



**T.C.**  
**ÜSKÜDAR ÜNİVERSİTESİ**  
**SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SAFETİ YAZILIMI İLE SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ (LNG) İÇEREN**  
**DEPOLAMA TANKLARININ PATLAMA SONUÇ ANALİZİ VE**  
**TOKSİK SALIM DAĞILIMININ MODELLENMESİ**

**Fatih Gökçe VAROL**

**Tez Danışmanı**  
**Dr. Öğr. Üyesi Müge Ensari ÖZAY**

**İSTANBUL-2020**

**T.C.**  
**ÜSKÜDAR ÜNİVERSİTESİ**  
**SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SAFETİ YAZILIMI İLE SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ (LNG) İÇEREN**  
**DEPOLAMA TANKLARININ PATLAMA SONUÇ ANALİZİ VE**  
**TOKSİK SALIM DAĞILIMININ MODELLENMESİ**

**Fatih Gökçe VAROL**

**Tez Danışmanı**

**Dr. Öğr. Üyesi Müge Ensari ÖZAY**

**İSTANBUL – 2020**

**Tez Onayı**



## ÖZET

### SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ (LNG) İÇEREN DEPOLAMA TANKLARININ PATLAMA SONUÇ ANALİZİ VE TOKSİK SALIM DAĞILIMININ MODELLENMESİ

Dünyada günümüze dek meydana gelen LNG ile ilgili kazaların araştırılarak, insan popülasyonu ve çevre üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve tekrar yaşanmaması için iş sağlığı ve güvenliğinin ele alması gereken konulardan birisidir. Buna göre, oluşabilecek patlama senaryoları ve termal radyasyon etkileri analiz edilerek, bu tür kazaların oluşma olasılıkları durumlarından yola çıkılarak çalışma gerçekleştirilmiştir.

LNG içeren depolama tankların muhafaza edildiği tesislerde, olası patlamaların dağılım, katastrofik yırtılma ve toksik yayılım modellerinin sonuç analizinden, tesis ve çevresinde bulunan insan popülasyonunun ve yapıların nasıl ve ne kadar etkilendikleri çıkarılmaktadır. Bu çalışmanın amacı Safeti programı kullanılarak dağılım, katastrofik yırtılma ve toksik yayılım modellenerek, modeller sonucunda ortaya çıkacak olan radyasyon etkisinin ölümle sonuçlanacak etki boyutunda olduğu analiz edilmiştir.

Safeti program kullanılarak oluşturulan katastrofik patlama modellemesinde, 85.000 m<sup>3</sup>'lük LNG içeren depolama tankının, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava (5/D) olmak üzere modellenmesi yapılmıştır. Her üç hava koşulunda da katastrofik patlama neticesinde; ortaya çıkacak geç havuz yangını nedeniyle oluşan radyasyon seviyesi ~890 m içerisinde 220 kW/m<sup>2</sup> olduğu bulunmuştur. GIS verileri doğrultusunda, tesis çevresinde belirlenen popülasyonda ortaya potansiyel hayat kaybının ortalama 579 kişi/yıl olduğu hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın, modelleme sonucunda çevre üzerindeki etkilerin incelenebileceğini göstermesinin yanında; lokasyon seçimi, müdahale mesafeleri, etki dinamiklerinin izlenebilmesi açısından bilgilendirici ve farkındalığı artırıcı nitelikte olduğu ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler: LNG, Katastrofik Yırtılma, Patlama, Toksik Yayılım, Potansiyel Hayat Kaybı, Havuz Yangını, Radyasyon, Safeti,**

## **ABSTRACT**

### **A CONSEQUENCE ANALYSIS OF THE EXPLOSION OF STORAGE TANKS CONTAINING LIQUEFIED NATURAL GAS (LNG) AND TOXIC RELEASE DISPERSION MODELLING WITH SAFETI SOFTWARE**

It is one of the issues that occupational health and safety should address in order to investigate the effects of LNG related accidents occurring in the world to date and to examine the effects on the human population and the environment. Accordingly, the study was carried out by analyzing the explosion scenarios and thermal radiation effects that may occur and the probability of occurrence of such accidents.

In the facilities where storage tanks containing LNG are preserved, the result analysis of the modeling of possible explosions, dispersion, catastrophic rupture and toxicity is extracted from how the human population and its structures are affected. The purpose of this study is to model distribution, catastrophic tear and toxic spread using Safeti software. The radiation effect that will emerge as a result of these models is analyzed to be the effect size that will result in death.

In the catastrophic explosion modeling created by using Safeti software, the storage tank containing 85,000 m<sup>3</sup> of LNG, modeled by using wind parameters such as; 1,5 km / h wind speed, stable air (1,5 / F), 1,5 km / h wind speed, normal air (1,5 / D) and 5 km / h wind speed, normal air (5 / D). As a result of a catastrophic explosion in all three weather conditions; The radiation level caused by the late pool fire to be revealed was found to be 220 kW / m<sup>2</sup> within ~ 890 m. In line with Geographical Information Systems data, the potential life loss in the population determined around the facility was calculated to be 579 people/year on average.

As a result of modeling this study, besides showing that the effects on the environment can be examined; It has been demonstrated that it is informative and awareness-raising in terms of location selection, intervention distances, and monitoring of impact dynamics.

**Keywords: LNG, Catastrophic Rupture, Explosion, Toxic Dispersion, Potential Loss of Life, Pool Fire, Radiation, Safeti**

## TEŐEKKÜR

Tez alıőmamın yrtlmesinde bilgi birikimi, tecrbesi ve nerileri ile beni ynlendiren tez danıőmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Müge Ensari zay'a çok teőekkür ederim.

Yardımlarından dolayı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gr. Rüőtü UÇAN'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nuri Bingöl'e teőekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam boyunca yanımda olan ve desteğini esirgemeyen sevgili eőim Dr. Öğr. Üyesi Pınar Hamurcu VAROL'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Fatih Gökçe Varol

## BEYAN

Bu çalışmanın kendi tez çalışmam olduğunu, planlanmasından yazımına kadar hiçbir aşamada etik dışı davranışımın olmadığını, tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim.



Tarih

Fatih Gökçe VAROL

İmza

# İÇİNDEKİLER

## TABLolar DİZİNİ

## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GENEL BİLGİLER</b> .....	<b>3</b>
2.1. Doğal Gaz.....	3
2.2. Sıvılaştırılmış Doğalgaz.....	4
2.2.1. LNG'nin Kimyasal Özellikleri.....	6
2.2.1.1. Yanıcılık.....	6
2.2.1.2. LNG Kaynaklı Ateş Topu (Fireball).....	7
2.2.2. LNG'nin Sıvılaştırılması.....	7
2.2.2.1. Saflaştırma.....	8
2.2.2.2. Sıvılaştırma.....	9
2.2.2.2.1. Klasik Kaskad Soğutma Sistemi Döngüsü.....	11
2.2.2.2.2. Karışık Soğutucu Akışkan Döngüsü.....	13
2.2.2.2.3. Tek Karışık Soğutucu Akışkan Döngüsü.....	14
2.2.2.2.4. Çift karışık soğutucu akışkan döngüsü.....	15
2.2.3. LNG'nin Tekrar Gazlaştırılması.....	16
2.2.4. LNG'nin Taşınması.....	19
2.2.4.1. Boru Hatlarıyla LNG Taşımacılığı.....	19
2.2.4.2. Kara Taşıtlarıyla LNG Taşımacılığı.....	20
2.2.4.3. Deniz Yoluyla LNG Taşımacılığı.....	20
2.2.5. LNG'nin Depolanması.....	21
2.2.5.1. Tek Cidarlı Tanklar.....	21
2.2.5.2. Çift Cidarlı Tanklar.....	22
2.2.5.4. Tam Cidarlı Tank.....	24



2.2.6. LNG Güvenliği.....	25
2.2.6.1. LNG Sızması Dökülmesi.....	25
2.2.6.1.1. LNG'nin Suya Sızması (Dökülmesi).....	26
2.2.6.1.2. LNG'nin Toprağa Sızması.....	26
2.2.6.3. Ateşleme ve Yangınlar.....	27
2.2.6.3.1. Buhar Bulutu.....	27
2.2.6.3.2. Buhar Bulutu Patlamaları.....	29
2.2.6.3.2.1 Erken Patlama.....	30
2.2.6.3.2.2 Geç Patlama.....	30
2.2.6.3.2.3. Flaş Yangını.....	30
2.2.6.3.2.4. Jet Yangını.....	30
2.2.6.3.2.5. Havuz Yangını.....	31
2.3. LNG Buharı Üretimi, Dağılımı ve Deneysel Çalışmaları.....	31
2.4 Safeti Yazılım.....	32
2.4.1. Kantitatif Risk Değerlendirmesi.....	32
2.4.2. Risk Analizi.....	33
2.4.3. Frekans Analizi.....	33
2.4.4. Sonuç Modelleme Analizi.....	33
2.4.4.1. Deşarj hesaplamaları.....	34
2.4.4.2. Dağılım Hesaplamaları.....	34
2.4.4.3. Yangın Hesaplamaları.....	35
2.4.4.4. Patlama Hesaplamaları.....	35
2.4.4.5. Termal – Radyasyon Hesaplamaları.....	35
2.4.5. Envanter Girdileri.....	36
2.4.6. Sonuç Modellemesi.....	36
<b>3.GEREÇ VE YÖNTEMLER.....</b>	<b>38</b>
3.1. Araştırmanın Tipi ve Modeli.....	38
3.2. Araştırmanın Yeri, Zamanı ve Evreni.....	41

<b>4.BULGULAR.....</b>	<b>42</b>
4.1 Dağılım Senaryosu.....	43
4.2. Patlama Senaryosu .....	46
4.2.1. Flash Ateşi Kuşatması .....	47
4.2.2 Aşırı Basınç Patlaması – Mesafe İlişkisi .....	49
4.2.3 En Kötü Senaryo Patlaması .....	50
4.2.4 Havuz Yangını Buharlaştırması .....	52
4.2.4.1 Buharlaştırma Hızı ve Zaman İlişkisi.....	52
4.2.4.2 Havuz Yarıçapı ve Zaman İlişkisi .....	53
4.2.5 Erken Oluşan Havuz Yangınları.....	54
4.2.5.1 Radyasyon- Mesafe ilişkisi.....	55
4.2.5.2 Erken Oluşan Havuz Yangınlarında Mortalite Riski.....	56
4.2.6 Geç Oluşan Havuz Yangınları.....	57
4.2.6.1 Radyasyon Mesafe İlişkisi .....	59
4.2.6.2 Geç Havuz Yangınlarında Mortalite Riski .....	60
4.2.6.3 Geç Havuz Yangınları Olasılık Yarı Çapı .....	61
4.2.7 Potansiyel Hayat Kaybı .....	63
<b>5. TARTIŞMA.....</b>	<b>64</b>
5.1. Modellemeler ve Senaryolar .....	64
5.2. Aşırı Patlama Basıncı ve Buhar Bulutu Patlaması.....	65
5.3. Havuz Yangını ve Termal Radyasyon .....	65
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>67</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>70</b>
<b>13.EKLER .....</b>	<b>73</b>

## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo 1:Doğal gaz kimyasal içeriği (Deli, 2013).....</b>	<b>3</b>
<b>Tablo 2: Termal Radyasyon seviyeleri için öngörülen zarar seviyeleri.....</b>	<b>36</b>
<b>Tablo 3:Pasquill – Gifford Stabilite Verileri- 1 (Ivanka Zheleva, 2014) .....</b>	<b>39</b>
<b>Tablo 4: Pasquill – Gifford Stabilite Sınıflaması meteorolojik koşulları .....</b>	<b>39</b>
<b>Tablo 5: Bir LNG depolama tankında olası dağılım senaryosunda, rüzgâr yönünde metan konsantrasyonları.....</b>	<b>45</b>
<b>Tablo 6: Bir LNG depolama tankında olası dağılım senaryosunda, metan konsantrasyonu LFL fraksiyon- maksimum mesafe.....</b>	<b>45</b>
<b>Tablo 7: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, üç farklı hava koşulunda basınç, mesafe ve çap etkileri .....</b>	<b>46</b>
<b>Tablo 8: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, flaş ateşi analiz sonuçları.....</b>	<b>48</b>
<b>Tablo 9: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, maksimum flaş ateşi – zaman ilişkisi .....</b>	<b>48</b>
<b>Tablo 10: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, en kötü senaryo değerleri .....</b>	<b>51</b>
<b>Tablo 11: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç havuz yangınlarının üç farklı hava koşulunda, rüzgâr yönünde tanımlanan radyasyon seviyeleri.....</b>	<b>58</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1: Metanın yanma mesafesi ( <i>Karabay,2014</i> ).....	7
Şekil 2: Doğal gazın sıvılaştırma işlemi öncesi saflaştırma proses akış şeması ( <i>Deli, 2013</i> ).....	8
Şekil 3:Doğal gazdan LNG eldesinin blok akış diyagramı ( <i>Bahadori 2014</i> ).....	9
Şekil 4:LNG sıvılaştırma Sistemi ( <i>Bayraktar 2016</i> ).....	10
Şekil 5: Klasik kaskad sıvılaştırma sistemi.....	11
Şekil 6:Karışık soğutucu akışkan döngüsü ( <i>Khan, 2016</i> ).....	14
Şekil 7:Tek karışık soğutucu akışkan çevrimi ( <i>Moon ve ark., 2014</i> ).....	15
Şekil 8:Çift karışık soğutucu akışkan çevrimi ( <i>Moon ve ark., 2014</i> ).....	16
Şekil 9:LNG terminali genel Gazlaştırma prosesi ( <i>Deli, 2013</i> ).....	17
Şekil 10:ORV (Open Rack Vaporizer) tipi gazlaştırıcılar ( <i>Deli, 2013</i> ).....	18
Şekil 11:SMV (Submerged Comb Vaporizer) tipi gazlaştırıcılar ( <i>Deli, 2013</i> ).....	18
Şekil 12:Tek cidarlı (tekli muhafaza- Single containment) LNG depolama tankı ( <i>Humphrey, 2009</i> ).....	22
Şekil 13:Çift cidarlı (Double Containment) LNG depolama tankı ( <i>Humphrey, 2009</i> ).....	22
Şekil 14:Çelik kubbeli (Steel roof) LNG tankı ( <i>Humphrey, 2009</i> ).....	23
Şekil 15:Çelik kubbeli (Steel roof) LNG tankı ( <i>Humphrey, 2009</i> ).....	23
Şekil 16:Tam Muhafaza – LNG Tankı ( <i>Yang ve ark., 2006</i> ).....	24
Şekil 17:LNG'nin yanma düzeyleri ( <i>Bayraktar, 2016</i> ).....	28
Şekil 18:2 yönlü LNG Boşalması ( <i>Arnet,2014</i> ).....	33
Şekil 19:Çalışmanın Evreni.....	41
Şekil 20:Bir LNG depolama tankında olası dağılım senaryosunda, konsantrasyon- zaman- mesafe ilişkisi grafiği.....	43
Şekil 21:Bir LNG depolama tankında olası dağılım senaryosunda, maksimum konsantrasyon – mesafe ilişkisi grafiği.....	44
Şekil 22:Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, flaş ateşi kuşatması grafiği.....	47

<b>Şekil 23: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, aşırı basınç patlaması ve mesafe ilişkisi.....</b>	<b>49</b>
<b>Şekil 24: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, en kötü senaryo patlama yarıçapı .....</b>	<b>50</b>
<b>Şekil 25: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, havuz buharlaşma hızı ve zaman ilişkisi.....</b>	<b>52</b>
<b>Şekil 26: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, havuz buharlaşma hızı ve zaman ilişkisi.....</b>	<b>53</b>
<b>Şekil 27: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, erken oluşan havuz yangının radyasyon yoğunluk yarıçapı.....</b>	<b>54</b>
<b>Şekil 28: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, erken havuz yangınlarının oluşturduğu radyasyon ve mesafe ilişkisi .....</b>	<b>55</b>
<b>Şekil 29: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, erken havuz yangınlarının mortalite elipsi.....</b>	<b>56</b>
<b>Şekil 30: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının radyasyon yoğunluğu yarıçapı .....</b>	<b>57</b>
<b>Şekil 31: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının radyasyon mesafe ilişkisi.....</b>	<b>59</b>
<b>Şekil 32: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının mortalite elipsi.....</b>	<b>60</b>
<b>Şekil 33: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının mortalite yarıçapı .....</b>	<b>61</b>
<b>Şekil 34: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangınlarının olasılık yarıçapı.....</b>	<b>62</b>
<b>Şekil 35: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangınların radyasyon doz yarıçapı.....</b>	<b>62</b>
<b>Şekil 36: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, potansiyel hayat kaybı (PLL).....</b>	<b>63</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>AB</b>	: Avrupa Birliği
<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>BLEVE</b>	: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions – Kaynayan Sıvı Genleşen Buhar Patlaması
<b>BM</b>	: Birleşmiş Milletler
<b>C3-MR</b>	: Propan Mixed Refrigerant- Propan Tek Karma Soğutucu Akışkanı
<b>CO</b>	: Carbon Monoxide – Karbon Monoksit
<b>ÇSGB</b>	: Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı
<b>DMR</b>	: Double Mixed Refrigerant–Çift Katman Karma Soğutucu Akışkan
<b>GIIGNL</b>	: Group of International LNG Importers -Uluslararası LNG İthalatçıları
<b>GIS</b>	: Geographical Information Systems – Coğrafi Bilgi Sistemi
<b>KKD</b>	: Kişisel Koruyucu Donanım
<b>LFL</b>	: Lower Flammability Limit- Alt Yanıcılık Limiti
<b>LNG</b>	: Liquefied Natural Gaz- Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
<b>LOC</b>	: Loss of Containment – Bütünlük Kaybı
<b>LPG</b>	: Liquefied Petroluem Gas – Sıvı Petrol Gazı
<b>LPG</b>	: Liquefied Petroleum Gas - Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
<b>MR</b>	: Mixed Refrigerant – Karışık Soğutucu Akışkanı
<b>PHAST</b>	: Process Hazard Analysis Software Tool- Proses Tehlike Analizi Yazılım Aracı
<b>Q</b>	: Thermal Radiation, W/m <sup>2</sup> - Termal Etki
<b>QRA</b>	: Quantitative Risk Assessment – Kantitatif Risk Değerlendirmesi
<b>SMR</b>	: Single Mixed Refrigerant – Tek Karışık Soğutucu Akışkanı

- UFL** : Upper Flammability Limit – Üst Yanıcılık Limiti
- VCE** : Vapor Cloud Explosion – Buhar Bulutu Patlaması
- IGU** : International Gas Union (Uluslararası Gaz Birliği)



# 1. GİRİŞ

Doğal gaz, metan, etan, propan, bütan, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, helyum gibi gazların farklı oranlarda bileşiminden oluşan bir çeşit yanıcı gaz karışımı olarak tanımlanmaktadır (Akdoğan, 2008).

