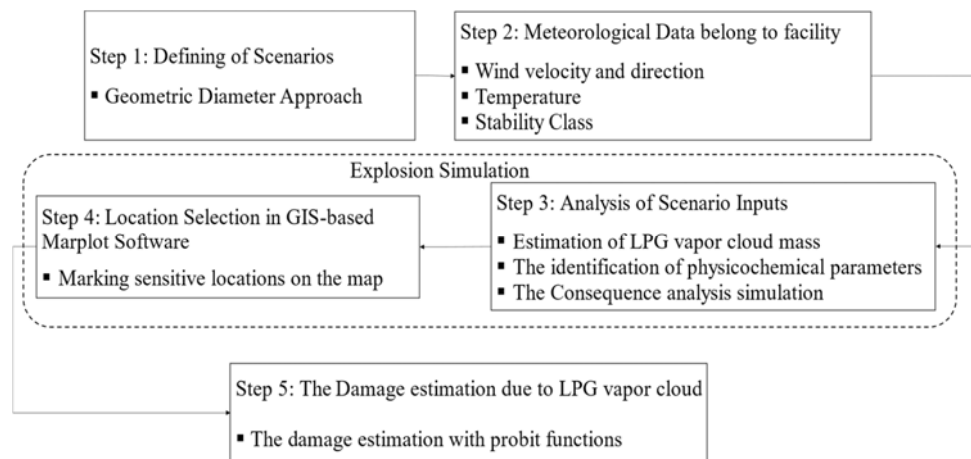


Figure A. Main steps for consequence analysis approach

Purpose:

The main purpose of this study is to evaluate the damage after vapor cloud explosions caused by potential gas leakage from a systematic, scientific, and quantitative perspective. It is thought that this study will contribute to taking proactive measures for possible fire and explosion accidents.

Theory and Methods:

In this consequence analysis modeling study, 5 different leak scenarios were defined according to the geometric mean diameter approach. The LPG gas cloud explosion dispersed into the atmosphere from different leakage cross-section diameters because of 15 minutes of dispersion was analyzed with ALOHA software. The resulting damage parameters (overpressure, impulse, and positive phase time) were imported into MARPLOT mapping software and analyzed for selected sensitive locations. The probabilities of damage at selected locations caused by overpressure (pascal), impulse (Pa. s) and positive phase duration (s) were estimated by Probit functions ($Y = a + b \cdot \ln \ln (P_s - \text{pascal}, I - \text{Pa. s}), P_r (\%) = 1/2 [1 + \text{erf}(Y - 5/\sqrt{2})]$).

Results:

According to the results of the study; S-1, S-2 and S-3 were considered as deflagration events resulting from alternative leakage scenarios, and S-4 and S-5 as detonation events resulting from worst-case scenarios.

Conclusion: The consequence analysis study is an important tool in the nature of pre-assessment in order to predict possible explosion damage in chemical plants and to the planning of proactive actions.



Türkiye’de bir LPG dolum terminali için buhar bulutu patlama riskinin sonuç analizi yaklaşımı ile değerlendirilmesi

Ferdi Çalık^{1*}, Gökçen Alev Çiftçioğlu², Mehmet Arif Neşet Kadırgan²

¹Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Güvenliği Bölümü, 34722, Kadıköy, İstanbul, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 34722, Kadıköy, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- LPG buhar bulutu patlama riskinin değerlendirilmesi için kapsamlı bir metod önerisi
- ALOHA ve Coğrafi Bilgi Sistemi Tabanlı MARPLOT Yazılımı Entegrasyonu ile Hasar Tahmini
- Buhar bulutu patlamalarından kaynaklanan zarar görülebilirlik seviyelerinin tahmini

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 09.02.2022

Kabul: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1070431

Anahtar Kelimeler:

Gaz patlaması,
buhar bulutu patlaması,
patlama hasar tahmini,
sonuç analizi

ÖZ

Sonuç analizi modelleme yaklaşımı; kimyasal proses endüstrisinde alevlenebilir özellikteki kimyasalların bütünlük kaybı senaryoları sonrasında meydana getireceği fiziksel hasarın; tesis ekipmanları, tesis içerisinde ve etrafındaki yapılar, çevre ve canlılar üzerine etkisini kantitatif olarak değerlendiren risk analizi yöntemini ifade etmektedir. Bu çalışmada; literatürde ele alınan geleneksel yaklaşımın aksine, LPG(sıvılaştırılmış propan gazı) bulutunun açık alanda meydana getireceği patlama riski, tesise özgü parametreler üzerinden ve genel literatürde kullanılan metodların içerdiği salım kesit alanı, patlamaya katkıda bulunan gaz kütlesi, meteorolojik parametreler, yakıt reaktivitesi, sıkışıklık geometrisi ve DDT(parlamadan patlamaya geçiş) değerlendirmesi gibi belirsizliklerin minimum düzeye indirildiği, konservatif ve sistematik bir prosedür önerisi sunulmuştur. Temmuz 2017 tarihinde yaklaşık 15 dakikalık gerçek ramak-kala LPG dispersiyonuna dayanan bu modelleme çalışmasında; tanımlanan senaryolardaki patlayabilir LPG bulutu kütlelerinden kaynaklanan hasar parametreleri ALOHA yazılımında analiz edilmiştir. Elde edilen aşırıbasınç konturları GIS tabanlı MARPLOT yazılımına aktarılarak; hassas lokasyonlar üzerinde oluşan aşırıbasıncın neden olacağı hasar, probit fonksiyonları ile tahmin edilmiştir. Yapıların içerdiği farklı donatı ve fiziksel özellikler olası bir yapısal hasar için doğru tahminlere ulaşmayı güçleştirmektedir. Bu sebeple tesis yatırımları için karar alma aşamasında daha ileri analizlere ihtiyaç duyulması bu güncel prosedürün kısıtıdır. Fakat; kimyasal tesislerin yükümlü olduğu kanuni belgelendirmeler için (KRA, PKD, GR, BKÖPB, ADTP) bilimsel ve sistematik bakış açısı sunar.

The evaluation of vapor cloud explosion risk through consequence analysis approach for an LPG filling terminal in Turkey

HIGHLIGHTS

- A comprehensive method proposal for the evaluation of LPG vapor cloud explosion risk
- The damage estimation by ALOHA and GIS-based MARPLOT Software Integration
- The estimation of vulnerability levels caused by vapor cloud explosions

Article Info

Research Article

Received: 09.02.2022

Accepted: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1070431

Keywords:

Gas explosion,
vapor cloud explosion,
damage estimation of
explosion,
consequence analysis

ABSTRACT

The Consequence analysis modeling approach refers to the risk analysis method that quantitatively evaluates the effect of physical damage to be caused by flammable chemicals in the chemical process industry on the plant equipment, structures in and around the plant, the environment and living things after the loss of integrity scenarios. This study minimizes uncertainties such as release cross-section, flammable gas cloud mass, congestion geometry and DDT (deflagration to detonation transition) assessment, fuel reactivity involved in the traditional approach discussed in the literature and presents a conservative systematic procedure. This consequence analysis modelling based on near-miss LPG dispersion that have happened approximately 15 minutes in July 2017 at an LPG filling facility. The damage parameters caused by explosive LPG cloud mass in the defined scenarios were analyzed in ALOHA software. The overpressure outputs were transferred to GIS-based Marplot software and were estimated damage on sensitive locations caused by explosion overpressure through probit functions. The probit equations used in this study for building damage estimations put all buildings in the same category. The different reinforcement and physical properties of the buildings make it difficult to reach accurate estimates for possible structural damage. In addition, this study is a pre-assessment on the dimensions of the explosion risk due to the uncertainties and assumptions contained in the method. At the decision-making stage for the facility investment plans should make more comprehensive analysis.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *ferdicalik@marun.edu.tr, gçiftcioglu@marmara.edu.tr, nkadirgan@marmara.edu.tr / Tel: +90 533 765 0813

1. Giriş (Introduction)

Kimyasal süreçleri içeren endüstrilerde meydana gelen patlamalar canlılar, ekipmanlar ve yapılar için büyük risk teşkil eden kazalardır [1]. Proses güvenliği literatüründe; sızıntı ve patlamaların meydana gelme frekanslarının oldukça yüksek majör potansiyel kazalar olduğu vurgulanmaktadır [2]. Ayrıca olası sonuçlarını tahmin edebilmek ve proaktif önlemler alabilmek için yoğun çaba sarf edilmektedir [3,4]. Gaz sızıntıları ve bu sızıntıların meydana getireceği patlamalar, yalnızca iş yerinde çalışan işçiler üzerinde olumsuz etkilere sebep olmakla kalmaz, aynı zamanda çevredeki yaşamsal alanları ve çevredeki ortamı da olumsuz etkiler. Ayrıca patlama nedeniyle oluşacak ekipman kaybı veya değişiminden kaynaklı ekonomik kayıplar ve tesisin tekrar çalışır duruma getirilmesi için gereken süre de üzerinde düşünülmesi gereken bir diğer husustur.

Türkiye’de patlama riskinin söz konusu olduğu işletmeler; bu riskin tamamen ortadan kaldırılması veya sonuçlarının kabul edilebilir düzeye indirilmesi konusunda ulusal ve uluslararası düzenlemelerle yükümlülük altına alınmıştır. Ulusal çapta yürürlükte olan “Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik” ve “Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik” hükümleri, olası patlamanın etkilerinin ve sonuçlarının değerlendirilebilmesi için önemli bir kılavuz niteliğindedir, fakat bu değerlendirmenin nasıl bir kantitatif yöntemle yapılması gerektiği hususunda fikir birliğine varılmamış birçok nokta mevcuttur.

Türkiye’de 7 Temmuz 2020 tarihinde, Sakarya’nın Hendek ilçesinde, kimyasal bir tesiste meydana gelen patlamada 4 kişinin ölümü ve çevre köylerde tespit edilen hasar, olası patlamaların tesis ve çevresinde oluşturduğu etkiyi gözler önüne sermektedir.

Şekil 1’de patlama sonrası oluşan aşırıbasınç dalgasının yaklaşık 700 m uzaklıktaki yaşamsal alanlarda meydana getirdiği tahribatı

göstermektedir [5]. Büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik” kapsamına giren veya bu yönetmelik kapsamı dışında kalıp patlama riski taşıyan kimyasal proses endüstrisi işletmeleri genelde, tehlike ve işletilirlik analizi (HAZOP), tehlike tanımlaması (HAZID), papyon analizi, hata ağacı, olay ağacı, hata türleri ve etkileri analizi (FMEA) gibi metotlar üzerinden kurulan varsayımsal kaza senaryoları ile çok fazla belirsizlik içeren yarı kantitatif analizler yapmaktadır. Fakat bu yöntemler olası bir buhar bulutunun patlama riskinin değerlendirilmesinde yetersiz kalmaktadır.

Geçmiş literatür incelendiğinde; Türkiye kimyasal proses endüstrisinde benzen(C_7H_8) üretim prosesi içeren bir tesis için tasarlanan Nötrosifik FMEA (Hata türleri ve Etkileri Analizi) metodu ile söz konusu patlama ve yangın riskini değerlendirme aşamasındaki belirsizlikleri gidermeyi amaçlayan yarı kantitatif bir model önerisi sunulmuştur. Nötrosifik küme tabanlı çıkarım sistemi ile risk derecelerini hesaplayarak öncelik sırasına koyan bu model, tanımlanan kontrol noktaları üzerinden patlama ve yangın sonucundaki olası ölümlü kazaları önleyebilme adına, alınması gereken kontrol tedbirleri üzerine yoğunlaşmaktadır (Karamustafa vd. [6]). Fakat, olası bir patlama riskinin sonuçlarını zarar görülebilirlik açısından değerlendirmede daha kantitatif yöntemlere ihtiyaç olduğu açıktır.

