



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YER ALTI VE YER ÜSTÜ TANKLARININ ÇEVRE VE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

SABRİ MERT BÜYÜKLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Bilimleri Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Programı

DANIŞMAN

Doc. Dr. Gökçen Alev ÇİFTÇİOĞLU

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. M. Neşet KADIRGAN

İSTANBUL, 2020

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, DNV GL şirketinden alınan PHAST 8.11 yazılım lisansı ile kantitatif bir sonuç modellemesi gerçekleştirilmesinin yanında, tehlikeli bölge sınıflandırması konusunda yeni bir yaklaşım metodu geliştirilmiştir. Tehlikeli maddelerin muhafaza edildiği tankların patlaması sonucu çevreye ve insan sağlığı üzerine oluşan tüm olumsuz etmenler ayrıntısıyla incelenmiştir. Bu kapsamda, söz konusu bu patlama olaylarıyla açığa çıkacak olan karbon emisyonu hesaplanarak ve çevresel iklim değişimine olacak etkisi üzerinde durulmuştur. Son olarak da, tanklarda görülebilen yanma ve patlamanın Nitel Hata Ağacı Analiz yöntemiyle risk değerlendirilmesi yapılarak, genel süreç dahilindeki muhtemel hatalar ortaya konmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yapılmasına imkan sağlayan, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, desteğini hiç esirgemeyen, çalışmama sabırla destek olan, çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Gökçen Alev ÇİFTÇİOĞLU'na;

Destek ve yardımlarını esirgemeyen, motive eden, samimiyeti ile hep yanımda olan çok değerli eş danışman hocam Prof. Dr. M. Neşet KADIRGAN'a;

Bu süreçte beni yalnız bırakmayan, çalışmalarımın her aşamasında güven, destek ve güç verip yol gösteren arkadaşım Ferdi ÇALIK'a;

Bugüne kadar bana emeği geçen tüm hocalarıma;

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan annem Filiz BÜYÜKLÜ, babam Mehmet BÜYÜKLÜ, halam Ayfer BÜYÜKLÜ ve kardeşim Oğuzalp BÜYÜKLÜ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
SEMBOLLER.....	vii
KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER	ix
TABLolar.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. İş Güvenliği ve Çevre Açısından Risk Değerlendirmesi	2
1.2. Yer Altı ve Yer Üstü Tanklarının Özellikleri ve Risk Değerlendirmesi	3
1.2.1. Sıvılaştırılmış petrol gazının karakteristikleri	4
1.3. Çevresel Karbon Emisyonu	7
2. MODELLEME ÇALIŞMASI VE YÖNTEMLER	9
2.1. Yanma ve Patlama Etkilerinin Modellenmesi	9
2.1.1. Matematiksel model	11
2.1.2. Konut hasar kategorileri.....	11
2.1.3. Empirik tabanlı modeller	12
2.1.4. TNT eşdeğerlik metodu	12
2.1.5. TNO Multi-Enerji metodu	15
2.1.6. Dispersiyon.....	16
2.2. Karbon Emisyonu	18
2.3. Hata Ağacı Analizi (FTA).....	18
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	21
3.1. DNV PHAST Yazılımı Kullanarak Empirik Modelin Uygulanması	21
3.2. Dispersiyon Girdi Parametreleri.....	23
3.3. Patlama Sonuçları.....	25
3.4. C1-C4 Hidrakerbonlar İçin Tahmini Patlama Sonuçları.....	30
3.4.1. Atmosfer kategorileri.....	30

3.4.2. Bütan ve propanın kimyasal özellikleri	31
3.4.3. C1-C4 aşırı basınçlardaki patlama alanı çapları ve etkileri	32
3.5. Karbon Emisyonu Sonuçları	38
3.6. Hata Ağacı Analizi Risk Değerlendirmesi	40
4. SONUÇLAR.....	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	



ÖZET

YER ALTI VE YER ÜSTÜ TANKLARININ ÇEVRE VE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN RİSK DEĞERLENDİRMESİ

İşlenen ve depolanan yanıcı ve patlayıcı maddelerin miktarlarının sürekli arttığı günümüzde, alevlenebilir özellikteki kimyasalların işlendiği proseslerde meydana gelen geçmiş patlamalar incelendiğinde, ortaya çıkan maddi ve manevi kayıpların büyüklüğü söz konusu riskin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Olası patlama risklerinin önlenmesi için oluşturulacak senaryolar üzerinden yapılacak sonuç modelleme çalışmalarından elde edilecek çıktıların analiz edilmesi ve yorumlanması proses güvenliğinde proaktif yaklaşımın gereğidir. Patlayıcı buhar bulutu (vapour cloud explosion; VCE-UCVCE) üzerinden, aşırı basınç, şok dalgası, etki mesafesi ve bölge sınıflandırması gibi parametrelerin belirlenerek olası bir patlama senaryosunun hasar tahmininin yapılması, bu olası hasar tahminlerinin yönetmelikte belirtildiği şekilde rapor edilerek ilgili kurumlarla paylaşılması, işletmenin kanuni gereklilikleri yerine getirmesi için kantitatif bir yaklaşım benimsemesini zorunlu hale getirmektedir. Bu çalışmada, DNV GL şirketinden alınan PHAST 8.11 yazılım lisansı ile kantitatif bir sonuç modellemesi gerçekleştirmenin yanında, tehlikeli bölge sınıflandırması konusunda yeni bir yaklaşım metodu geliştirilmiştir. Ayrıca, PHAST 8.11’de en çok kullanılan sonuç modelleme yöntemlerinden biri olan TNT Eşdeğerlik metodu üzerinden yapılan analiz sonrasında, muhtemel aşırı basıncın etki mesafesi, hasar seviyeleri ve riskli bölge konturları gibi parametreler Petersen hasar ölçeğinde tanımlanan aşırı basınç değerlerine göre düzenlenmiştir. Ayrıca; Mexico City’de meydana gelen Pemex LPG terminali kaza araştırma raporlarında yer alan patlama parametreleri farklı bir işletme üzerinden senaryo edilerek, geniş ölçek patlamalar için bir empirik tabanlı bölge sınıflama metodu tavsiye edilmiştir. Söz konusu bu patlama olaylarıyla açığa çıkacak olan karbon emisyonu hesaplanarak, çevresel iklim değişimine olacak etkisi üzerinde durulmuştur. Son olarak da, tanklarda görülebilen yanma ve patlamanın Nitel Hata Ağacı Analiz yöntemiyle risk değerlendirilmesi yapılarak, genel süreç dahilindeki muhtemel hatalar ortaya konmuştur.

ABSTRACT

RISK ASSESSMENT OF UNDERGROUND AND ABOVEGROUND TANKS IN TERMS OF ENVIRONMENT AND HEALTH AND SAFETY

The amount of flammable and explosive substances processed and stored is continuously increasing in today's world. Therefore, the risks and dangers that occur in the processes where these substances are processed increase, and explosions occur. The magnitude of material and moral losses in these undesirable events clearly reveals their importance in preventing these risks. Therefore, the analysis and interpretation of the outputs obtained from the modeling studies to be done through scenarios to avoid possible explosion risks is a requirement of the proactive approach in process safety. Legal requirements such as determination of the damage estimation of a possible explosion scenario by determining the parameters like overpressure, shockwave, impact distance and zone classification over the flammable vapor cloud (VCE, UCVCE) and reporting of these possible damage estimates as indicated in the regulation, make it compulsory to adopt a quantitative approach for the companies. In this study, in addition to performing quantitative result modeling with the PHAST 8.11 software license obtained from DNV GL, a new approach method has been developed in hazardous zone classification. Also, after using the TNT Equivalence method, one of the most commonly used consequence modeling methods, in PHAST-8.11, the interpretation of the results was made on possible overpressure parameters: impact distance, damage levels, and risk contours. These risk contours were produced according to overpressure rates described in Petersen Damage Scale. Besides, in the wake of planning the scenario of the explosion parameters which exist in the reports of the Pemex LPG accident, Mexico City, the empirical zone classification method is recommended for the massive scale explosions. After evaluating the carbon emission resulting from the explosion, the effects on climate change will be elaborated carefully. And finally, to exhibit the probable faults of the general process, a risk assessment is performed by using the Qualitative Fault Tree Analysis method.

SEMBOLLER

%	: percentage
ps	: aşırı basınç, N/m ²
W ³	: patlayıcı kütlesi, kg
z	: ölçeklenmiş mesafe, m
n ¹	: endeks (1,7)
M _{TNT}	: Eşdeğer TNT kütlesi, kg
f _e	: katsayı, şok dalgası şeklinde yayılan enerjinin fraksiyonu
ΔH _c	: alevlenebilir gazın yanma ısısı (kJ/kg)
M _G	: patlamaya yol açan gazın kütlesi
ΔH _{TNT}	: TNT yanma ısısı (kJ/kg)
Z	: ölçeklenmiş uzaklık
x	: patlama merkezine olan mesafe

KISALTMALAR

UVCE : Unconfined Vapor Cloud Explosion

LCA : Life Cycle Assessment

GBF : Güvenlik Bilgi Formu

PKD : Patlamadan Korunma Dokümanı

API : American Petroleum Institute

ATEX : Atmosphères Explosives

TNT : Trinitrotoluene

PHAST : Process Hazard Analyses Software

BST : Baker-Strelow-Tang

ŞEKİLLER

Şekil 2. 1 Şiddetli kayıplara neden olan sebepler.....	10
Şekil 2. 2 Ölçeklenmiş uzaklığın bir fonksiyonu olarak aşırı basınç [11]	13
Şekil 2. 3 Uzaklığın bir fonksiyonu olarak aşırı basınç [11].....	14
Şekil 2. 4 Kararlı ve kararsız atmosferik şartlar [7]	17
Şekil 3. 1 Bölge sınıflandırması için empirik tabanlı sonuç modelleme prosesi	22
Şekil 3. 2 Petersen tarafından önerilen aşırı basınç hasar seviyeleri.....	23
Şekil 3. 3 Patlama merkezi ve yaşam alanı arasındaki uzaklık	27
Şekil 3. 4 Propan için aşırı basınç etki mesafesi	35
Şekil 3. 5 Metan için aşırı basınç etki mesafesi	36
Şekil 3. 6 C1-C4 hidrokarbonlarının karbon emisyonlarının kg bazında kıyaslanması.....	39
Şekil 3. 7 C1-C4 hidrokarbonlarının karbon emisyonlarının % bazında kıyaslanması	40
Şekil 3. 8 Yanıcı LPG depolama tankı ve parçalarının örnek bir görünümü	41
Şekil 3. 9 LPG tankı performans sürecinin Nitel Hata Ağacı Analizi	42

TABLÖLAR

Tablo 1. 1 LPG ile sıvı oksijen tankları arasındaki mesafeler	6
Tablo 1. 2 LPG ile sıvı oksijen tankları arasındaki mesafeler	7
Tablo 2. 1 Petersen tarafından önerilen aşırı basınç hasar kategorileri	11
Tablo 2. 2 Pasquill-Gifford dispersiyon modelinde kullanılan atmosferik stabilite sınıfları	17
Tablo 3. 1 TNT eşdeğerlik metodu için alevlenebilir gaz ve eşdeğer patlayıcı parametreleri	21
Tablo 3. 2 Petersen ölçeğine göre aşırı basınç bölge sınıfları.....	22
Tablo 3. 3 Empirik tabanlı modelleme için patlama parametreleri	24
Tablo 3. 4 Farklı rüzgar kategorilerinde oluşan aşırı basınç ve etki mesafesi	25
Tablo 3. 5 Hava şartları ve hasar kategorileri arasındaki ilişki.....	26
Tablo 3. 6 Aşırı basıncın yapılar ve insanlar üzerindeki mesafeye göre etkisi.....	29
Tablo 3. 7 Aşırı basınç bölge sınıfları ve maksimum uzaklık	33
Tablo 3. 8 TNT ve TNO Multi-Enerji patlama senaryolarının karşılaştırılması	37
Tablo 4. 1 Aşırı basınç bölge sınıfları ve maksimum uzaklık	43

1. GİRİŞ

Gün geçtikçe değişen yaşam şartları, teknoloji ve sosyal yapı bir çok çalışma alanına iş sağlığı ve güvenliği ve çevre bilinci kapsamında katı kurallar getirmekte ve uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Hemen hemen her sektörde iş güvenliği prosedürleri oluşturulmakta, çevre kirliliğine karşı en sıkı tedbirler alınarak sağlıklı ve huzurlu çalışma ortamı şartları geliştirilmektedir. Günümüzdeki İSG ve çevre kavramı, yalnızca insan sağlığı olarak değil, proje ve tesislere ekonomik ve sosyal yönlerden de büyük katkı sağlamaktadır. Ekonomik anlamda iyi yerlerde olmak ve mevcut işsizliğin azaltılması tüm dünya ülkeleri için öncelikli hususlardan biri olmuştur. Bu sebeple, güvensiz ve sağlık koşullarının yetersiz olduğu tüm işyerlerinde, tesislerde verim düşüklüğü ve iş gücü kaybı nedeni ile ortaya çıkan durumların ülke kaynaklarına verdiği zararlar apaçık ortadadır.

İşlenen ve depolanan yanıcı ve patlayıcı maddelerin miktarlarının sürekli arttığı günümüzde, söz konusu insan sağlığı ve çevreyle ilgili olan risk boyutları giderek büyümektedir. Özellikle bu maddeleri kullanan sektörler, ekonomik olarak çok güçlü konumda olmasına rağmen, yeterli önlemlerin alınamaması ya da büyük ihmallerin sonucu ülke sağlığına ve çevreye büyük zararlar verebilmektedir. Akaryakıt firmaları, bu çalışmanın ileri kısımlarında anlatılan nedenlerden ötürü, sorumluluğu alanındaki tüm faaliyetlerde çevrenin ve insan sağlığının korunması için alınması gerekli tedbirleri belirlemekte ve uygulamaya çalışmaktadır.

Yer altı ve yer üstü tanklarının bulunduğu ve tehlikeli alan olarak nitelendirilebilecek söz konusu bu sahalardaki iş güvenliği ve çevre bilincinin temel hedefleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Çalışanı Korumak: Çalışanların işyerinin olumsuz etkilerinden korunması, rahat ve güvenli bir ortamda çalışmalarının sağlanması.
- Üretim Güvenliğini Sağlamak: İş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesi iş gücü kayıplarını azaltarak, üretim güvenliğinin ve üretim verimliliğinin sağlanması.
- Çevresel Güvenliği Sağlamak: Olumsuz koşullardan doğacak makine arızaları, patlama, yangın gibi tehlikeli durumları ortadan kaldırarak işletme güvenliğinin sağlanması.

1.1. İş Güvenliği ve Çevre Açısından Risk Değerlendirmesi

Projelerde iyileştirici faaliyetlerin ve ilgili tedbirlerin belirlenmesi için öncelikle iş sağlığı ve güvenliği ve çevresel açıdan risk değerlendirilmesinin yapılması gerekir. Risk değerlendirmesiyle işyeri için olası tehlike ve riskler belirlenip kontrol önlemleri değerlendirildikten sonra, işyerini büyük maddi manevi kayıplara uğratacak, toplu ölümlere yol açacak, acil müdahale, mücadele, ilk yardım gerektirecek olaylar daha net şekilde görülebilecektir. Böylece risk değerlendirmesi, muhtemel acil durumların belirlenmesinde en önemli referans olacaktır.