Doğal gaz, enerji açısından en verimli fosil yakıttır, petrol veya kömür yerine kullanıldığında önemli enerji tasarrufu avantajları sunar. Her ne kadar doğal gazın birincil kullanımı yakıt olsa da aynı zamanda petrokimyasal hammaddeler için bir hidrokarbon kaynağı ve önemli bir endüstriyel kimyasal olan ana element kükürt kaynağıdır (Mokhatab,2019).

Doğal gaz, atmosferik basınç altında, -159<sup>0</sup>C ile -162<sup>0</sup>C arasında soğutma işlemi uygulanması ile sıvılaştırılmış doğal gaz elde edilir (Foss, 2012 ve Bahadori, 2014).

Dünyada LNG ticareti 316,5 milyon tona (MT) ulaşmıştır. Bunun yanında IGU (Uluslararası Gaz Birliği) Şubat 2019 verilerine göre global nominal sıvılaştırma kapasitesi 393 mtpa (milyon ton / yıl), küresel ticaret 316.5 mt, sıvılaştırma kapasitesi 843 mtpa'ya ulaşmıştır (IGU,2019).

LNG tesisindeki ana tehlikeler; yangın ve patlama, kriyojenik donma yanıkları, metal ve plastiklerin korozif ortam nedeniyle hasara uğraması ve kapalı alan tehlikeleridir (Mokhatab,2019).

Dünya tarihinde LNG ile ilgili gerçekleşmiş ve sonucunda yaralanma ve ölümle sonuçlanmış 28 büyük kaza mevcuttur. Bu kazalardan en sonuncusu 31 Mart 2014 yılında, Washington'da beş çalışanın yaralanmasıyla sonuçlanan LNG deposu patlamasıdır (Riley,2004).

1970'lerin başlarında LNG buharı üretimi laboratuvarlarda araştırılmaya başlamıştır. Bu araştırmalar (Ikealumba ve ark., 2014, s:3564), kıyaslama için deneysel verilerin toplanması ve bilgisayar modellerinin geçerliliği için temel amaçlarla gerçekleştirilmiştir.



Dünyada, bilgisayar modellemeleri için kullanılan çeşitli yazılımlar mevcuttur. Bunların arasında Phast, Safeti, Aloha ve matlab en popülerlerindedir.

SAFETI yazılımı dünyanın en çok kullanılan risk modelleme araçlarından biridir. İlk sızıntı noktasından, tehlikeli maddenin yayılmasına, patlama ve toksisite etkilerinin analizine kadar potansiyel kazaların gelişimini değerlendirmek için tasarlanmıştır (Pasculescu, 2019).

Bu çalışmanın amacı; ülkemizde LNG tesislerindeki depolama tanklarında ortaya çıkabilecek olası patlamaların, SAFETI programı kullanılarak, iki farklı modelleme ile (dağılım risk modellemesi ve katastrofik patlama risk modellemesi) risk analizlerini yapmak, analiz sonuçlarından yola çıkarak çevre popülasyonun ve yapıların bu patlamadan nasıl ve ne kadar etkilendiklerini incelemektir. Sekonder olarak, modellemelerden çıkan sonuçların incelenmesiyle, olası patlama senaryolarını önleme ve müdahale faaliyetlerinin değerlendirilmesinin yanında, tesislerin konumlandırılması ve patlama sonucunda etkilenecek popülasyon ve çevre konusunda bilgi sağlamaktır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Doğal Gaz

Doğal gaz, hidrojenle doymuş karbon molekülü ve bunun katları olarak tanımlanabildiği gibi yer kabuğunun içindeki fosil kaynaklı, üretildiği bölgeden bölgeye metan, etan, propan, bütan, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, helyum gibi gazların farklı oranlarda bileşiminden oluşan bir çeşit yanıcı gaz karışımı olarak tanımlanmaktadır (Akdoğan, 2008).

Doğal gazın büyük bölümünü (en az %85'i) metan gazı (CH<sub>4</sub>) adı verilen hidrokarbon bileşiği oluşturur. Diğer bileşenleri etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) en fazla %7 oranında, propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) en fazla %3 oranında, bütan (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) en fazla %2 oranında bulunur. Bileşiminde eser miktarda karbondioksit (CO<sub>2</sub>), azot (N<sub>2</sub>), helyum (He) ve hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S) de bulunur (Karabay, 2014). Doğal gazın kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (Deli, 2013).

Tablo 1: Doğal gaz kimyasal içeriği (Deli, 2013)

Kimyasal İçeriği	Metan (CH <sub>4</sub> ), C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ve bazı diğer hidrokarbonlar
Molekül Ağırlığı (kg/kmol)	16.04
Kaynama Noktası (°C)	-162
Likit Yoğunluğu (kg/lt)	0.46
Gaz Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	0.76
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı (°C)	580
Maksimum Alev Sıcaklığı (°C)	1.954
Parlama Limitleri (Hava ile karışım oranı)	%5- %15
Üst Isıl Değer (kcal/kg)	12.930
Üst Isıl Değer (kcal/Sm <sup>3</sup> )	9.825
Sıvı/Gaz Genleşme Oranı	600
Buharlaştırma Basıncı (15°C' de bar)	230

Doğal gaz, dünya yüzeyinin altındaki rezervlerde bulunur. Ham petrol ve doğal gaz, "hidrokarbonlar" olarak bilinen bir tür fosil yakıtı oluşturur ve bu yakıtlardaki moleküller, hidrojen ve karbon atomlarının kombinasyonlarıdır. Yer altı doğal gazı fosil bir yakıttır, yani milyonlarca yıl önce toprağa biriken ve gömülen organik maddelerden elde edilir. Doğal olarak kendiliğinden (bağlı olmayan gaz) meydana geldiği gibi, ham yağlarla bir arada bulunarak da yüzeye çıkabilir. Doğal gaz ayrıca laboratuvar ortamında da üretilmektedir (Foss, 2012). Bu şekilde elde edilen doğal gaz, sıvılaştırılmış olarak,

boru hatları veya gemilerle okyanus üzerinden uzun mesafelere taşınabilir ve bu lokasyonlarda yer altı mağaralarında veya atmosferik tanklarda, yine sıvılaştırılmış halde, ihtiyaç duyulana kadar depolanmaktadır. Doğal gaz talebi ortaya çıktığında, depolanan sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), sıvılaştırılmış durumundan tekrar gaz haline dönüştürülerek, hedef lokasyonlara arz edilmektedir (Petasis, 2016, s:72).

Doğal gaz, Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) 19. yüzyılın ortalarından beri enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bundan yaklaşık 50 yıl öncesine kadar değersiz bir sanayi ürünü olarak varsayılmaktaydı ve dünyada geniş kullanım alanı bulunmamaktaydı (Turan ve Dinç, 2015). Ancak 1973'teki ilk petrol krizinden sonra doğal gazın önemi git gide arttı. 1950'lerde enerji tüketiminin yaklaşık %8'i doğalgazdan sağlanırken, 2000'li yıllarda bu değer yaklaşık %25'lere yükselmiştir (Woodyard, 2009). Zamanla petrol bağımlılığını azaltmayı amaçlayan alternatif enerji kaynağı olarak kullanılan doğal gaz, daha çevreci bir yakıt türü olarak nitelendirilmiş ve özellikle yaşam alanlarında ısınma ve pişirme amacıyla kullanımı yaygınlaşmıştır. Bunun yanında, sanayi sektöründe, bilhassa elektrik üretimi ihtiyacında ve küçük-orta ölçekli işletmelerin hem üretim hem de elektrik ihtiyacını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Karabay, 2014).

Halen dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü sağlayan fosil yakıt sıralamasında ikinci sırada bulunan doğal gazın (ilk sırada petrol) en dikkat çeken özelliği; temiz bir yakıt olması, çevreyi kirletmemesidir. Bunun yanında doğal gaz kullanımı gelişmişlik ölçütü olarak da kabul görmektedir (Karabay, 2014).

## **2.2 Sıvılaştırılmış Doğalgaz**

Sıvılaştırılmış doğal gaz (Liquified Natural Gaz – LNG); atmosferik basınç altında, doğalgaza  $-159^{\circ}\text{C}$  ile  $-162^{\circ}\text{C}$  arasında soğutma işlemi uygulanması ile elde edilir (Foss, 2012 ve Bahadori, 2014). Ayrıca yeryüzü tabakasının altında, çok uzun yıllar fiziksel ve kimyasal değişime uğramış organik yapılardan meydana gelen ham petrol veya doğal gaz rezervinin üstünde gaz halde bulunan bir yakıt çeşididir (Karabay, 2014). LNG renksiz, berrak, kokusuz olmasının yanında, korozyona uğramayan yapısı ve zehirli olmayan özellikleri içeren bir gazdır. Özellikle Asya, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde 50 yıldan fazla süredir kullanılmaktadır (Mokhatab, 2019).

Elektrik üretimi sağlayan sistemlerde, canlılar üzerinde negatif etkileri bulunan azot gazlarından NO<sub>x</sub> ve SO<sub>x</sub> salınımı oldukça düşük seviyede olan LNG; CO<sub>2</sub> salınım miktarını da azaltan çevreci bir yakıt olarak sanayi kuruluşları ve evlerin ısıtılmasının yanı sıra hammadde olarak birçok alan uygulamasında da kullanılmaktadır (Bahadori, 2014).

Doğal gaz, petrol ve kömür sıralamasından sonra LNG, dünyadaki enerji tüketiminin yaklaşık olarak çeyreğini sağlamaktadır. Karbon içeriğinin düşük olması nedeniyle LNG kullanımı git gide yaygınlaşmaktadır. Ancak diğer taraftan en büyük handikapı gaz fazında yüksek yanıcılık özelliği olmasıdır. Bunun yanında, sıvılaştırıldığı için bulaştığı yüzeyi dondurma ve nefes yolunu tıkama vesilesiyle boğulmaya neden olma riskleri de bulunmaktadır (Karabay, 2014).

LNG sıvı halde patlayıcı veya yanıcı değildir. LNG buharı -106,7°C'nin üzerinde ılımaya başladığında, yerin yüzeyinde toplanmak yerine, havadan daha hafif hale gelmesi nedeniyle yükselerek dağılır. Bununla birlikte, kapalı alanlarda yanıcı gaz konsantrasyonları oluşmadıkça patlayıcı değildir. (Mokhatab ve ark., 2019, s:499).

Gelişmiş teknoloji, LNG'yi büyük miktarlarda üretmeyi, taşımayı ve depolamayı daha ekonomik hale getirmektedir. Fiyatı nedeniyle diğer yakıt kaynakları ile etkin bir şekilde rekabet edebildiği yerlerde LNG, daha geniş pazarlarda yerini almıştır (Mokhatab ve ark., 2019, s:1).

LNG uygulamalarındaki büyüme, mevcut tesislerin genişletilmesine ve LNG tedarik zincirlerindeki yeni altyapı yatırımlarına bağlıdır. Endüstri son 20 yılda yaklaşık %7,5 oranında bir büyüme kaydetmekle beraber, yatırım taahhütleri, bu büyüme hızının en azından önümüzdeki on yıl boyunca devam edeceğini göstermektedir. LNG arzındaki artışın sürekli olması ve çeşitlenmesi, LNG kaynaklarının dünyadaki gaz tüketen pazarlarda daha kolay bulunabileceğine işaret etmektedir. Güney Amerika'da (Arjantin, Brezilya ve Şili) ve Orta Doğu'da (Dubai, Kuveyt) yeni LNG ithalat pazarlarının son yıllarda ortaya çıkması, endüstrinin çeşitliliğini kanıtlamaktadır (Mokhatab ve ark., 2019, s:2).

LNG depolama tankları, LNG alıcı terminalleri kurmadan daha küçük pazarların LNG ithalatını hızlı bir şekilde emniyete almasını sağlamıştır. Bu yaklaşım, zaman zaman veya mevsimsel LNG ithal etmek isteyen ülkeler arasında popüler hale gelmiştir (Mokhatab ve ark., 2019, s:2).

## 2.2.1. LNG'nin Kimyasal Özellikleri

Bir gazın, basınç uygulanarak sıvılaştırılabileceği en yüksek sıcaklığa kritik sıcaklık denir (Karabay, 2014). Kritik sıcaklığın önemi; soğutulmuş ya da basınçlı tanklara gaz yüklemesi yapılacağı zaman değerlendirilmesi gereken en temel faktör olmasından ileri gelmektedir. LNG'nin kritik sıcaklığı ise  $-82^{\circ}\text{C}$ 'dir (Karabay, 2014).

Kritik sıcaklıkta bulunan bir gazın sıvılaştırılması için gereken basınç düzeyine ise gazın kritik basıncı denir (Karabay, 2014). Kritik basıncın önemi ise; kritik sıcaklığa bağlı olarak sıvılaştırılmış gazın bir tanka ne şekilde yüklenmesi gerektiğinde ortaya çıkar.

LNG için yanıcılık/alevlenme durumu;

- %15 yoğunluktaki LNG ve hava karışımının yoğunluğu "aşırı" olduğundan yanma gerçekleşmez.
- %5- %15 yoğunluk aralığındaki LNG ve hava karışımı ise yanıcıdır. Parlama zamanı öngörülemez ve kontrol edilemez.
- %0- %5 yoğunluk aralığındaki LNG ve hava karışımı yoğunluğu "az" olduğundan yanıcı değildir (Karabay, 2014).

### 2.2.1.1. Yanıcılık

Tutuşturucu bir etken aracılığıyla atmosferdeki oksijen ile tepkimeye giren gazın karbondioksit, su buharı ve ısıya dönüşmesine gazın yanması denir (Karabay, 2014). Gazın yanmasının gerçekleşmesi için, hava içinde bulunan yanıcı gaz oranı belirli bir düzeye ulaşmalıdır. Bu oranlar için şu ifadeler kullanılır;

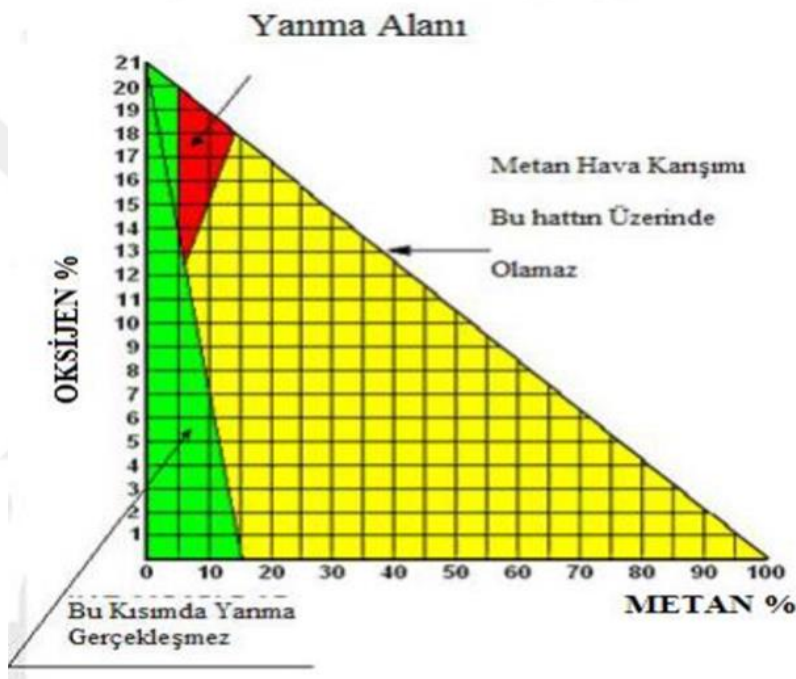
**Alt yanıcılık limiti (Lower Flammability Limit-LFL):** Yanmanın başlaması için ihtiyaç duyulan hava içindeki minimum yanıcı gaz oranıdır. (Karabay, 2014).

**Üst yanıcılık limiti (Upper Flammability Limit-UFL):** Yanmanın kesinlikle gerçekleşeceği bilinen, hava içindeki maksimum yanıcı gaz oranıdır (Karabay, 2014).

Havadaki oksijen oranının %21 varsayıldığı durumlar için, LNG bileşenlerinin yanıcılık limit oranları;

- Metan: %5,3-%14
- Propan: %2,1-%9,5
- Etilen: %3-%34
- Etilen oksit: %3,0-%100 şeklindedir.

Eğer havadaki oksijen oranı %21'den az ise bu değerler değişecektir (Şekil 1) (Karabay, 2014).



Şekil 1: Metanın yanma mesafesi (Karabay,2014).

### 2.2.1.2. LNG Kaynaklı Ateş Topu (Fireball)

### 2.2.2. LNG'nin Sıvılaştırılması

Doğal gaz atmosferik basınç altında,  $-162^{\circ}\text{C}$ 'ye soğutulduğunda sıvı bir faza yoğunlaşır ve "sıvılaştırılmış doğal gaz" (LNG) olarak adlandırılır. LNG, uzun yıllar boyunca yüksek basınç ve sıcaklık altında, fiziksel ve kimyasal olarak değiştirilmiş organik yapılardan oluşan bir tür yeraltı yakıtı olan doğal gazın sıvılaştırılmış formu olarak da bilinmektedir (Deli, 2013)

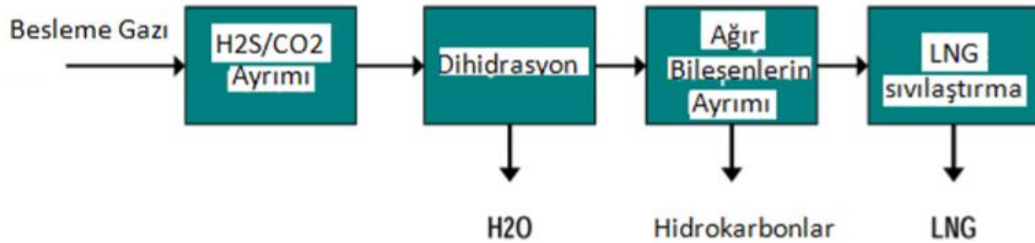
Doğal gaz sıvılaştırılırken, içeriğindeki zararlı bileşiklerinden arındırılarak “temiz yakıt” haline getirilmesi yanında doğal gazı ithal ve ihraç eden ülkeler arasında boru hatlarıyla taşınmasının mümkün olmadığı koşullarda, gemiler aracılığıyla taşınabilir olması sıvılaştırılmasının tercih sebepleri arasında sayılabilir (Bayraktar, 2016 ve Coşkun, 2004).