Sonuç Analizi Yaklaşımı ise, beklenen olayın meydana gelme sıklığı veya olasılığından bağımsız olarak, olay sonuç durumlarının beklenen etkilerinin tahmini olarak tanımlanmaktadır (CCPS- Center for Chemical Process Safety) ve söz konusu spesifik olaylardan kaynaklanabilecek potansiyel hasar veya yaralanmayı tahmin etmek için kullanılır. Sonuç analizi yaklaşımı; en kötü durum senaryosu (Worst-Case scenario, WCS) ve alternatif sızıntı senaryoları olmak üzere iki temel yaklaşımı içerir [7]. Bu çalışmada; S-4 ve S-5 senaryoları buhar bulutu kütlelerine ve DDT (deflagrasyondan detonasyona geçiş)’ye bağlı olarak en kötü durum senaryosu, S-1, S-



Şekil 1. Hendek Patlaması ve hasar görüntüleri (Hendek Explosion and Damage Images)

2, S-3 senaryoları alternatif sızıntı senaryoları olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma; Türkiye’de “Sonuç Analizi Modelleme” yaklaşımı ile yapılan ilk çalışma olmasının yanında, kimyasal proses endüstrisinde ciddi belirsizlikler içeren büyük patlama kaza senaryolarının oluşturulması ve etkilerinin değerlendirilmesinde kantitatif kılavuz niteliğindedir. Bu çalışmada sonuç analizi yaklaşımı ile ele alınan LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) ve neden olacağı patlama riski hasarı, özellikle petrol ve gaz endüstrisinde hizmet veren işletmeler açısından yol gösterici olacaktır.

1.1. Hasar Parametreleri (Damage Parameters)

Gaz patlamaları sonucunda atmosfere hızlı bir şekilde yayılan enerji bir aşırıbasınç dalgası üretir [8]. İnsanlarda ciddi yaralanma ve yapısal hasar olasılığı, patlama merkezinden uzaklığın bir fonksiyonu olarak ifade edilen aşırıbasınç sayesinde belirlenebilir. Hasar, Aşırıbasınç dalgasının hem şekli hem de büyüklüğü ile ilişkilidir. Aşırıbasınç dalgası dışarı doğru hareket ettikçe her ikisi de değişir [9]. Aşırıbasınç dalgası neredeyse anlık olan ses hızında hareket eder ve çevredeki yapı veya popülasyona ciddi zararlar verir [10]. Aşırıbasınç (bu çalışmada P_s olarak ifade edilmiştir), patlama sonucu oluşan şok dalgasına atıf yapan, patlama pik basıncı ve atmosferik basınç farkını ($P_{pik} - P_{atmosfer} = \Delta P$) ifade eden bir kavramdır. Proses Güvenliği literatüründe açık alanda aşırıbasınç oluşumuna neden olabilecek buhar bulutu büyüklüğünü belirleme adına yapılan deneysel çalışmalar oldukça sınırlıdır. Kapalı tüp denemelerine göre; kütlesi 0,5 – 500 kg arasındaki çok küçük bulutların neden olduğu patlamalar bile hasar verme kapasitesine sahip aşırıbasınç oluşumuna yol açabilir (Maurer vd. [11]).

TNT (trinitrotoluen) eşdeğer kütle metodu, TNO çoklu enerji metodu ve BST(Baker-Sthrelow-Tang) metodu BBP (buhar bulutu patlaması) sonrası oluşacak aşırıbasıncı hesaplamak için literatürde yaygın olarak kullanılan modellerdir [12, 13]. Üç modelinde; kolaylık, aşırı tahmin, ortam geometrisi, yakıt reaktivitesi, dispersiyon gibi olası patlama sonuçlarını direkt etkileyen parametreleri hesaba katma konusunda birbirine göre üstün ve zayıf tarafları söz konusudur [14].

Şekil 2’de ideal bir aşırıbasınç dalgasının hasar parametreleri (P_s : Aşırıbasınç-Pascal, \dot{I}_s : impuls-Pa. s, t_d :pozitif faz süresi-saniye) gösterilmiştir. Aşırıbasınç ile yakından ilişkili bir diğer önemli hasar parametresi de impuls süresidir [15]. Hasarın boyutu, patlamanın meydana getirdiği şok dalgasının yapı üzerinde ne kadarlık basınçla ne kadar süre etkileştiği ile yakından ilişkilidir. İmpuls süresi Eş. 1 ile hesaplanabilir.

$$\dot{I}_s \cong \frac{1}{2} \cdot P_s \cdot t_d \quad (1)$$

Eş. 1’de \dot{I}_s : impuls süresi (Pa. s), P_s : aşırıbasınç(pascal), t_d : pozitif faz süresini(saniye) ifade etmektedir. Patlama olayı anlık ve çok kısa süre içerisinde gerçekleşen bir olay olduğundan Pozitif faz süresi t_d ; patlamanın yapı üzerinde etki gösterdiği süre (patlama süresi) olarak karakterize edilebilir. Kimyasal proses endüstrisi kayıp önleme literatüründe geçmişte yapılan deneysel çalışmalar; buhar bulutu kütlesi (M_{gaz} , kg) ve gaz patlamasının pozitif faz süresi (t_d ; saniye) arasındaki ampirik korelasyonun Eş. 2 ile ifade edilebileceğini göstermiştir [16].

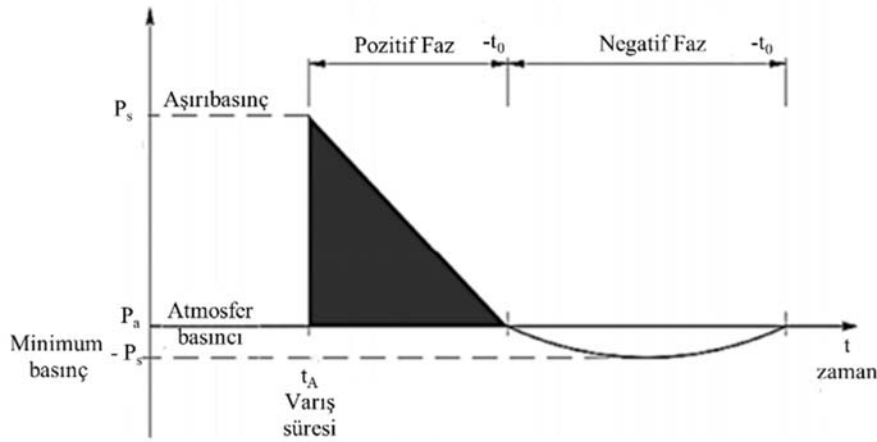
$$t_d \cong \sqrt[6]{M_{gaz}} \quad (2)$$

Patlama fenomeni; sonuçlarının ciddi risk teşkil etmesinden dolayı deney ve gözlem sahasından uzaktır. Bu sebeple tesise özgü oluşturulacak senaryolar üzerinden yapılması gereken matematiksel ispatların; ciddi uzmanlık gerektirmesi, zaman ve maliyet gibi birçok açıdan olumsuzluk teşkil etmektedir. Bu durumda, buhar bulutu patlaması sonrasında oluşabilecek hasarın tahmin edilebilmesi oldukça zor ve karmaşık bir hal almaktadır. Teknolojik gelişmelere bağlı, uluslararası firmaların geliştirdiği simülasyon programlarının kullanımı son yıllarda global çapta artış göstermiştir. Olası bir patlamanın sonuçları, özel olarak hazırlanan ortamlarda ve deney düzeneklerinde elde edilen sonuçların yazılıma dökülmesiyle tesise özgü senaryolar üzerinden hızla modellenebilmekte ve sonuçları analiz edilmektedir. Olası patlamaların sonuçlarını tahmin etmek için literatürde en çok bilinen ve atıf yapılan; ALOHA, PHAST, SAFETI, BREEZE, RMP Comp, EFFECTS, TerEx, ROZEX gibi yazılımlar geniş çapta kullanılmaktadır [17].

1.2. Deflagrasyondan Detonasyona Geçiş (Deflagration to detonation Transition-DDT)

Proses güvenliği literatüründe alevlenebilir özellikteki gazlardan kaynaklanan patlamalar deflagrasyon(parlama) ve detonasyon(patlama) olmak üzere iki başlık altında incelenir. Deflagrasyon; subsonik (ses altı) hızlarda gerçekleşen bir olaydır. Hidrokarbonlardan kaynaklanan deflagrasyon olayları tipik olarak 300 m/s mertebesinde [18].

Detonasyon(patlama) olayı oldukça farklı bir mekanizma üzerinden gerçekleşir. Alev cephesi şok dalgasını sürdürmek için enerjiyi serbest bırakan bir yanma dalgası tarafından yakından takip edilen bir şok dalgası olarak hareket eder. Oluşan bu şok dalgasının hızı ses hızının



Şekil 2. İdeal Aşırıbasınç Dalgası Formu (Ideal Overpressure Wave Form)

çok üstündedir. Hidrokarbonlar için detonasyon hızı 2000-3000 m/s mertebesindedir. Detonasyon olayı deflagrasyon olayından daha fazla aşırıbasınç oluşturur ve daha yıkıcıdır. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre; deflagrasyon olayında meydana gelen aşırıbasınç 8 bar civarında iken, detonasyon olayı 20 bar civarında aşırıbasınç meydana getirebilir (Pierorazio vd. [19]). Proses güvenliği literatüründe geçmişte meydana gelen LPG buhar bulutu patlamaları (Pord Hudson, USA, Aralık 1970; CAPECO, Portoriko, 23 Ekim 2009; Brenham, Texas, USA, 7 Nisan 1992; Ufa, Rusya, 4 Haziran 1989) üzerine süregelen tartışmalar, bahsi geçen buhar bulutu patlamalarının DDT olayı olarak değerlendirilmesine neden olmuştur [20]. Türbülans oluşturan engellerin ve sıkışık geometrinin etkisi, bir deflagrasyonda alev hızının ve aşırıbasıncın belirlenmesinde baskın bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır (Rasbash vd. [21]). Bu patlama araştırmalarından çıkan en önemli mesaj, açık ve sıkışık olmayan alanlar dahil olmak üzere buhar bulutu patlaması kazalarında yüksek aşırı basınçların oluştuğuna dair açık ve tartışılmaz kanıtların olmasıdır [22].