İşyerinde yapılan çalışmalar, kullanılan kimyasallardan kaynaklanacak patlamalar ve sonrasında meydana gelecek yangın durumu, muhtemel acil durumların belirlenmesinde dikkat edilmesi gereken bir diğer husustur. Kullanılan kimyasalların Güvenlik Bilgi Formu'ndaki (GBF) bilgilerden faydalanılarak hangi durumlarda yangın veya patlama ihtimali olacağı değerlendirilmelidir.

Parlama, patlama risklerinin değerlendirilmesi amacıyla patlayıcı ortam oluşabilecek tüm işyerlerinin ayrıca Patlamadan Korunma Dokümanı (PKD) hazırlaması gerekmektedir. İşyerlerinde patlama ve yangın gibi acil durumların belirlenmesi için kontrol listesi hazırlanmasında fayda görülmektedir. Kontrol listesinde yer alabilecek bazı başlıklar aşağıda yer almaktadır:

- İşyerindeki alevlenir, oksitleyici ve patlayıcı kimyasal maddeler ile bunların depolanması,
- Varsa kaynak ve kesme faaliyetleri,
- Tesiste ürün alan/boşaltan taşıtlar,
- Potansiyel bir alev kaynağı teşkil edebilecek yüksek sıcaklık oluşturan makine ve teçhizatlar,
- Tesiste kullanılan tüm cihazların standartlara uygunluğu,
- Tehlikeli kimyasal maddelerin ve atıkların işlenmesi, kullanılması, taşınması ve depolanmasının uygunluğu,
- Acil durum planını hazırlayan işyerinin komşu işyeri ve binalarında yapılan faaliyetler,
- Tehlikeli patlayıcı atmosferin oluşma/tutuşma ihtimali.

Meydana gelen kazaların en önemli sebebi her zaman bilgisizlik olmuştur. Bütün önlemler alınmış olsa bile, herhangi bir tehlike kapsamında yüzeysel bilgiye sahip olmak, operatörün hata yapmasına ya da tasarımcının yanlış ekipman seçmesine sebep olabilir. Söz konusu bilgi açığını kapamak engin bir tecrübeyle daha mümkün olabilecektir. İşte bu tecrübe kapsamlı bir risk analizini ve bunun değerlendirmesini gerektirir.

1.2. Yer Altı ve Yer Üstü Tanklarının Özellikleri ve Risk Değerlendirmesi

Depolama tanklarının bulunduğu yerlerde eksik önlemler ya da yetersiz risk analizlerinden doğan kazaların meydana getireceği olumsuzluklar söz konusu sektör ve ülke ekonomisi açısından önemlidir. Modelleme programlarının çıktılarının ortaya koyacağı veriler ışığında, bu tarz endüstriyel kazaların insan sağlığı ve çevre açısından sonuçları belirlenerek, bu sayede mevcut beklemeyen olay planlarının ve alınan önlemlerin yeterliliği de sorgulanabilmektedir. Uzman kişilerin değerlendirmelerinin gerçekçiliği ve doğruluğu, kullanılan risk analiz tekniklerine ve mevcut geçmiş tecrübelerle bağlı olacaktır.

Özellikle yanıcı hidrokarbonları barındıran tesislerdeki yer altı ve yer üstü tankları sahalarındaki en kritik ekipmanlar olarak göze çarpmaktadır. İçerdikleri hidrokarbonlara göre şekilleri, boyutları ve bazı özellikleri değişebilmektedir. Hassas yapılarından dolayı, aşırı basınç ve vakum etkileri sebebiyle kırılgan olabilmektedirler.

Yaygın olarak kullanımları sonucu, hem geçmişte hem de günümüzde bir çok trajik kazanın asıl nedenleri arasında depolama tankları ilk sıraları almaktadır. Söz konusu bu tankların barındırdığı tehlikeli kimyasallar ve muhtemel bir kaza sonucu çevreye vereceği zararlar göz önüne alındığında, tankların dahil olduğu tüm süreçler özel dikkat gerektirmektedir.

Buna istinaden tez kapsamında, depolama tankının hem yapısı hem de içeriği bakımından risk değerlendirmesi gerçekleştirilerek, Nitel Hata Ağacı Analizi çıktıları da şematik olarak incelenecektir.

1.2.1. Sıvılaştırılmış petrol gazının karakteristikleri

LPG'nin gaz hâlindeki şeklinin karakteristikleri; bu gazın tamamen hidrokarbonlardan oluşması ve içinde sülfür olmamasından dolayı yüksek ısıtma değeri ve ileri derecede saflık olarak ifade edilmektedir.

Buharlaştırma ısısı: Buharlaştırma için gerekli olan ısı, sıvının kendisinden sağlanabileceği gibi, haricî bir ısı kaynağı (buharlaştırıcı gibi) kullanılmadığı takdirde, gazın muhafaza edildiği kabın cidarlarından da temin edilebilmektedir.

Buhar basıncı: Belirli bir ısı derecesinde, sıvıyı onun buharı ile dengede tutan basınç olarak tarif edilmektedir. Bu, gazın oda sıcaklığındaki basıncını belirlemesi açısından LPG'nin en önemli karakteristiklerinden biri olup gazın kullanılma yöntemlerini ve içinde saklandığı depoların dizaynını şekillendirmektedir.

Sülfür miktarı: LPG'nin diğer yakıtlara nazaran yok denecek derecede düşük bir sülfür miktarı vardır ve bu sebepten diğerlerine nazaran daha üstün konumdadır.

Buhar yoğunluğu: LPG buharı havadan daha ağır olduğundan zemin üzerine birikir. LPG buharının havadaki oranı, alt parlama limitinin altına düşmeden önce geniş bir alana yayılır ve bodrumlar, merdiven altları gibi çukur yerlerde kolayca birikebilir. Bu sebepten, bu gibi mahaller iyice havalandırılmalı ve LPG hiçbir zaman zeminden aşağı yerlere depolanmamalıdır.

Yoğunluk: Bir sıvının rölatif yoğunluğu; sıvının ağırlığının, aynı ısıda ve aynı hacimdeki suya oranı olarak tanımlanmaktadır. Sıvı hâldeki bütan ve propanın yoğunlukları, yaklaşık suyun yarısı kadardır. Sıvı LPG su üzerinde yüzer. Bir gazın rölatif yoğunluğu ise gazın ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havaya oranıdır. Gaz hâlindeki propan ve bütan, havadan çok daha ağırdır.

Genişleme katsayısı: Genişleme katsayısı; cismin ısısı bir derece artırıldığı zaman, birim hacminde meydana gelen artma şeklinde tanımlanmaktadır. Bu karakteristik, LPG'nin sıvı hâlde depolanması için önemlidir.

Viskozite: Bütan ve propanın viskoziteleri düşük olup bu husus sistemlerin boru bağlantılarında ve contalarda, göz önüne alınması gereken önemli bir faktördür.

Ek buharlaşma ısısı: LPG buharlaşırken ısı alır ve yoğunlaşırken ısı verir. İçinde bulunduğu kabın ve çevrenin ısını aldığından kabın dışında soğuma meydana gelmesine sebep olur. İçinde bulunduğu kaptan sızdığı noktada, beyaz bir bulut hâlinde donmuş su damlacıkları oluşturur. Bu durumda deriye değmesi hâlinde, deriden ısı alarak soğuk yanığı meydana getirir.

Türkiye’de %30 propan ve %70 bütandan oluşan Mix LPG (karışım LPG) kullanılmaktadır. Ancak bazı firmalar oto gaz için kış mevsiminde bu oranı %50 propan ve %50 bütan olarak değiştirmektedirler. Avrupa’da pazarlanan LPG’nin içindeki propan oranı % 35 ila % 95 arasında değişmektedir.

Türkiye’de kullanılan LPG’nin fiziksel özellikleri şunlardır:

- Özgül ağırlık (sıvı hâlde) 0,560 kg/dm³
- Özgül ağırlık (gaz hâlinde) 1,860 kg/dm³
- Kaynama noktası -23 °C
- Gaz hacminin sıvı hacme oranı 25
- En düşük tutuşma limiti (havada) 2 %
- En büyük tutuşma limiti (havada) 8,70 %
- Buharlaşma ısısı (15°C’de) 85 Cal/kg
- Buhar basıncı (15°C’de) 2,5 Bar
- Isıl değeri 10900 Kcal/Kg

Depolama tankların bulunduğu alanlarda muhtemel tehlikeye maruz kalan personeller şu şekilde sıralanabilir: saha güvenlik sorumluları, bakım personelleri, acil durum elemanları, kontrol odası operatörleri. Söz konusu bu çalışanların herhangi bir kaza olayının gerçekleşmesi hususundaki rolleri çok kritiktir. Bakımların düzgün yapılması, kontrollerin zamanında gerçekleşmesi ve çalışanın iş sağlığı ve güvenliği açısından bilinçli olması bir çok olumsuz tablonun oluşmasını engelleyecektir.

Tankların fiziksel yapılarının ve dayanıklılıklarının standartları karşılaması son derece önemli bir husustur. Tesis bünyesinde bulunan tüm sistemlerin güvenilirliği ve kaza durumunda verdiği tepkilerin yanında tüm mekanik sistemlerin işlevselliği muhtemel tehlikelerin ve risklerin gerçekleşme olasılıklarını minimum düzeye çekecektir.

Tank sahasının etrafındaki doğal alanlar ve yerleşim yerleri etki-boyut değerlendirme kapsamında göz önüne alınmaktadır. Çevredeki etkilenme potansiyeline sahip olan toprak, su, hava ve diğer tüm doğal alanlar risk değerlendirmesinin en önemli unsurları arasındadır. Olasılık ve frekans değerlerini çok fazla değiştirmeyecek olsa da, şiddet değerinin belirlenmesinde çevresel şartlar birincil öneme sahiptir.

Yerleşim yerlerinde yapılan hazırlıklar ve alınan önlemlerin uygunluğu, herhangi bir kaza sonrasında iyileşme sürecinin en etkin şekilde yürütülmesini sağlayacaktır. Söz konusu bu çevresel şartları göz önüne aldığımızda, ülkemizde uygulanmakta olan mevzuat kapsamında da, özellikle depolama sahalarında yer alan sıvı oksijen, argon ve azot depolama tanklarının mevcut lpg tanklarına olan uzaklıkları hususunda belirli limit sınırları belirlenmiştir [1].

Bu mesafeleri içeren tablo ve ilgili sayısal veriler aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

LPG'nin ulusal kanunlara uygun olarak depolandığı yerler ile sıvı oksijen tankı arasındaki uzaklıklar Tablo 1.1'deki gibidir:

Tablo 1. 1 LPG ile sıvı oksijen tankları arasındaki mesafeler

Tank kapasitesi (m³)	Uzaklık (m)
0-400	5
401-1000	6
1001-2000	10
2001-3000	13
3001-4000	14
4001-10000	15

LPG depoları, yanıcı, parlayıcı, gaz ve sıvı boru hatlarındaki vana ve flanş gibi ek yerleri ile sıvı argon ve sıvı azot depolama tankı arasındaki uzaklıklar Tablo 1.2'deki gibidir.

Tablo 1. 2 LPG ile sıvı oksijen tankları arasındaki mesafeler

Tank kapasitesi (m³)	Uzaklık (m)
0-100	3
101-200	4
201-400	5
401-600	6
601-900	7
901-1000	8
1001-2000	10
2001-3000	12
3001-4000	14
4001-10000	15

1.3. Çevresel Karbon Emisyonu

Teknolojik gelişmeler ve günümüz ihtiyaçları depolanan kimyasal maddelerin boyutunu ve kapasitesini büyük ölçüde artırmaktadır. Doğal olarak söz konusu tesislerde artan üretim faaliyetleri ve ürünlerin tüketiciler tarafından da artan kullanımları nedenlerinden dolayı ortaya çıkan çevresel etkiler de artmaktadır. Daha evvel bahsedildiği gibi çeşitli seviyelerde risk ve tehlikeler de oluşmaktadır. Dünyada bulunan tüm ürün ve hizmetlerin yaşam döngüleri süresince açığa çıkan çevresel etkilerinin azaltılması öncelikli bir amaç haline gelmiştir. Bu doğrultuda birçok farklı çevresel etki değerlendirme metodolojisi geliştirilmiştir.

Artan iş sağlığı ve güvenliği bilincinin çevre bilinci ile birleşmesinin sonucu olarak meydana gelen riskli olayların sadece ekonomik yönden değerlendirilmesi ile sınırlı kalınmamakta, çevre ve insan sağlığına olan etkileri de incelenmektedir. Karbon Ayak İzi hesabı ile bir yanma ya da patlama olayında açığa çıkan çevresel boyutlar hesaplanabilir. Bu sayede doğrudan etki hesabı yapılarak, riski azaltma noktasında alınması gereken tedbirler saptanmış olur.

Karbon Ayak İzi kavramı, ISO 14064-1 standardına uygun biçimde tedarik zinciri içerisinde yer alan tüm faaliyetler ile üretim, kullanım ve bertarafı gibi işlemler sonucu ortaya çıkan emisyonların karbondioksit cinsinden eşdeğerinin belirlenmesidir [2]. Ancak artan İSG anlayışı ile istenmeyen bir olayın meydana gelmesindeki çevresel etkilerin karbon emisyonu

olarak belirlenmesi ve olası bir felaketi önleme çalışmaları da firmalara dolaylı yoldan maliyet ve emisyon azaltımı sağlayacaktır.

Hükümetler arası iklim değişikliği paneli (IPCC) karbon emisyonlarını hesaplamak için metodoloji geliştirmiştir. Burada en önemli olan girdiler, aşamalarda kullanılan yakıt tipi, yanma teknolojisi, çalışma şartları, kontrol teknolojisi gibi spesifik bilgilerin toplanmasıdır. Metodolojide karbon ayak izi Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 isimleri ile anılan yöntemlerle hesaplanır [3].

Tier 1; basitleştirilmiş bir yöntem olup iki bilgiye ihtiyaç duyar: tüketilen yakıt miktarı ve standart emisyon faktörü. Tier 2; Tier 1 gibi aynı yaklaşıma sahip ancak yakıtın kalitesi, karbon içeriği, yanma teknolojisi ve ülkeye özgü emisyon faktörünün bilinmesi gerekir. Tier 3; daha şeffaf sonuçların verilebilmesi için geliştirilmiş, karmaşık modellere uygulanan ve daha detaylı envanter gerektiren bir modeldir.

Karbon emisyonları için Tier 1 yöntemi geçerli olan ve çok yaygın kullanılan bir yöntemdir. Aşağıdaki formül ile ilgili veriler bilindiği takdirde kolayca hesaplanır ve kg/yakıt başına iklim değişimine olan etkisi belirlenmiş olur [4].