Doğal gaz sıvılaştırma işlemi, LNG tesislerinde maliyet, karmaşıklık ve operasyonel önem açısından anahtar bileşendir. Doğal gaz sıvılaştırma tesisinin başarısı için doğal gaz sıvılaştırma sistemlerinin tasarım ve işletme gereklilikleri ve verimliliklerinin iyi anlaşılması önem teşkil etmektedir. (Mokhatab ve Ark.,2019, S:147).

Doğal gaz sıvılaştırma tesislerinde saflaştırma ve sıvılaştırma işlemi olarak iki temel birim bulunur.

### 2.2.2.1. Saflaştırma

Doğal gaz sıvılaştırma amacıyla tesise geldiğinde, ilk olarak ön arıtma (saflaştırma) işlemi uygulanır. Bu işlem ile su, asit gazları ( $H_2S$  ve  $CO_2$ ) ve civa gibi parçacıklardan arındırılır (Şekil 2) (Deli 2013).



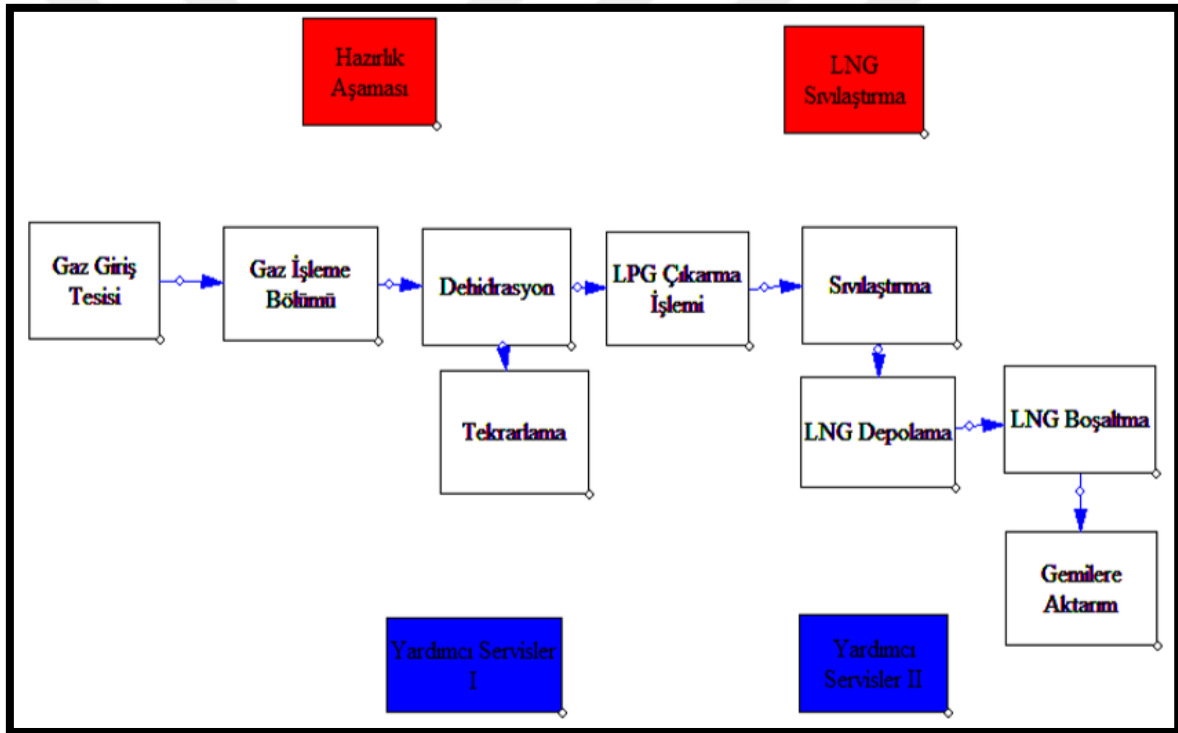
Şekil 2: Doğal gazın sıvılaştırma işlemi öncesi saflaştırma proses akış şeması (Deli, 2013).

Saflaştırmanın en önemli gerekliliklerinden biri,  $H_2S$  bileşiğinin korozif yapı oluşturmasıdır.  $CO_2$  ve  $H_2O$  bileşikleri sıvılaştırma işleminde  $-162^{\circ}C$  ye gelmeden donacağı ve işletmedeki ekipmanlara zarar vereceği olasılığından dolayı sıvılaştırma işleminde bu bileşiklerden arındırılması veya saflaştırma metoduna bağlı olarak konsantrasyon değerlerinin kabul edilir sınıra çekilmesi gereklidir (Erdoğan Deli 2013).

### 2.2.2.2. Sıvılaştırma

Sıvılaştırma en saf LNG durumunu (neredeyse %100 metan) elde etmek için yapılır. Sıvılaştırma yöntemindeki olası hataları önlemek amacıyla, içeriğindeki etan ve sıvılaştırılmış petrol gazlarından (propan ve bütan) ayrılması gerekir (Bahadori, 2014).

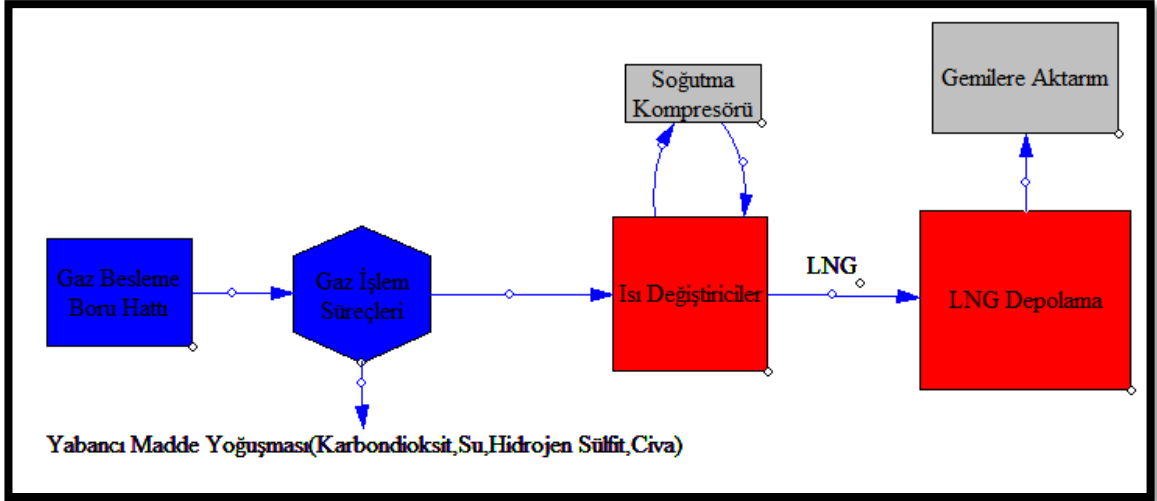
Doğal gazın üst seviyelerinde bulunabilen azot, saf haldeki metandan daha düşük sıcaklıklarda yoğunlaştığından ( $<196^{\circ}\text{C}$ ), proses sonunda var olan azot elemine edilebilmektedir. Sıvılaştırma işlemi ise, işlem süresince kullanılan ekipmanların donmasını, ısı eşanjör yüzeylerinde muhtemel korozyonu önlemek amacıyla gerekmektedir. Bunun yanında, son ürünün ısı değerini doğru şekilde kontrol edebilmek için önem teşkil etmektedir (Şekil 3) (Bahadori, 2014).



Şekil 3:Doğal gazdan LNG eldesinin blok akış diyagramı (Bahadori 2014).

Sıvılaştırma LNG tesisinin ana bileşenidir. Sıvılaştırma, soğutucunun LNG'nin ardışık genişleme ve sıkıştırma ile üretildiği fazdan ısı taşıdığı bir soğutma yöntemine dayanmaktadır. Genellikle, LNG santralleri istasyon olarak bilinen paralel birimlerden oluşur. Bu tesislerde doğal gaz arıtılır ve sıvılaştırılır ve daha sonra LNG için depolama tanklarına gönderilir (Şekil 4) (Bayraktar, 2016).





Şekil 4:LNG sıvılaştırma Sistemi (Bayraktar 2016).

Sıvılaştırma işlemi esas olarak soğutma işlemine dayanmaktadır. Sıvılaştırma döngüsünün verimliliği, soğutucunun ve kullanılan ısı eşanjörlerinin büyüklüğüne bağlıdır. LNG üretimi sırasında ısıtma performansı gereksinimlerini karşılamak amacıyla, propan, bütan, azot gibi bileşenlere sahip gazlar sistemden çıkarılır (Bayraktar,2016).

Soğutma sıvıları kullanarak soğutma ve sıvılaştırma gazlarının temel prensipleri, gaz işlemlerinin ve soğutma sıvısının soğutma/ısıtma eğrilerinin en iyi şekilde eşleştirilmesini içerir. Bu fikirler, düşük güçlü LNG çıkışı da dahil olmak üzere daha etkili termodinamik sistemleri mümkün kılmaktadır (Bahadori, 2014).

Doğal gaz, normal şartlarda içindeki bileşenlere bağlı olarak yaklaşık  $-162^{\circ}\text{C}$ 'de sıvılaşmaktadır. Bu sıvılaştırma işleminin gerçekleşebilmesi için gazın iç enerjisinin alınarak dışarıya verilmesi gerekir. Ya da ortam sıcaklığında sıvı faza geçirilebilmesi için 1200 bara kadar sıkıştırılması gerekir ki bu pratik ve ekonomik bir yöntem olarak nitelenmemektedir (Coşkun, 2004).

Sıvılaştırma işlemleri için dört farklı işlem döngüsü kullanılmaktadır.

- Klasik Kaskad Döngüsü
- Karışık Soğutucu Akışkan Döngüsü
- Tek Karışık Soğutucu Akışkan Döngüsü
- Çift Karışık Soğutucu Akışkan Döngüsü



soğumaktadır. Isı alarak buharlaşan etilen, yaklaşık 15 bar basınca kadar K2 kompresöründe sıkıştırılır. Sonrasında K1 eşanjörüne gelen etilen ve burada ön soğutma ile 1 bar dolayında basınca kısılarak K2 eşanjörüne geri döner. Böylelikle etilen döngüsü tamamlanır (Coşkun, 2004 ve Deli, 2013).

E2 eşanjöründe  $-100^{\circ}\text{C}$ 'ye soğutulan doğal gaz, buradan içinde metan bulunan K3 eşanjörüne gelmektedir. Burada doğal gazdan ısı alarak yaklaşık 1 atmosferik barda  $-160^{\circ}\text{C}$  dolaylarında buharlaşan metan, K3 kompresöründe 25 bar basınca kadar sıkıştırılmasının akabinde, propan çevriminde K1 eşanjörüne ulaşır. Döngünün son kademesinde ön soğutmadan geçtikten sonra etilen döngüsüne gelmektedir. Burada da  $-100^{\circ}\text{C}$  dolayına soğuduktan sonra 1 atmosferik bar basınca kısılarak K3 eşanjörüne iletilmektedir. Böylelikle, metan döngüsü de tamamlanmaktadır (Coşkun, 2004 ve Deli, 2013).

Doğal gaz, K3 eşanjöründen geçerken 1 atmosferik bar basınca kısıldıktan sonra dengeleme ve depolama tankına ulaşır. Depolama tankında sıvılaşmayan ya da çevreden ısı alışverişi nedeniyle yeniden buharlaşan doğal gaz kısımları ise ya kullanılmak üzere enerji santraline ya da geri besleme ile LNG sistemi girişine yönlendirilmektedir. LNG sisteminin enerjisi, santralden karşılanıyorsa bu enerji santrali için gerekli doğal gaz miktarı, seçilen sisteme bağlı olarak, toplam gazın %15-20'si civarında olmaktadır (Coşkun, 2004 ve Deli, 2013).

Klasik kaskad döngüsü, soğutucu akışkanları farklı ancak sabit sıcaklıklarda buharlaşan birkaç soğutma çevrimi kullanarak, geri dönüşümü olmayan şekilde ısı değişim kayıplarını azaltır. Kaskad döngüsü operasyonda esneklik; her soğutucu akışkan devresi ayrı ayrı kontrol edilebilir. Kaskad döngüsü, kapasite birimi başına nispeten düşük bir ısı eşanjörü yüzey alanı gereksinimine sahiptir (Finn ve ark., 2000).

Ölçek ekonomisi, düşük ısı eşanjörü alanı ve düşük güç gereksiniminin birden fazla makineye sahip olmanın maliyetini dengelemesi nedeniyle kademeli çevrimin büyük kapasitelere en uygun olduğunu göstermektedir. (Jamieson ve ark., 1998).

Diğer avantajlar, düşük teknik riskler ve yapım süresinin azaltılmasına neden olan standart ekipmanların kullanılmasıdır. Bununla birlikte, kaskad teknolojisinin dezavantajları nispeten yüksek sermaye yatırımları, doğal gaz bileşimindeki değişikliklere yetersiz esneklik / adaptasyon ve üretim kapasitesi sınırlamalarıdır.

Gaz sıvılaştırma tesislerinin işletilmesinde kullanılan klasik kademeli işlemin iki modifikasyonu vardır:

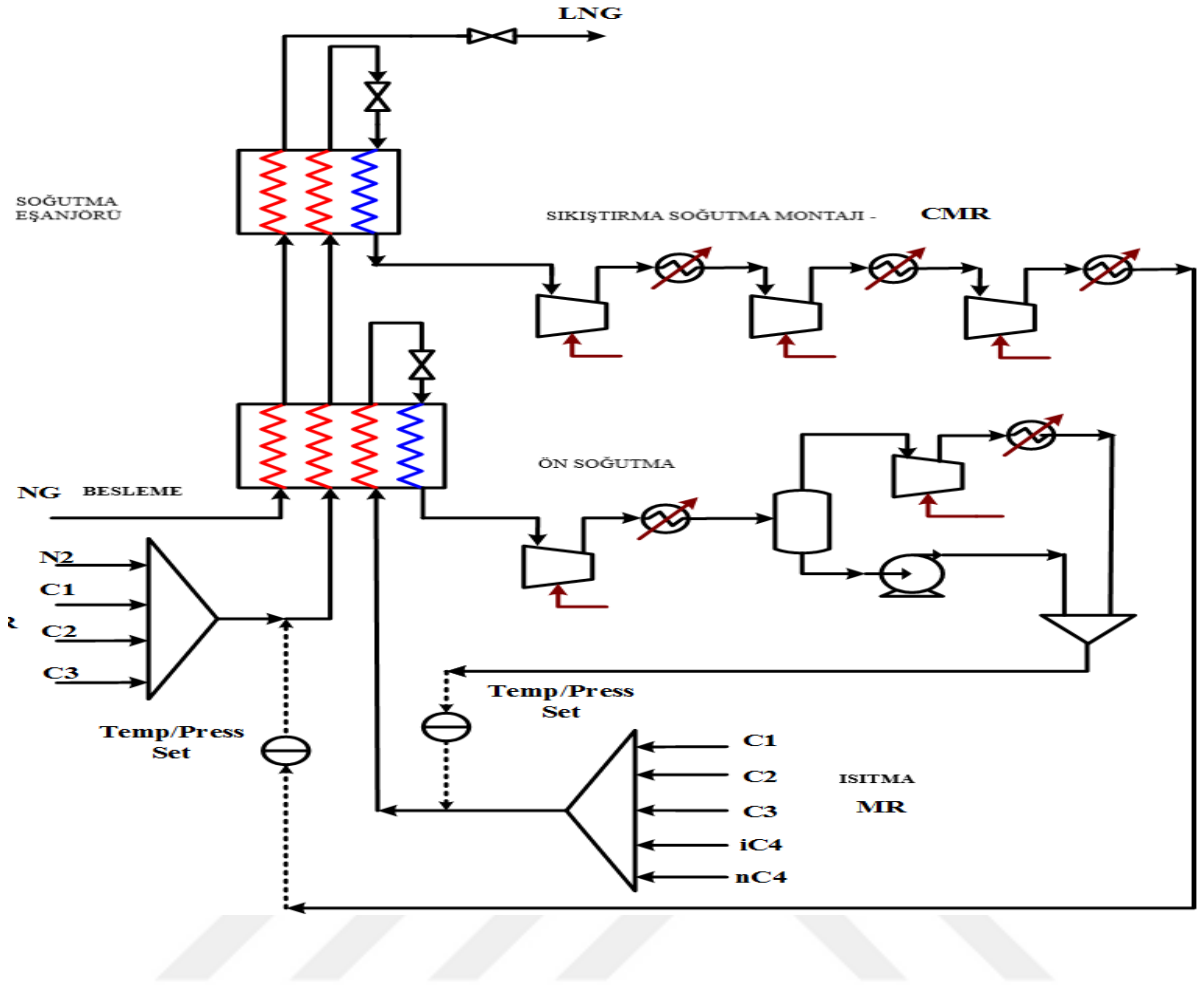
1. Optimize edilmiş kaskad (Conoco-Phillips tarafından geliştirilmiştir.)
2. Karışık sıvı kaskadı (Linde ve Statoil tarafından hazırlanmıştır) (Mokhatab ve ark., 2014, s:150).

#### **2.2.2.2.2. Karışık Soğutucu Akışkan Döngüsü**

Karışık soğutucu akışkan döngüsü, doğal gazın ortamdan kriyojenik sıcaklıklara soğutma eğrisini taklit edebilen, dikkatli bir şekilde seçilmiş soğutucu madde karışımı (genellikle hafif hidrokarbon ve azot karışımı) kullanarak, doğal gaz akışımının sürekli soğutulmasını sağlamaktadır. Böylece enerji kullanımı ve ısı eşanjörleri boyutu optimize edilmektedir. Kaskad teknolojisine kıyasla, karışık soğutucu akışkan işleminin avantajları, ısı eşanjörlerinin çalışma sıcaklığına daha yakın olmalarıdır;

- Daha düşük sayıda kompresör ve ısı eşanjörü hizmeti
- Soğutucu akışkan bileşimlerini, gaz bileşimindeki, besleme gazı çıkışındaki ve tesis işletme basıncındaki değişikliklere uyum sağlamak için ayarlama kabiliyeti (Şekil 6) (Khan, 2016).