1.3. BST(Baker-Strehlow-Tang) Metodu

Bu çalışmada kullanılan ALOHA[®] yazılımı aşırı basıncı (P_s; Pascal) BST metoduna göre hesaplar (Jones vd. [23]). BST metodu; Mach sayısı (alev hızı), yakıt reaktivitesi, ortam geometrisinin sıkışıklık durumu gibi patlama sonuçları üzerine direkt etkisi olan parametreleri hesaba katmaktadır ki, bu durum yöntemi diğerlerine nazaran daha güvenilir kılmaktadır. BST metodu, sıkışıklık seviyesini 3'e ayırır. Patlama bölgesi içerisindeki sıkışıklık alan blokaj oranı (ABO) ile karakterize edilir. ABO; tesisi genelinin %10'undan düşükse "düşük derecede sıkışık", %10 ve %40 arasında ise "orta derecede sıkışık", %40'ın üzerinde ise "yüksek derecede sıkışık" olarak ifade edilir. Reaktivite terimi, yakıtın kimyasal özelliklerini karakterize etmek için kullanılır. Zeeuwen ve Wiekema tarafından kullanılan reaktivite derecelendirmeleri, BST modelinde kimyasal laminar yanma hızına dayalı olarak reaktiviteyi sınıflandırır (Woodward vd. [24]). "Düşük reaktiviteli kimyasalların hızları 45 cm/sn'den azdır (metan ve karbon monoksit gibi). "Yüksek reaktivite"; yanma hızları 75 cm/sn'den yüksek olan kimyasallar için geçerlidir (hidrojen, asetilen, etilen, etilen oksit, propilen oksit gibi) ve aradaki yanma hızları "orta reaktivite" olarak etiketlenir (Diğer tüm yakıtlar-propan, n-bütan vb.). Literatürde ve teorik hesaplamalarda propan için laminar yanma hızı 45-52 cm/s (orta reaktivite) olarak öngörülmesine rağmen, DDT mekanizmasına katkı sunan patlayabilir gaz bulutu kütledeki belirsizliğe bağlı olarak, ALOHA yazılımında propan senaryoları "yüksek reaktivite" olarak kabul edilmiştir. Tablo 1'de sonuç analizi çalışmasında senaryo edilen çalışma alanı ve propan gazı için konservatif BST metodu varsayımı gösterilmiştir.

Tablo 1. BST Metodu Alev hızı, Sıkışıklık ve Yakıt Reaktivite Korelasyonları

(The Correlations of Flame Speed, Congestion and Fuel Reactivity for BST Method)

Boyut	Reaktivite	Sıkışıklık		
		Yüksek	Orta	Düşük
3D (Tamamen Açık Alan)	Yüksek	DDT	DDT	DDT
	Orta	0,50	0,44	0,11
	Düşük	0,34	0,23	0,026

Tablo 1'e göre tamamen açık alan yüksek reaktivite ve yüksek sıkışıklık geometrisine sahip 3D boyutlu bir patlama için detonasyon oluşacaktır.

1.4. Proses Güvenliği için Hasar Tahmin Fonksiyonları (The Probit Functions for Process Safety)

Proses güvenliği literatüründeki kanıtlar ve deneysel araştırmalar, yalnızca toksikolojik senaryolara ait olmayan, birçok neden-etki

olgusunun, genel olasılık fonksiyonu ile ifade edilebileceğini göstermektedir [25].

$$Y = a + b \ln(P_s, i); P_r (\%) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Y-5}{\sqrt{2}} \right) \right] \cdot 100 \quad (3)$$

Eş. 3'te Y: olasılık(probit) fonksiyonu, a ve b: ilgili hasar parametresi için katsayıları, P_s: Patlama sonucu meydana gelen aşırı basıncı (Pascal), İ_s: impuls (Pa. s), P_r: ilgili hasarın meydana gelme olasılığını(%) ifade etmektedir.

Geçmiş literatür çalışmaları incelendiğinde buhar bulutu patlama modellemesi üzerine birçok araştırma yapılmıştır (Bagster vd. [26]).

Xianzhao S. ve arkadaşlarının 2021 yılında yapmış oldukları sonuç analizi modelleme yaklaşımında; açık alanda aerosol (Propilen Oksit, JP-10 ve petrol eteri) bulutunun neden olduğu insan ve yapı hasarını; TNO Çoklu enerji modeli yöntemiyle elde ettikleri aşırıbasınç ve impuls süresine bağlı olasılık fonksiyonları (probit functions) üzerinden değerlendirmişlerdir [27]. I. Sellami ve diğerleri; Cezayir ulusal petrokimya ve gaz endüstrisi şirketi Sonatrach bünyesinde; 2018 yılında yaptıkları "Kantitatif sonuç analizi" çalışmasıyla LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) için BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) termal etkilerini modelleyerek, aşırıbasıncın ve radyant ısının insanlar ve ekipmanlar üzerine olası hasarını ve etki mesafelerini "birleştirilmiş QRA-Sedow-Taylor yaklaşımı" adını verdikleri teorik çalışma ile ortaya koymuşlardır [28].

1.5. Potansiyel Sızıntı Senaryoları için Sızıntı Delik Boyutlarının Belirlenmesi

(The Defining of Leak Hole Sizes for Potential Leak Scenarios)

Sonuç analizi modellemesi için; bir depolama tankı veya boru hattı gibi proses ekipmanları üzerinde bir sızıntı delik çapından LPG gazının atmosfere veya kapalı bir ortama boşalmasını gerektiren bir problem düşünülmelidir. Peki, kapalı bir ekipman içerisinde bütünlük kaybına uğrayan LPG (Sıvılaştırılmış Propan Gazı)'nın ne kadarlık bir delik çapından yayılabileceği nasıl tahmin edilir? Bu çalışmada; bu belirsizlik için mantıklı bir öneri de sunulmuştur. Birleşik Krallık hidrokarbon sızıntı veri tabanına (HydroCarbon Release Database-HCRD) göre; proses güvenliğinde gaz dispersiyonuna neden olan sızıntı delik çapları; 1-3 mm aralığı için "Çok Küçük", 3-10 mm aralığı için "Küçük", 10-50 mm aralığı için "Orta", 50-150 mm aralığı için "Geniş" ve >150 mm üzeri için "Tam Delik" çaplı sızıntılar olarak 5 sınıfta genelleştirilmiştir [29].

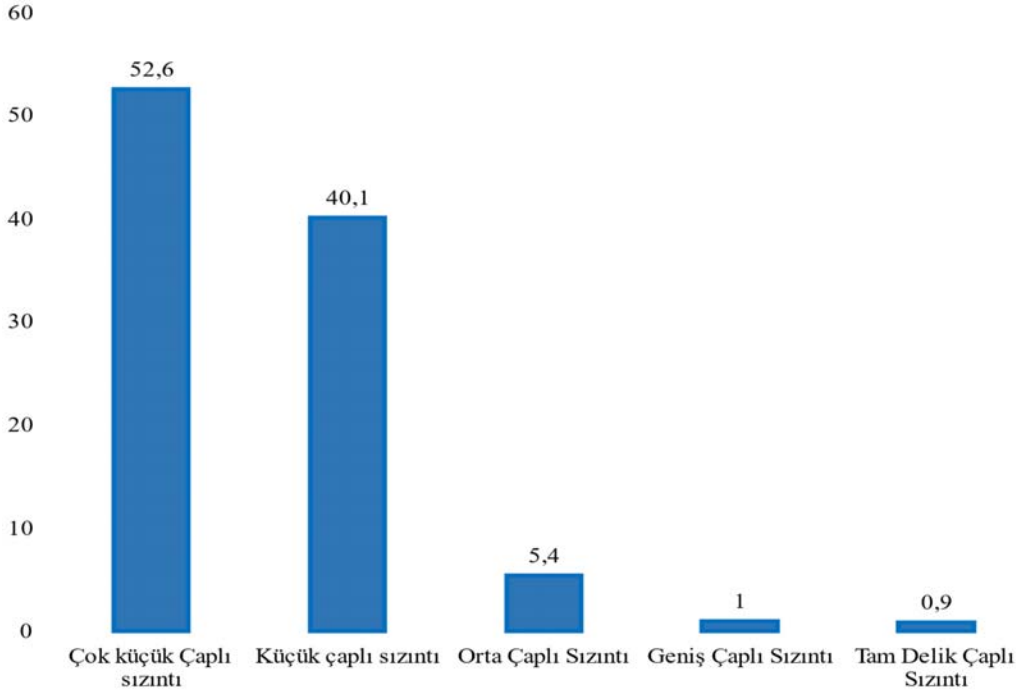
U.K(Birleşik Krallık) HCRD veri tabanından elde edilen Şekil 3'e göre; sızıntı delik çapı arttıkça, sızıntının gerçekleşme frekansı düşmekte fakat oluşacak buhar bulutunun büyüklüğüne paralel olarak zarar görülebilirlik(hasar) seviyesi artmaktadır. B. Bain ve diğer DNV (Det Norske Veritas) mühendisleri, hidrokarbon sızıntılarının modellenmesi üzerine yaptıkları çalışmada; sızıntı delik çapları ve kütle salım oranları(kg/s) arasındaki ilişkiyi inceleyerek, kütle salım oranına bağlı; "Küçük" (0,01-1 kg/s), "Orta" (1-10 kg/s), "Geniş" (>10 kg/s) çaplı buhar bulutu büyüklüğüne atıf yapan alternatif bir sınıflandırma önermişlerdir [30]. Uluslararası petrol ve gaz üreticileri birliği (IOGP) 434-01 başlık numaralı 2019 raporunda; 5 sınıfta genelleştirilen sızıntı delik çapı aralıkları için, ölümcül hasara sebep olacak en uygun sızıntı delik çapının tahmin edilebilmesinin geometrik ortalama çap yaklaşımı ile mümkün olduğunu ifade etmekte ve bu yaklaşımın; patlama hasarı tahmini için gerekli olan senaryolarda kullanılmasını önermektedir. Geometrik ortalama çap yaklaşımına göre; 50-150 mm "Geniş" çaplı bir sızıntı senaryosu için, seçilmesi tavsiye edilen en uygun sızıntı delik çapı; $\sqrt{(50 \times 150)} = 86,6 \text{ mm}$ 'dir [31]. Bu çalışmada; literatürde ele alınan geçmiş sonuç analizi modellemelerinden farklı olarak; senaryo edilen Propan buhar bulutu kütlelerinin geometrik ortalama sızıntı delik çapından kaynaklandığı öngörülmüştür.

2. Teorik Metot (Theoretical Method)

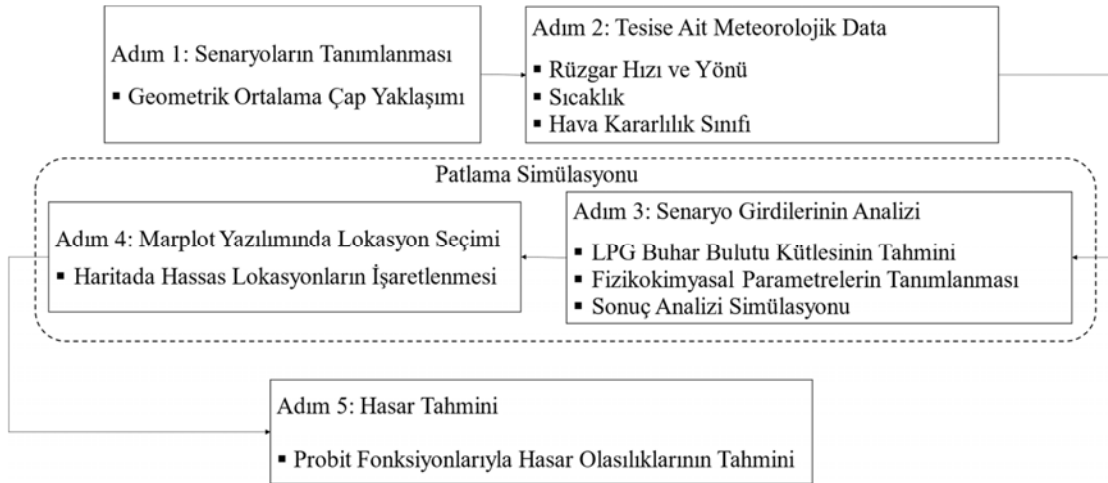
Kimyasal prosesleri içeren tesislerin ulusal ve uluslararası yükümlülükler kapsamında yapmak zorunda oldukları kantitatif risk yönetimi süreçlerinin proaktif olarak değerlendirilmesine katkı sunması beklenen bu çalışma ile; farklı sızıntı delik çaplarına göre belirlenen senaryolar için LPG buhar bulutu patlama simülasyonları ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), MARPLOT haritalama yazılımı ve Probit (Olasılık) Fonksiyonları ile analiz edilmiştir. Çalışmada önerilen bu teorik metot ile, kimyasal proses endüstrisinde modellenen olası gaz sızıntısı ve patlama senaryolarında sık karşılaşılan belirsizliklerin minimum düzeye indirilmesi amaçlanmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak aşağıdaki belirsizliklere atıf yapılmıştır,