Emisyon GHG, Yakıt (kg GHG)= Yakıt Tüketimi (TJ) x Emisyon Faktörü (kg GHG/TJ)

Bu tez çalışmasında karbon emisyonları hesabı metan, etan, propan ve bütan yakıtları için yapılmıştır.

2. MODELLEME ÇALIŞMASI VE YÖNTEMLER

Bu tez çalışmasında yer altı ve yer üstü tanklarının yanma ve patlaması sonucu ortaya çıkacak etkilerin incelenmesi için detaylı analizler farklı yöntemler ile yapılmıştır. Bu yöntemlerden birincisi yanma ve patlamanın meydana gelmesiyle ortaya çıkacak aşırı basıncın hesaplanması ve etkilerinin incelenmesidir. Bir diğer modelleme analizi, istenmeyen bu olaylarda açığa çıkacak olan karbon emisyonunun hesaplanması ve çevresel iklim değişimine olacak etkinin belirlenmesidir. Son olarak da, tanklarda görülebilen yanma ve patlamanın Nitel Hata Ağacı Analiz yöntemiyle risk değerlendirmesi olacaktır.

2.1. Yanma ve Patlama Etkilerinin Modellenmesi

Patlamayı en basit şekliyle basıncın hızlı bir şekilde artmasına sebep olan olay olarak tanımlayabiliriz. Nükleer reaksiyonlar, patlayıcılar, buhar patlamaları, hava içerisinde veya başka oksitleyicilerle gaz ve tozların yanması gibi olaylar bu hızlı basınç artışına sebep olabilmektedir. Patlama, tanımından da anlaşılacağı gibi çok hızlı gerçekleşen bir olay olması sebebiyle, kontrol altına alınması oldukça güçtür. En önemli çözüm yöntemi patlama riskini proaktif olarak ele alıp, yapılacak analiz ve değerlendirmelerle patlama riskini azaltma, hasar azaltma veya hafifletme üzerine odaklanmaktır. Hidrokarbon işleyen büyük bir tesiste, olası bir patlama sonrası oluşacak aşırı basınç riskinin kamusal alanlara olan uzaklığının kabul edilebilir seviyede görülmesi için gerekli mesafe 500 m civarındadır [5].

Aşırı basınç, patlama sonrası oluşan aşırı basınç ölçeklenmiş mesafenin fonksiyonudur [6]. Baker yaklaşımına göre aşırı basınç aralığı 1,0 – 0,1 bar arasındadır (1,7 indeksi).

$$p_s = f(z) \quad (1)$$

$$z = r/W^3 \quad (2)$$

$$p_s = 1/r^{n^1} \quad (3)$$

p_s : aşırı basınç, N/m²

W^3 : patlayıcı kütlesi, kg

z : ölçeklenmiş mesafe, m

n^1 : endeks (1,7)

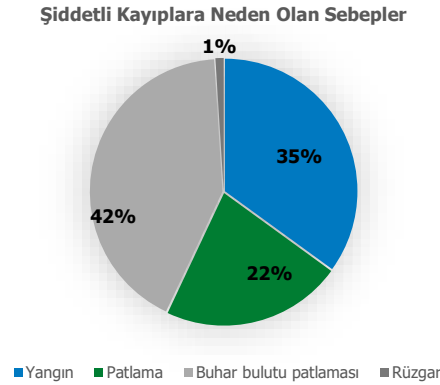
Risk bölgesi; merkezindeki alevlenebilir gaz salınımının sonuçlarının halk sağlığını ciddi şekilde etkileyebilecek seviyelere (ölüm, yaralanma, olası hasar) ulaşabileceği belirli bir dairesel alanı ifade eder.

Atmosferik kararlılık ise; dikey sıcaklık gradyanlarının atmosferdeki türbülansı ne ölçüde desteklediğini veya bastırđını açıklar. Atmosferik kararlılık 3 (üç)'e ayrılır.

- Kararlı; yükseklikle sıcaklık artar.
- Kararsız; yükseklikle sıcaklık azalır.
- Nötr; yükseklikle sıcaklıkta önemli değişim yoktur.

Patlamalar, meydana geldikleri çevreye göre üç bölümde sınıflandırılmaktadır [6].

- Kapalı Alan Gaz patlamaları: tank, boru, kanal veya tünellerde,
- Kısmi Kapalı Alan Gaz Patlamaları: off-shore modüller veya binalar, kompartmanlar,
- Açık Alan Gaz Patlamaları: tesis geneli veya açık alanlardaki patlamalar.



Şekil 2. 1 Şiddetli kayıplara neden olan sebepler

1988 yılında Garrison; 1957 ve 1986 yıllarında meydana gelen endüstriyel felaketlerin sebeplerini araştırmış ve Şekil 2.1'deki ilgi çekici sonuçlara ulaşmıştır. Söz konusu sebepler % 42 oranla buhar bulutu patlamaları , % 35 oranla yangınlar, %22 oranla patlamalar ve %1 oranla rüzgar kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır [7].

2.1.1. Matematiksel model

Geniş ölçekte UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion) açık alan buhar bulutu patlama modelleri; empirik modeller, fenomenolojik modeller, hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli (computational fluid dynamics; CFD) modeller ve ileri CFD modeller olmak üzere kategorize edilmiştir. Bu çalışmada; örnek bir senaryo üzerinden empirik tabanlı TNT eşdeğerlik metodu kullanılarak elde edilen aşırı basınç, etki mesafesi gibi parametreler, Petersen tarafından önerilen hasar seviyesi ölçeği ile birleştirilerek yeni bir geniş ölçek bölge sınıflandırma yöntemi tavsiye edilmiştir.

Olası bir patlama sonrası oluşacak tahmini hasar, patlama sonrası oluşacak şok dalgası ile yakından ilişkilidir. Patlama meydana geldiğinde, kaynaktan ilerleyen basınç dalgası çevrede bulunan canlı ve cansız nesneler üzerinde hasar oluşturma potansiyeline sahiptir. Tablo 2.1’de şok dalgası değerlerinin meydana getirdiği hasar seviyeleri gösterilmiştir.

2.1.2. Konut hasar kategorileri

Geniş çapta alıntılanan hasar sınıfları 1970 yılında Petersen tarafından tanımlanmıştır [8].

Tablo 2. 1 Petersen tarafından önerilen aşırı basınç hasar kategorileri

Bölge	Hasar Seviyesi	Pik Aşırı basınç(kPa)	(N/m ²)
Bölge A	Çok şiddetli	> 83	≈ 83000 N/m ²
Bölge B	Şiddetli Hasar	> 35	≈ 35000 N/m ²
Bölge C	Orta Derece Hasar	> 17	≈ 17000 N/m ²
Bölge D	Hafif Hasar	> 3.5	≈ 3500 N/m ²

Tablo 2.1’de tanımlanan aşırı basınç, hasar seviyesi ve bölgelere göre; [8]

Bölge A ; ekonomik onarımın ötesinde, şiddetli hasara uğramayı,

Bölge B ; bazı yapısal bölümlerin kısmi çökmesi veya kullanılamaz hale gelmesini,

Bölge C ; kullanılabilir fakat yapısal onarım gerektirdiğini,

Bölge D ; pencere veya lambaların kırılması, duvar panellerinin hasara uğramasını tanımlanmaktadır.

Patlamaların binalar üzerindeki etkisi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, 1 psi (6,89 kPa)’lık aşırı basınç kısmi tahribat için yeterliyken, 12 psi (83 kPa)’lık aşırı basıncın toplu tahribata sebep olacağı öngörülmektedir. [9]

2.1.3. Empirik tabanlı modeller

Empirik modeller; deneysel çıktıların korelasyon analizlerine dayanmaktadır. Kompleks geometrileri hesaba katmayan, basitleştirilmiş fiziksel ve matematiksel denklemleri içeren bu modeller, daha kompleks yaklaşım modelleri (fenomenolojik, CFD vs.) ile birleştirilerek de kullanılabilmektedir.

2.1.4. TNT eşdeğerlik metodu

TNT eşdeğer modeli patlayıcı bir gazın buhar bulutunun oluşturacağı şok dalgasının etkilerini tahmin edebilmek için sık kullanılan ve uluslararası literatürde kabul görmüş bir modeldir [10].

Patlayabilir buhar bulutu kütesine karşılık gelen eşdeğer TNT (TriNitroToluen), M_{TNT} (kg) ve patlama merkezine olan uzaklık arasındaki ilişki;

$$M_{TNT} = \frac{f_E \Delta H_c M_G}{\Delta H_{TNT}} \quad (4)$$

M_{TNT} : Eşdeğer TNT kütlesi, kg

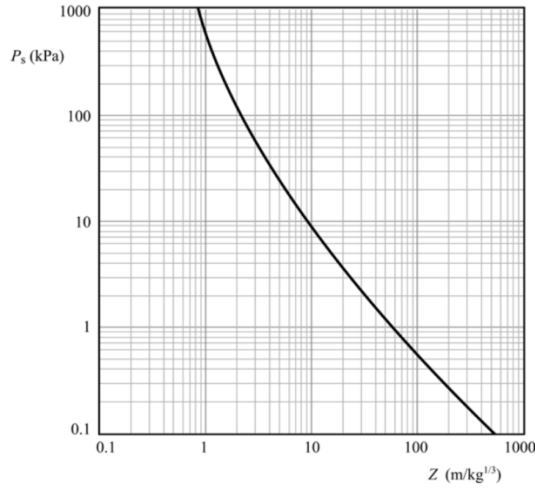
f_e : Katsayı, şok dalgası şeklinde yayılan enerjinin fraksiyonu (0,01 ve 0,1 arasında alınır)

ΔH_c : Alevlenebilir gazın yanma ısısı (kJ/kg)

M_G : Patlamaya yol açan gazın kütlesi

ΔH_{TNT} : TNT yanma ısısı (kJ/kg)

Metot; ölçeklenmiş uzaklığın bir fonksiyonu olarak ifade edilen aşırı basıncı (P_s , kPa), Brsie ve Simpson'ın empirik diyagramına dayandırmaktadır [11].



Şekil 2. 2 Ölçeklenmiş uzaklığın bir fonksiyonu olarak aşırı basınç [11]

Hopkins-Krantz ölçekleme denklemine göre ölçeklenmiş uzaklık ifadesi aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilir,

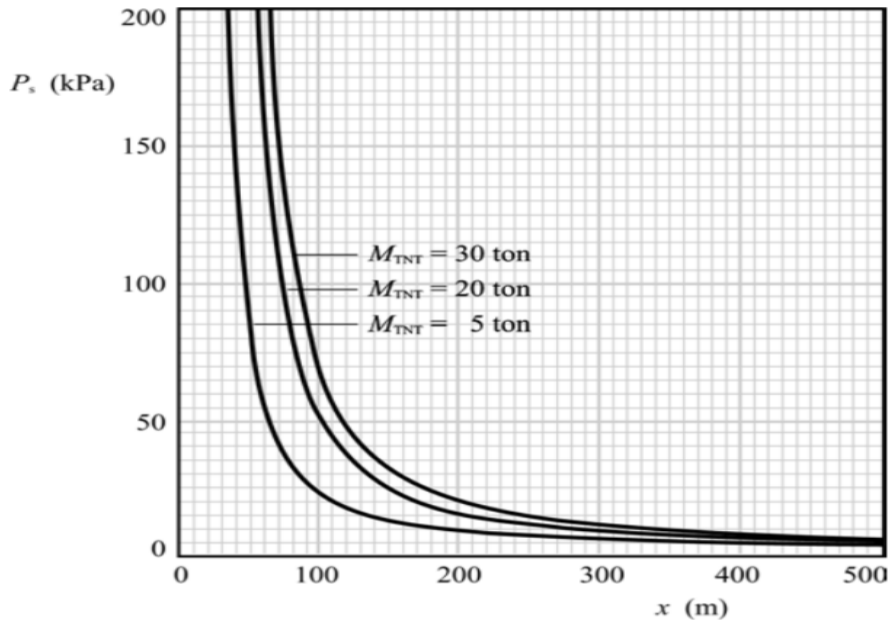
$$Z = \frac{x}{M_{TNT}^{1/3}} \quad (5)$$

Z : ölçeklenmiş uzaklık
 x : Patlama merkezine olan mesafe
 M_{TNT} : Eşdeğer TNT kütlesi, kg

Şekil 2.2’de kullanılan diyagrama göre şok dalgası tarafından üretilen aşırı basınç, P_s (kPa) daha analitik bir şekilde aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$P_s = \frac{80,800 \left(1 + \left[\frac{Z}{4.5} \right]^2 \right)}{\sqrt{1 + \left[\frac{Z}{0.048} \right]^2} \sqrt{1 + \left[\frac{Z}{0.32} \right]^2} \sqrt{1 + \left[\frac{Z}{1.35} \right]^2}} \quad (6)$$

6 numaralı denklemden elde edilen ölçeklenmiş mesafelerde ki aşırı basınç değerleri uzaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 2.3 üzerinde görülebilmektedir.



Şekil 2. 3 Uzaklığın bir fonksiyonu olarak aşırı basınç [11]

2.1.5. TNO Multi-Enerji metodu

TNO Multi-Enerji metodu; güçlü bir patlamanın ancak ve ancak yüksek boyutlardaki gaz sıkışmaları sonucunda oluşabileceğini varsaymaktadır. Kapalı bir alanda birikmeyen bir yanıcı gaz kütlesi sadece yanacak olup, patlama aşırı basınç sürecine büyük bir katkısı olmayacaktır. Bu yöntem ile asıl amaç engellenmiş ya da kısmen sınırlandırılmış yanıcı buhar bulutlarının statik ve dinamik aşırı basınçlarının hesaplanmasıdır. Bu sayede aşırı basınçların tehlike mesafeleri belirlenecektir [12].

TNO Multi-Enerji metodu kapsamında oluşturulan buhar bulutunun yarı çapı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$R = \left(\frac{3V}{2\pi} \right)^{1/3} \quad (7)$$

Patlama etkisinin gücünün belirlenmesi için kullanılan ölçeklendirilmiş aşırı basınç ve ölçeklendirilmiş mesafenin yer aldığı formülasyonlar aşağıda belirtilmiştir.