Öte yandan, tek bir karışık soğutucu akışkan döngüsü tipik olarak daha karmaşık kaskad döngüsünden daha düşük bir termal verime sahiptir bunun nedeni, karışık soğutucu akışkan bileşimi, doğal gazın sıvılaştırılmasında geniş bir yelpazedeki soğutma sıcaklıkları ile en uygun şekilde eşleşemez. Soğutucu akışkan karışımının hassas bir şekilde harmanlanması gerektiğinden, soğutma işleminin başlatılması ve sıralanması daha uzun sürer. Bu, soğutucu akışkan bileşiminin sık ayarlanması, sık başlatılması ve kapanmasının beklendiği bir ortamda önemli bir husustur (Mokhatab ve ark., 2014, s:150).



Şekil 6: Karışık soğutucu akışkan döngüsü (Khan, 2016).

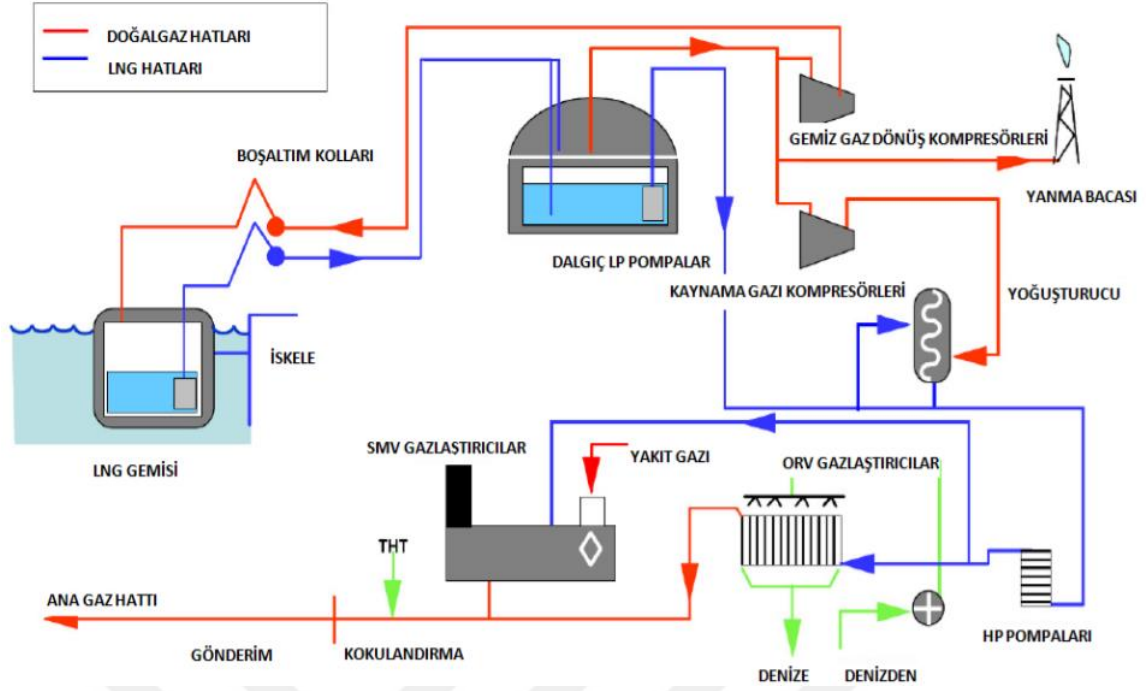
### 2.2.2.2.3. Tek Karışık Soğutucu Akışkan Döngüsü

Tek karışık soğutucu akışkan işlemi, gazın tek bir ısı eşanjöründe soğutulduğu ve sıvılaştırıldığı ters veya ters Rankine Döngüsü'nü içerir. Rankine Döngüsü genel olarak, buharı veya hidrokarbonlar gibi bir çalışma akışkanı kullanarak ısıyı dönüştüren bir çevrimi ifade etmektedir. Tersine Rankine Döngüsü, ısının reddedilmesiyle soğutma sağlamak için güç kullanır. Karışık soğutucu, birkaç bileşiğin karışımıdır (çoğunlukla düşük kaynama noktalı hidrokarbon ve azot) ve optimum bileşim aşağıdakiler tarafından belirlenir:

- Yem bileşimi,
- Besleme basıncı,
- Sıvılaştırma tesisi basıncı,
- Ortam sıcaklığı.





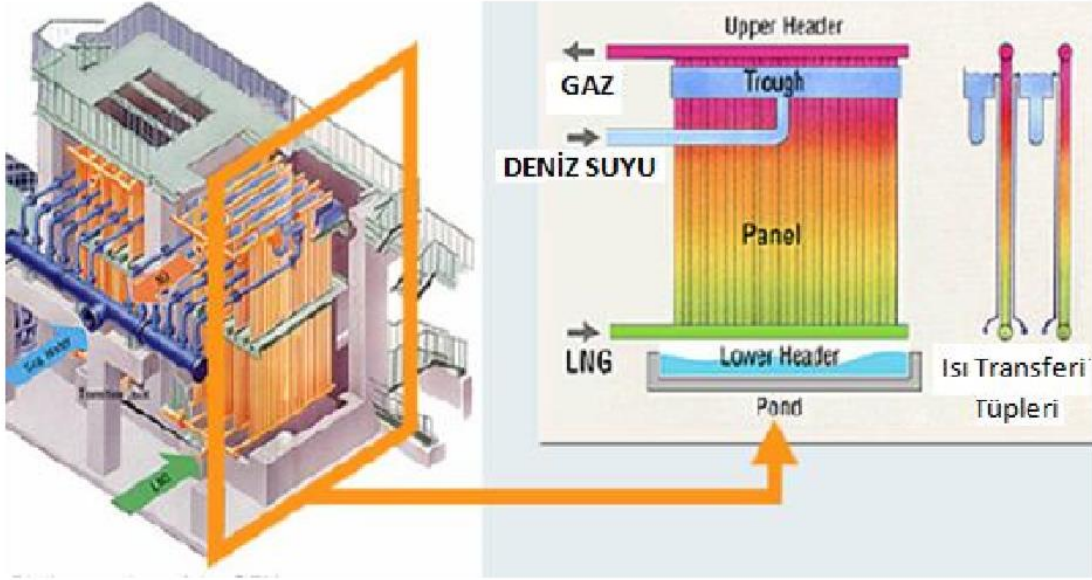


Şekil 9: LNG terminali genel Gazlaştırma prosesi (Deli, 2013)

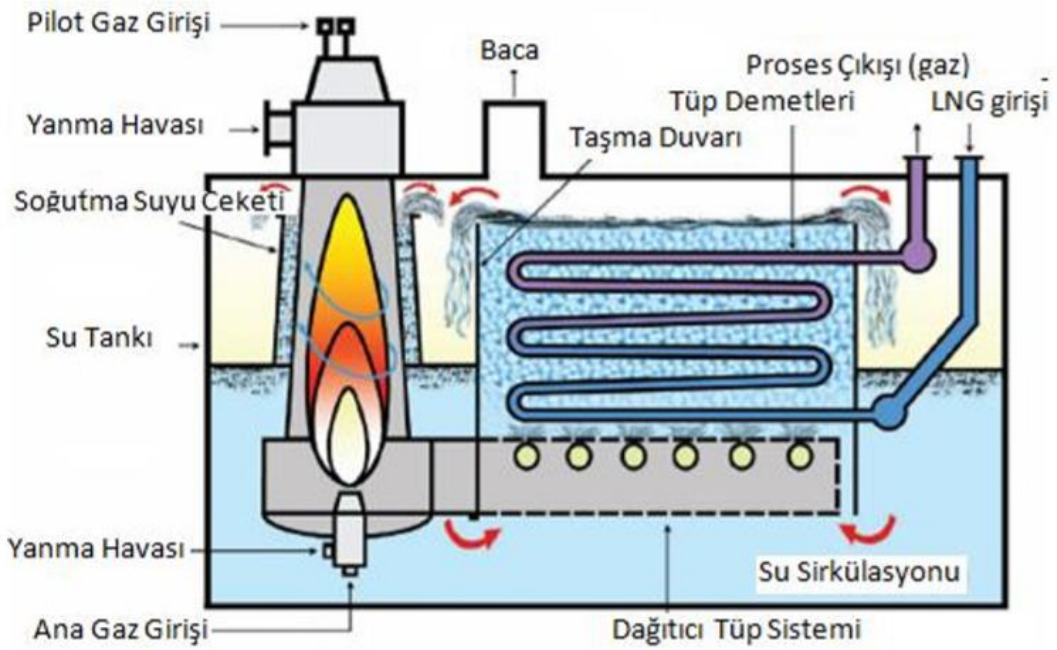
Dizayn farklılıklarına bağlı olmakla birlikte, genelde LNG'nin hacimsel olarak yaklaşık 1/8'lik miktarı yoğuşturucu üniteye iletilir. Bu üniteye 10 atmosferik bar basınçta tamamıyla LNG haline dönüşen karışım, HP (high pressure- yüksek basınç) pompalarının emişine gelir. HP pompaları; birçok farklı kademe düzeylerinde çalışan yatay santrifüj pompalardır ve 10 atmosferik bar basınçta ulaşan LNG'yi her bir kademedede biraz daha sıkıştırarak, 100-120 atmosferik bar basınçta gazlaştırıcı ünitelere iletmektedir (Deli, 2013).

LNG terminallerinde en yaygın kullanılan iki tür gazlaştırıcıdan, yüzey akışlı gazlaştırıcı (ORV-open rock vaporizer) Şekil 10'da ve daldırılmış yanma odalı gazlaştırıcı (SCV-submerged combustion vaporizer) Şekil 11'de gösterilmiştir. LNG gazlaştırma terminallerinde çoğunlukla bu iki tür gazlaştırıcı birlikte bulunmalarına rağmen, ORV'ler normal şartlarda daha çok tercih edilmektedir. SMV'ler ise genelde ORV'lere yedek tutulmakta ve ORV'lerin kullanılmadığı ya da talebi karşılayamadığı durumlarda ayrıca devreye sokulmaktadır. ORV ve SMV'lerin ortak görevi LNG'yi gazlaştırma olsa da işletme maliyetleri ve çalışma prensipleri ile birbirlerinden ayrılmaktadır (Deli, 2013 ve GIIGNL, 2009).





Şekil 10:ORV (Open Rack Vaporizer) tipi gazlaştırıcılar (Deli, 2013)



Şekil 11:SMV (Submerged Comb Vaporizer) tipi gazlaştırıcılar (Deli, 2013)

Tekrar gazlaştırma işlemi için kullanılan deniz suyunu buharlaştırmak amacıyla yaklaşık 8 kWh/ton LNG enerji, daldırılmış buharlaştırıcılarda ise yaklaşık 200 kWh/ton LNG enerji gerekmektedir. Doğal gazı sıvılaştırmak için gerekli olan enerji 850 kWh/ton LNG'dir. Sıvı formdaki doğal gazı (LNG), tekrar gaz haline döndürmek için enerji

tüketilmesinin yerine, kriyojenik enerjinin kullanılması 240 kWh/ton LNG elektrik enerjisi üretecektir.

LNG terminallerinde “direkt genleşme metodu”nun kullanılması enerji üretimini mümkün kılabilir. Direkt genleşme metodu; sıvı halde bulunan doğal gazın (LNG), gazlaştırılma fazında oluşan basıncı türbinden geçirilmesi ile oluşan enerjidir. Ülkemizde Botaş firmasının Marmara Ereğlisi Tesisi’nde, sıvılaştırılmış olan doğal gaz deniz suyu kullanılarak gazlaştırılmakta iken, doğal gaz talebinin artmakta olduğu kış aylarında ise daldırılmış buharlaştırıcılar kullanılarak arz talep ilişkisi korunmaktadır (Demirpolat, 2007).

#### **2.2.4. LNG’nin Taşınması**

LNG taşınmasının güvenilir bir şekilde yapılabileceğini gösteren ilk çalışma 1959 yılında Louisiana’dan okyanusu aşarak İngiltere’ye ulaşan ilk tankerle gerçekleşmiştir. Bu çalışma sonrasında, 1964 yılında, İngiltere, Cezayir’den LNG ithal etmeye başlayarak tarihte ilk LNG ithalatçısı ve Cezayir’de ilk LNG ihracatçısı olmuştur (Kaya, 2016).

LNG’nin taşınması; boru hatlarıyla LNG taşımacılığı, kara taşıtlarıyla LNG taşımacılığı ve deniz yoluyla LNG taşımacılığı olmak üzere üç şekilde sağlanmaktadır (Bayraktar, 2016 ve Economides ve Wang, 2009).

##### **2.2.4.1. Boru Hatlarıyla LNG Taşımacılığı**

LNG’nin uzun mesafeli boru hatlarıyla taşınması fikrini, ilk olarak 1970 yılında Hoover, ardından 1971 yılında Dimentberg, Katz ve Hashemi ortaya koymuş ve çalışmalar yapmaya başlamışlardır. Basınçla sıkıştırılmış gaz yerine, sıvı forma getirilmiş gazın taşınma fikri daha cazip gelmiştir (Kidnay ve ark., 2011).

Doğal gaz, genellikle nihai tüketiciye boru hatları aracılığıyla taşınmaktadır. Ancak doğal gaz tesisi ve tüketici arasındaki mesafe çok uzaksa, doğal gaz sıvılaştırma işlemi yardımıyla doğal gazın hacmi küçültülür ve taşıma maliyeti daha ekonomik hale getirilir. Bahsi geçen mesafe; karadan taşıma yapacak tüketici için 5000 km iken, denizden taşıma yapacak tüketici için 1500 km olarak kabul görülür (Bahadori, 2014).

#### **2.2.4.2. Kara Taşıtlarıyla LNG Taşımacılığı**

Sıvı hidrojen, sıvı helyum ile sıvı azot, sıvı oksijen barındıran kriyojenik sıvılar kara taşıtları vasıtasıyla nihai tüketiciye sunulabilmektedir. Kara taşıtlarıyla LNG taşımacılığında, taşımayı sağlayacak olan araç LNG yüklenmek üzere istasyona gelir. Araçta bulunan LNG tankına dolum işlemi tamamlandıktan sonra, ihtiyacı olan bölgelere LNG taşınması kara yolu ile sağlanır (American Bureau of Shipping (ABS), 2015).

#### **2.2.4.3. Deniz Yoluyla LNG Taşımacılığı**

Deniz yoluyla ilk LNG taşımacılığı, 25 Ocak 1959 tarihinde, Methane Pioneer isimli gemi vasıtasıyla 32.000 varil (yaklaşık 5.088 m<sup>3</sup>) LNG ile, Louisiana'dan Lake Charles'e taşınmıştır (Bayraktar, 2016).

Doğal gaz, taşıma ve depolama kolaylığı açısından sıvılaştırma işlemiyle sıvı forma dönüştürülmektedir. Sıvılaştırma işlemi, doğal gazın kapladığı hacmi 600 kat civarında küçültmektedir. Bu şekilde LNG'nin deniz yoluyla LNG taşımacılığına özel tasarlanmış tanker gemilerde taşınması mümkün olmaktadır. Deniz yoluyla LNG taşımacılığında, LNG'nin düşük sıcaklıklarda korunarak taşınmasına, LNG buharlaşma kaybını minimuma indirmek amacıyla gemide bulunan tanklarda yalıtımın çok iyi sağlanmasına ve güvenlik bakımından çift cidarlı yapıya sahip gemilerle taşıma yapılmasına önem verilmelidir (Bahadori, 2014).

Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organisation – IMO) tarafından hazırlanan uluslararası kurallar doğrultusunda tüm LNG gemilerine ait kriterleri belirlenmekte ve transport operasyonunun güvenliği sağlanmaktadır.

Deniz yoluyla LNG taşımacılığında iki ana gemi tipi vardır. Bunlardan ilki; tek duvarlı kendinden destekli küreler (Moss küreleri) ve diğeri Gaz Transport veya TechniGaz (GTT) tarafından sağlanan çift membran tasarımı. Moss tasarımındaki küresel tanklar genellikle 49 ila 57 mm kalınlığında alüminyumdan yapılır (Pitblado ve ark. 2004). Küre kendi yapısal bütünlüğünü korumakta ve yükü, kürenin ekvatoruna tutturulmuş bir metal vasıtasıyla kaba aktarmaktadır. Gövde çift gövdedir ve bazı gemiler küreleri çevreleyen ek bir duvara sahiptir.

Küreler, ortalama olarak, dış ortamdan, membran tipi LNG taşıyıcının tanklarından çok daha fazla ayrılmıştır (Mokhatab ve ark., 2014, s:374).

### **2.2.5. LNG'nin Depolanması**

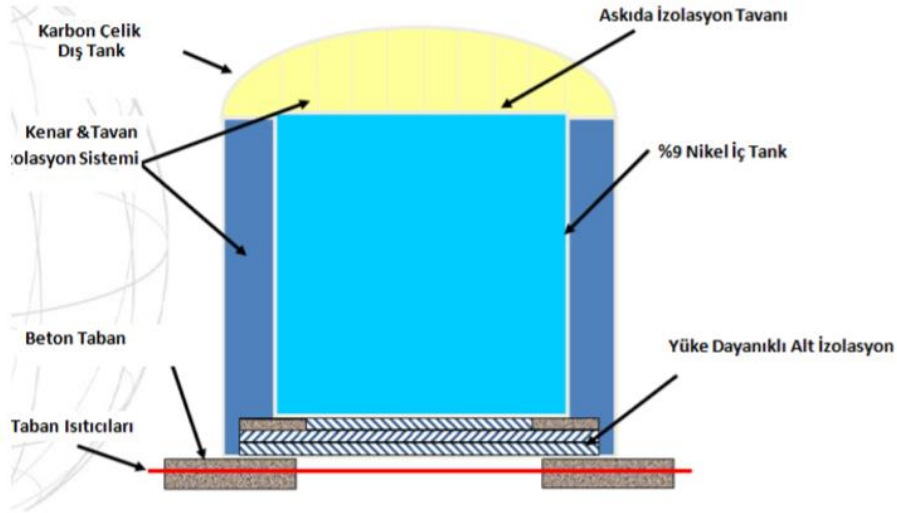
Alternatif enerji kaynağı arayışı arttıkça, LNG'ye olan talep te uluslararası piyasalarda artmaktadır. Bu arz talep ilişkisi doğal gaz tüketicisi ülkeler tarafından tek bir doğalgaz kaynağına bağlı kalmamak ve belli zaman dilimlerinde oluşabilecek arz talep durumu artışına kayıtsız kalmamak amacıyla depolama yapma zorunluluğunda kalmışlardır (Avcı ve ark., 1995).