- Sızıntı kesit alanı
- Sızıntı süresi
- Tahmini patlayabilir kimyasal miktarı
- DDT mekanizması ve hasar oluşturacak buhar bulutu kütlesi arasındaki ilişki
- GIS tabanlı Marplot ve ALOHA yazılımlarının entegrasyonu
- Tesis içi ve çevresindeki hassas lokasyonlar için hasar görme olasılıkları

Önerilen “Sonuç Analizi Yaklaşımı” için sistematik akış diyagramı Şekil 4’te gösterilmiştir. Buhar bulutu patlama simülasyonu öncesinde tanımlanan senaryolar ve tesise ait meteorolojik veri setinin oluşturulması ile başlayan hazırlık safhası, buhar bulutu patlama simülasyonunu takiben hassas lokasyonlar üzerinde oluşan



Şekil 3. Buhar bulutu Oluşumuna Sebebiyet Veren Sızıntı Delik Çapı Frekansları (Leakage Hole Diameter Frequencies Causing Vapor Cloud Formation)



Şekil 4. Sonuç Analizi Yaklaşımı için Sistematik Akış Diyagramı (Systematic Flow Diagram for Consequence Analysis Approach)

aşırıbasınç, impals ve pozitif faz süresi gibi hasar parametreleri ile ilişkili olarak hesaplanan olasılık tahminleri ile analiz edilir.

Şekil 5'te verilen sonuç analizi yaklaşımına göre geometrik ortalama çap yaklaşımına göre belirlenen LPG sızıntı senaryoları; tesisin bulunduğu bölgedeki meteorolojik koşullara ve Eş. 5 yardımıyla elde edilen Tablo 2'de ki tahmini LPG buhar bulutu kütlelerine göre ALOHA yazılımında simüle edilir. Marplot haritalama yazılımı üzerinde işaretlenen hassas lokasyonlar üzerinde patlama simülasyonu sonrası oluşan aşırı basınçlar analiz edilerek probit(olasılık) fonksiyonları yardımıyla olası hasar olasılıkları tahmin edilir.

2.1. Tehlikeli Atmosferlerin Alansal Konumları- ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres - ALOHA)

ALOHA[®] (Areal Locations of Hazardous Atmospheres); Amerikan EPA (Environmental Protection Agency) tarafından geliştirilen toksik veya alevlenebilir gaz bulutu dispersiyonu, BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), jet yangını, havuz yangını ve buhar bulutu patlamalarını modelleme kapasitesine sahip, proses güvenliği literatüründe geniş çapta kullanım alanına sahip bir yazılım programıdır [32]. ALOHA[®] yazılımı üzerinde BBP (Buhar bulutu patlaması) sonucu oluşan aşırı basınçtan etkilenen bölgeler tehlike derecesine göre sırasıyla, >8 psi (55158 Pascal) kırmızı, >3,5 psi (24132 Pascal) turuncu ve >1 psi (6895 Pascal) sarı renklerle gösterilmektedir. Ayrıca, American Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) tarafından geliştirilen MARPLOT haritalama programı üzerinde tehdit gören bölgelerin detaylı olarak analizi yapılabilmektedir.

2.3. Potansiyel Sızıntı Senaryoları için Sızıntı Delik Çaplarının Belirlenmesi-Adım 1 (The Defining of Leak Hole Sizes for Potential Leak Scenarios- Step 1)

M-01 TAG numaralı Propan tankı için farklı delik çaplarına göre tanımlanan senaryolar belirlenirken ekipman dizayn parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. S-1, S-2, S-3 senaryoları için 50,8 mm (2 inç) çapındaki drain hattı, S-4 ve S-5 sızıntı senaryoları için 203,2 mm (8 inç) LPG geliş hattından kaynaklanabilecek sızıntı delik çapları dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, tam delik çaplı sızıntı senaryosu(S-5) için tesis içerisindeki en büyük çaplı boru hatlarının (6 inç-8 inç) geometrik çap ortalaması kullanılmıştır.

Proses güvenliği literatüründe 5 sınıfta genelleştirilen sızıntı delik çapları; "Geometrik ortalama çap" yaklaşımına göre hesaplanarak (Tablo 1), elde edilen her bir sızıntı delik çapı farklı senaryo kodu olarak girilmiştir. (Orta Sızıntı delik çapı aralığı için hesaplanan salım çapı; $\sqrt{(10 \times 50)} = 22,4 \text{ mm} = 0,0224 \text{ m}$)

2.3. Tesise Ait Meteorolojik Şartların Tanımlanması-Adım 2 (The Defining of Meteorological Data Belong to Facility-Step 2)

Bu çalışmada Tekirdağ-Marmara Ereğlisi ilçesinde bulunan LPG (Sıvılaştırılmış Propan Gazı) depolama terminalinde, 2017 temmuz ayında, operatör tarafından açık unutulmuş manuel drain hattından meydana gelen 15 dakikalık propan gazı dispersiyonu için "Sonuç Analizi Modelleme" yaklaşımı, ALOHA 5.4.7 yazılımı ve MARPLOT haritalama yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Farklı sızıntı delik çaplarından 15 dakikalık (900 saniye) sızıntı senaryoları sonrasında oluşacak gaz bulutu kütlelerinin tutuşması sonucu meydana gelecek patlamanın aşırıbasınç etki mesafeleri belirlenmiş, tesis içi ve çevresinde belirlenen hassas lokasyonlar için olası hasar olasılıkları ve aşırıbasınç dağılım haritaları elde edilmiştir. Resmi makamlardan (Tekirdağ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü) elde edilen son 5 yıllık meteorolojik veri, propan gazı dispersiyonunun yaşandığı temmuz ayı için analiz edilerek ALOHA[®] yazılımına girilmiştir. Senaryolarda kullanılan meteorolojik veriler; 5 yıllık temmuz ayı veri ortalamasına göre; rüzgâr hızı: 2 m/s, rüzgâr yönü: Kuzey-Batı, ortalama sıcaklık: 34°C, ortalama nem: %85, hava kararlığı: Kararsız - C stabilite sınıfı: açık ve bulutsuz olarak tanımlanmıştır.

2.4. Senaryo Sonuçlarının Analizi-Adım 3 (The Analysis of Scenario Consequences - Step 3)

5 farklı sızıntı delik çapından meydana gelen propan buhar bulutunun patlama senaryoları sonrasında oluşacak aşırıbasınç değerleri ALOHA[®] yazılımı sayesinde hesaplanmıştır. ALOHA[®] yazılımı kırmızı tehdit bölgesi içerisindeki >8 psi (55158 Pa), turuncu tehdit bölgesinde >3,5 psi (24132 Pascal), sarı tehdit bölgesi için >1 psi (6895 Pascal) aşırıbasınç eşik değerleri için; sırasıyla "binaların yıkılması", "ciddi yaralanma ihtimali" ve "pencerelerin parçalanması" hasar türlerini öngörmektedir. (ALOHA[®] technical document) Aşırıbasınç (P_s; pascal) her bir tehdit bölgesi için Pascal basınç biriminde ALOHA[®] yazılımına girilmiştir.

2.4.1. LPG gaz bulutu kütesinin tahmini (Estimation of LPG gas cloud mass)

LPG (sıvılaştırılmış propan gazı) basınç altında sıvılaştırılarak depolanan ve transfer edilebilen, %v/v 1.8 alt patlama limitine sahip, ~-410 - 580°C'de kendiliğinden kolayca alevlenebilen bir gazdır. Kaynama noktası (~ -42°C) çok düşük olması sebebiyle olası sızıntı sonrası, basınç engelinden kurtularak hızla gaz faza geçerek, buhar bulutu oluşturur [33]. Çalışmanın gerçekleştirildiği proses şartlarında propan; 5 bar basınç altında, 8°C sıcaklıkta sıvı fazda depolanmaktadır. Gaz sızıntılarının dispersiyonu kompleks bir süreçtir. Gerçek akışta sürtünme kuvvetinin varlığı ortaya çıkan akış dinamiklerini önemli ölçüde etkiler ve gaz yayılımının analizini daha



Şekil 5. Sonuç Analizi Senaryoları için LPG Sızıntı Kaynakları (LPG Leak Equipments for Consequence Analysis Scenarios)

kompleks hale sokar [34]. Bir buhar bulutu patlamasını modelleyebilmek için en önemli hasar parametrelerinden biri olan aşırıbasıncı (P_s ; Pascal) üretecek buhar bulutu kütesinin bilinmesi gerekir. Basıncılı tank duvarından veya boru hattından kaynaklanan gaz sızıntısı; kütleli akış oranı, W_g (kg/s) terimi ile karakterize edilir. Literatürde; yüksek basınçlı boru hattı üzerindeki delikten meydana gelecek gaz sızıntısının kütleli akış oranını hesaplayabilmek için basit modeller mevcuttur [35]. Kütleli akış oranı, gazın delikten akış hızıyla yakından ilişkilidir. Bu kararı vermek için; kritik basınç değerlendirmesi (Eş. 4) yapmak gerekmektedir.

$$P_c = P_a \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4)$$

Kritik basınç- P_c (pascal), atmosferik basınçtan- P_a (101325 Pascal) büyükse; $P_c > P_a$ akış sonik olarak ifade edilir. Literatürde; yaklaşık 1.9 bar ve üzerindeki tüm akışlar sonik akış olarak değerlendirilmektedir [36].

Bu çalışmada propan gazının 5 farklı delik çapı için kütleli akış oranı; kg/s 60079:10-1 Patlayıcı Gaz Atmosferlerin Sınıflandırılması standardına öngörülen Eş. 5 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$W_g = C_d \cdot S \cdot P \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot M_{\text{gaz}}}{R \cdot T} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (5)$$

Eş. 5'te; W_g : sonik hızla yayılan gazın kütleli akış oranı (kg/s), C_d : (0,50 -1) boşalma katsayısını, S : gazın çıktığı kesit alanı (m^2), P : Gazın maruz kaldığı proses basıncını (Pascal), γ : politropik indeks ($1 < \gamma < 1,8$), M : Gazın molekül ağırlığı (kg/kmol), R : Evrensel gaz sabiti (8314 J/kmol. K), T : gazın maruz kaldığı sıcaklığı (Kelvin) ifade etmektedir.

2017 Temmuz ayında, manuel drain hat valfinden operatör hatası kaynaklı meydana gelen yaklaşık 15 dakikalık LPG sızıntısı ramak-kala olayına dayandırılarak senaryo edilen farklı sızıntı delik çaplarının neden olduğu LPG (sıvılaştırılmış propan gazı) bulutu kütleleri Tablo 2' de gösterilmiştir.

2.5. MARPLOT Haritalama Yazılımı Üzerinde Hassas Lokasyonların Seçilmesi-Adım 4 (The Selection of Sensitive Locations on MARPLOT Mapping Software-Step 4)

Tüm LPG buhar bulutu patlama senaryoları için, seçilen hassas lokasyonlarda (A: tesis kontrol odası, B: Komşu tesis ofis binası, C: Barınak, D: En yakın yaşamsal konut) üç tür zarar görülebilirlik(hasar) türü belirlenmiştir. Bu hasar türleri; "Yapının Çökmesi", "Majör Yapısal Hasar- duvar çatlakları, bazı duvarların çökmesi" ve "Minör Yapısal Hasar pencerelerin kırılması, kapıların dağılması, cam parçalarının oluşması, kiremitlerin dağılması" şeklinde tanımlanmıştır. Seçilen lokasyonların patlama merkezine olan uzaklıkları Şekil 6'da gösterilmiştir.