Katsayı sabitinin uygun kriterler arasından belirlenmesi önemli bir husustur. PHAST yazılım programına girilen veriler sonucunda program bu formülasyonlar üzerinden değerlendirmeler yapmaktadır [13].

$$P'_s = \frac{P_s}{P_a}, \quad (8)$$

$$r' = x \left(\frac{E}{P_a} \right)^{-1/3}. \quad (9)$$

2.1.6. Dispersiyon

Olası bir patlama öncesinde, prosesi oluşturan ekipmanlarda meydana gelen yırtık, çatlak ve hasar; tesis sahası veya yerel yaşam alanları boyunca alevlenebilir buhar bulutunun oluşmasına neden olabilir. Alevlenebilir gazların atmosferik dispersiyonunu etkileyen parametreler şunlardır:

1. Rüzgar hızı
2. Atmosferik kararlılık
3. Yer koşulları (binalar, akarsular, ağaçlar)
4. Yer seviyesi üzerinde yayılım yüksekliği
5. Yayılmaya başlayan gazın momentumu ve havanın yoğunluğuna göre konumu

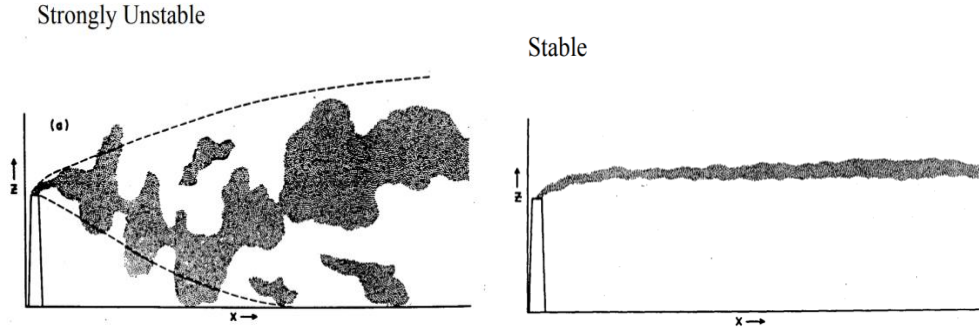
Rüzgar hızı arttıkça Şekil 2.4'teki alevlenebilir buhar bulutu kütlesi uzar ve daralır, rüzgar sayesinde daha fazla alevlenebilir bulut kütlesi taşınır ancak daha fazla hava ile daha hızlı seyreltilmiş olur.

Empirik tabanlı patlama hesaplamalarında buhar bulutunun oluşumu, taşınması, salınımın süresi gibi faktörler oldukça önemlidir. Gündüz ve gece hava şartlarının oluşturduğu atmosferik stabilite Pasquill-Gifford yaklaşımına göre kararsız, nötr ve kararlı olmak üzere 3(üç) türbülans sınıfında kategorize edilmektedir [14].

Kararsız atmosferik şartlar: Yer seviyesinin üzerindeki yüksekliklerde hava yoğunluklarındaki değişiklikler sebebiyle düşük yoğunluktaki hava daha yüksek yoğunluklu havanın altında kalır ve bu durum kararsız bir stabilite meydana getirir. Bu kararsız hava durumunun sonucu olarak atmosferik mekanik türbülans artar.

Nötr atmosferik şartlar: Yer seviyesi ve üzerindeki hava ısınır ve rüzgar hızı artar, güneşe maruziyet azalır fakat hava sıcaklığında meydana gelen fark mekanik türbülansı etkilemez.

Kararlı atmosferik şartlar: Kararlı atmosferik şartlarda güneşin sebep olduğu ısıtma, soğuma kadar hızlı olmaz. Bu sebeple yer seviyesine yakın hava sıcaklığa daha yüksek bölgelere göre daha düşüktür. Daha yüksek yoğunluktaki havanın aşağıda kalması mekanik türbülansı bastırır [15].



Şekil 2. 4 Kararlı ve kararsız atmosferik şartlar [7]

Pasquill-Gifford (P-G) sistemi, atmosferik kararlılığın rutin meteorolojik ölçümlerle gözlemlenmesini sağlayacak bir dizi farklı kararlılık sınıfından oluşmaktadır. Tablo 2.2.'de P-G yaklaşımına göre; en kararsız koşullar A; orta derecede kararsız B; hafif kararsız C; nötr D; E hafif kararlı ve F en az kararlı sınıflar olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. 2 Pasquil-Gifford dispersiyon modelinde kullanılan atmosferik stabilite sınıfları

Rüzgar hızı (m/s)	Gündüz Güneşi			Gece Kondüsyonları	
	Güçlü	Orta	Hafif	Hafif bulutlu $\geq 4/8$	$\leq 3/8$ bulut seviyesi
<2	A	A-B	B	F5	F5
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

2.2. Karbon Emisyonu

İklim değışikliğinin, ekosistem sağığı, insan sağığı ve maddi refah üzerinde olumsuz etkileri vardır. İklim değışikliği farklı proseslerden, kullanım aşamalarından ve meydana gelen yanma ve patlama olaylarından salınan sere gazlarının havaya yayılması ile ilgilidir. IPCC tarafından geliştirilen karakterizasyon modeli küresel ısınma potansiyelini birim emisyon başına salınan kg karbondioksit olarak ifade eder. IPCC karakterizasyon modelinde kullanılan faktörler yüz yıl, yirmi yıl veya beşyüz yıl başına olacak şekilde küresel ısınma hesabında kullanılabilir.

Hava emisyonlarının küresel ısınmaya olan direkt etkilerinin hesaplanmasında IPCC'nin uyguladığı faktörler aşağıdaki gibidir:

- Azot emisyonlarından dolayı dinitrojen monoksit oluşuma dahil değildir.
- Alt stratosfer ve üst stratosferdeki azot oksitleri, su, sülfat vb. emisyonlardan dolayı radyal zorlamayı hesaba katmaz.
- Dolaylı etkileri dikkate almaz.
- CO emisyonlarının dolaylı etkilerini içermez.

Küresel ısınma potansiyel hesabında normalizasyon ve ağırlıklandırma çalışmaları yoktur. Hesaplama IPCC tarafından verilen iklim etki faktörleri kullanılarak direkt olarak yapılmaktadır [3].

2.3. Hata Ağacı Analizi (FTA)

Yer altı ve yer üstü depolama tankları kapsamında meydana gelen kazalara bakıldığında zaman genellikle şimşek, alev ya da kıvılcımların asıl sebep olduğu görülmektedir. Fakat kesin olay şey; herhangi bir alevlenebilir kaynak olmadan yangın ya da patlama olmayacağıdır. Çeşitli kaza gelişim ağaçları incelendiğinde, bir tank kazasının insanlara, ekipmanlara ve çevreye büyük boyutlu etkilerinin olduğunu net bir şekilde görülebilir.

Sızıntı olan bir tanktan çevreye yayılan bir kimyasalın çevreye bir çok zararlı etkisinin olacak olmasının yanında, işletme için de azımsanmayacak bir ekonomik kayba neden olacaktır. Yayılan madde zehirli ise insanların sağığına ölümcül etkiler olacak, herhangi bir ölüm olmasa bile işletmenin telafisi olmayan bir itibar kaybı yaşamasına sebep olacaktır.

Eğer ki yayılan madde parlayıcı bir özelliğe sahipse, yangın ve patlamalar felakete yol açabilecektir. Aşırı basınç etkileri ve termal radyasyon insan ve hayvan ölümlerine sebep olacaktır.

Tank kazalarının olasılığını hesaplamak sürecinde ilk aşama potansiyel sızıntı kaynaklarını belirlemektir. Tank, boru hatları, hava alma ve güvenlik valfleri gibi ekipmanlar söz konusu risk etmenlerinden bazılarıdır. Potansiyel sebepleri ‘Hardware’ ve ‘Software’ olarak ayırmak mümkündür. ‘Hardware’ sebepler ekipmanların güvenilir oluşları ve dış çevre etkileri olarak değerlendirilebilir. ‘Software’ sebepler ise operatör ve yöneticilerin kalitelerini ve yönetimsel seviyelerini ifade eder. Operatör kalitesi ilgili kişinin yeterliliğine, profesyonellik seviyesine ve fiziksel/mental sağlık durumuna bağlıdır. Yönetimsel kalite unsurları arasında iş sağlığı ve güvenliği ve çevre bilinci ön plana çıkmaktadır. Denetimlerin sıklığı ve eğitimler bu süreçlerin istenilen seviyede tutulmasında son derece önemlidir.

Tehlike derecesi, salımı gerçekleşen maddenin kimyasal içeriklerine, tehlike yaratabilecek özelliklerine ve bulunduğu çevreye bağlı değişir (parlama noktaları, patlama limitleri ve zehirlilik derecesi). Söz konusu maddeler ne kadar fazla miktarda olursa, muhtemel tehlike derecesi de o kadar yüksek olacaktır.

Literatürde, çalışma faaliyetlerinden kaynaklanan sağlık ve güvenlik risklerini değerlendiren birçok yöntem bulunur. Söz konusu tehlikelerden kaynaklı risklerden insanların etkilenme potansiyelini tahmin etmek amacıyla bilgilerin düzenli olarak işlenmesiyle, istenilen seviyede bir risk değerlendirme prosesi oluşacaktır [16].

En fazla kullanılan teknik odaklı yöntemlerden biri Hata Ağacı Analizi metodolojisidir. Bu yöntem, sistemi oluşturan bileşenleri, ilgili hataları ve bunlar arasındaki bağlantıları göstermek amacıyla geliştirilmiştir. Buna göre belirlenen bir hata analiz edilirken ikincil olaylar ve zararın kombinasyonları şematize edilip, genellikle en önemli olaya göre düzenlenir. Bir sistem içerisindeki herhangi bir problemi etkileyen çok basit olmayan ve etkileşim potansiyeli yüksek olan faktörlerin belirlenebilmesi ve değerlendirilmesi için bu yöntem kullanılabilir [17].

Bu yöntemin en önemli avantajı, diğer istenmeyen olaylarla birleşerek çok tehlikeli sonuçlara yol açabilecek durumları sistematik olarak tespit etmesidir. Bir çok risk analizi

metodunda en başta sorulan sorunun ‘what if’ (olursa ne olur) mantığına cevap verir nitelikte olması beklenir. FTA mantığında ise bu soru ‘ne sebep olur?’ algısına d6nüşür. Ayrıca istenmeyen olayların çok değişik şekillerle ifade edilmesi bu risk analizi metodunu diğerlerinde ayıran bir 6zelliktir. Tablo ya da listeler yerine kullanılan semboller, proses aşamalarını çok net bir şekilde ortaya koyar. En tepede bulunan ana olaydan (top event) itibaren gelişen sũreleri doğru sembollerle ifade etmek son derece kritiktir.



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde yukarıda ayrıntıları verilen modellemeler kullanılarak, LPG depolama sahalarında meydana gelen kazaların olası etki hesaplamaları ayrıntılarıyla yapılmıştır. LPG içeriğini oluşturan bütan ve propan dışındaki metan ve etan için de tüm modelleme ve hesaplamalar tekrarlanmış olup, artan karbon miktarının aşırı basınca olan etkisi ayrıntılarıyla incelenmiştir. Söz konusu bu hesaplamalar bir önceki bölümde irdelenmiş olan 2 ayrı metot (TNT Eşdeğerlik ve TNO Multi-Enerji metot) üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1’de, çalışmada kullanılacak propan gazı ve TNT için spesifik değerler gösterilmiştir.

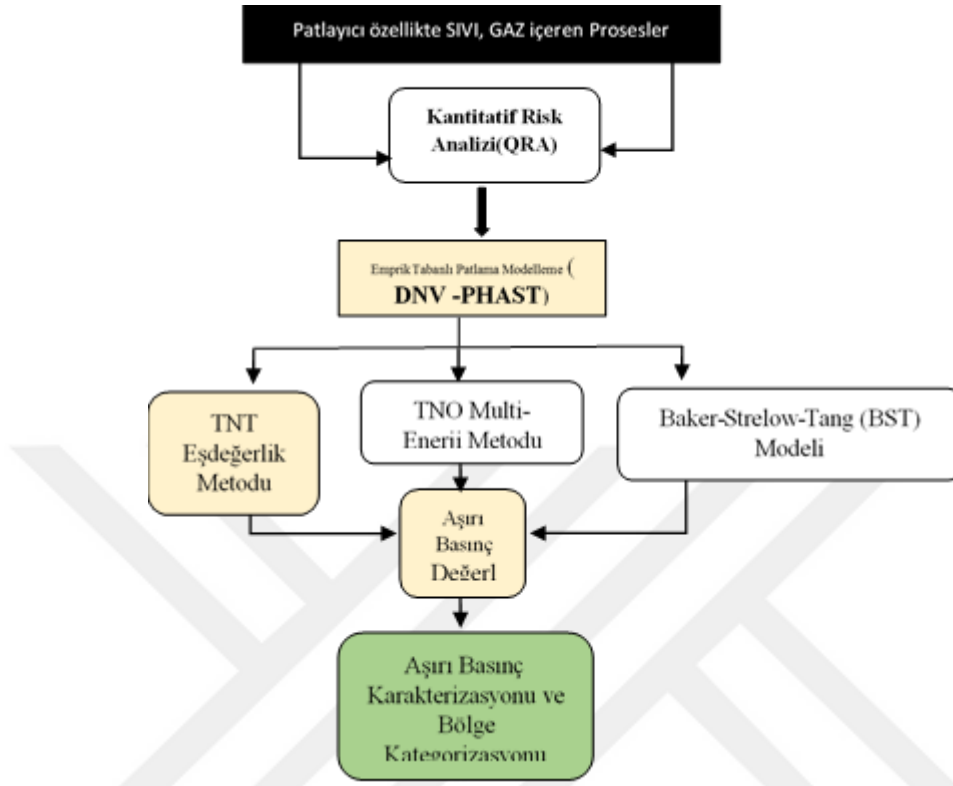
Tablo 3. 1 TNT eşdeğerlik metodu için alevlenebilir gaz ve eşdeğer patlayıcı parametreleri

	Fiziksel Hal	Yoğunluk (kg/m ³)	Kaynama Noktası(°C)	Molekül ağırlığı (g/mol)	Yanma Isısı, ΔH_c , kJ/kg)
Propan – C ₃ H ₈	Gaz	493	-42	44	46010 kJ/kg
TNT	Katı	1654	210	227,13	4760kg

3.1. DNV PHAST Yazılımı Kullanarak Empirik Modelin Uygulanması

Google Earth üzerinden koordinatları belirlenen kurgusal işletme için, 19 Kasım 1984 yılında Mexico City’de PEMEX LPG (Sıvılaştırılmış propan gazı) terminalinde meydana gelen patlama parametreleri baz alınmış, empirik tabanlı modelleme yazılımı sayesinde elde edilen aşırı basınç değerleri, literatürde Petersen tarafından tavsiye edilen aşırı basınç hasar seviyesi ölçeği ile birleştirilerek, riskli bölge sınıfları gösterilmiştir.

Bu çalışmada 19 kasım 1984 tarihinde Mexico City Pemex LPG (Sıvılaştırılmış propan gazı) terminalinde meydana gelen patlama parametreleri baz alınmıştır. Söz konusu terminal yaşam alanlarına 130 metre uzaklıkta bulunmaktadır. Yayılan alevlenebilir propan bulutunun 4750 kg olduğu tahmin edilmektedir. Alandaki rüzgar hızı 0,4 m/s’ dir. Çalışmada kullanılan empirik tabanlı modelleme prosesi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1 Bölge sınıflandırması için empirik tabanlı sonuç modelleme prosesi

Bu çalışmada DNV şirketinden proje kapsamında temin edilen Process Hazard Analysis Software Tools (PHAST) yazılımı kullanılarak empirik model ile patlama sonrası aşırı basınç dalgası karakterize edilmiştir. Petersen tarafından Tablo 3.2’de önerilen hasar seviye ölçeği ile birleştirilerek geniş ölçek bölge sınıflandırmasına uyarlanmıştır.