Rafinerilerdeki ve kimyasal tesislerdeki depolama tankları büyük miktarda yanıcı ve tehlikeli kimyasal içerir. Küçük bir kaza milyon dolarlık mülk kaybına ve birkaç günlük üretim kesintisine neden olabilir. Büyük bir kaza davalara, stok devalüasyonuna veya şirket iflasına neden olur. Son 50 yılda, Amerikan Petrol Enstitüsü (API) 1988 ve 1990 yıllarında, Amerikan Kimya Mühendisleri Enstitüsü (AIChE) 1988 ve 1993 yıllarında, Amerikan Makine Mühendisleri Topluluğu (ASME) 2004 yılında ve Ulusal Yangından Korunma Derneği (NFPA) 1992 yılında sıkı mühendislik yönergeleri ve standartları yayınlamıştır. LNG depolama tesisleri tasarım, yapım ve işletimde bu standartları ve yönergeleri takip etmektedir (Chang ve Ark. 2005).

Çeşitli taşıma yolları ile tesise ulaşan LNG, farklı teknolojiler kullanılarak yapılan, yaklaşık %9 çelik-nikel alaşımlı depolama tanklarında aktarılmaktadır. Bu tanklar genellikle;

#### **2.2.5.1. Tek Cidarlı Tanklar**

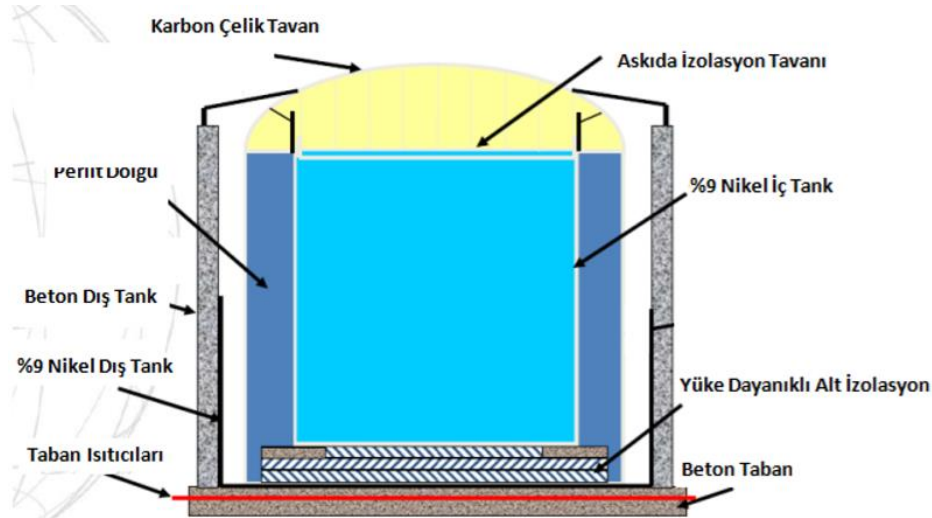
Genelde tek cidarlı (tekli muhafaza- single containment) olduklarından çok güvenilir bulunmamaktadır. Olası bir sızıntı durumunda, döküntü bir havuz etrafında toplanmaktadır (Şekil 12) (Deli, 2013 ve Humphrey 2009).



Şekil 12: Tek cidarlı (tekli muhafaza- Single containment) LNG depolama tankı (Humphrey, 2009)

### 2.2.5.2. Çift Cidarlı Tanklar

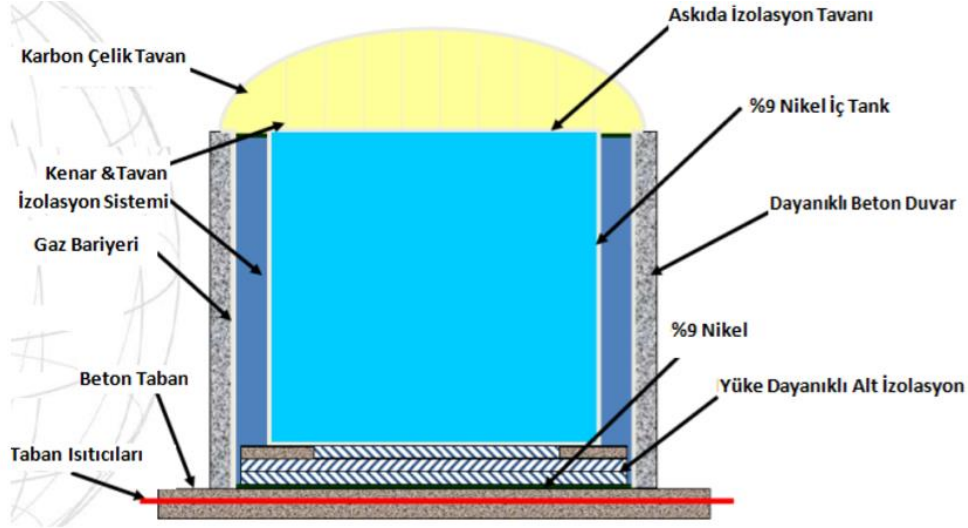
Çift cidarlı tanklar (double containment), tek cidarlı tanklara göre daha gelişmiş sistemlerdir. İç cidardaki zedelenme/yırtılmaya karşı olası bir sızıntının önüne geçmek amacıyla, ikinci bir cidar, ile birinci cidarın etrafı çevrilidir. Genelde perlit dolgu ile cidarlar arasındaki bölüm doldurularak yalıtım sağlanır (Şekil 13) (Deli, 2013 ve Humphrey 2009).



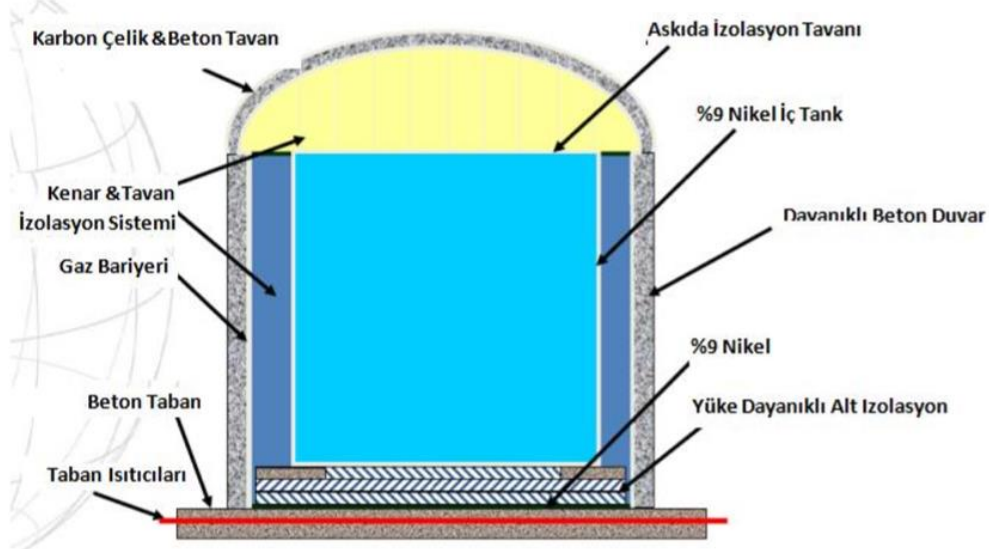
Şekil 13: Çift cidarlı (Double Containment) LNG depolama tankı (Humphrey, 2009)

### 2.2.5.3. Çelik Kubbeli ve Beton Kubbeli Tanklar

Çelik kubbeli (steel roof) ve beton kubbeli (concrete roof) tanklar (full containment), çift cidarlı tanklara ek olarak bulunan gaz bariyeri, dış cidar ile çelik (Şekil 14) veya beton (Şekil 15) koruma arasında konumlanmıştır. Bu sayede olası bir gaz sızıntısının dışarı çıkması önlenir (Deli, 2013 ve Humphrey 2009).



Şekil 14:Çelik kubbeli (Steel roof) LNG tankı (Humphrey, 2009)

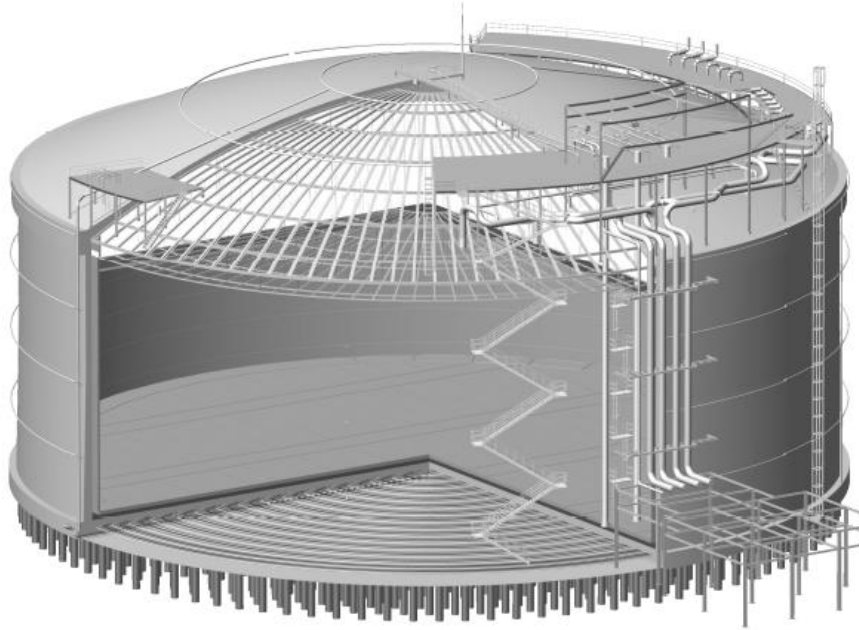


Şekil 15:Çelik kubbeli (Steel roof) LNG tankı (Humphrey, 2009)

#### 2.2.5.4. Tam Cidarlı Tank

Tam Muhafaza tankları yaklaşık 85.000 m<sup>3</sup> kapasiteli, %9 nikel-çelik alaşımından yapılmıştır. Deponun dış kısmı betonarmeden oluşmakla beraber ön gerilmeli beton kullanılmıştır. Dış tankı oluşturan betonarme yapı sismik yük dahil olmakla birlikte tüm dış yüklere dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Asma tavan destekli kubbe şeklinde çatısı bulunur. Kriyojenik kullanımlar için yeterli kuvvete sahip olması açısından %9 nikel-çelik alaşımı iç tankta yaygın olarak kullanılmaktadır. İç depo aynı zamanda LNG'nin sızmasını önleme özelliğine sahiptir. İç ve dış tankların arası, LNG sızıntısını önlemek amacıyla poliüretan köpük yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır (Şekil 16) (Yang ve ark., 2006).

Tam cidarlı (muhafazalı) tank hem iç hem de dış tankın, depolanan soğutulmuş sıvıyı, bağımsız olarak içerecek şekilde tasarlanmaktadır (Yang ve ark., 2006).



Şekil 16: Tam Muhafaza – LNG Tankı (Yang ve ark., 2006)

İkili muhafaza ve tam muhafaza tankları arasındaki fark; tam muhafaza tankının dış tankının hem soğutulmuş sıvıyı hem de ürün sızıntısından kaynaklanan buharın kontrollü havalandırılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmasıdır. Bu dört tip LNG tankı arasında, tam muhafaza tipi en gelişmiş tip olarak kabul edilir (Yang ve ark., 2006).

## 2.2.6. LNG Güvenliği

LNG sanayisi, diğer sanayi gruplarında olduğu gibi, risk ve emniyet düzenlemelerine tabiidir. LNG işletmecileri, tüm ulusal ve uluslararası güvenlik düzenlemelerini bünyelerinde barındırmak durumundadır. LNG güvenliği doğal çevreyi ve çevrede yaşıyan toplulukları koruma açısından değerlidir. LNG istasyonu var olan bölgelerde, tehlike oluşturabilecek etkenler azaltılmalı ve koruma işlemleri yapılmalıdır (Foss, 2012).

LNG temiz bir yakıttır ve bu nedenle diğer yakıtlarla kıyaslandığında çevresel açıdan uygun olarak kabul görür. LNG tesisindeki ana tehlikeler; yangın ve patlama, kriyojenik donma yanıkları, metal ve plastiklerin korozif ortam nedeniyle hasara uğraması ve kapalı alan tehlikeleridir. Bu başlıkların hepsi, tehlikelerin dikkatli değerlendirilmeleriyle iyi bir şekilde hafifletilebilir (Mokhatab ve ark., 2014, s:359).

### 2.2.6.1. LNG Sızması Dökülmesi

LNG genellikle iyi yalıtımlı tipik tanklarda yaklaşık 5.4 atmosferik bar basınçta depolanır ve taşınır. Isı artışı tankları yavaşça etkiler ancak içerisinde bulunan LNG'nin buharlaşmasına neden olabilir ve 'kaynar gaz' olarak bilinen madde ortaya çıkar. Doğal gaz, tutarlı bir basınçta kalarak sıvılaştırılmaya devam eder, ancak kaynama meydana geldiğinde ve gaza döndüğünde, daha büyük gaz hacmi tank basıncını artırır, bu durumda da sızıntısının ortaya çıkması beklenir (Mokhatab ve Ark.,2014, S:359).

Olası bir gaz sızıntısının teknolojik yardımcılarla erken teşhisi ile, ateşleme kaynağı alev oluşturacak raddeye gelmeden engellenebilir. Bu durum dizel ve benzin gibi hızlıca yanıcı karışım oluşturabilen yakıtlar için geçerli değildir (Bayraktar, 2016).

Dizel yakıtlara nazaran LNG çok daha güvenlidir. Olası bir sızıntı (dökülme) durumunda, sıvı evre ile oda sıcaklığı arasındaki şiddetli enerji farkı nedeniyle gaz, direkt buharlaşır. Bu şekilde ortaya çıkan karışım, atmosferik basınçta tutuşabilme özelliğine sahip değerdir. Dolayısıyla çevreye hiç zarar vermediği kabul edilmektedir. Dizel yakıtın ise olası bir sızıntı (dökülme) senaryosunda yanma ve/veya patlama özelliği bulunmaktadır. Ayrıca sızıntı durumunda suyu ve toprağı kirletmektedir (McGhill, ve ark., 2013).



IMO'nun (Uluslararası Denizcilik Örgütü) muaffak kuralları ile IGF (Gaz Kullanan Gemilerin Ulusal Emniyeti) kodları, yakıt olarak LNG kullanan gemilerin dizaynı ve düzenlerindeki risk seviyesini minimuma indirmeye yönelik araştırmalara fokuslanmaktadır. Böylelikle ortaya çıkabilecek kötü senaryolar en aza indirgenmeye çalışılmaktadır (International Maritime Organization (IMO), 2016).

#### **2.2.6.1.1. LNG'nin Suya Sızması (Dökülmesi)**

LNG'nin yoğunluğu (özkütlesi) suyun yaklaşık olarak yarısı (%47'si) kadardır. Suyun üzerine LNG dökülürse su yüzeyinde yüzer. Su normal şartlar altında LNG'nin sıcaklığından daha yüksek sıcaklığa sahip olmasına rağmen, donmaya yakın su sıcaklıklarında bile (yaklaşık 0°C) LNG'nin suya dökülmesi durumunda, LNG hızla buharlaşır. Diğer taraftan, kaynar LNG, suyun içinde konveksiyon akımları oluşturur, bu nedenle yalnızca suyun çok sığ olması durumunda buz oluşumu gözlemlenebilir. LNG sızıntılarını (dökülmelerini) tespit etmek amacıyla 'sıcaklık sensörleri' yaygın olarak kullanılır ve 'hidrokarbon gazı detektörleri'nden daha güçlü bir sinyal sağlar. Yanıcı sıvıların aksine (katran, fuel oil, motor yağları...gibi), doğal gazın sıvı formu olan LNG yanmaz veya patlamaz. Ateşlemeden önce buharlaştırılmalı ve yanıcı aralıkta hava ile karıştırılmalıdır (Mokhatab ve ark., 2014, s:360).

#### **2.2.6.1.2. LNG'nin Toprağa Sızması**

LNG toprağa döküldüğünde, kaynama noktası toprak sıcaklığından düşük olması nedeniyle, ilk önce hızlıca kaynar ve sonra zemin soğudukça daha yavaş bir şekilde kaynamaya devam eder. Sonuç olarak bir kalıntı bırakmadan tamamen buharlaşır (Mokhatab ve ark., 2014, s:359).

Her iki sızıntı (dökülme) türünde de, LNG'nin sıcak hava ile temas etmesi durumunda, beyaz bir "buhar bulutu" oluşur. LNG sıvı formundan, gaz formuna geçerek buharlaşmaya devam eder ve kütlesi havadan daha hafif olduğu için yükselerek atmosferde dağılır (Bayraktar, 2016).

### 2.2.6.3. Ateşleme ve Yangınlar

LNG tesislerindeki yangın ve patlama tehlikeleri, özellikle yükleme ve boşaltma faaliyetleri de dahil olmak üzere, transferler sırasında sızıntı ve dökülmelerden kaynaklanabilir. Ayrıca herhangi bir ateşleme kaynağının var olması gerekmektedir (Mokhatab ve ark., 2014, s:360).

Tesis tasarımcıları araçlar gibi tutuşturma kaynaklarını, statik elektrik oluşumuyla ilgili kıvılcımları, işlem fırınları gibi ısı kaynaklarını ve yıldırımları en aza indirmeye çalışmaktadır ancak risk değerlendirmeleri tutuşmayı engelleyememektedir. Tutuşma olmazsa, LNG yanıcı sınırların altında seyreltikten sonra hızla buharlaşacak, rüzgâr etkisi olmasa bile atmosferde yayılacak ve sonuç olarak yaralanmaya yol açmayacaktır (Mokhatab ve ark., 2014, s:360).

LNG buhar bulutunun su buharından yoğunlaşmış nem içermesi sebebiyle, kısmen tutuşması kolay değildir. Yapılan çalışmalar, birkaç bulut yangınının kendi başına söndüğünü göstermiştir (MIACC, 2007). Doğal gaz, diğer çoğu yakıttan daha yüksek olan 540°C kendiliğinden tutuşma sıcaklığına sahiptir.