Tablo 2. Sonuç Analizi Senaryoları için LPG Gaz Bulutu (The LPG Gas Cloud for Consequence Analysis Scenarios)

Senaryo Kodu	Sızıntı Delik Çapı Aralığı; mm	Sızıntı Delik Çapı Büyüklüğü	Geometrik Ortalama Çap- D; mm	Sızıntı Kesit Alanı-S: $\pi \cdot D^2/4$; m ²	Sızıntı Süresi; saniye	Kütleli Akış Oranı; kg/s	Toplam Buhar bulutu Kütleli; kg
S-1	1-3	Çok Küçük	1,7	2,27E-06	900	0,00294	2,15
S-2	3-10	Küçük	5,5	2,37E-05	900	0,03074	22,5
S-3	10-50	Orta	22,4	3,94E-04	900	0,5098	373
S-4*	50-150	Geniş	86,6	5,89E-03	900	7,62	6858
S-5*	> 150- 203,2	Tam Çaplı Yırtılma	175	2,40E-02	900	31,11	28000

*En kötü durum senaryoları için DDT varsayımı



Şekil 6. Marplot Haritalama Yazılımı Üzerinde Seçilen Lokasyonların Patlama Noktasına Uzaklıkları (The Explosion Distances for Selected Locations on MARPLOT Mapping Software)

Marplot yazılımı üzerinde seçilen A (tesis kontrol odası) lokasyonu patlama merkezinden 76 m, B (komşu tesis ofis binası) lokasyonu 141 m, C(barınak) lokasyonu 284 m ve D (en yakın yaşamsal konut) 634 m uzaklıktadır.

2.6. Gaz Bulutu Patlaması Kaynaklı Hasar Olasılığı Tahmini-Adım 5 (The Estimation of Damage Probability Caused by Gas Cloud Explosion – Step 5)

Sonuç analizi senaryolarından elde edilen hasar parametrelerinin (aşırıbasınç, impuls ve pozitif faz süresi) etki mesafeleri içerisinde oluşturacağı zarar görülebilirlik, yapılar ve insanlar açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada; patlama senaryolarının yapılara etkisi “yapısal çökme”, “majör yapısal hasar” ve “minör yapısal hasar” türleri için kullanılan probit(olasılık) fonksiyonları sırasıyla Y_1 , Y_2 , Y_3 olarak, insanlara etkisi; “baş darbesinden kaynaklı ölüm”, “tüm vücut darbesinden kaynaklı ölüm” hasar türleri için Y_3 ve Y_4 olarak kodlanmıştır. Tablo 2’de verilen LPG (sıvılaştırılmış propan gazı) gaz bulutu kütlelerinin patlama senaryoları sonrasında oluşması muhtemel yapı ve insan hasarı tahmini için kullanılacak probit denklemleri Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3’te verilen referansların deneysel çalışmaları sonucu geliştirilen, doğal logaritmik fonksiyon katsayılarına bağlı probit denklemlerinde; P_s aşırı basıncı (Pascal), I_s ; impulsı (Pa. s), t_d ;pozitif faz süresi-patlama süresini(saniye) ifade etmektedir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Alevlenebilir LPG buhar bulutunun detonasyonu, tutuşma için gerekli olan ısı enerjisi (açık alev, kıvılcım, statik elektrik vb.) tarafından başlatılması ve DDT (parlamadan patlamaya geçiş) yoluyla meydana gelebilir. Parlamadan patlamaya geçiş, alev cephesinin güçlü şekilde hızlanmasını gerektirir. Açık alanda oluşacak LPG bulutunun, rüzgâr etkisiyle seyrelmesi, hipotetik hacim içerisindeki patlamaya katkı sunacak gaz bulutu kütlelerinin stabilitesini etkileyeceğinden dolayı, 400 kg’dan daha az gaz bulutu kütlelerinin yıkıcı hasar etkisinin

tartışmalı olduğu düşünülmektedir. Literatür yazarları tarafından teorik modellemelerde ele alınan en kötü durum senaryolarındaki patlayabilir gaz bulutu miktarlarının, daha önce yaşanan gaz bulutu patlama kazalarına neden olan miktarlara yakın seçilmesi bu tespiti doğrular niteliktedir. ALOHA® ve MARPLOT yazılımları sayesinde analiz edilen senaryo sonuçlarına göre; tehdit bölgeleri içerisinde kalan mesafeler ve bu mesafeler içerisindeki hasar parametreleri (P_s : aşırıbasınç-pascal, I_s : impuls-Pa. s, t_d : pozitif faz süresi -s) Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4’te ALOHA ve MARPLOT yazılımlarının entegrasyonu ile, özellikle yıkıcı hasarlara sebebiyet verebilecek detonasyon oluşturma kapasitesine sahip S-4 ve S-5 buhar bulutu patlama senaryolarına göre, sırasıyla hâkim rüzgâr yönünde 377 m ve 691 m mesafe içerisi binalarda yıkıcı etkiye sebebiyet verebilir. Ayrıca 1200 m içerisindeki yaşamsal konutların veya binaların camlarında parçalanma riski söz konusudur.

Sonuç analizi yaklaşımı çalışmasında elde edilen hasar olasılıkları ve hasar türleri Tablo 5’te detaylı olarak gösterilmiştir.

3.1. Alternatif Sızıntı Senaryoları- Deflagrasyonlar (Alternative Leak Scenarios- Deflagrations)

Alternatif sızıntı senaryoları olarak değerlendirilen S-1, S-2 ve S-3 senaryolarından elde edilen patlama sonuçları, propan buhar bulutu kütlelerine ve çalışma için seçilen alanın sıkışıklık seviyesi ile ilişkili olarak açık alanda DDT (deflagrasyondan detonasyona geçiş) olayına izin vermediğinden, bu senaryoların olası bir patlama hasarına neden olması pek mümkün gözükmemektedir. Fakat özellikle yaz günlerinde hava koşullarına (aşırı sıcaklık, nem, engeller, düşük rüzgâr hızı vs.) bağlı sebepler ve 0,5 – 500 kg buhar bulutu kütleleri için yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen aşırıbasınç değerleri göz önünde bulundurularak detonasyon(patlama) sonuçları hesaplanmıştır. Aksi taktirde; alternatif senaryoların deflagrasyon olayı olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Tablo 3. Yapılar ve İnsanlar Üzerindeki Patlama Hasar Tahmini İçin Olasılık Denklemleri (The Probit Equations for Explosion Damage Estimation on Structures and People)

	Hasar Türü	Probit Eşitliği	Referanslar
Yapılar Üzerine Etkisi	Yapısal Çökme: kısmen veya tamamen yıkılmış binalar	$Y_1 = 5 - 0,22 \ln \left[\left(\frac{40000}{P_s} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I_s} \right)^{11,3} \right]$	(Yoon vd. [37])
	Majör Yapısal Hasar: Duvar çatlakları, bazı duvarların çökmesi	$Y_2 = 5 - 0,26 \ln \left[\left(\frac{17500}{P_s} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I_s} \right)^{9,3} \right]$	
	Minör Hasar: pencerelerin kırılması, kapıların dağılması, cam parçalarının oluşması, kiremitlerin dağılması vb..	$Y_3 = 5 - 0,26 \ln \left[\left(\frac{4600}{P_s} \right)^{3,9} + \left(\frac{110}{I_s} \right)^5 \right]$	
İnsanlar Üzerine Etkisi	Baş Darbesinden Kaynaklı Ölüm	$Y_4 = 5 - 8,49 \ln \left[\frac{2430}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s \times I_s} \right]$	(Debroey vd. [38])
	Tüm vücut darbesinden kaynaklı ölüm	$Y_5 = 5 - 2,44 \ln \left[\frac{7,38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1,3 \times 10^9}{P_s \times I_s} \right]$	

Tablo 4. Senaryo sonuçlarına göre Gaz Patlaması Etki Mesafeleri ve Hasar Parametreleri (The Effect Distances and Damage Parameters for LPG Vapor Cloud Explosion Scenarios According to Scenario Consequences)

Senaryo Kodu	Toplam Buhar Bulutu Kütleleri; kg	ALOHA® Hasar Türü								
		Binaların Yıkılması > 55158 Pa			Olası Ciddi Yaralanma > 24132 Pa			Camların Parçalanması > 6895 Pa		
		R-m	i-Pa.s	t_d -s	R- m	>i-Pa. s	t_d -s	R, m	i-Pa.s	t_d -s
S-1	2,15	14	>31340	1,14	19	>13711	1,14	38	>3918	1,14
S-2	22,5	16	>46387	1,68	22	>20294	1,68	46	>5799	1,68
S-3	373	21	>74140	2,69	31	>32437	2,69	68	>9268	2,69
S-4*	6858	377	>120565	4,37	432	>52748	4,37	751	>15071	4,37
S-5*	28000	691	>152494	5,53	772	>66717	5,53	1200	>19062	5,53

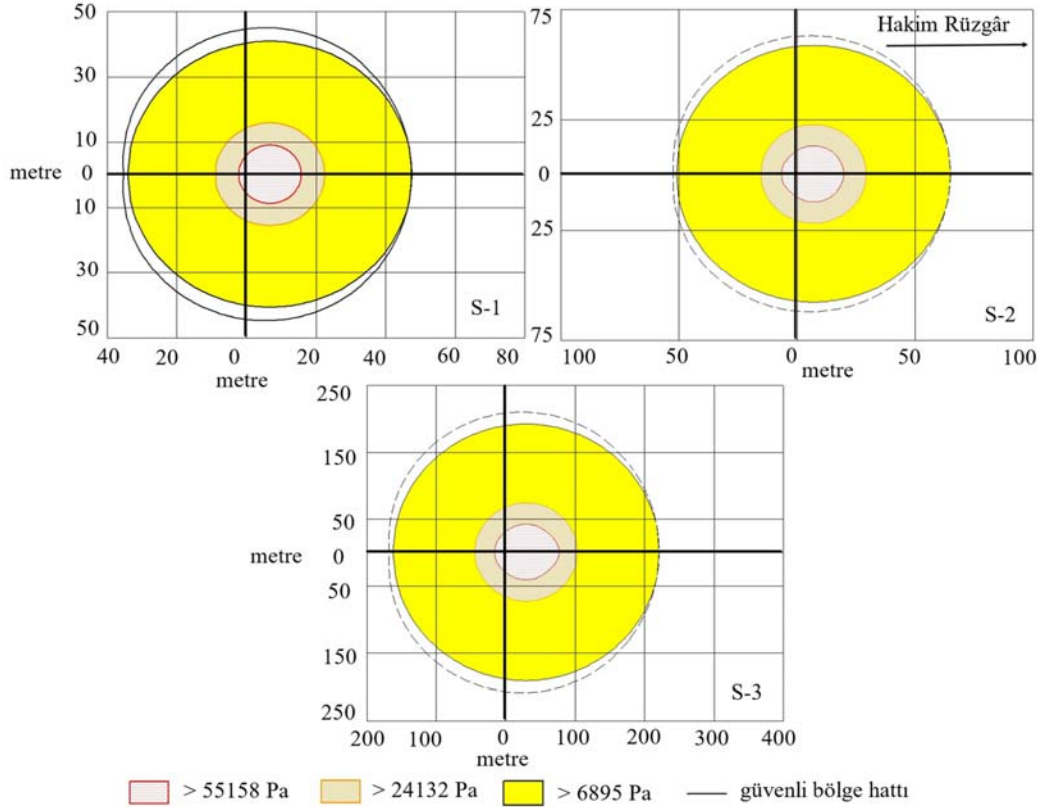
Şekil 7’de alternatif patlama senaryoları için detonasyon tehdit mesafeleri gösterilmiştir. Hesaplanan mesafeler içerisinde herhangi bir yapı ve canlı bulunmamaktadır. Ayrıca seçilen en yakın hassas lokasyon patlama merkezine 76 m uzaklıktadır. Bundan dolayı alternatif sızıntı senaryoları için yapısal hasar olasılıkları değerlendirmeye alınmamıştır.