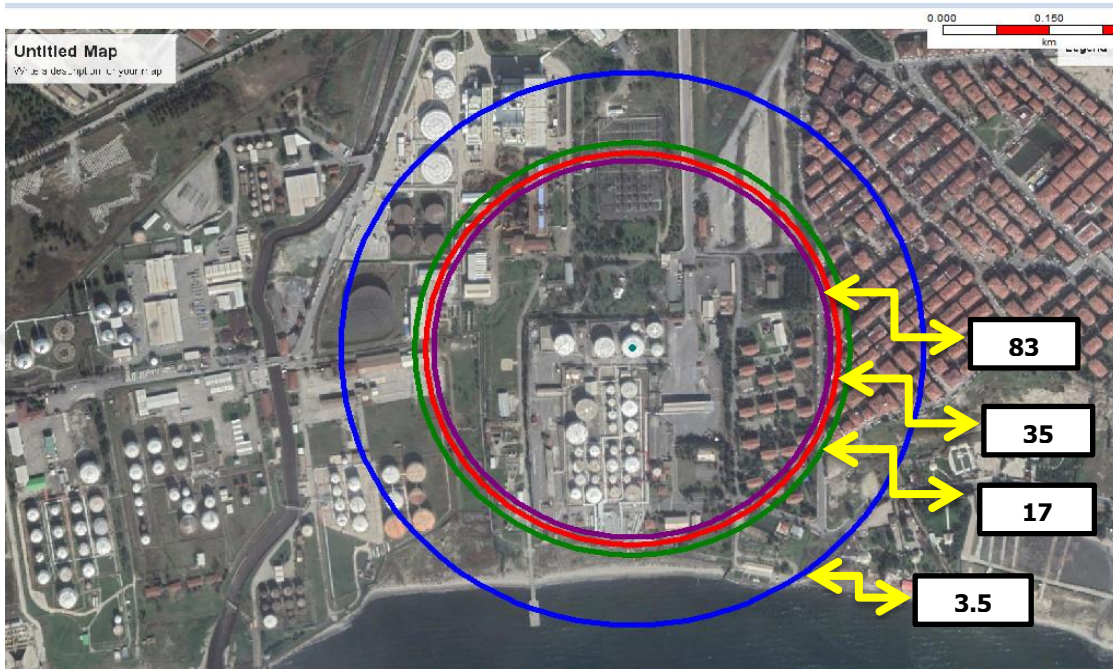
Petersen tarafından önerilen Tablo 3.2’de aşırı basınç hasar skalası empirik tabanlı modelleme için aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

Tablo 3. 2 Petersen ölçeğine göre aşırı basınç bölge sınıfları.

Bölge	Hasar Seviyesi	Aşırı basınç(kPa)	Bölge Rengi
Bölge A	Çok şiddetli	$P_s > 83$	Mor 
Bölge B	Şiddetli Hasar	$35 < P_s < 83$	Kırmızı 
Bölge C	Orta Derece Hasar	$17 < P_s < 35$	Yeşil 
Bölge D	Hafif Hasar	$3.5 < P_s < 17$	Mavi 

1 kPa = 0,01 bar

Aşırı basınçların hasar etki mesafeleri ve buna bağlı olarak belirlenen risk kontur sınırları da Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 Petersen tarafından önerilen aşırı basınç hasar seviyeleri

3.2. Dispersiyon Girdi Parametreleri

Pemex patlaması için verilen dispersiyon parametreleri bu çalışma lokasyonuna uyarlanarak TNT eşdeğerlik metoduna göre hesaplanmıştır. Burada üzerinde ayrıntıyla durulan bir çok farklı parametre mevcuttur. Salınan propan miktarının miktarı, toplam sızıntı süresinin saniye cinsinden belirtilmesi ve yine saniye olarak alevlenebilir zamanın ortalamasının alınması söz konusu bu parametrelerden bazılarıdır.

Tablo 3.3’te görüldüğü üzere, mevcut atmosferik koşullar, yanıcı buhar bulutu propanın tutuşma sıcaklığına kadar etki etmekte ve muhtemel patlama etki mesafelerini belirlemektedir. Atmosferik koşulların aşırı basınç üzerindeki etkilerine ilerleyen bölümlerde ayrıntılı şekilde yer verilecektir.

Tablo 3. 3 Empirik tabanlı modelleme için patlama parametreleri

Alevlenebilir zaman ort.	18.75	s
Sızıntı süresi	600	s
Salınan propan miktarı	4750	kg

Senaryo	Hava	Üst patlama limiti için mesafe [m]	Alt patlama limiti için mesafe [m]	Mesafe(alt patlama limiti fraksiyonu) [m]
Katastrofik yırtık	Kategori 1.5/F	13,5	137,4	201,1
	Kategori 1.5/D	13,5	153,9	220,4
	Kategori 5/D	14,8	147,5	217,7
	Kategori 0.4/B	13,5	178,5	274,5

Senaryo	Hava	Aşırıbasınç seviyesi [kPa]	Toplam alevlenebilir kütle [kg]	Patlayıcı buhar kütleşi [kg]	Tutuşma zamanı [s]	Tutuşma kaynağı [m]	Bulut merkezi [m]	Patlama merkezi [m]
Katastrofik yırtık	Kategori 1.5/F	3,5	1203,0	1203,0	61,4	170	36,9	170
		17	741,6	741,6	85,4	190	47,5	190
		35	741,6	741,6	85,4	190	47,5	190
		83	741,6	741,6	85,4	190	47,5	190
	Kategori 1.5/D	3,5	885,6	885,6	61,3	190	63,5	190
		17	388,3	388,3	80,6	210	82,8	210
		35	388,3	388,3	80,6	210	82,8	210
		83	388,3	388,3	80,6	210	82,8	210
	Kategori 5/D	3,5	866,1	866,1	21,7	160	77,1	160
		17	61,2	61,2	38,6	210	18,4	210
		35	61,2	61,2	38,6	210	18,4	210
		83	61,2	61,2	38,6	210	18,4	210
	Kategori 0.4/B	3,5	556,7	556,7	182,3	260	58,0	260
		17	293,5	293,5	215,4	270	68,1	270
		35	293,5	293,5	215,4	270	68,1	270
		83	293,5	293,5	215,4	270	68,1	270

3.3. Patlama Sonuçları

Tanımlanan en kötü durum senaryosunda (worst-case scanerio) meydana gelen patlama sonuçları farklı Pasquil rüzgar stabilite durumlarına göre, rüzgar yönünde etki edeceği maksimum mesafeler göz önüne alınarak Tablo 3.4’te gösterilmiştir.

Tablo 3. 4 Farklı rüzgar kategorilerinde oluşan aşırı basınç ve etki mesafesi

Senaryo	Hava	Aşırı Basınç Seviyesi [Bar]*	Maksimum Mesafe [m]	Çap [m]	Hasar Kategorisi	Şiddet seviyesi
Aşırı basınçtan dolayı tank gövdesinde çatlak oluşumu	Kategori 1.5/F	0,035	356,1	372,3	Bölge D	Hafif hasar
		0,17	243,8	107,6	Bölge C	Orta hasar
		0,35	224,5	69,1	Bölge B	Şiddetli hasar
		0,83	211,0	41,6	Bölge A	Çok şiddetli hasar
Aşırı basınçtan dolayı tank gövdesinde çatlak oluşumu	Kategori 1.5/D	0,035	358,1	336,1	Bölge D	Hafif hasar
		0,17	253,3	86,7	Bölge C	Orta hasar
		0,35	237,8	55,7	Bölge B	Şiddetli hasar
		0,83	226,9	33,8	Bölge A	Çok şiddetli hasar
Aşırı basınçtan dolayı tank gövdesinde çatlak oluşumu	Kategori 5/D	0,035	326,8	333,7	Bölge D	Hafif hasar
		0,17	233,4	46,8	Bölge C	Orta hasar
		0,35	225,0	30,1	Bölge B	Şiddetli hasar
		0,83	219,1	18,3	Bölge A	Çok şiddetli hasar
Aşırı basınçtan dolayı tank gövdesinde çatlak oluşumu	Kategori 0.4/B	0,035	404,0	288,0	Bölge D	Hafif hasar
		0,17	309,5	79,0	Bölge C	Orta hasar
		0,35	295,3	50,7	Bölge B	Şiddetli hasar
		0,83	285,403	30,8	Bölge A	Çok şiddetli hasar

(*1 bar = 100kPa)

Tablo 3.4'teki sonuçlar dikkatle incelendiğinde, farklı atmosferik şartlarda ciddi yıkıcı etkiye sahip 83 kPa (0,83 bar) ve 35 kPa (0,35 bar) aşırı basınç konturlarının 210-300 metre arasında, orta dereceli ve hafif hasar olarak nitelendirebileceğimiz 17 kPa (0,17 bar) ve 3,5 kPa (0,035bar) aşırı basınç konturlarının ise 233-403 metre arasında etkili olduğu görülmektedir. Patlama esnasında bölgedeki rüzgar hızı (0,4 m/s) Pasquill rüzgar parametrelerine göre düzenlenerek, farklı rüzgar parametrelerinde elde edilen aşırı basınç değerleri Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Tablo 3. 5 Hava şartları ve hasar kategorileri arasındaki ilişki

Hasar Kategorisi	Rüzgar Kategorisi	Maksimum mesafe(m)	MAKSİMUM ETKİ MESAFESİ (ZONE A İÇİN)	MAKSİMUM ETKİ MESAFESİ (ZONE C İÇİN)
Bölge A (83 kPa)	Kategori 1.5/F	211		
	Kategori 1.5/D	227		
	Kategori 5/D	219		
	Kategori 0.4/B	285		
Bölge B (35 kPa)	Kategori 1.5/F	225		
	Kategori 1.5/D	238		
	Kategori 5/D	225		
	Kategori 0.4/B	295		
Bölge C (17 kPa)	Kategori 1.5/F	244		
	Kategori 1.5/D	253		
	Kategori 5/D	238		
	Kategori 0.4/B	310		
Bölge D (3,5 kPa)	Kategori 1.5/F	356		
	Kategori 1.5/D	358		
	Kategori 5/D	327		
	Kategori 0.4/B	404		

0.4/B hava kategorisinde elde edilen aşırı basınç-mesafe değerleri incelendiğinde; Petersen ölçeğine göre Bölge A ve B bölgelerindeki hasar seviyeleri için yaklaşık 300 metrelik alan içerisindeki yaşam alanları ciddi bir risk altındadır. Kategori C ve D bölgelerinde ise maddi onarım gerektiren orta dereceli hasarlar söz konusudur.



Şekil 3. 3 Patlama merkezi ve yaşam alanı arasındaki uzaklık

Aşırı basıncın yarattığı şok dalgaları önünde duran engellerin (binalar, ağaçlar, sütunlar) ve o alanda bulunan insanların üzerinde hasara neden olabilir. Bu hasarın boyutu aşırı basıncın büyüklüğü ve aşırı basıncın pozitif faz süresiyle farklı seviyelere çıkabilir. Şok dalgasının en önemli karakteristiği maksimum aşırı basınç kullanılarak, pozitif faz zamanı aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$i_s = \frac{1}{2} P_s t_p \cdot$$

Bina ve yapılara olan etkilerinin hesaplanabilmesi için olasılık fonksiyonu kullanılır.

Olasılık ise; istatistik ihtimalin fonksiyonu olarak aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right],$$

$$Pr = c_1 + c_2 \ln S .$$

Burada ‘S’ değişkeni etkinin türüne göre belirlenmekte, c_1 ve c_2 katsayıları mesafeye göre literatürdeki tablolardan okunmaktadır. Hata fonksiyonu ise kolay bir şekilde literatürden elde edilir.

Tablo 3.6’da farklı hava kategorileri için hesap edilen aşırı basıncın engel ve yapılara olan zarar olasılığı hesaplanmıştır. Tablodan da görüldüğü üzere, farklı hava kategorileri için hesaplanan maksimum mesafeler için yapı ve binaların etki olasılık değerleri farklılık göstermiştir. Aşırı basıncın çok düşük olduğu 0,035 bar için maksimum mesafe olan 356,1 metrede camlar %90 kırılıp, tuğlalar yerinden oynarken, aşırı basıncın en yüksek olduğu noktada 211 metreye kadar olan mesafedeki binalar tamamen yıkılmaktadır. Ancak, bu olasılık hesaplamasında engellerin olmadığı kabul edilmiştir. Söz konusu engel ve yapılara olan zarar etkisinin daha gerçekçi bir yaklaşımla hesaplanabilmesi için çevrede bulunan tüm engellerin dikkate alınarak daha detaylı bir çalışma yapılmalıdır.

Diğer hava kategorileri; kategori 1.5/D, 5/D ve 0.4/B için de hesaplanan olasılık değerleri kategori 1.5/F ile aynı seviyede bulunmuştur. Bunun nedeni engellerin etkisinin dahil edilmemesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 3.6 incelendiğinde en kararlı hava şartı olan 1.5/F’den, en kararsız hava kategorisine doğru olan geçişte bu olasılık değerleri değişmemekte, ancak etki mesafelerinin %35 arttığı görülmektedir. Bu artış yüzdesini kalan diğer hava kategorileri için hesaplırsak 1.5/D için % 7 iken, 5/D için % 4 olduğu görülmüştür.