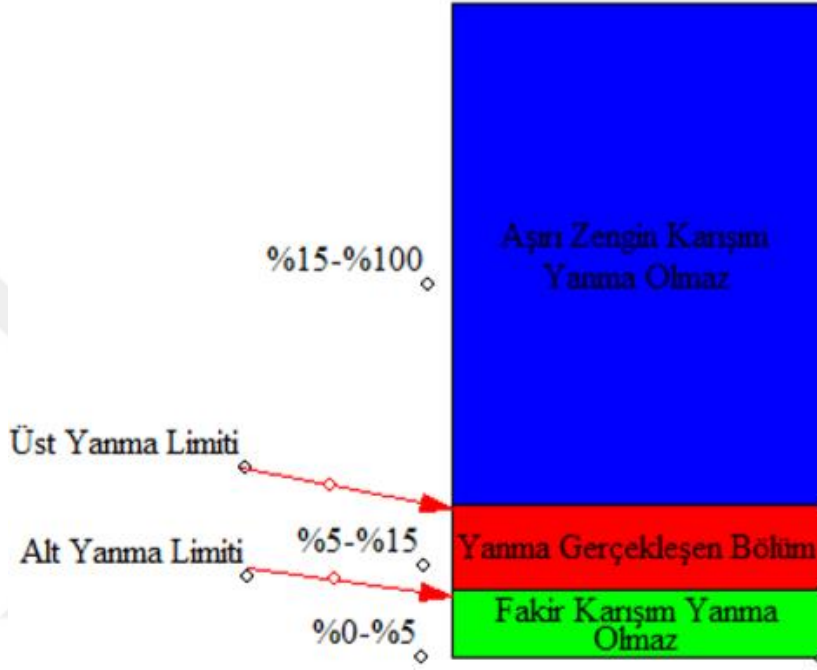
LNG herhangi bir kaynakla ateşlenirse, dört potansiyel yangın riski senaryosu sunar:

- Buhar Bulutu Patlaması (Vapor Cloud Explosion- VCE)
- Buhar Bulutu Flaş Yangını (Vapor Cloud Flash Fire)
- Jet Yangını (Jet Fire)
- Havuz Yangını (Pool Fire)

#### 2.2.6.3.1. Buhar Bulutu

Gaz halindeki doğal gazın kazara salımı veya dökülmesi, gaz bulutunun evrimine ve dağılmasına yol açar. Bu gaz bulutunun şekli ise, bulunduğu topografya, atmosferik koşullardan, gaz salımının türünden ve oranından etkilenmektedir (Sheets, 2018).

Metan, doğal gazın temel bileşenidir. LNG sıvı formunda patlayıcı değildir. LNG buharı (gaz şekline geçtiğinde) yalnızca kapalı alanda %5-%15 yanma aralığında patlayabilme özelliğindedir (Bahadori, 2014). LNG buharı %5 ve daha az metanla oluşursa, bu metanın yanması için yeterli olmaz. Diğer taraftan eğer LNG buharında %15'ten fazla metan bulunursa, bu sefer de gazın tutuşması için yeterli oksijen bulunmaz ve yanma olayı yine gerçekleşmez (Şekil 17) (Bayraktar, 2016 ve Foss, 2012).



Şekil 17:LNG'nin yanma düzeyleri (Bayraktar, 2016)

Bir LNG buhar bulutunun yanıcı bölgesi (havadaki %5 ila %15 gaz konsantrasyonunda), genellikle beyaz bir su buharı bulutu ve soğuk LNG buharından yoğunlaşan buz kristalleri bulutu olarak görülür (Mokhatab ve ark., 2014, s:360). Buradan çıkan buhar bulutunun başlangıçta sıcaklığı-161.7°C civarında ve kütlesi havadan ağırdır (Mokhatab ve ark., 2014, s:360). Buhar bulutu herhangi bir yüzeye yayıldığında, bir tutuşma kaynağına rastlama olasılığı havadakinden daha fazladır. Buhar bulutu bir etken vasıtasıyla tutuşmadığı takdirde, negatif yüzdürme nedeniyle yayılmaya başlar. Bulut yayıldıkça, hava sıcaklığından etkilenerek ısınmaya başlar ve görünür olmaktan çıkabilir. -110°C'nin üzerine kadar ılıtıldığında, pozitif bir şekilde yüzer (Mokhatab ve ark., 2014, s:360).

LNG buharı renksiz, kokusuz, düşük kaynama noktalı hafif hidrokarbonlardan (çoğunlukla metan, etan, propan, bazı nitrojenlerden) oluşur. Buharları toksik olmamasına rağmen, sınırlı bir alanda oksijeni yer değiştirdikleri zaman boğucu olabilir (Mokhatab ve ark., 2014, s:360).

Patlama ve yangın risklerini saptayabilmek için, 'alev noktası' ve 'ateşleme noktası' en önemli başlıklardır. Parlama noktası -188°C olan metanda, ateşlemenin ortaya çıkması dizel ve benzine kıyasla çok daha büyük bir alev topuna neden olabilmektedir (Bayraktar 2016).

#### **2.2.6.3.2. Buhar Bulutu Patlamaları**

Buhar bulutu patlamaları, (Unconfined Vapor Cloud Explosion – UVCE), atmosferde yanıcılık sınırları içindeki gaz bulutunun (%5-%15) bir enerji ile karşılaşması sonucu oluşan ani yanma veya patlama ile sonuçlanan olaydır (Claudio, 2016). Bu durumda gazlar ve buharlar sınırlandırılmaz ve enerjinin büyük bir kısmı ısı olarak açığa çıkar. Örnek olarak, belli bir alanda birikmiş olan gazın, herhangi bir ateş kaynağı ile teması sonucu aniden patlaması (evde gaz kaçağı sonrası gaz bulutunun patlaması vs.) verilebilir ve UVCE tehlikeli ve şiddetli bir patlama türüdür.

Özellikle 2 Boyutlu (çift düzlemlili konfigürasyonlar) ve 3 Boyutlu (yoğun engel) ortamları için patlama meydana getirmek üzere önemli bir hızda alev yayılmalıdır. Bu hızlara ulaşmak için ya alev hızlanması ya da bulutun çok güçlü bir şekilde tutuşturulması ve böylece doğrudan patlamanın başlatılması gerekir. Alev hızlanmasının mümkün olduğu durumlar şu şekilde sıralanabilir;

- Açık hava engelleri varlığında (örneğin boru rafları, hava kanopileri, tanklar, proses kolonları ve çok seviyeli proses yapılarından kaynaklanan tıkanıklık durumları)
- Türbülansa neden olan, bir salınım varlığında (örneğin patlayıcı bir şekilde dağılmış bulut veya jet salınımına neden olan yüksek momentumlu bir salınım)
- Yüksek momentum salınımları ve tıkanıklık kombinasyonlarında. (Claudio, 2016).

### **2.2.6.3.2.1 Erken Patlama**

Herhangi bir ani salımdan erken bir patlama meydana gelebilir. Bulut dağılmaya başlamadan önce, sürümün başında gerçekleşir. Patlamanın ana sonucu aşırı basınçtır (bar). Patlamanın etki bölgeleri, serbest bırakma noktasında ve hava koşullarından bağımsız olarak bir daire veya elips şeklinde sunulur (Shetts, 2018).

### **2.2.6.3.2.2 Geç Patlama**

Buhar bulutu LFL'nin altında seyreltilmeden önce (%4) ateşlenirse geç patlama veya buhar bulutu patlaması (VCE) oluşabilir. VCE'nin patlamasının merkezi, ateşleme anında serbest bırakılma merkezinden aşağı doğru rüzgâr noktasındaki bulut merkezidir. Tank yırtılmalarından kaynaklanan aşırı basınç anlık olarak maksimum tepe aşırı basıncına yükselir ve daha sonra mesafe arttıkça azalır. (Shetts, 2018)

### **2.2.6.3.2.3. Flaş Yangını**

Parlama ateşi, hava ile karıştırıldıktan sonra bir tutuşma kaynağına ulaşan yanıcı bir malzemenin kaçmasından kaynaklanan bir buhar bulutunun yanmasıdır. Bu olaylar nispeten kısa süreli, yüksek düzeyde radyasyon üretebilirler (Pierruchi, 2011).

Flaş yangınlarının, alevler içindeki herhangi biri için ciddi sonuçlar doğurabileceği kabul edilmektedir (MIACC, 2007), ancak bulutun yanıcı halkası dışında kalan alanda maruz kalma riski düşüktür (Mokhatab ve ark., 2014, s:360).

### **2.2.6.3.2.4. Jet Yangını**

Bir depolama tankında, basınç altında delikten boşalan tutuşmuş olan sıvı, buhar veya iki fazlı bir karışım jet yangını meydana getirecektir. Jet yangını ciddi hasara neden olabilir, ancak yerel bir bölgeyle sınırlandırılabilir.

LNG depolama tankı için malzeme basınç altında depolanmadığından dolayı olası değildir (hidrolik kafa basıncı hariç). Fakat jet yangınları basınçlı LNG buharlaştırıcılarından, izolasyon valflerinde pompa basıncı tahliyesi sırasında ortaya çıkabilir (Mokhatab ve Ark.,2014, S:360).

#### **2.2.6.3.2.5. Havuz Yangını**

Havuz yangını, sıvılaştırılmış doğal gaz, benzin, jet yakıtı vb. yanıcı bir sıvı havuzundan üretilen buharın kontrolsüz yanmasıdır (Mokhatab ve Ark.,2019, S:361). Havuz yangın özellikleri büyük ölçüde yakıt özelliklerinin, havuz çapının ve rüzgâr hızının bir fonksiyonu olan yakıt kütlesi yanma oranına bağlıdır. Havuz yangın karakteristiklerini hesaplamak için iki tip model mevcuttur: analitik modeller ve sayısal modeller. Nokta kaynağı modeli (Point Source Modelling) ve katı alev modeli (Solid Flame Model), uzun süre yangın radyasyonu tehlikesini analiz etmek için kullanılan iki analitik model örneğidir.

Nokta kaynaklı termal radyasyon modelleri, alevin tek noktalı bir termal enerji kaynağı olduğu ve termal radyasyon yoğunluğunun mesafenin karesiyle ters orantılı varsayımına dayanmaktadır. Nokta kaynağı modeli alevden daha büyük mesafelerde radyasyonu tahmin edebilir, ancak daha yakın mesafelerde termal radyasyonu hafife alır. Bunun nedeni termal radyasyonun tek nokta kaynağı olarak kabul edilmesine karşın, daha yakın mesafelerde alev radyasyonu alevin büyüklüğüne, şekline ve yönüne bağlıdır (Mokhatab ve Ark.,2019, S:361).

### **2.3. LNG Buharı Üretimi, Dağılımı ve Deneysel Çalışmaları**

LNG buharı üretimi 1970'lerin başlarında laboratuvarlarda araştırılmaya başlamıştır. Bu araştırmalar (Ikealumba ve ark., 2014, s:3564), kıyaslama için deneysel verilerin toplanması ve bilgisayar modellerinin geçerliliği için temel amaçlarla gerçekleştirilmiştir.

Meteorolojik parametreler (sıcaklık, nem, rüzgâr hızı, türbülans, güneş ısı akısı vb.) ve gaz parametreleri (sıcaklık, konsantrasyon, toprak ısı akısı dahil) dikkate alınarak kapsamlı ölçümler yapılmıştır.

Karada veya suda LNG dökülmeleri her boyuttan değişebilir. Zaman zaman, beklenen sızıntı büyüklüğü veya koşulları deneysel olarak çoğaltılamaz ve bu, LNG sızıntılarının özelliklerini simüle etmek, incelemek ve anlamak için, buhar üretimine, dağılmaya ve / veya yanmaya yol açan matematiksel modellerin kullanılmasına yol açmıştır (Ikealumba ve ark., 2014, s:3564).

## **2.4 Safeti Yazılımı**

SAFETI yazılımı, olasılık dahilinde bir yaklaşım için sonuç hesaplamalarını kullanılan bir kantitatif risk değerlendirme (QRA) yazılımıdır. Safeti, sonuçların net bir şekilde anlaşılmasını sağlayan, etki haritalarına etki aralıklarının uygulanmasına izin veren görselleştirme araçları içermektedir. Kapsamlı modelleri kullanarak, belirli bir madde için dağılım, deşarj, yanıcı, patlayıcı ve toksik etkiler dahil olmak üzere kaza senaryolarını hızlı ve kolay bir şekilde simüle edebilmektedir (Arnet,2014).

### **2.4.1. Kantitatif Risk Değerlendirmesi**

Kantitatif Risk Değerlendirmesi (QRA) yöntemi, tehlikeli madde sızıntısı durumunda, risk mesafelerinin hesaplanmasında kullanılan bir yaklaşımdır. QRA kullanılarak risk mesafesi modellenir. QRA sonuç tahminlerini ve salım miktarını, salım işlem sürecini (tank veya proses ekipmanı), operasyonel prosedürleri ve ateşleme olasılığını, salımdan sonraki zamanın bir fonksiyonu olarak dikkate alır. Belirli bir sistem için çeşitli senaryoların potansiyel etkisini ve bunların ortaya çıkma olasılığını hesaplayarak, insan hayatı üzerindeki riskleri hakkında fikir vermektedir (Arnet, 2014).

## 2.4.2. Risk Analizi

Safeti Programında var olan Risk Analizi metodunda incelenen olası senaryolarının tüm varsayımları, belirsizlikleri, modelleme seçimleri ve hesaplama parametre ayarları belgelenmektedir (Arnet, 2014).

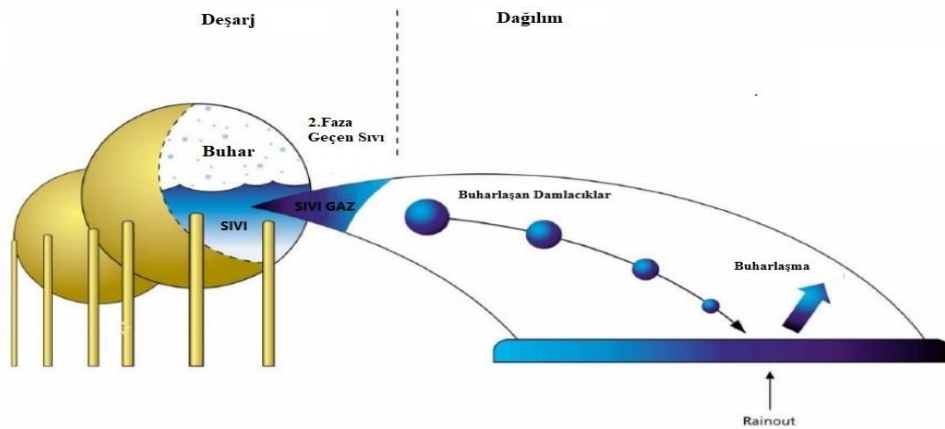
## 2.4.3. Frekans Analizi

Bir sistemin veya sürecin tehlikeleri tanımlandıktan sonra, kantitatif risk değerlendirmesi ve analizinden sonraki adım olan Frekans Analizi tehlikeli olayların meydana gelme sıklığını tahmin etmektir. Seçilen teknik ve kullanılan araçlar, geçmiş verilerin ve istatistiklerin kullanılabilirliğine bağlıdır (Arnet, 2014).

Bu çalışmadaki senaryomuzda tehlikeli olayın meydana gelme sıklığı yılda bir defa (1/year) olarak alınmıştır.

## 2.4.4. Sonuç Modelleme Analizi

Sonuç modelleme analizi (consequence analysis), kazaların meydana gelmesi durumunda ortaya çıkan etkileri ile bunların personel ve sistem üzerindeki etkilerini değerlendirir. Ortaya çıkan herhangi bir yangının sonucu, büyük ölçüde sızıntı senaryosunun tipine ve tahliye sırasındaki basınç, sıcaklık işlem koşullarına bağlıdır.



Şekil 18: 2 yönlü LNG Boşalması (Arnet,2014)



Şekil 18'de LNG'nin iki fazlı bir salımını göstermektedir:

Kazara oluşan salım, basınç nedeniyle jet akışı oluşturmaktadır. Bazı damlacıklar kısmen buharlaşırken, geri kalan sıvı LNG havuzunu oluşturmaktadır (Arnet, 2014).

Sonuç modellemesi; deşarj, dağılım, yangın ve patlama hesaplamaları olarak 4 başlığı içermektedir. Bu çalışmada modelleme araçlarından dağılım, yangın ve patlama hesaplamaları kullanılarak elde edilen sonuçların, ortaya çıkan personel, ekipman, yapı veya çevre üzerindeki etkileri, sonuç modelleme analizinde incelenmiştir.

#### **2.4.4.1. Deşarj hesaplamaları**

Deşarj hesaplamaları, ortamı basınçsızlaştırma da dahil olmak üzere, LNG için salım karakteristiklerini ayarlamak amacıyla yapılmaktadır. Modellenen senaryolar sızıntı senaryoları listesi tarafından tanımlanır. Dikkate alınması gereken sızıntı senaryoları, depolama sistemi tarafından tanımlanan hem basınçlı hem de basınçlı olmayan salımlardır (Arnet, 2014).

#### **2.4.4.2. Dağılım Hesaplamaları**

Dağılım hesaplamaları bulut, rüzgâr yönünde ilerlediğinde gaz konsantrasyonlarını belirleme amacıyla yapılmaktadır. Seçilen modellemenin jet, ağır gaz ve pasif dağılımının etkilerini açıklayabilmesi gerekir. İki fazlı bir salım olması durumunda, rainout<sup>1</sup> meydana gelebilir. Havuz oluşumu, yayılması ve buharlaşması buna göre modellenmektedir (Arnet, 2014).

Dağılım modellemesi, bir kaynaktan çeşitli mesafelerde kirletici madde konsantrasyonunun zemin seviyesinde tahmin edilmesi için bir yöntemdir. Modelleme, kirletici dağılımını etkileyen faktörlerin matematiksel temsillerini kullanan genel bir tekniği ifade eder. Bilgisayarlar, hava kirleticilerinin taşınmasından ve dağıtılmasından sorumlu karmaşık sistemlerin bilim adamlarına modellenmesine yardımcı olmak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Dipnot 1: Rainout, radyoaktif parçacıkların atmosferden zemine çıkarılmasına neden olan ve [1] yağmurla nükleer serpinti oluşturan yağış sürecidir. (<https://en.wikipedia.org/wiki/Rainout>)

#### **2.4.4.3. Yangın Hesaplamaları**

Yangın hesaplamaları, nihai risk seviyesi sonuçlarını üretmek için yapılır. Hesaplama, deşarj ve dağılım etkileri ile birlikte ateşleme olasılığını da dikkate almaktadır (Arnet, 2014).