3.2. En Kötü Durum Senaryoları- Detonasyonlar
(Worst Case Scenarios- Detonations)

Geçmiş proses güvenliği literatürüne giren açık alan gaz patlamalarındaki buhar bulutu büyüklükleri dikkate alındığında yapılar ve insanlar üzerinde ciddi hasar oluşturma ihtimali olan S-4 ve

Tablo 5. Sonuç Analizi Senaryolarında MARPLOT Haritalama Yazılımı Üzerinde Seçilen Hassas Lokasyonlar İçin Hasar Tahmini
(The Damage Estimation for Selected Sensitive Locations on MARPLOT Mapping Software in Consequence Analysis Scenarios)

Lokasyon ^a	Koordinat ^b	Hasar Türü ^c	Sonuç Analizi En Kötü Durum Senaryoları ^d							
			S-4				S-5			
			P _s Pascal	İ Pa.s	t _d ms	P _r %	P _s Pascal	İ Pa.s	t _d ms	P _r %
A: Tesis Kontrol Odası	Batı:48 m Kuzey:76 m	Y ₁				45			82	
		Y ₂				92			100	
		Y ₃	36800	80438	4,22	96	69900	193251	5,53	99
		Y ₄				100			100	
		Y ₅				86			100	
B: Komşu Tesis Ofis Binası	Batı:55m Güney:141 m	Y ₁				76			88	
		Y ₂				99			100	
		Y ₃	61400	134209	4,22	99	81000	223939	5,53	99
		Y ₄				100			100	
		Y ₅				100			100	
C: Barnak	Doğu:281 m Kuzey:284 m	Y ₁				2			12	
		Y ₂				21			57	
		Y ₃	11400	24918	4,22	78	19300	53358	5,53	89
		Y ₄				0			100	
		Y ₅				0			11	
D: En Yakın Yaşamsal Konut	Doğu: 634 m Güney:96 m	Y ₁				0,5			20	
		Y ₂				9			72	
		Y ₃	8360	18274	4,22	70	24000	66352	5,53	92
		Y ₄				0			100	
		Y ₅				0			39	



Şekil 7. Alternatif Sonuç Analizi Senaryoları için ALOHA Tehdit Mesafeleri
(ALOHA Software Threatened Distances for Alternative Consequence Analysis Scenarios)

S-5 senaryoları için, hem hesaplanan tehdit mesafeleri içerisindeki zarar görülebilirlik olasılıkları hem de MARPLOT haritalama yazılımı üzerinde seçilen hassas lokasyonlardaki zarar görülebilirlik olasılıkları değerlendirilmiştir. S-4 senaryosu için; 377 metre içerisinde kalan kırmızı tehdit bölgesinde “Y₁:Bina çökme” olasılığı > %70, “Y₂: majör yapısal hasar- Duvar çatlakları, bazı duvarların çökmesi” olasılığı >98, “Y₃: minör yapısal hasar- pencerelerin kırılması, kapıların dağılması, cam parçalarının oluşması, kiremitlerin dağılması” olasılığı %98 olarak; 432 metre içerisinde kalan turuncu tehdit bölgesinde “Y₄: baş darbesi kaynaklı ölüm” olasılığı %100, “Y₅: tüm vücut darbesi kaynaklı ölüm” olasılığı >%25 olarak; 751 metre içerisinde kalan sarı tehdit bölgesinde camların parçalanma olasılığı >%64 olarak hesaplanmıştır. S-5 senaryosu için; 691 metre içerisinde kalan kırmızı tehdit bölgesinde “Y₁: Bina çökme” olasılığı > %70, “Y₂: majör yapısal hasar” olasılığı >98, “Y₃: minör yapısal hasar” olasılığı %98 olarak; 751 metre içerisinde kalan turuncu tehdit bölgesinde “Y₄: baş darbesi kaynaklı ölüm” olasılığı %100, “Y₅: tüm vücut darbesi kaynaklı ölüm” olasılığı >%96 olarak; 1200 metre içerisinde kalan sarı tehdit bölgesinde camların parçalanma olasılığı >%64 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan olasılık değerleri eşik değerlerdir. Patlama merkezine yaklaştıkça ilgili hasar olasılıkları %100’e yaklaşmaktadır. ALOHA yazılımının öngördüğü hasar tahminleri ve Tablo 4’te verilen hasar parametrelerine (aşırıbasınç-P_s; İmpuls-i, pozitif faz süresi-t_a) bağlı hesaplanan olasılıklar oldukça tutarlıdır.

S-4 ve S-5 senaryolarının, MARPLOT haritalama yazılımı üzerinde seçilen hassas lokasyonlar üzerinde oluşturması muhtemel hasar tahmin olasılıkları Şekil 9’da detaylı olarak gösterilmiştir.

En kötü durum senaryoları S-4 ve S-5 için elde edilen hâkim rüzgâr yönündeki dispersiyona bağlı aşırıbasınç tehdit mesafeleri Şekil 8’de gösterilmiştir.

3.3. MARPLOT Üzerinde Seçilen Hassas Lokasyonlar için Hasar Olasılık Değerlendirmesi (The Damage Probability Assessments for Selected Sensitive Locations on MARPLOT Software)

ALOHA simülasyonundan elde edilen sonuç analizi senaryo çıktılarının MARPLOT haritalama yazılımı üzerine aktarılmasıyla, seçilen hassas lokasyonlar üzerindeki aşırıbasınç yükü, patlama süresi ve yapı üzerindeki impulsüne bağlı hasar tahminleri Şekil 9’da ki grafiklerde gösterilmiştir. Alternatif sızıntı senaryoları (S-1, S-2 ve S-3) DDT (parlamadan patlamaya geçiş) olayına sebep olsa bile elde edilen aşırıbasınç değerlerinin seçilen hassas lokasyonlar üzerine

etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bu sebeple Şekil 9’da ki grafiklerde değerlendirmeye alınmamıştır.

3.3.1. Tesis kontrol odası (The facility control room)

Sonuç analizi senaryolarına göre patlama merkezine 76 metre uzaklıkta bulunan, LPG(sıvılaştırılmış propan gazı) dolmuş terminali kontrol odası için en kötü durum senaryolarında değerlendirilen “Y₁: yapının çökmesi”, “Y₂: Majör yapısal hasar: Duvar çatlakları, bazı duvarların çökmesi” ve “Y₃: minör yapısal hasar: pencerelerin kırılması, kapıların dağılması, cam parçalarının oluşması, kiremitlerin dağılması” olasılıkları S-4 için sırasıyla; % 45, % 92 ve % 96, S-5 için; % 82, % 100, % 99 mertebesindedir. Sonuçlar en kötü durum senaryoları seviyesinde gerçekleşecek bir propan gazı detonasyonunun, tesis kontrol odası için yıkıcı yapısal hasara neden olabileceğini göstermektedir.

3.3.2. Komşu tesis ofis binası (Adjacent office building)

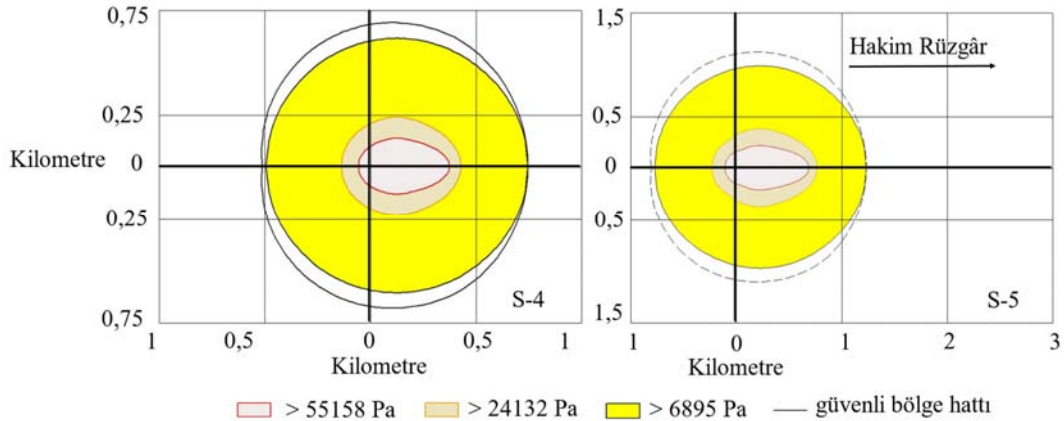
Patlama noktasına uzaklığı yaklaşık 140 metre olan komşu tesis ofis binası için en kötü durum senaryolarında değerlendirilen “Y₁: yapının çökmesi”, “Y₂: Majör yapısal hasar” ve “Y₃: minör yapısal hasar” olasılıkları S-4 için sırasıyla; %76, %99 ve %99, S-5 için; %88, %100, %99 mertebesindedir. Sonuç analizi en kötü durum senaryosu sonuçlarına göre; komşu tesise ait ofis binasının yapısal çökme veya majör hasar görme riski oldukça yüksektir.

3.3.3. Barınak (Shelter)

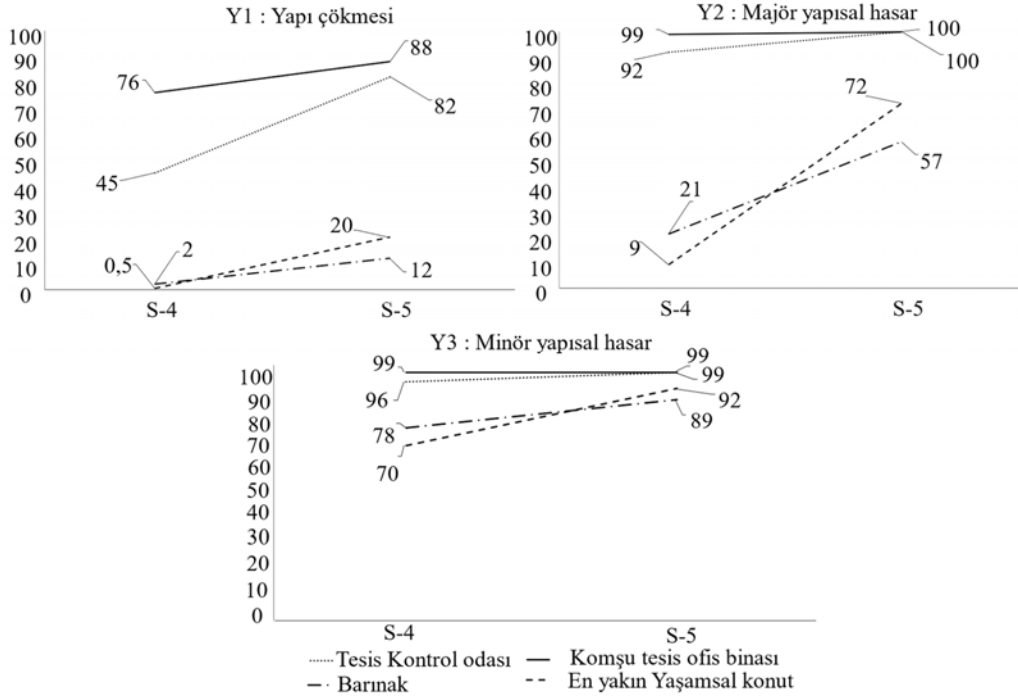
Patlama noktasına 284 metre uzaklıktaki barınak için en kötü durum senaryolarında değerlendirilen “Y₁: yapının çökmesi”, “Y₂: Majör yapısal hasar” ve “Y₃: minör yapısal hasar” olasılıkları S-4 için sırasıyla; %2, %21 ve %78, S-5 için; %12, %57, %89 mertebesindedir. Bu durumda; olası bir en kötü durum senaryosunda barınak için; minör yapısal hasar (pencerelerin kırılması, kapıların dağılması, cam parçalarının oluşması, kiremitlerin dağılması) riskinin oldukça yüksek olduğu sonucuna varılabilir.