Tablo 3. 6 Aşırı basıncın yapılar ve insanlar üzerindeki mesafeye göre etkisi

Senaryo	Hava	Aşırı Basıncı Seviyesi [Bar]*	Maksimum Mesafe [m]	Engel ve yapılara olan zarar etkisi	Zarar Kategorisi
Aşırı basınçtan dolayı tank gövdesinde çatlak oluşumu	Kategori 1.5/F	0,035	356,1	Camların %90'ı kırılır.Binalardaki tuğlalar oynar.	Hafif hasar
		0,17	243,8	Duvarlar %30 civarında büyük hasar görür.	Orta hasar
		0,35	224,5	Duvarlar %60 arasından hasar görür.	Şiddetli hasar
		0,83	211,0	Engeller ve binalar tamamen yıkılır.	Çok şiddetli hasar
Aşırı basınçtan dolayı tank gövdesinde çatlak oluşumu	Kategori 1.5/D	0,035	358,1	Camların %90'ı kırılır.Binalardaki tuğlalar oynar.	Hafif hasar
		0,17	253,3	Duvarlar %30 civarında büyük hasar görür.	Orta hasar
		0,35	237,8	Duvarlar %60 arasından hasar görür.	Şiddetli hasar
		0,83	226,9	Engeller ve binalar tamamen yıkılır.	Çok şiddetli hasar
Aşırı basınçtan dolayı tank gövdesinde çatlak oluşumu	Kategori 5/D	0,035	326,8	Camların %90'ı kırılır.Binalardaki tuğlalar oynar.	Hafif hasar
		0,17	233,4	Duvarlar %30 civarında büyük hasar görür.	Orta hasar
		0,35	225,0	Duvarlar %60 arasından hasar görür.	Şiddetli hasar
		0,83	219,1	Engeller ve binalar tamamen yıkılır.	Çok şiddetli hasar
Aşırı basınçtan dolayı tank gövdesinde çatlak oluşumu	Kategori 0.4/B	0,035	404,0	Camların %90'ı kırılır.Binalardaki tuğlalar oynar.	Hafif hasar
		0,17	309,5	Duvarlar %30 civarında büyük hasar görür.	Orta hasar
		0,35	295,3	Duvarlar %60 arasından hasar görür.	Şiddetli hasar
		0,83	285,4	Engeller ve binalar tamamen yıkılır.	Çok şiddetli hasar

Tablo 3.4'te yer alan hasar kategorisi ve şiddet seviyesi incelendiğinde Tablo 3.6'da hesaplanan engel ve yapılara olan zarar etkisi uyumlu bulunmuştur. Örneğin, hava kategorisi 1.5/F olan yanma patlama senaryosu için hesaplanan aşırı basınçların şiddet seviyeleri 356,1 m, 243,8 m, 224,5 m ve 211,0 m'e kadar olan mesafeler sırasıyla hafif hasar, orta hasar, şiddetli hasar ve çok şiddetli hasar olarak belirlenmiştir. Tablo 3.6'da ise hava kategorisinin de 356,1 m, 243,8 m, 224,5 m, 211,0 m'e kadar olan mesafeler de engel ve yapılara olan zarar etkisi sırasıyla hafif hasar için camlar kırılırken, orta hasar için %30 civarında yıkım, şiddetli hasar için yaklaşık %70 civarında yıkım ve çok şiddetli hasar için ise yapıların tamamen yıkıldığı tespit edilmiştir.

3.4. C1-C4 Hidrokarbonlar İçin Tahmini Patlama Sonuçları

LPG bileşiminde bulunan propan ve bütan gazlarıyla beraber benzer hidrokarbonlar olan metan ve etanın da söz konusu patlamalarda muhtemel etkilerini karşılaştırmak, elde ettiğimiz sayısal sonuçları yorumlamamıza fayda sağlar.

Bu kapsamda ilgili hidrokarbonlardan 10'ar tonluk miktarlarıyla farklı rüzgar hızı ve sınıflarında ortaya çıkan aşırı basınç ve mesafe tabloları sırasıyla aşağıdaki gibi incelenmiştir.

3.4.1. Atmosfer kategorileri

Bu çalışmada ele alınan C1-C4 hidrokarbonlarının patlaması sonucu oluşacak olan aşırı basıncın hesaplanması için kullanılan atmosferik hava kategorileri ve özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

F kategorisi; kararlı gece atmosferik koşulları ve ortalama bulut yoğunluğu, ışık ve rüzgarını,

D kategorisi ise; nötr atmosferik koşulları ve az güneşli ama rüzgarlı bir geceyi ifade etmektedir.

Atmosferik sıcaklık ortalama olarak 9,85 °C alınmış olup, bağıl nem oranı 0,7 olarak belirlenmiştir. Solar radyasyon akışı ise 0,5 kW/m²'dir. Hidrokarbonların patlama sonucu oluşturdukları farklı etki boyutlarını ifade edebilmek amacıyla aynı atmosferik kategoriler referans alınarak tüm hesaplamalar buna göre gerçekleştirilmiştir.

3.4.2. Bütan ve propanın kimyasal özellikleri

LPG, bir hidrokarbon olup başlıca bileşenleri; propan, bütan, izobütan, izopropan ve bütanler olan hidrokarbon karışımlarıdır. Bütan (C_4H_{10}) ve propan (C_3H_8) bazlı patlamaların etkisi bu sebepten ötürü lpg depolama tanklarını bulunduğu alanlar göz önüne alınarak öncelikli olarak irdelenmiştir. Daha sonrası diğer karbon bazlı hidrokarbonlarda benzer etkilerin karşılaştırılması açısından sınıflandırılacaktır.

Propanın özellikleri;

- Kimyasal formülü: C_3H_8
- $15^{\circ}C$ 'de atmosfer basıncı altında bir kg propan gazının hacmi: 509 litre
- Havaya göre yoğunluğu: 1,52
- Atmosfer basıncı altında kaynama ısısı: $-42^{\circ}C$
- Kritik sıcaklık: $95^{\circ}C$
- Donma noktası: $-187,7^{\circ}C$
- $15^{\circ}C$ 'ye göre basınç değeri: 7,5 bar

Bütanın özellikleri;

- Kimyasal formül: C_4H_{10}
- $15^{\circ}C$ 'de atmosfer basıncı altında bir kg bütan gazının hacmi: 386 litre
- Havaya göre yoğunluğu: 2,07
- Atmosfer basıncı altında kaynama ısısı: $-0,5^{\circ}C$
- Kritik sıcaklık: $150,8^{\circ}C$
- Donma noktası: $-138^{\circ}C$
- $15^{\circ}C$ 'ye göre basınç değeri: 0,92 bardır.

Yukarıdakilere benzer şekilde, etan ve metan için ilgili fiziksel özellikleri belirlenip, aynı şekilde similasyon çıktısı olarak kullanılmak üzere PHAST 8.11 programına veri girişi sağlanmıştır.

3.4.3. C1-C4 aşırı basınçlardaki patlama alanı çapları ve etkileri

Çalışmanın bu bölümünde C1-C4 hidrokarbonları için farklı 2 yaklaşım kullanılarak; TNT ve TNO Multi-Enerji, aşırı basınç hesapları ve maksimum etki mesafeleri hesaplanmıştır. Ek olarak yapı ve binalara olan hasar olasılıkları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.7 toplamda 10 tonluk bir propanın muntamel patlama sonucu aşırı basınç ve kontur çaplarını göstermektedir. 1.5/F hava kategorisine sahip olan bir ortamda TNT eşdeğerlik metodu kullanılarak yapılan hesaplamalarda propan, bütan ve etan için ortalama olarak 473 metre ve 479 metre mesafeler arasında camların %90'ının kırıldığı ve binalardaki tuğlaların da oynadığı görülmektedir. Bu mesafe değeri metan için 386,9 metredir. Bunun en önemli sebebi C2-C4 hidrokarbonlarında C1 hidrokarbonuna (metan) nazaran daha fazla C-C ve C-H bağı olmasıdır. Patlamanın gerçekleşmesi bilindiği üzere yanıcı maddelerin hava içerisindeki oksijen ile reaksiyona girmesi ile gerçekleşmektedir. Bu reaksiyon sonucu girenlerin bağları koparak daha düşük enerjili ürünler oluşmaktadır ve bu sayede de açığa enerji çıkmaktadır. Bu enerjisinin etkisi de patlamada ani değişen sıcaklık (adyabatik sıcaklık patlama sıcaklığı) basınç seviyeleri olarak hissedilmektedir. Dolayısı ile daha fazla C-C ve C-H bağlarının bir maddede bulunması, bir yanma patlama reaksiyonun da daha fazla enerji açığa çıkması demektir.

Tablo 3.7'de görüldüğü üzere propan ve bütanın (C3-C4 hidrokarbonları) aşırı basınç etki mesafeleri etanın (C2 hidrokarbonu) aşırı basınç etki mesafesinden daha kısadır. Bunun nedeni ise C3-C4 hidrokarbonları sıvılaştırılmış halde tanklarda basınç altında bulunmaktadır. Dolayısı ile ani patlamanın meydana gelmesi esnasında C3-C4 hidrokarbonları eşzamanlı faz değişimi de sergilemektedirler.

Faz değişimi için propan ve bütün enerji absorbe etmek zorundadırlar. C3-C4 hidrokarbonlarının sıvıdan gaz haline geçmesi için gerekli faz değişimini enerji ihtiyacı da açığa çıkan patlama reaksiyonu enerjisinden karşılanmaktadır. Bu nedenle Tablo 3.7'de de görüldüğü üzere söz konusu bu mesafe farkı oluşumları hesaplanmıştır.

Tablo 3. 7 Aşırı basınç bölge sınıfları ve maksimum uzaklık

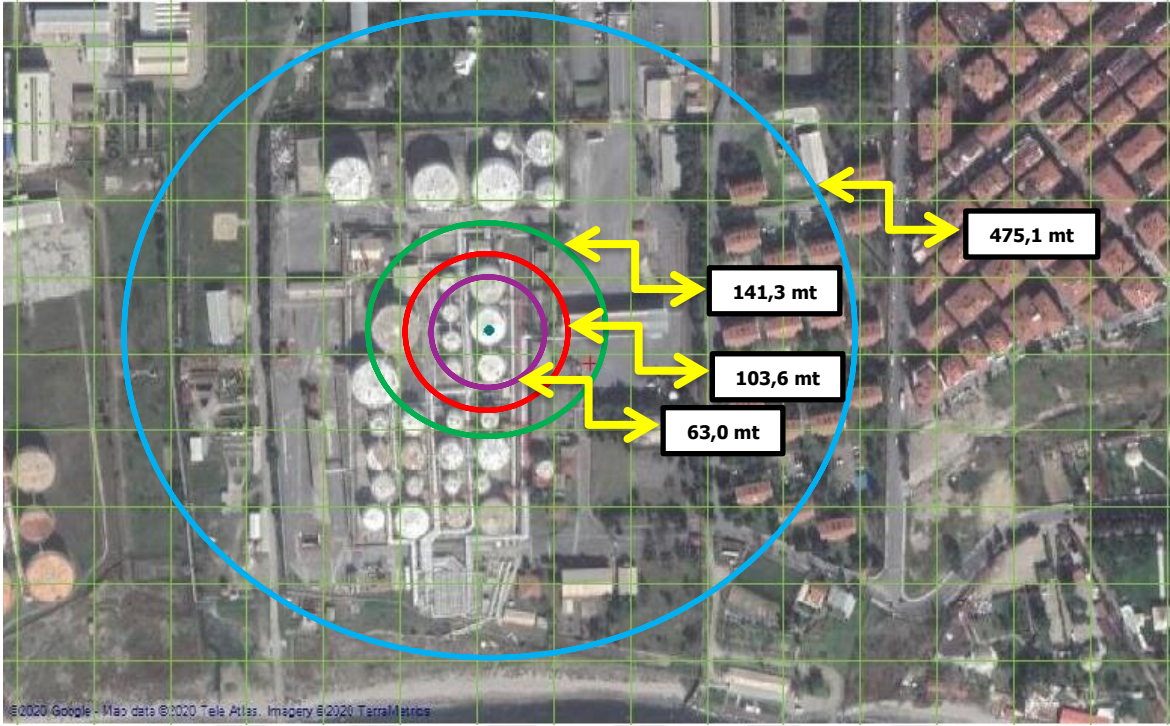
Senaryo	Hava	Aşırı Basınç Seviyesi [Bar]*	Çap [m]	Engel ve Yapılara Olan Zarar Etkisi	Zarar Kategorisi
10 Ton BÜTAN TNT Patlama Senaryosu	Kategori 1.5/F	0,035	473,0	Camların %90'ı kırılır.Binalardaki tuğlalar oynar.	Hafif hasar
		0,21	140,1	Duvarlar %30 civarında büyük hasar görür.	Orta hasar
		0,35	103,1	Duvarlar %60 arasından hasar görür.	Şiddetli hasar
		0,83	62,6	Engeller ve binalar tamamen yıkılır.	Çok şiddetli hasar
10 PROPAN / TNT Patlama Senaryosu	Kategori 1.5/F	0,035	475,1	Camların %90'ı kırılır.Binalardaki tuğlalar oynar.	Hafif hasar
		0,21	141,3	Duvarlar %30 civarında büyük hasar görür.	Orta hasar
		0,35	103,6	Duvarlar %60 arasından hasar görür.	Şiddetli hasar
		0,83	63,0	Engeller ve binalar tamamen yıkılır.	Çok şiddetli hasar
10 Ton ETAN / TNT Patlama Senaryosu	Kategori 1.5/F	0,035	479,1	Camların %90'ı kırılır.Binalardaki tuğlalar oynar.	Hafif hasar
		0,21	142,5	Duvarlar %30 civarında büyük hasar görür.	Orta hasar
		0,35	104,4	Duvarlar %60 arasından hasar görür.	Şiddetli hasar
		0,83	63,4	Engeller ve binalar tamamen yıkılır.	Çok şiddetli hasar

10 Ton METAN / TNT Patlama Senaryosu	Kategori 1.5/F	0,035	386,9	Camların %90'ı kırılır.Binalardaki tuğlalar oynar.	Hafif hasar
		0,21	115,0	Duvarlar %30 civarında büyük hasar görülür.	Orta hasar
		0,35	84,3	Duvarlar %60 arasından hasar görülür.	Şiddetli hasar
		0,83	51,2	Engeller ve binalar tamamen yıkılır.	Çok şiddetli hasar

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te Peterson ölçeğine göre bölge haritalanması yapılmıştır. Farklı yarıçaplara sahip risk konturları, Tablo 3.2'deki renk koduna göre çizilmiş ve etki mesafelerini gösteren çap değerleri ise Tablo 3.7'den alınmıştır. Bu gösterimler sayesinde aşırı basınçların etkilediği çevresel alan çok net olarak gözlemlenebilmektedir. Bu çizimlerden elde edilen sonuçlar, daha evvelde bahsedildiği gibi risklerin engellenmesi ve istenmeyen olayların gerçekleşmesindeki etkilerin azalması için yapılabilecek aksiyon adımlarında yol gösterici olmaktadır. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'teki mor halkaya kadarki alan Bölge A, mor ile kırmızı halka arasındaki alan Bölge B, kırmızı ve yeşil halka arasındaki alan Bölge C ve yeşil ve mavi halka arasındaki alan da Bölge D olarak belirlenmiştir.

Özellikle propan ve metan arasındaki aşırı basınç etki mesafesi farkını daha net gözlemleyebilmek için Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 incelenmelidir.