#### **2.4.4.4. Patlama Hesaplamaları**

Patlama hesaplamaları, sistem kısmen veya tamamen kapalı alanlarda bulunuyorsa, gerekli hesaplamaların bir parçasıdır (Arnet, 2014).

#### **2.4.4.5. Termal – Radyasyon Hesaplamaları**

Havuz yangını, LNG'nin kazara serbest bırakılmasının ardından ortaya çıkabilecek potansiyel bir olaydır. Buharlaşan LNG havuzunun üzerinde büyük, parlak, difüzyon alevin oluşur. Büyük yangınlardan yayılan ısı, yakındaki insanlar ve nesnelere için önemli bir tehlike oluşturmaktadır. Düşük rüzgarda, 35 m çapında bir LNG havuzunun üzerindeki alev yaklaşık 70 m yüksekliğinde ve 6-7 Giga Watt'lık bir yanıcı güç açığa çıkarır. Bu gücün yaklaşık% 25'i termal radyasyon olarak yayılacaktır (Johnson, 2000).

LNG boru hattından salınan gazın termal radyasyon etkileri ve müteakip yangın ve patlama insanlar için zararlı veya öldürücüdür. Her bir tehlikenin etki mesafesini değerlendirmek için özel hasar kriterleri gereklidir. Tablo 2'de gösterildiği gibi Çin Güvenlik Bilimi ve Teknolojisi Akademisi tarafından yapılan termal radyasyon kriterinin araştırma sonuçlarına göre, bu termal radyasyon değerleri 1.6 ila 37.5 kW / m<sup>2</sup> arasında değişmekte ve beş zararlı seviye ile sınıflandırılmaktadır.

**Tablo 2: Termal Radyasyon seviyeleri için öngörülen zarar seviyeleri**

<b>Termal Radyasyon Yoğunluğu (kW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Yaralanma Tipi</b>	<b>Zarar Tipi</b>	<b>Zararlılık Derecesi</b>
>37,5	Ölüm	Tüm operasyonel ekipmanlar tamamen yok edilmiştir	Ölümcül
25	3. derece yanık	Ağaç/Odun Alevlenir	Şiddetli
12,5	2. derece yanık	Plastik erir	Orta
4,0	1. derece yanık		Hafif
<1,6	Güvende		Güvende

#### **2.4.5. Envanter Girdileri**

Safeti yazılımı'nda, envanter sekmesine risk senaryosu ile ilgili veri girişi yapılır. Bu veri girişleri simülasyon değerlerini ve sonuçlarını etkileyeceği için değerler önceden belirlenmelidir. Girilen verinin materyal tipi, kap kütlesi, hacmi, başlangıç sıcaklığı, başlangıç basınç değerleri ile senaryo girdisi olarak, tank başlığı verileri girilir.

#### **2.4.6. Sonuç Modellemesi**

Kaza sonucu zehirli veya yanıcı kimyasalların atmosfere salınmasının modellemesine 'sonuç modellemesi' denir. Sonuç modellemesi, sırayla aşağıdaki üç adımı içerir:

İlk olarak 'deşarj hesapları' yapılmaktadır. Deşarj hesapları, tehlikeli kimyasalın bırakma özelliklerini ayarlamak için yapılır. Modellenebilecek senaryolar; gemi ya da

depodan (sızıntılar veya katastrofik rüptürler), kısa veya uzun borulardan ve depo yangını sonucu salınan maddeleri içerir. Serbest bırakılan maddeler arasında, alt soğutmalı sıvı, aşırı ısıtılmış sıvı veya buhar salınımları bulunur. Serbest bırakılan maddeler ayrıca, basınçsız veya basınçlı bırakmalar ve sürekli, zamanla değişen veya anlık bırakmalar olarak da kabul edilir.

İkinci olarak, bulut rüzgâr yönünde hareket ettiğinde tehlikeli kimyasal konsantrasyonlarını belirlemek için dağılım hesaplamaları yapılır. Dağılım hesaplamaları jet, ağır gaz ve pasif dağılımın etkilerini içerir. İki fazlı bir salınım durumunda, rainout meydana gelebilir ve havuz oluşumu/yayılması ve yeniden buharlaşma modellenir.

Son olarak toksik veya yanıcı hesaplamalar yapılır. Yanıcı maddeler için ateşleme jet yangınlarına (basınçlı yanıcı salımlar), ateş toplarına (anlık salımlar), havuz yangınlarına (yağmur sonrası) ve buhar bulutu yangınlarına veya patlamalarına yol açabilir. Radyasyon hesaplamaları yangınlar için yapılırken, aşırı basınç hesaplamaları patlamalar için yapılır. Her olay için ölüm olasılığı, toksik veya yanıcı probit<sup>2</sup> fonksiyonları kullanılarak belirlenir (Witlox ve ark., 2010).

Dipnot2: Probit, İstatistiklerde, bir probit modeli, bağımlı değişkenin sadece iki değer alabileceği bir regresyon türüdür.( [https://en.wikipedia.org/wiki/Probit\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Probit_model))

## 3.GEREÇ VE YÖNTEMLER

### 3.1. Araştırmanın Tipi ve Modeli

Patlama ve yayılım mesafelerini hesaplamak için SAFETİ programının matematiksel hesaplamalar yapması ve sayısal sonuçlar elde edilmesinden dolayı Nicel Araştırma Yöntemi olarak belirlenmiştir.

SAFETI yazılımı dünyanın en çok kullanılan risk modelleme araçlarından biridir. İlk sızıntı noktasından, tehlikeli maddenin yayılmasına, patlama ve toksisite etkilerinin analizine kadar potansiyel kazaların gelişimini değerlendirmek için tasarlanmıştır (Pasculescu, 2019).

Safeti Yazılımında, kaza senaryolarının sonuç modellemesini inceleyebilmek için birtakım önemli kritik giriş maddeleri bulunur;

- En kritik giriş parametrelerinden biri hava koşulları ile temsil edilir. Meteorolojik kararlılık, mevsim sıcaklıkları, nem, rüzgâr hızı ve yönü bu tür kazaların modellenmesinde çok önemli bir role sahiptir. Bununla birlikte, risk değerlendirmesi, kazaların hesaplanması modellemesi sırasında da önemli bir faktör olan ilgili malzeme miktarı ve türünden büyük ölçüde etkilenmektedir (Pasculescu, 2019). SAFETI yazılımı, Pasquill'in sınıflarını meteorolojik istikrar için girdi olarak kullanır (Tablo 3) (Ivanka Zheleva, 2014).
- En eski ve uzun yıllar boyunca, mevcut atmosferik türbülans miktarını sınıflandırmak için en yaygın kullanılan yöntem, 1961'de Pasquill tarafından geliştirilen yöntemdir.
- Atmosferik türbülansı A çok dengesiz, B dengesiz, C hafif dengesiz D nötr, E biraz dengeli ve F çok dengeli anlamına gelen altı stabilite sınıfına ayırdı. A sınıfı en dengesiz veya en çalkantılı sınıf ve F sınıfı en kararlı veya en az türbülanslı sınıftır (Pasculescu, 2019 ve Ivanka Zheleva, 2014). Tablo 3, Pasquill – Gifford Stabilite Sınıflaması'nı ve Tablo 4 her sınıfı tanımlayan meteorolojik koşulları göstermektedir (Ivanka Zheleva, 2014).
- Sonuç modellemesini gerçekleştirmek için önemli bir diğer faktör, olaya karışan malzemenin miktarını ve niteliğini tahmin etmektir (Pasculescu, 2019).

**Tablo 3:Pasquill – Gifford Stabilite Verileri (Ivanka Zheleva, 2014)**

Pasquill Kararlılık Sınıfları	Açıklama	Rüzgâr hızı ve bulut örtüsü Metre yüksekliğinde ölçülen rüzgâr (metre / saniye)
A	Çok Dengesiz	Gündüz: güçlü güneş ve rüzgâr <3m/s veya orta güneş ve rüzgâr <2m/s
B	Dengesiz	Gündüz: güçlü güneş ve rüzgâr yaklaşık 3 ve 5 m/s arasında ya da orta güneş, rüzgâr 2 ve 4 m/s arasında ya da hafif güneş, rüzgâr <2m/s
C	Hafif Dengesiz	Gündüz: güçlü güneş, rüzgâr >5m/s ya da orta güneş, rüzgâr 4 ile yaklaşık 5,5m/s ya da hafif güneş, rüzgâr 2 ve 5m/s
D	Nötr	Tüm hava koşulları gündüz ya da gece: gündüz ve orta güneş ve rüzgâr >5,5m/s; gündüz ve hafif güneş ve rüzgâr >5m/s; gece ve rüzgâr >5m/s; gece ve bulut %50'den fazla ya da hafif bulutlu ve rüzgâr >3m/s
E	Hafif Stabil	Gece; hafif bulutlu ya da %50'den fazla bulutlu ve rüzgâr <3m/s; %50'den az bulutlu ve rüzgâr 3 ile 5m/s arasında
F	Stabil	Gece; %50'den az bulutlu ve rüzgâr <3m/s

**Tablo 4: Pasquill – Gifford Stabilite Sınıflaması meteorolojik koşulları**

Kararlılık Sınıfları	Açıklama	Kararlılık Sınıfları	Açıklama
A	Çok Dengesiz	D	Nötr
B	Dengesiz	E	Hafif Stabil
C	Hafif Dengesiz	F	Stabil

Rüzgâr Hızı		Gündüz Gelen Güneş Radyasyonu			Gece Bulut Örtüsü	
<2	<5	A	A-B	B	E	F
2-3	5-7	A-B	B	C	E	F
3-5	7-11	B	B-C	C	D	E
5-6	11-13	C	C-D	D	D	D
>6	>13	C	D	D	D	D

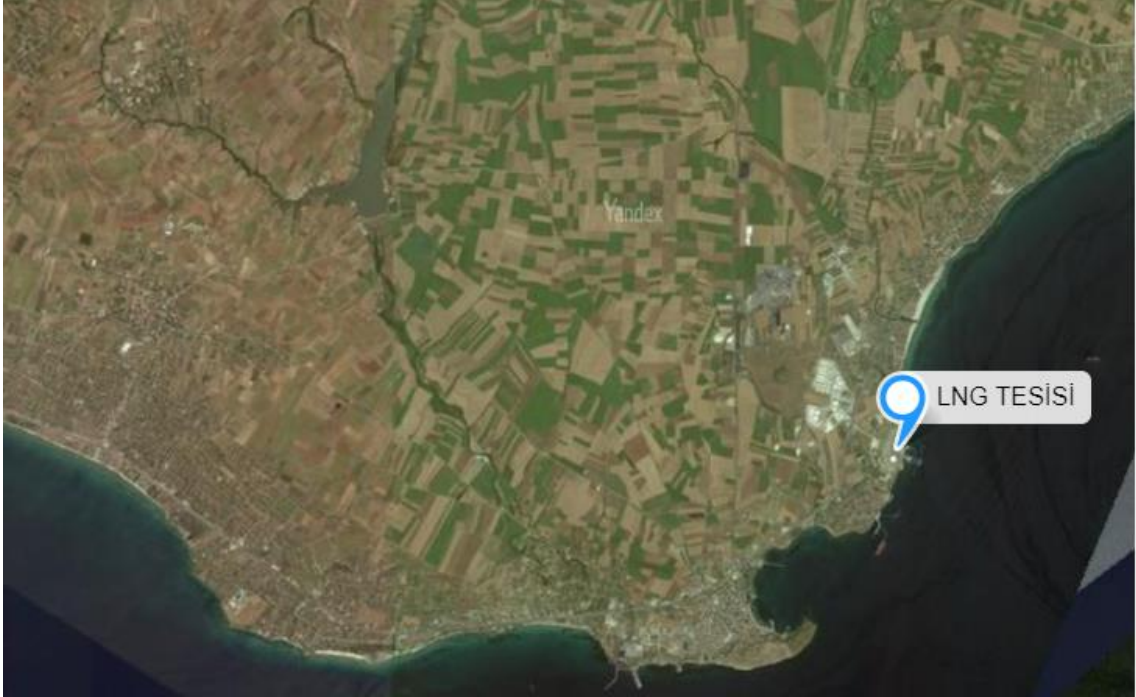
Yukarıda bahsedilen önemli kritik faktörler, Safeti yazılımına girildikten sonra program tarafından yapılan hesaplamalar ve üretilen veriler, analizin gerekliliklerine bağlı olarak GIS (Geographical Information Systems – Coğrafi bilgi sistemi) grafikler veya raporlar gibi çeşitli formlarda görüntülenmektedir (Pasulescu,2019).

Bu çalışmadaki senaryomuz; atmosferik LNG depolama tankının, katastrofik patlama simülasyonunu içermektedir. Safeti programı, patlama hesaplamalarını, bu modelleme üzerinden yapmaktadır. Bu çalışmanın yöntemi, GIS bilgisi girildikten ve hava koşulları belirlendikten sonra, sırasıyla şu işlemleri içermektedir:

- “Atmosferik Depolama Tankı” bilgileri şu şekilde girilmiştir:
  - Depolanan kimyasal: Metan
  - Hacim bilgisi: 85000m<sup>3</sup>
  - Tank Başlığı: 90 m
  - Modele göre risk etkilerinin türü: Sadece Alevlenebilir
  - Sıcaklık Değeri: -162°C
  - Doğu: 5380,41m
  - Kuzey: 848,154 m
  
- Senaryomuzda, modele etki edecek “Risk Etmenleri” şu şekilde girilmiştir:
  - Jet ateşi modellemesi seçilmiştir.
  - Ateş topu riski dahil edilmiştir.
  - Tüm toksik modellemeler
  
- Modele etki edecek “Durgunluk Verileri”
  - Başlangıç Basıncı (gösterge): 0 bar
  - Başlangıç Sıcaklığı: -162oC
  - Sıvı Durumu: Atmosferik basınçta sıvı
  
- Modele etki edecek “Hava Koşulları”
  - 1,5D: Rüzgâr hızı 1,5 m/s – Normal Koşullar
  - 1,5F: Rüzgâr Hızı 1,5 m/s – Stabil Koşullar
  - 5 D: Rüzgâr Hızı 5 m/s – Normal Koşullar

### 3.2. Araştırmanın Yeri, Zamanı ve Evreni

Bu çalışma, Türkiye’de Marmara bölgesinde bulunan bir LNG tesisi incelenerek modellenmiştir. Çalışma için gerekli izinlerin verilmemiş olmasından dolayı çalışmada kullanılan veriler tahmini olmakla beraber literatür araştırmaları neticesinde elde edilerek kullanılmıştır.



Şekil 19: Çalışmanın Evreni

Şekil 19’da belirtildiği üzere Safeti yazılımı aracılığıyla modellenen ve GIS girdisi olarak kullanılan LNG tesisi, deniz kenarında ve insan popülasyonunun kısmen fazla olduğu (30.000 kişi) bir yerde konumlandırılmıştır. Bu çalışmada tesiste bulunan LNG tankının olası patlama sonucu çevreye vereceği potansiyel zararlar ve patlamanın etkisi incelenmiştir.



## 4.BULGULAR

Yanıcı olan ve sıvı halde muhafaza edilmiş olan doğal gazın yanması sonucu ortaya çıkan buharın ya da gazın durumu, dağılım modellemesinde oluşturacağı riskleri gösterir. Doğalgazın yoğunluğu havadan düşük olduğu için faz değişim sonucu yukarı ivmelenecektir. Bu gaz ve buhar yoğunlukları havanın durumuna göre farklılık göstermekle beraber, etki alanı ve şiddetiyle doğru orantılı olarak gelişmektedir.

Safeti programı ile yapılan kaza modellemelerinde, yanıcı ve patlayıcı madde olan metan, doğal gaz bileşiğinin %90'nını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, Safeti programı kullanılarak, 85.000 m<sup>3</sup> lük sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) hacmine sahip bir depolama tankında oluşabilecek *katastrofik patlama* modellemesinde, olasılıklar dahilinde ortaya çıkabilecek tüm koşullar, patlamanın etkisi, patlamanın mesafesi, patlama ile mesafe ilişkisi, patlamayla oluşacak ani yangın ve yangının mesafesiyle zaman ilişkisi, yangın havuzu, buharlaşma oranları yanı sıra oluşabilecek radyasyon seviyeleri ve etkileri göz önünde bulundurularak risk değerlendirmeleri aşağıdaki iki modelleme (Dağılım Risk Değerlendirmesi ve Katastrofik Patlama Risk Değerlendirmesi) üzerinden, üç farklı hava koşulunda (1,5 km/s rüzgar hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgar hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgar hızı, normal hava koşulunda (5/D)) hesaplanmış, bu hesaplamalar grafikler yardımıyla analiz edilmiş ve bu analiz sonuçlarından yola çıkarak, çevre popülasyonun ve yapıların nasıl ve ne kadar etkilendikleri incelenmiştir.