3.3.4. En yakın yaşamsal konut (The nearest residential house)

Patlama noktasına 684 metre uzaklıktaki en yakın konut için en kötü durum senaryolarında değerlendirilen “Y₁: yapının çökmesi”, “Y₂: Majör yapısal hasar” ve “Y₃: minör yapısal hasar” olasılıkları S-4 için sırasıyla; % 0,5, %9 ve %70, S-5 için; %20, %72, %92 mertebesindedir. En yakın yaşamsal alan için minör yapısal hasar riski dikkate değerdir. Propan bulutu kütledeki artışa paralel majör



Şekil 8. En Kötü Durum Senaryoları için ALOHA Tehdit Mesafeleri
(ALOHA Software Threat Distances for Worst Case Scenarios)



Şekil 9. Seçilen Lokasyonlarda Yapısal Hasar Tahminleri (The Structural Damage Estimation for Selected Locations)

yapısal hasar olasılığı % 70-72 seviyelerine çıkmaktadır. Şekil 9’da verilen grafiklerde DDT kapsamında değerlendirilen S-4 ve S-5 senaryoları için yapısal hasar olasılıkları detaylı olarak gösterilmiştir.

ALOHA yazılımı üzerinden değerlendirilen sonuç analizi senaryolarına göre, tehdit görmesi muhtemel yön ve mesafeler MARPLOT haritalama yazılımı üzerinde detaylı olarak gösterilmiştir.

Bu çalışmada; güncellenerek sistematik bir bakış açısıyla ele alınan “Sonuç Analizi Modelleme Yaklaşımı”; kimyasal proses endüstrisinde olası patlama risklerinin ortadan kaldırılması (28512 sayılı, “İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmesi yönetmeliği”) veya kabul edilebilir seviyeye çekilebilmesi (ALARP – güvenlik açısından kritik sistemlerin düzenlenmesi ve yönetilmesi ilkesi) için kantitatif bir bakış açısı sağlar. Ayrıca; Tesis içi ve etrafındaki yaşamsal alanlar için güvenli mesafelerin belirlenebilmesi, açık veya kapalı ortamlardaki uygun ex-proof(alev sızdırmaz) ekipmanlar için dizayn parametrelerinin belirlenmesi, dahili ve harici acil durum eylem planları, tahliye ve acil durum prosedürlerinin güncellenmesi ve iyileştirilmesi, ulusal ve uluslararası düzenlemelere(BS EN 60079-10-1:2020:“Patlayabilir gaz ortamların sınıflandırılması”, 2012/18 EEC sayılı SEVESO III Direktifi) uygunluk gibi bir çok konuda kantitatif bakış açısı geliştirilmesinde yardımcı olacaktır. Gaz bulutu patlamaları için gerçekleştirilen sonuç analizi modelleme çalışmasında esas amaç; senaryo edilen gaz bulutu patlamaları sonrasındaki fiziksel hasarın (canlı, yapı ve ekipman üzerindeki), hasar parametrelerine bağlı (aşırıbasınç, impuls süresi, pozitif faz süresi) olasılıklarını doğru bir şekilde tahmin ederek, tesis proses güvenliği yönetimi için proaktif bir bakış açısı geliştirmektir.

4. Simgeler (Symbols)

P_s	: Aşırıbasınç (Pascal)
P_c	: Kritik basınç (Pascal)
P_a	: Atmosferik basınç (Pascal)
P	: Proses basıncı (Pascal)
P_{pik}	: Pik basınç (Pascal)

ΔP	: Pik basınç ve atmosferik basınç farkı (Pascal)
I_s	: İmpuls süresi (Pa. s)
t_d	: Pozitif faz süresi (s)
M_{gaz}	: Gaz molekül ağırlığı (kg/kmol)
W_g	: Sonik hızda yayılan gazın kütleli akış oranı (kg/s)
Y_{1-4}	: İlgili hasar tahminleri için Probit Fonksiyonları
a, b	: Probit fonksiyonlarında ilgili hasar katsayıları
Pr	: Hasar olasılık yüzdesi (%)
Erf	: Hata fonksiyonu
γ	: Politropik indeks (1- 1,8)
C_d	: Boşalma katsayısı (0,50 – 1)
S	: Kesit alanı (m ²)
R	: Evrensel gaz sabiti (8314 J/kmol. K)
T	: Sıcaklık [Kelvin]

4.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

LPG	: Sıvılaştırılmış propan gazı
TNT	: Tri-Nitro Toluen
BST	: Baker – Sthrelow – Tang
QRA	: Kantitatif Risk Değerlendirmesi
BLEVE	: Kaynayan sıvı-geçleşen buhar patlaması
ABO	: Alan blokaj oranı
S-1	: 1 numaralı senaryo
S-2	: 2 numaralı senaryo
S-3	: 3 numaralı senaryo
S-4	: 4 numaralı senaryo
S-5	: 5 numaralı senaryo
BBP	: Buhar bulutu patlaması
DDT	: Deflagrasyondan detonasyona geçiş
HCRD	: Hidrokarbon sızıntı veri tabanı
C Class	: Güneşli, açık ve hafif rüzgârlı hava
BKÖPB	: Büyük kaza önleme politika belgesi
GR	: Güvenlik raporu
ADTP	: Acil durum tahliye planı
PKD	: Patlamadan korunma dokümanı

5. Sonuçlar (Conclusions)

Kimyasal proses endüstrisinde yaşanan geçmiş buhar bulutu patlamaları günümüzde hala tartışılmakta ve kayıpların tekrar yaşanmaması için tesis, ekipman tasarımı, yaşamsal alanların konumlandırılması gibi konular bilimsel ve kanuni açıdan kapsamlı olarak değerlendirilmektedir, fakat literatürde sistematik ve bütüncül bir metodoloji önerilmemektedir. Çalışma; buhar bulutu patlamalarının sonuçlarını doğrudan etkileyen belirsizliklerin sistematik, bütüncül ve koruyucu bakış açısı ile analiz edildiği güncel bir “Sonuç Analizi Modelleme” prosedürü içermektedir. Güncellenen sonuç analizi modelleme yaklaşımı Ulusal literatürde ilk çalışma olmasının yanında, uluslararası kimyasal proses güvenliği literatüründe ALOHA yazılımı ve MARPLOT Haritalama yazılımlarının, standartlarda öngörülen teorik denklemlerle entegrasyonu sonucu ortaya atılan ve metodolojideki belirsizlikleri minimum düzeye indiren ilk sistematik prosedür olması açısından da oldukça önemlidir. Ayrıca; kimyasal proses endüstrisinde teorik olarak değerlendirilen geleneksel yöntemlerden farklı olarak patlama mekanizmasını ve oluşturacağı hasarı doğrudan etkileyen meteorolojik şartlar, gaz salım süresi, salım kesit alanı, patlayıcı gaz kütlesi, DDT(parlamadan patlamaya geçiş) değerlendirmesi gibi önemli parametrelerin oluşturduğu belirsizlikler; tesis, çevre ve canlılar açısından ağır sonuçlara yol açan patlama riskinin tesise özgü ve kabul edilebilir şekilde değerlendirmesi açısından yönlendirici kılavuz niteliğindedir.

Sonuç analizi yaklaşımı; kimyasal tesislerde olası patlama hasarının tahmin edilebilmesi ve alınması gereken proaktif önlemlerin planlanabilmesi için ön değerlendirme niteliğinde olan önemli bir araçtır. Olası LPG bulutu patlaması sonrasında meydana gelebilecek hasarın önceden doğru şekilde tahmin edilebilmesi oldukça güçtür. Söz konusu hasar tahminleri, farklı bir bakış açısı için fikir vermenin yanında, tesisin bazı kanuni yükümlülükleri yerine getirmesi için hazırlamakla yükümlü olduğu dokümantasyonlarda (kantitatif risk değerlendirmesi, patlamadan korunma dokümanı, güvenlik raporu, büyük kaza önleme politika belgesi), patlama riskinin teorik olarak ispatlanabilmesi için kullanılabilecek ön değerlendirme niteliğindedir. Bu sebeple, tesisin iyileştirme ve güçlendirme için yapacağı yatırım planları için karar alma aşamasında daha ileri analiz ve metotlarla (hesaplamalı akışkanlar dinamiği, deneysel tabanlı çalışmalar vb.) desteklenmesi gerekmektedir. Yapısal çökme, majör ve minör yapısal hasar için kullanılan probit denklemleri tüm bina tiplerini aynı kategori içerisinde değerlendirdiğinden, farklı donatı ve fiziksel özelliklere sahip yapılar için genelleştirmek doğru bir yaklaşım değildir. Ayrıca; hasar parametrelerinin tahmini için kullanılan ampirik-tabanlı BST(Baker-Sthrelow-Tang) metodu sıkışıklık geometrisi, yakıt reaktivitesi, alev hızı varsayımları sebebiyle temelde bazı belirsizlikleri beraberinde getirmektedir. Kullandığı varsayımların koruyucu yaklaşım sunması (en kötü durum senaryosuna göre) uluslararası literatürde ve raporlarda bu metoda atıf yapılmasının en belirgin göstergesidir. Güncellenmiş sonuç analizi yaklaşımının en önemli çıktısı; olası patlamanın etkilerini yaklaşık olarak tahmin edebilmek ve gerekli proaktif önlemleri alarak zarar görülebilirlik seviyesini en aza indirmektir. Bu çalışma; kimyasal proses endüstrisinde faaliyet gösteren işletmelerin hem tesisin sürdürülebilirliği hem de kanuni olarak hazırlamakla yükümlü oldukları kantitatif risk değerlendirmeleri için bir kılavuz niteliğindedir. ALOHA ve MARPLOT haritalama yazılımlarının birlikte kullanıldığı bu sonuç analizi çalışması, teorik ve ampirik yaklaşımları sunmasının yanında, uluslararası kimyasal proses endüstrisindeki öncü firmaların güncel tecrübelerini içermesi açısından da oldukça önemlidir (sızıntı kesit alanı tanımlanması için geometrik ortalama çap yaklaşımı). S-1(çok küçük sızıntı delik çapı: 1,7 mm), S-2(küçük sızıntı delik çapı: 5,5 mm) ve S-3(orta sızıntı delik çapı: 22,4 mm) senaryoları için tanımlanan sızıntı çapları; “BS-

EN 60079/10-1-2020: Patlayıcı Gaz Ortamların Sınıflandırılması” standardında öngörülen tali(ikincil) sızıntı kesit alanları ile hemen hemen aynıdır. Bu çalışmada öngörülen sistematik sonuç analizi senaryolarının ayrıca, kimyasal prosesleri içeren tesislerin hazırlamakla yükümlü olduğu “Patlamadan Korunma Dokümanı” kapsamında ele alınmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Çalışmada önerilen sonuç analizi metodu sayesinde; çalışanların patlayıcı ortamların tehlikelerinden korunması hakkında yönetmelik madde 6’da belirtilen “olabilecek patlamanın etkisinin büyüklüğünün değerlendirilmesi” bilimsel ve sistematik açıdan ele alınmış olacaktır. Ayrıca; çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, seçilen tesis için aşağıdaki iyileştirme aksiyonlarının alınmasının yanında, tesis üst yönetimi ve resmi denetim makamları tarafından güvenli işletme yeterliliğini sağladığı konusunda fikir birliği oluşmasına katkı sunmuştur.