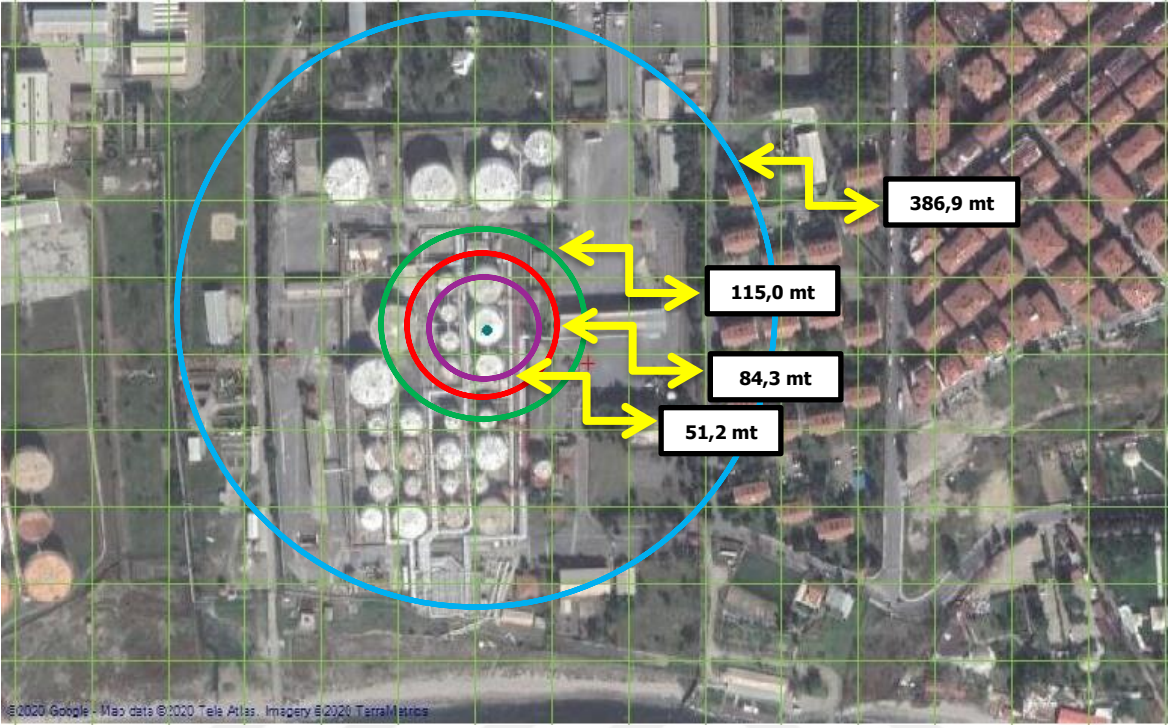
Şekil 3.4'te Propan'ın patlama senaryosu haritalandırılmıştır. Şekil 3.4'teki haritadan da görüleceği üzere, 0,83 barlık aşırı basınç etkisi, 475,1 metreye kadar varmaktadır. Bu etki gerçek anlamda küçümsenecek bir seviye değildir. Çünkü 0,83 barlık aşırı basınç, yapı ve binalara ciddi seviyede zarar verecek bir basınç seviyesidir. Dolayısı ile bu senaryonun sonucu, patlamanın etkisini azaltıcı önlemlerin tasarlanıp uygulanmasının zorunluluğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 3. 4 Propan için aşırı basınç etki mesafesi

Benzer şekilde metanın ele alındığı senaryonun bölgelendirilmiş haritası Şekil 3.5'te görülmektedir. Burada metanın oluşturacağı aşırı basıncın 'çok şiddetli hasar' olarak değerlendirildiği ve mavi renkle gösterilen etki boyut alanının çapı 386,9 m olup, diğer hidrokarbonlara nazaran daha küçüktür. Ancak, yine küçümsenmeyecek bir boyutta zarar mesafesi vardır. Bu mesafelerdeki bir çok yapı ve bina da ciddi şekilde hasar alacaktır.

Buradaki mavi, yeşil, kırmızı ve mor olarak gösterilen halkalar Tablo 3.2'de yer alan hasar kategorilerini ve şiddetli bölgeleri ifade etmektedir. Mor halkanın içinde kalan bölge 'çok şiddetli hasar' bölgesi olarak değerlendirilirken; kırmızı, yeşil ve mavi renkli halkalar ise sırasıyla; şiddetli, orta ve hafif hasar bölgelerini göstermektedir.



Şekil 3. 5 Metan için aşırı basınç etki mesafesi

Tablo 3.8 incelendiğinde kullanılan iki metot arasındaki fark açıkça görülmektedir. TNT eşdeğerlik metodundan elde edilen aşırı basınç seviyeleri TNO Multi-Enerji metodundaki seviyelerden düşüktür. Bunun nedeni ise, TNT eşdeğerlik metodunda kullanılan f_E kat sayısının, sonuçları artırıcı bir etki değerine hiçbir şekilde sahip olmamasıdır.

Sadece patlama hesabını yaptığımız 10 tonluk miktar, 50 ton olarak seçilseydi, sonuçlar birbirine yakın olabilirdi; ancak, bu da mantıklı bir yaklaşım olmayacaktı. Dolayısı ile TNT eşdeğerlik metodunda matematiksel modelden kaynaklı bir sapma mevcuttur.

TNO Multi-Enerji metodundaki sonuçlar, gerçek sonuç verilerine daha yakın olan değerler olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen değerler, TNO Multi-Enerji metodu ile simüle edildiğinde de gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmiştir [18]. Ayrıca TNO Multi-Enerji metodu pozitif basıncın zamanı da hesaplanabilmektedir. Ancak bu zaman hesapları bu tez kapsamında ele alınmamıştır.

Tablo 3. 8 TNT ve TNO Multi-Enerji patlama senaryolarının karşılaştırılması

Senaryo	Hava	Mesafe [m]	TNT Eşdeğerlik Metodu Patlama Senaryosu Aşırı Basınç Seviyesi [Bar]	TNO Multi Enerji Patlama Senaryosu Aşırı Basınç Seviyesi [Bar]
10 Ton PROPAN	Kategori 1.5/F	20	1	1
		40	1	1
		60	0,90	1
		80	0,54	0,98
		100	0,37	0,86
		120	0,27	0,72
		140	0,21	0,60
		160	0,17	0,50
		180	0,14	0,42
		200	0,12	0,35
10 Ton BÜTAN	Kategori 1.5/F	20	1	1
		40	1	1
		60	0,90	1
		80	0,54	0,97
		100	0,37	0,84
		120	0,27	0,70
		140	0,21	0,58
		160	0,17	0,48
		180	0,14	0,40
		200	0,12	0,34
10 Ton ETAN	Kategori 1.5/F	20	1	1
		40	1	1
		60	0,91	1
		80	0,55	0,97
		100	0,37	0,84

		120	0,27	0,70
		140	0,21	0,59
		160	0,17	0,49
		180	0,14	0,41
		200	0,12	0,35
10 Ton METAN	Kategori 1.5/F	20	1	1
		40	1	1
		60	0,62	1
		80	0,38	0,98
		100	0,26	0,86
		120	0,20	0,72
		140	0,15	0,60
		160	0,12	0,50
		180	0,10	0,42
		200	0,08	0,36

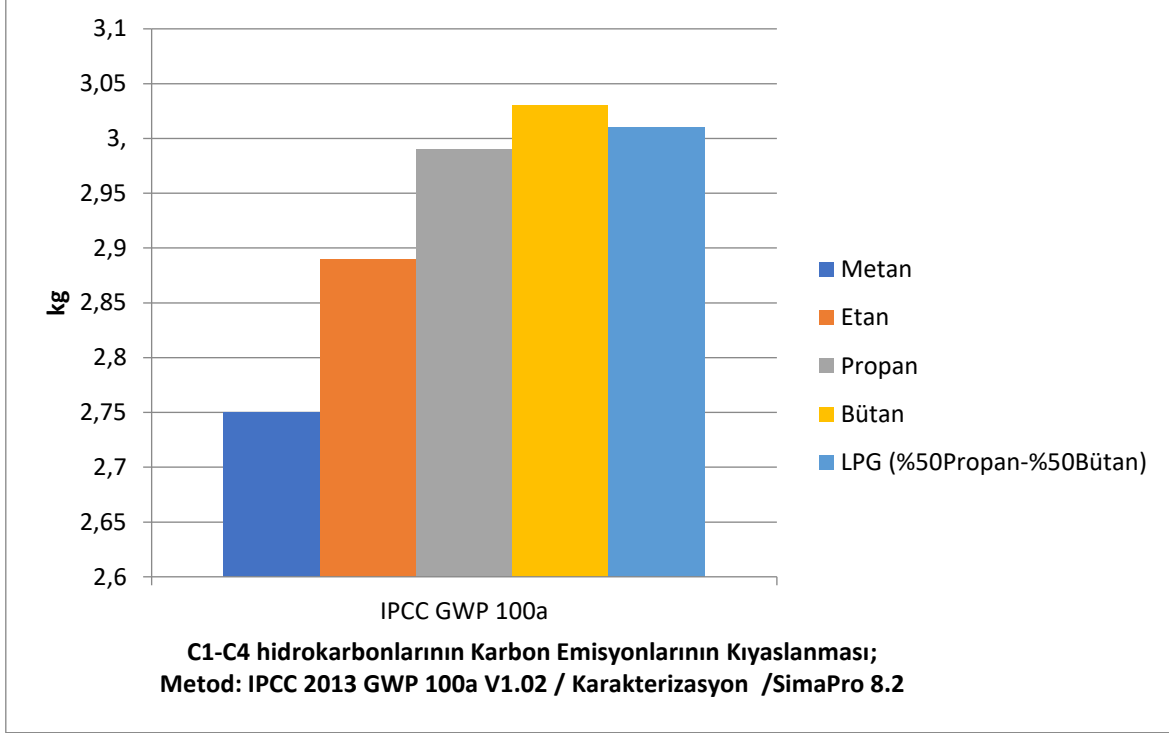
3.5. Karbon Emisyonu Sonuçları

Patlama veya yanma reaksiyonlarının diğer bir istenmeyen durumu ise, açığa çıkan yanma ürünlerinin meydana getirdiği emisyonlar ve bu emisyonların zararlarıdır. Bilindiği üzere hidrokarbonların tam yanma ürünleri CO₂ ve H₂O gazıdır. Ancak, patlama esnasında adyabatik sıcaklığa çok hızlı erişildiğinden, yanma reaksiyonu ürünleri farklılaşmakta ve tam yanma olmayan reaksiyon ürünleri ortaya çıkmaktadır. Tam yanma olmayan reaksiyon ürünleri arasında CO ve NO_x'ler bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında; C1-C4 hidrokarbonları ve LPG için tam yanma durumunda açığa çıkan CO₂ emisyonları, IPCC yöntemi ile SimaPro8.2 programı kullanılarak kg başına yakıt için hesap edilmiştir.

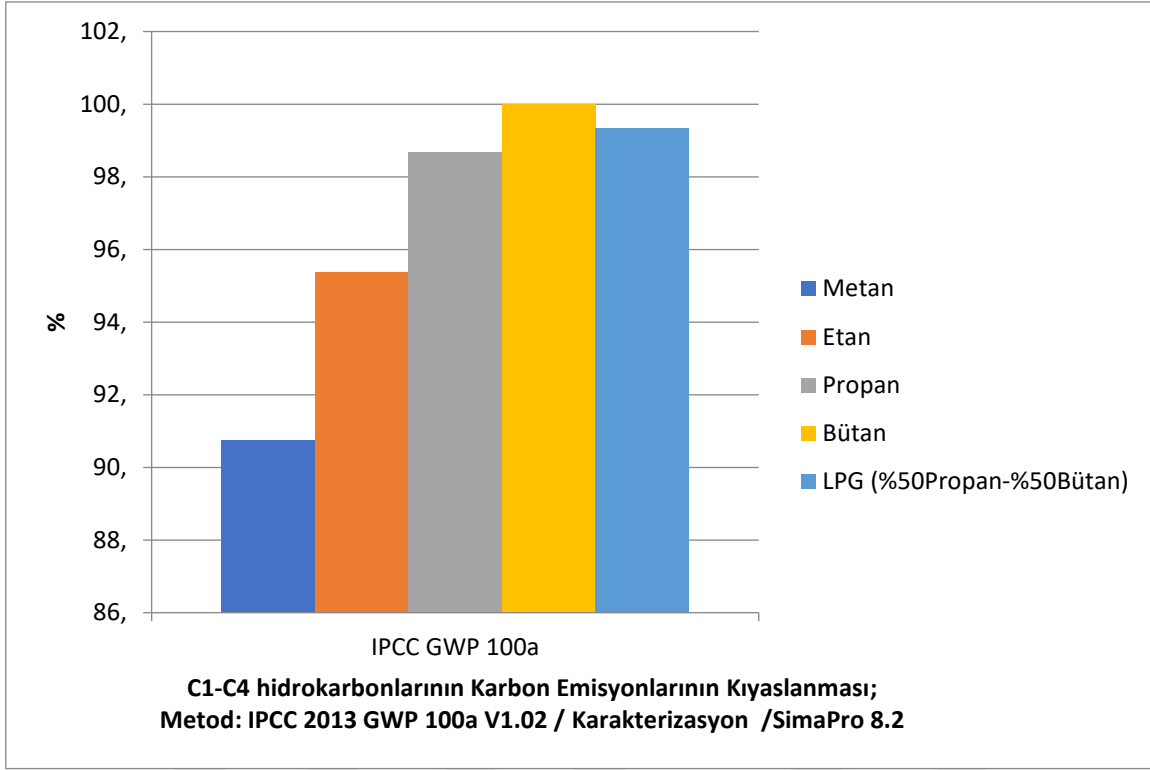
CO₂ emisyon değerleri Şekil 3.6'da kg başına verilmektedir. Buradan da açıkça görüldüğü üzere C miktarı arttıkça CO₂ emisyonları da artmaktadır. Bu beklenen ve bilinmekte olan bir sonuçtur. Dolayısı ile CO₂ salımları, C1-C4 hidrokarbonları kullanıldığı sürece kaçınılmaz

bir durumdur. Yanma ve patlama olaylarında bu emisyon miktarları ani olarak atmosfere yayılmaktadır. Kullanım aşamasında olduğu gibi yavaş ve zamana bağlı uzun bir sürede yayılım olmadığından çevre habitatına daha zararlı boyutlarda etkileri vardır.



Şekil 3. 6 C1-C4 hidrokarbonlarının karbon emisyonlarının kg bazında kıyaslanması

Şekil 3.7’de ise CO₂ emisyonunun % değişimleri yer almaktadır. Metandaki salım oranı bütana göre %10 daha azdır ve C miktarları arttıkça beklendiği gibi salımın yüzdesel oranlarının da arttığı görülmüştür. LPG’deki artışın bütan ve propan arasında olduğu görülmektedir. Buradaki hesaplamalarda LPG birleşimi ağırlıkça %50 propan %50 bütan olarak ele alınmıştır.