5.1. Tesis Düzeni ve Ex-proof Ekipman Dizaynı (Facility Layout and Ex-proof Equipment Design)

Bu çalışmanın, tesis kurulum süreçlerinde, sonuç analizi yaklaşımı kapsamında tanımlanan potansiyel sızıntı senaryoları (S-4, S-5) sonucunda elde edilen tehdit mesafeleri ve yaşamsal alanlar üzerinde ne derece risk oluşturabileceği konusunda proaktif bir bakış açısı geliştirilmesine katkı sunacağı düşünülmektedir. Ayrıca, Olası bir gaz dispersiyonunda gazın hava ile hızlıca seyreltilmesi için doğal ventilasyondan daha fazla faydalanma, tank çiftliklerinin konumu ve kurulum geometrileri, dispersiyon parametrelerine (rüzgâr yönü, hızı vb.) bağlı gaz bulutunun hangi yöne doğru ilerleyebileceği ve bu noktalardaki tutuşturucu kaynakların bertarafı, yaşamsal alanların konumları gibi tesis ve çevresi için faydalı ön değerlendirmelerin yapılabilmesine imkân tanır. Ayrıca; olası gaz dispersiyonu durumunda propan gazı buhar bulutunun tutuşmasını engelleyici alev sızdırmaz ekipman tasarımı, sonuç analizi senaryoları göz önünde bulundurularak hazırlanacak “patlamadan korunma dokümanı” çerçevesinde ele alınmalıdır. Bu sayede, gazın alt patlama limitine ulaştığı noktalar, gazın dispersiyon yönü ve hızına bağlı dedektör lokasyonlarının ve mesafelerinin belirlenebilmesi için faydalı bir değerlendirme imkânı sunar. (2G ekipman >T3 sıcaklık sınıfı)

5.3. Dahili ve Harici Acil Durum Eylem Planları (Internal and External Emergency Action Plans)

LPG dolmuş tesisi acil durum eylem planlarında öngörülen acil durum senaryoları, sonuç analizinde ele alınan en kötü durum senaryoları (S-4 ve S-5) kapsamında değerlendirilebilir. Olası bir patlama veya patlamayı takip eden yangın olayı için sonuç analizi senaryoları kapsamında elde edilen tehdit mesafeleri göz önünde bulundurularak, dahili-harici kaynakların müdahale mesafeleri belirlenebilir ve acil durum müdahale yöntemleri konusunda daha bilimsel ve somut bir yaklaşım oluşmasına katkı sunacaktır.

5.4. Tesis Tespit ve İzleme Seviyesi (Facility Detection and Monitoring Level)

Tank çiftliği bölgesinde gaz algılayıcı (dedektör) sistemlerin olası bir gaz dispersiyonunu etkileyen meteorolojik şartlarında hesaba katılarak PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) ile sürekli izlenebilir şekilde olması ve otomatik durdurma sistemlerini içeren dahili acil durum eylem planının güçlendirilmesi sağlanabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (Proje ID: 1811, Proje Kodu: FEN-C-DRP-110718-0400) tarafından desteklenmiştir. Yazarlar Marmara Üniversitesi BAPKO birimine teşekkür ederler.

Kaynaklar (References)

1. Gaspar H.M., Diaz-Ovalle C.O., Molina A.L., Conde-Mejia C., Valenzuela-Gomez L.M., Incident analysis of the Pajaritos Petrochemical Complex, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 70 (1), 104-118, 2021.
2. Ramsay, C. G., Bolsover, A. J., Jones, R. H., & Medland, W. G., Quantitative risk assessment applied to offshore process installations. Challenges after the piper alpha disaster, *Journal of loss prevention in the process industries*, 7 (4), 317-330, 1994.
3. Dongdong Y., Guoming C., Ziliang D., Accident modeling of toxic gas-containing flammable gas release and explosion on an offshore platform, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 65 (2), 104 -118, 2020.
4. Tang, Z., Yang, S., Xu, G., & Sharifzadeh, M., Disaster-causing mechanism and risk area classification method for composite disasters of gas explosion and coal spontaneous combustion in deep coal mining with narrow coal pillars, *Process Safety and Environmental Protection*, 132 (3), 182-188, 2019.
5. Kuran F., Polat S., 3 Temmuz 2020 Tarihinde Sakarya İli Hendek İlçesinde Meydana Gelen Havai Fişek Fabrikası Patlamasının Sismik-Akustik Kayıtlar Kullanılarak İncelenmesi. *OHS Academy*, 4 (1), 15-26, 2021
6. Karamustafa M., Çebi S., A new model for the occupational health and safety risk assessment process: Neutrosophic FMEA, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 29-43, 2022.
7. Kumar U. Chakrabarti, Jigisha K. Parikh, Route Risk Evaluation on Class-2 Hazmat Transportation, *Process Safety and Environmental Protection*, 89 (1), 248-260, 2011.
8. Shan L., Shuhao Z., Xiaomei H., Shini P., Jun L., Investigation and modelling of the LPG tank truck accident in Wenling, *Process Safety and Environmental Protection*, 157 (1), 493-508, 2022.
9. Yonghao Z., Yanchao L. Haipeng J., Lei H., Kai Z. Wei G., Experimental study on unconfined methane explosion: Explosion characteristics and overpressure prediction method, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 69 (1), 104377, 2021.
10. Inanloo B., Tansel B., Explosion impacts during transport of hazardous cargo: GIS-based characterization of overpressure impacts and delineation of flammable zones for ammonia, *Journal of Environmental Management*, 156 (1), 1-9, 2015.
11. Lees F., Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control, Mannan S., Elsevier Butterworth-Heinemann, Texas, U.S.A, 1, 2012.
12. Ding L., Khan F., Ji J., A novel vulnerability model considering synergistic effect of fire and overpressure in chemical processing facilities, *Reliability Engineering & System Safety*, 217 (1), 108081, 2022.
13. Sharma K.R., Gopalaswami N., Gurjar B.R., Agrawal R., Assessment of failure and consequences analysis of an accident: A Case Study, *Engineering Failure Analysis*, 109 (1), 104192, 2020.
14. Shennan Z., Zhongqi W., Qizhong L., A fusing NS with NN model for the consequence prediction of vapor cloud explosion, *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 698-710, 2021.
15. Köse S., Patlama Yükü Altındaki Çelik Plakaların Patlama Parametrelerine Bağlı Dinamik Davranışının İncelenmesi, Master Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
16. Al-Shanini, A., Ahmad, A., & Khan, F. Accident modelling and analysis in process industries, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32 (1), 319-334, 2014.
17. Wang Y., Li J., Hao H. A state-of-the-art review of experimental and numerical studies on BLEVE overpressure prediction. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 104920, 2022
18. Hytovick, R., Chin, H. M., & Ahmed, K. A., Investigation of Controlled Deflagration-to-Detonation Transition of Hydrocarbon Fuels. In *AIAA Scitech 2021 Forum*, (1146-1151), 2021.
19. Pierorazio, A., Cherolis, N. E., Lowak, M., Benac, D. J., & Edel, M. T., Assessment of Damage to Structures and Equipment Resulting from Explosion, Fire, and Heat Events. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22 (1), 139-153, 2022.
20. Chamberlain G., Oran E., Pekalski A., Detonations in Industrial Vapor Cloud Explosions, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*; 62 (1), 103918; 2019.
21. Rasbash D. J., Review of explosion and fire hazard of liquefied petroleum gas. *Fire safety journal*, 2 (4), 223-236, 2020.
22. Chamberlain G. A., Oran E., Pekalski A., An Analysis of Severe Vapor Cloud Explosions and Detonations in the Process Industries, *Chemical Engineering Transactions*, 77 (1), 853-858, 2019.
23. Jones R., Lehr W., Simecek-Beatty D., Reynolds M., National Oceanic and Atmospheric Administration United States Department of Commerce, ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres 5.5.4: technical documentation, <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2669>, Release date November 10, 2013. Date of Access July 10, 2020.
24. Baker, Q. A., Pierorazio, A. J., Woodward, J. L., & Tang, M. J. Update of CCPS book "guidelines to evaluating vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE and flash fire hazards". *Process Safety Progress*, 30 (3), 296-300, 2011.
25. R. Benintendi, Statistics and Reliability for Process Safety, *Process Safety Calculations*, IChemE; Elsevier, Editör: Anita A. Koch, Cambridge, MA02139, 227-249, 2018.
26. Bagster, D. F., & Schubach, S. A., The prediction of jet-fire dimensions. *Journal of loss prevention in the process industries*, 9 (3), 241-245, 1996.
27. Xianzhao S., Jing Z., Dan Z., Lifeng X., Bin L., Dispersion and explosion characteristics of unconfined detonable aerosol and its consequence analysis to humans and buildings, *Process Safety and Environmental Protection*, 152 (1), 66-82, 2021.
28. Sellami I., Nait-Said R., Chetehoua K., de Izarra C., Zidani F., Quantitative consequence analysis using Sedov-Taylor blast wave model. Part II Case study in an Algerian gas industry, *Process Safety and Environmental Protection*, 116 (2), 771-779, 2018.
29. Bustani M.A.F., Siti Aslina H., Quantitative Risk Assessment on Onshore Gas Terminal Plant, *Journal of Occupational Safety and Health*, 15 (2), 2018.
30. Pitblado, R., Bain, B., Falck, A., Litland, K., & Spitzenberger, C., Frequency data and modification factors used in QRA studies, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24 (3), 249-258, 2014
31. International Association of Oil&Gas Producers, Risk Assessment Data Directory-Process Release Frequencies; Report 434-01; September 2019
32. U.S Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, MARPLOT fact Sheet, December 2020, <https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/marplot.pdf>, Erişim Tarihi: 14.01.2022
33. Bariha N., Mishra I. M., Chandra S. V., Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 449-460, 2016.
34. Fthenakis, V. M., Rohatgi, U. S., & Chung, B. D., A simple model for predicting the release of a liquid-vapor mixture from a large break in a pressurized container. *Journal of loss Prevention in the Process Industries*, 16 (1), 61-72, 2003.
35. Yuhua D., Huilin G., Jingen Z., Yaorong F., Evaluation of gas release rate through holes in pipelines, *Journal of Loss Prevention in Process Industries*, 15, 423-428, 2002.
36. Mercedes G.M., Munoz M., Casal J., Radiant heat from propane jet fires, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 323-339, 2010.
37. Yoon, Y. K., Effects of explosion on structures. *Explosives and Blasting*, 37 (4), 10-16, 2019
38. Debroey, J., Probit function analysis of blast effects on human beings, Master Thesis, KU Leuven University, Engineering Faculty, Belgium, 2016.