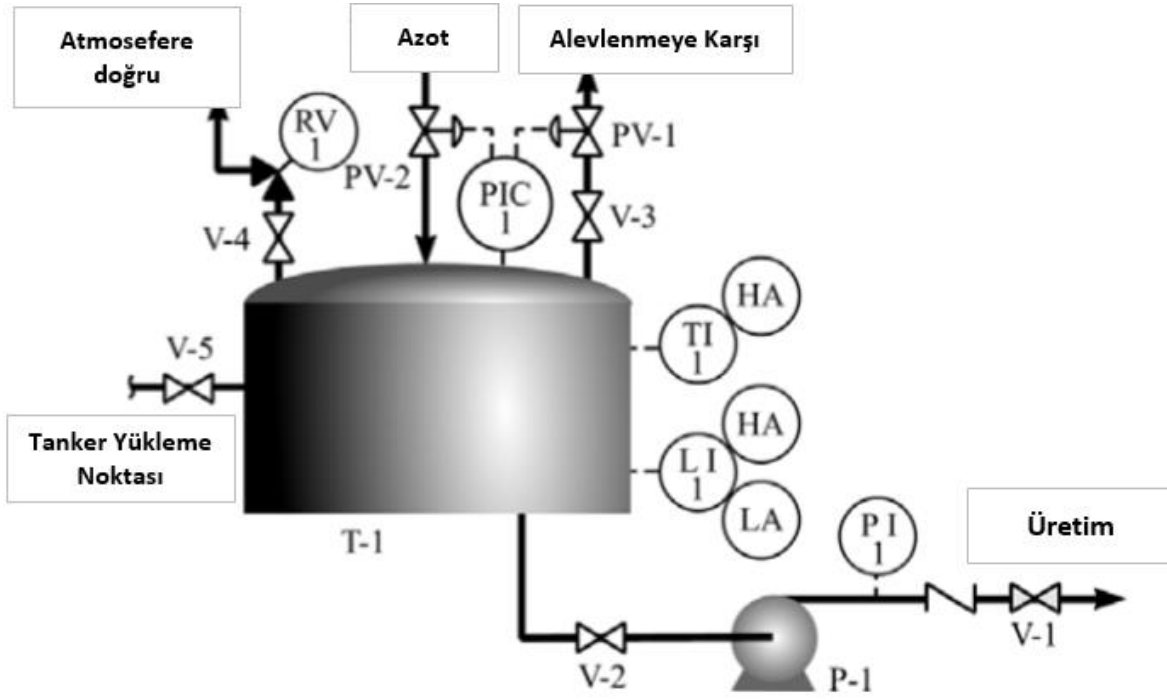


Şekil 3. 7 C1-C4 hidrokarbonlarının karbon emisyonlarının % bazında kıyaslanması

3.6. Hata Ağacı Analizi Risk Değerlendirmesi

Yanıcı LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı) depolama tankının örnek bir görünümü Şekil 3.8’de görülmektedir. Tankın asıl amacı, gaz karışımını belli bir basınç altında tutarak sıvı halde muhafaza etmektir. Tank içindeki basınç, PIC-1 tarafından kontrol edilmekte olup, herhangi bir aşırı basınçta kontrol odasına alarm düşmektedir. Ayrıca muhtemel aşırı basınçta gazı atmosfere aşamalı olarak boşaltan ‘boşaltma valfi’ (RV-1) sistem içinde mevcuttur. Sıvılaştırılmış gaz, tank içerisine tankerler aracılığıyla beslenmektedir. P-1 pompası, ihtiyaç olan durumlarda söz konusu yanıcı sıvıyı üretim hattına iletmektedir.

İşte tüm bu karmaşık süreçlerin risk analizini yapmak ve prosesleri ayrıntılarıyla ifade etmek ciddi bir sistem ve tecrübe gerektirmektedir. Burada kullanılacak olan FTA risk analizinin başlangıç olayı (top event); ‘aşırı basınçla beraber tank gövdesinde oluşan çatlak’ olacaktır.



Şekil 3. 8 Yanıcı LPG depolama tankı ve parçalarının örnek bir görünümü

Sembollerin anlamları aşağıdaki gibidir:

P = Basınç

T= Sıcaklık

L= Seviye

V= Valf

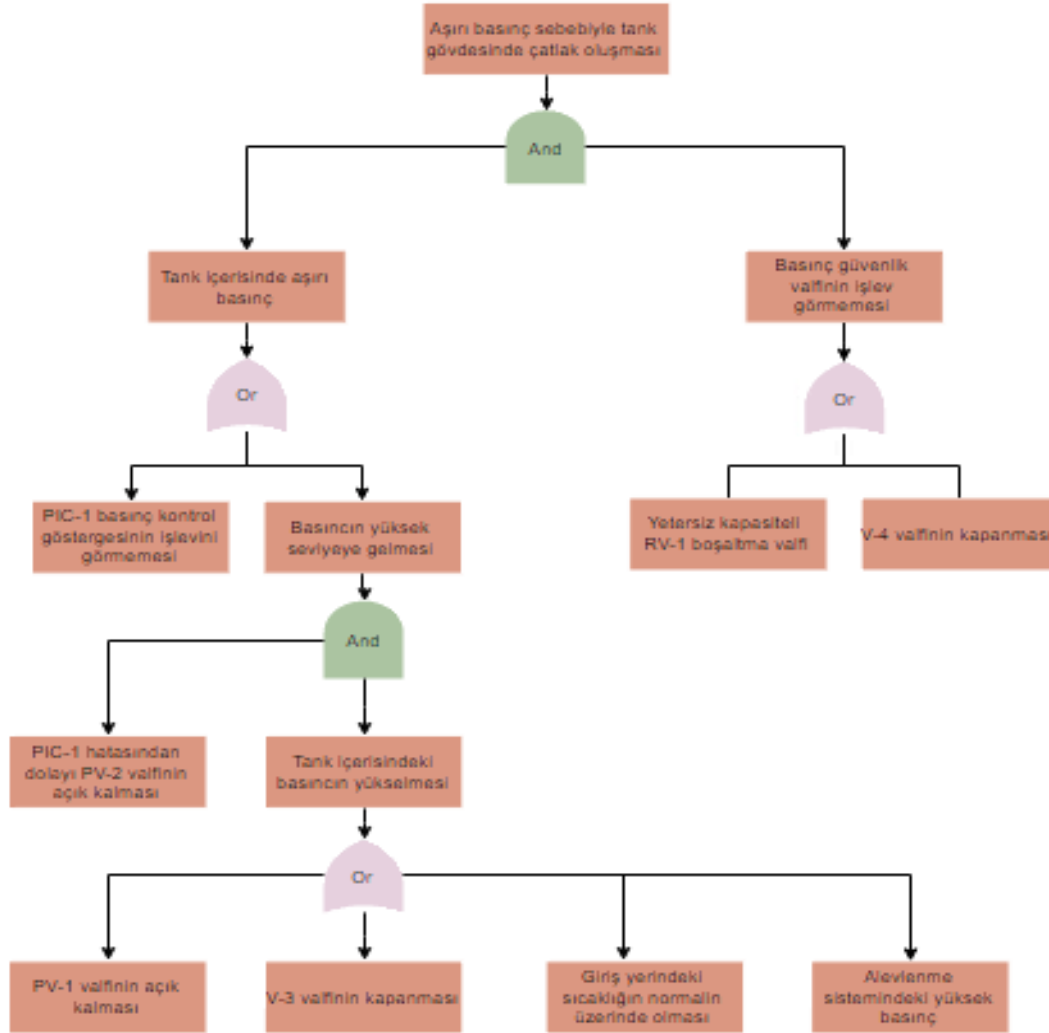
I= Gösterge

C= Kontrol

HA= Yüksek Alarm

LA= Düşük Alarm

Şekil 3.9’da görüldüğü üzere tank girişindeki sıcaklığın normalden fazla olması, alevlenme sistemindeki yüksek basınç ya da bazı valflerin sistem dışı açık ya da kapalı kalması, aşırı basınç sebebiyle bir tankın gövdesinden çatlak oluşmasına neden olan en öncül hatalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada bazı farklı hata unsurlarının hata ağacında bulunmamasının sebebi, mevcut koşullar değerlendirildiğinde söz konusu bu hata unsurlarının göz ardı edilebilecek olmasıdır.



Şekil 3. 9 LPG tankı performans sürecinin Nitel Hata Ağacı Analizi

Ancak, daha detaylı hata ağacı analizleri yapılması sayesinde farklı olası senaryolar oluşturulabilir ve prosesin kök nedenlerine inilerek alınması gereken birincil ve ikincil önlemler belirlenebilir. Beyin fırtınası toplantıları sayesinde de, ek olarak riskin gerçekleşmesindeki olasılığın azaltılmasına yönelik üçüncül önlemler tasarlanabilir.

4. SONUÇLAR

Empirik tabanlı PHAST 8.11 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sonuç modellemesinde, Pemex patlama senaryosu üzerinden elde edilen aşırı basınç değerleri kullanılarak geniş ölçekli gaz buharı patlamaları için yeni bir bölge sınıflandırma metodu geliştirilmiştir.

Farklı risk konturlarında oluşacak patlama hasarı için riskli bölgeler ve emniyet mesafeleri Tablo 4.1’de açıkça görülmektedir (0.4/B kategori - Pemex patlaması).

Söz konusu çalışma, empirik tabanlı modellerde buhar bulutu patlamasının etkinliğinin dispersiyon ve atmosferik kararlılıkla yakından ilişkili olduğunu açıkça göstermektedir. 83 kPa ve 35 kPa aşırı basınç konturlarının etkisi altında kalan yaklaşık 300 metrelik alanda ciddi risk söz konusudur. Uydu görüntüsü üzerinden yapılan mesafe ölçümleriyle, olası patlamanın meydana geldiği tesis ve yaşamsal alanlara olan mesafe 157 metredir.

Tablo 4. 1 Aşırı basınç bölge sınıfları ve maksimum uzaklık

Bölge	Hasar Seviyesi	Pik Aşırı basınç(kPa)	Bölge Rengi	Uzaklık(m)
Bölge A	Çok şiddetli	$P_s > 83$	Mor	285
Bölge B	Şiddetli Hasar	$35 < P_s < 83$	Kırmızı	295
Bölge C	Orta Derece Hasar	$17 < P_s < 35$	Yeşil	310
Bölge D	Hafif Hasar	$3.5 < P_s < 17$	Mavi	404

Ayrıca farklı atmosferik kararlılık derecelerinde hesaplanan aşırı basınç değerlerine göre; atmosferik açıdan kararsız olan dispersiyon modelinde meydana gelecek patlamalarda aşırı basıncın etki mesafesinin daha büyük olacağı varsayılabilir. Bunun en önemli sebebi, atmosferik türbülansın yükseklikler arasındaki sıcaklık farkının meydana getirdiği farklı hava yoğunluklarıdır. Kararsız atmosferik şartlarda buhar bulutu türbülanslı hareket yeteneğine sahip olduğundan, tutuşma meydana geldikten sonra etki mesafesi artmaktadır. Bu durum atmosferik kararlılık ve aşırı basınç - etki mesafesi arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada TNT eşdeğerlik metodundaki fe katsayısı 0,05 olarak alınmıştır. Normalde bu değer 0,01 ve 0,10 arasında bir değer alabilir. Bu katsayı değerini tam ve kesin olarak hesaplamak mümkün olmadığından, söz konusu metodun en zayıf noktası olarak göze çarpmaktadır. Bir başka çalışmada Baker-Strelow-Tang (BST) modelleri; engel, blokaj oranları, alev genişleme hızı ve patlama kuvveti gibi parametreler de dahil edilerek incelenebilir. Bu sayede, kantitatif risk değerlendirmesinin en önemli aşamalarından biri olan risk bölgeleri, etki mesafeleri ve olası hasar tahminleri arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılması sağlanabilir.

Bir patlama sonucunda aşağıdaki çevresel etkiler görülebilecektir:

- CO₂ emisyonu, stokyometrik miktardadır
- Gaz yakıt patlamalarında , gaz yakıtların içinde kükürt bulunmadığından , ortamda kükürtlü bileşikler bulunmayacaktır.

Elde edilen sonuçların yorumlanması ve her farklı iş yeri için uygulamaya alınması son derece önemlidir. Uygulanan Hata Ağacı Analizinin ağaç dalları kapsamı bir yere kadar genişletilmiştir. Uygulama çalışması sonucunda olasılık değeri en yüksek olan dal için iyileştirme çalışmaları yapmak ilk hedef olarak belirlenebilir. Bunun yanında önem ölçüleri kullanılarak ve hangi temel olayın istenmeyen olaya etkisinin daha fazla olduğu bulunarak, ilgili faaliyetlerde geliştirmelere ya da yenilemelere gidilebilir.

Sonuç olarak bir çok işletme ve işveren herhangi bir prosesle ilgili riskleri bulmak, kaza, hadise, anormal olay araştırması yapmak amacıyla, hata ağacı analizini kullanıp, olumsuzlukların köküne inebilir ve hata ağacı analizi sonucunda elde edilen değerlere göre geleceğini planlayabilir. Bu sayede özellikle yanıcı ve patlayıcı maddeleri barındıran tesislerde çok yönlü gözlem yapılmış olacaktır. Ayrıca hata ağacı analizi çalışmalarında çok daha fazla proses dalını kapsayan ya da karmaşık hesaplamalara olanak tanıyan programlar kullanılarak, daha kapsamlı ve detaylı analizler yapılabilir. Bu sayede iyileştirme faaliyetlerinde kullanılacak kaynakların daha etkin şekilde paylaşılması sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] T.C. Resmi Gazete, 12 Ağustos 2013, sayı: 28733
- [2] International Organization for Standardization. (2006)._Greenhouse gases_ Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gases_(ISO Standard No. 14064-1:2006)
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. IPCC Third Assessment Report. The Scientific Basis.
- [4] WBCSD & WRI. 2009. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. Review Draft for Stakeholder Advisory Group. The Greenhouse Gas Protocol Initiative. November 200
- [5] “Lees’ Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control”; Volume 3; pg. 2/13
- [6] Baker Q.A., Tang M.J., Scheier E.A., and Silva G.J., 1996, "Vapor Cloud Explosion Analysis", *Proc. Safety Prog.* **15**:106-109.
- [7] Marc J. Assael, Konstantinos E. Kakosimos; “Fires, Explosions and Toxic Gas Dispersions”; Taylor&Francis Group; Newyork; 2010
- [8] Sam Mannan, PE, CSP; “ Lee’s Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control”; Volume 1, Texas, page 17.32; 2005
- [9] T. Petr, L. Kotek, J. Petr; Modelling of Consequences of Biogas Leakage from Gasholder; Journal of Central European Agriculture; 2017 ; 18(1), page. 15-28,
- [10] Blast Effects Physical Properties of Shock Waves; Springer, USA; 2018, page-17
- [11] BRASIE, W.C. and SIMPSON, D.W.(1968). Guidelines for estimating damage explosion. Loss Prevention, 2, 91.
- [12] Berg van den A.C, and Lannoy A., 1993, "Methods for Vapor Cloud Explosion Blast Modelling", J. Hazard. Mater. 34:151-171.
- [13] Berg van den A.C., 1985, "The Multi-Energy Method. A Framework for Vapour Cloud Explosion Blast Prediction", J. Hazard. Mater. 12:1-10.

- [14] CCPS, 1994; “Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases”; Newyork, page 81.
- [15] Marc J. Assael, Konstantinos E. Kakosimos; “Fires, Explosions and Toxic Gas Dispersions”; Taylor&Francis Group; Newyork; 2010, page 222.
- [16] Ringdahl, L.H., 2003, “Assessing Safety Functions-Results From A Case Study At An Industrial Workplace”, Safety Science, S. 41, S. 701720.
- [17] Brooke P. J., Paige R. F., 2003, “Fault Trees For Security System Design And Analysis”, Computers & Security, C. 22, S. 3, S. 256-264.
- [18] Marc J. Assael, Konstantinos E. Kakosimos; “Fires, Explosions and Toxic Gas Dispersions”; Taylor&Francis Group; Newyork; 2010, page 170.