### 1) Dağılım Risk Değerlendirmesi

- a) Bulut konsantrasyon değerlerinin, zaman ve mesafe ilişkisi
- b) Bulut konsantrasyon değerlerinin maksimum konsantrasyon ve mesafe ilişkisi

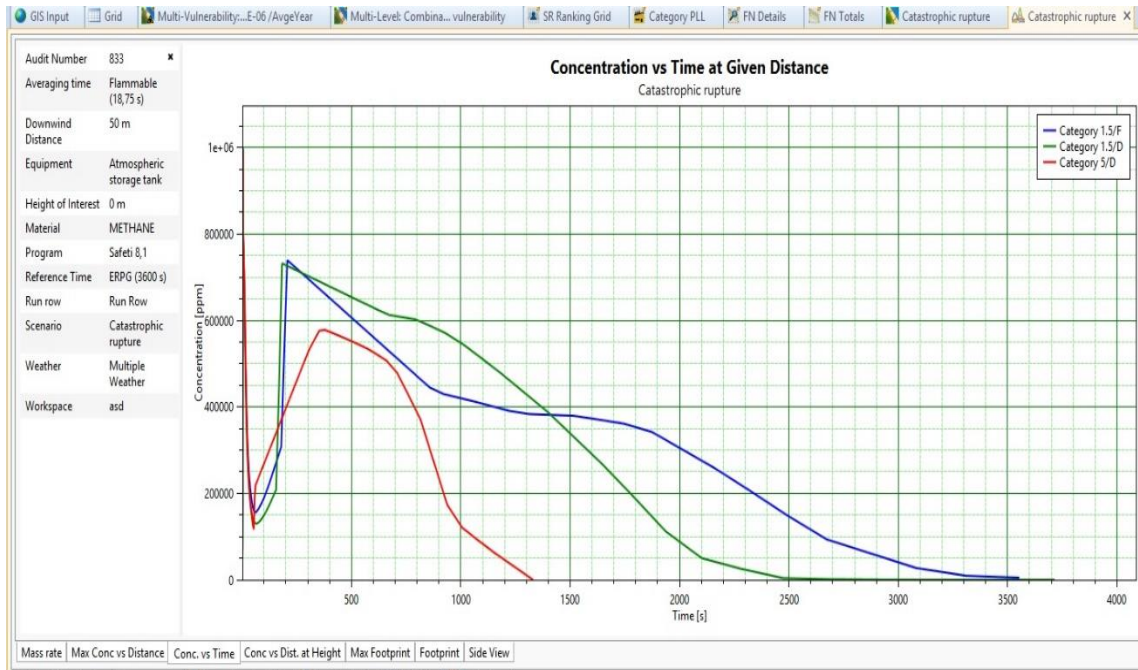
### 2) Katastrofik Patlama Risk Değerlendirmesi

- a) Flaş Ateşi Kuşatması
- b) Aşırı Basınç Patlaması- Mesafe İlişkisi
- c) En Kötü Senaryo Patlaması
- d) Havuz Yangını Buharlaşması
  - i) Buharlaşma Hızı ve Zaman İlişkisi
  - ii) Havuz Yarıçapı ve Zaman İlişkisi

- e) Erken Oluşan Havuz Yangınları
  - i) Radyasyon – Mesafe İlişkisi
  - ii) Erken Oluşan Havuz Yangınlarında Mortalite Riski
- f) Geç Oluşan Havuz Yangınları
  - i) Radyasyon Mesafe İlişkisi
  - ii) Geç Havuz Yangınlarında Mortalite Riski
  - iii) Geç Havuz Yangınlarında Olasılık Yarı Çapı
- g) Potansiyel Hayat Kaybı

#### 4.1 Dağılım Senaryosu

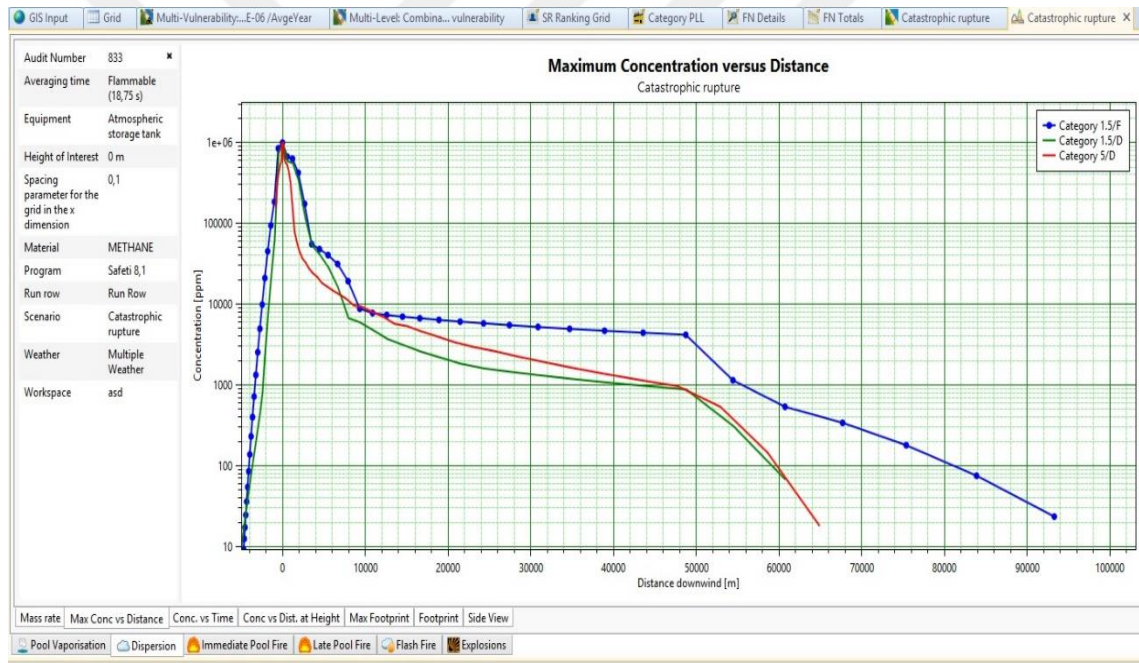
Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>'lük LNG içeren atmosferik depolama tankının dağılım senaryosunda, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) dağılımı sonucu ortaya çıkabilecek bulut konsantrasyon değerlerinin, zaman ve mesafe ilişkisi grafiği Şekil 20'de, maksimum konsantrasyon ve mesafe ilişkisi grafiği Şekil 21'de verilmiştir.



Şekil 20: Bir LNG depolama tankında olası dağılım senaryosunda, konsantrasyon- zaman- mesafe ilişkisi grafiği

Bir LNG depolama tankında, olası dağılım senaryosunda, bulutun merkez hattı boyunca konsantrasyonuna ait zaman-mesafe ilişkisi grafiği, Şekil 20'de gösterilmektedir. Bu grafikte zaman ve rüzgârın etkisiyle, bulut konsantrasyon değerlerinin değişimi görülmektedir. Rüzgâr hızının 1,5 km/s stabil hava koşulu (mavi çizgi) olduğunda; bulut konsantrasyon değeri ~200. sn'de ~730000 ppm yoğunluktan, ~3500. sn'de sıfırlandığı görülmektedir.

Rüzgâr hızının 1,5 km/s normal hava koşulu (yeşil çizgi) olduğunda; bulut konsantrasyon değeri ~200. sn'de ~730000 ppm yoğunluktan, ~2500. sn'de sıfırlandığı görülmektedir. Rüzgâr hızının 5 km/s stabil hava koşulu (kırmızı çizgi) olduğunda; bulut konsantrasyon değeri ~200. sn'de ~570000 ppm yoğunluktan, ~1350. sn'de sıfırlandığı görülmektedir.



**Şekil 21: Bir LNG depolama tankında olası dağılım senaryosunda, maksimum konsantrasyon – mesafe ilişkisi grafiği**

Şekil 21'de, bulut içindeki LNG salımının metan için hesaplanmış maksimum konsantrasyon-mesafe ilişkisi grafiği gösterilmektedir. Dış sınır, LFL (düşük yanıcılık limiti- lower flammability level) konsantrasyonunun, LFL fraksiyonunu göstermektedir.

**Tablo 5: Bir LNG depolama tankında olası dağılım senaryosunda, rüzgâr yönünde metan konsantrasyonları**

Yol	Senaryo	Hava	Materyal	İzlenecek Malzeme	İlgili Kons. [ppm]	Seçilen Ort. Zaman	Metan konsantrasyonuna rüzgâr yönündeki mesafesi [m]
Atmosferik Depolama Tankı	Katastrofik Yırtılma	Kategori 1,5/F	Metan	Metan	10	Yanıcı	60296,70
		Kategori 1,5/D	Metan	Metan	10	Yanıcı	60671,10
		Kategori 5/D	Metan	Metan	10	Yanıcı	54017,90

Tablo 5’te, bir LNG depolama tankında olası dağılım senaryosunda metan konsantrasyonunun rüzgâr yönündeki mesafesi ile ilgili bilgiler, Safeti yazılımından raporlanmıştır. Rüzgâr hızı 1,5 km/s ve stabil hava koşulunda (1,5/F) rüzgâra yönünde mesafenin 60296,7 m olduğu, rüzgâr hızı 1,5 km/s ve normal hava koşulunda (1,5/D) rüzgâra yönünde mesafenin 60671,1 m olduğu, rüzgâr hızı 5 km/s ve normal hava koşulunda (5/D) rüzgâr yönünde mesafenin 54017,9 m olduğu görülmektedir.

**Tablo 6: Bir LNG depolama tankında olası dağılım senaryosunda, metan konsantrasyonu LFL fraksiyon- maksimum mesafe**

Yol	Senaryo	Hava	Mesafe UFL [m]	Mesafe LFL [m]	Mesafe LFL fraksiyon [m]
Atmosferik Depolama Tankı	Katastrofik Yırtılma	Kategori 1,5/F	2712,76	4986,05	7628,10
		Kategori 1,5/D	2519,35	4248,79	6124,33
		Kategori 5/D	1185,29	2083,11	4067,86

Atmosferik LNG depolama tankında, olası dağılım senaryosunda, metan konsantrasyonu; rüzgar hızının 1,5 km/s ve stabil hava koşulunda (1,5/F), rüzgar yönünde ki UFL (üst yanıcılık limiti -upper flammability level) mesafesi 2712,76m, LFL mesafesi 4986,05 m ve LFL fraksiyonunun ise 7628,1 m olduğu; rüzgar hızının 1,5 km/s ve normal hava koşulunda (1,5/D), rüzgar yönünde ki UFL mesafesi 2519,35m, LFL mesafesi 4248,79 m ve LFL fraksiyonunun 6124,33 m olduğu; rüzgar hızının 5 km/s ve normal

hava koşulunda (5/D) ise, rüzgar yönünde ki UFL mesafesi 1185,29 m, LFL mesafesi 2083,11 m ve LFL fraksiyonunun ise 4097,86 m olduğu Tablo 6’te görülmektedir.

#### 4.2. Patlama Senaryosu

Safeti yazılımı, depolanan kimyasal yanıcı olduğu sürece mevcut yangın ve patlama modellerini otomatik olarak üreten bir yazılımdır. Bu program kullanılarak oluşturulan katastrofik patlama modellemesinde, 85.000 m<sup>3</sup>’lük LNG içeren depolama tankının, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) katastrofik patlaması sonucu ortaya çıkacak aşırı basınç sevipleri, maksimum mesafeleri ve etki çapları Tablo 5’te gösterilmiştir.

**Tablo 7: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, üç farklı hava koşulunda basınç, mesafe ve çap etkileri**

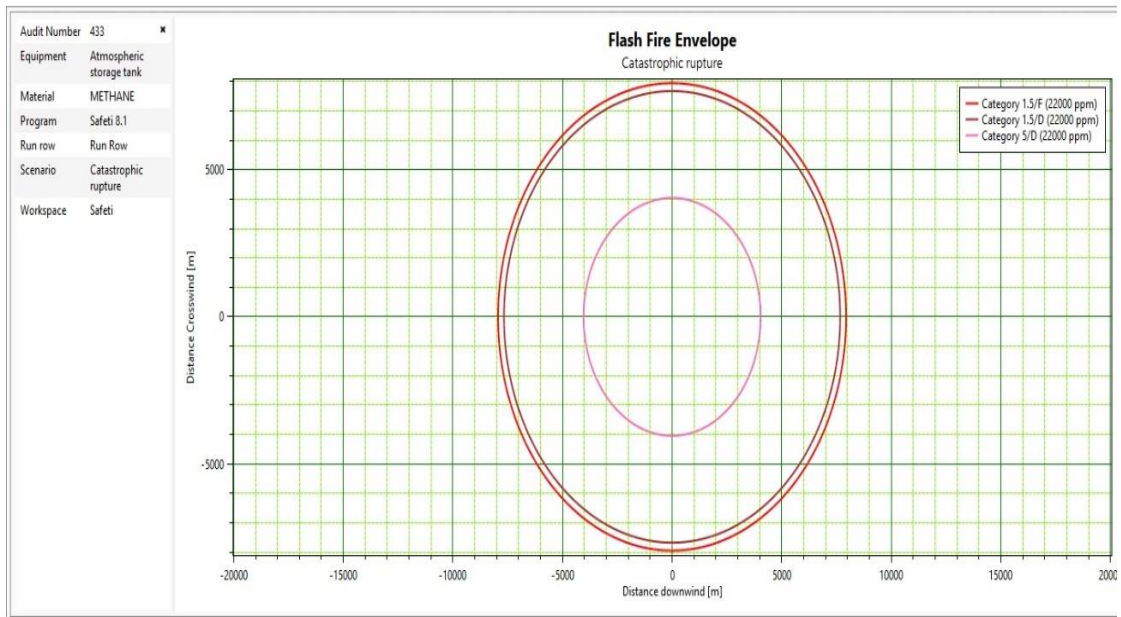
Yol	Senaryo	Hava	Aşırı Basınç Seviyesi [bar]	Maksimum Mesafe [m]	Çap [m]	
Atmosferik Depolama Tankı	Katastrofik Yırtılma	Kategori 1,5/F	0,02	14834,70	16789,40	
			0,13	8869,91	2559,82	
			0,20	8549,63	1919,26	
			Kategori 1,5/D	0,020	14329,80	19379,70
				0,13	7261,58	2723,17
				0,20	6922,86	2025,72
			Kategori 5/D	0,02	11600,70	15821,50
				0,13	5363,89	2907,78
				0,20	5005,95	2071,89

Tablo 7’da bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda; Rüzgâr hızı 1,5 km/s ve stabil hava koşulunda (1,5/F), Rüzgâr hızı 1,5 km/s ve normal hava koşulunda (1,5/D) ve Rüzgâr hızı 5 km/s ve stabil hava koşulunda (5/D):

İncelenen tüm hava koşullarında aşırı basınç seviyesinde artış ile maksimum mesafe ve çap ters orantılıdır. Aşırı basınç seviyesi arttıkça maksimum mesafe azalmakta ve çap daralmaktadır.

#### 4.2.1. Flash Ateşi Kuşatması

Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>'lük LNG içeren atmosferik depolama tankının olası katastrofik patlama senaryosunda, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) patlaması sonucu ortaya çıkacak flaş ateşi (flash fire) kuşatması grafiği Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 22: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, flaş ateşi kuşatması grafiği

Şekil 22'de, daire, serbest bırakma noktasında merkezlenmeye başlar ve daha sonra rüzgâr yönünde bu merkezlenme devam eder. Sürekli salımlar için, flaş ateşi etki bölgesi, bir elips olarak temsil edilen LFL parçasının bulut sınırı olarak alınır (Shetts, 2018). Safeti yazılımının şekil 22'de gösterilen grafik sonucu, tablo 8'de analiz edilmiştir.

**Tablo 8: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, flaş ateşi analiz sonuçları**

Yol	Senaryo	Hava	Rüzgâr Yönünde Mesafe LFL [m]	Rüzgâr Yönünde LFL Fraksiyonu [m]
Atmosferik Depolama Tankı	Katastrofik Yırtılma	Kategori 1,5/F	4986,05	7628,10
		Kategori 1,5/D	4248,79	6124,33
		Kategori 5/D	2083,11	4067,86

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, flaş ateşi analiz sonuçları tablosunda (Tablo ..), rüzgâr hızının 1,5 km/s ve stabil hava koşulunda (1,5/F), rüzgâr yönünde LFL mesafesinin 4986.05 m ve LFL fraksiyonunun 7628.10 m olduğu; rüzgâr hızının 1,5 km/s ve normal hava koşulunda (1,5/D), rüzgâr yönünde LFL mesafesinin 4248.79 m ve LFL fraksiyonunun ise 6124.33 m olduğu; rüzgâr hızının 5 km/s ve normal hava koşulunda (5/D) ise, rüzgâr yönünde LFL mesafesinin 2083.11 m ve LFL fraksiyonunun 4097.86 m olduğu görülmektedir.

**Tablo 9: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, maksimum flaş ateşi – zaman ilişkisi**

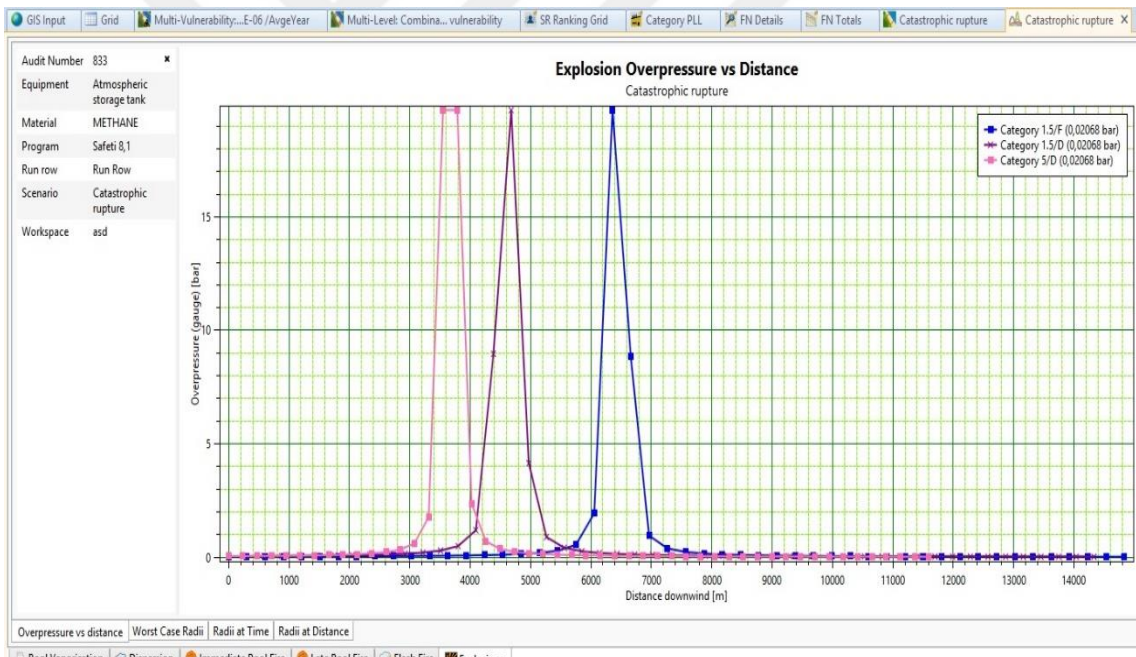
Yol	Senaryo	Hava	Maksimum Flaş Ateşi Mesafesi [m]	Zaman[s]
Atmosferik Depolama Tankı	Katastrofik Yırtılma	Kategori 1,5/F	7598,39	2529,57
		Kategori 1,5/D	6085,48	2269,72
		Kategori 5/D	4078,50	1109,70

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, maksimum flaş ateşi – zaman ilişkisi Tablo 9’de verilmiştir. Flaş ateşi kuşatmasının kapsadığı maksimum alan, hava koşullarına bağlı olarak farklılık göstermekle beraber; 1,5km/s rüzgâr hızında ve stabil hava koşulunda (1,5/F) maksimum flaş ateşi mesafesinin 2529.57 sn.’de 7598,39 m.’ye, 1,5 km/s rüzgâr hızı ve normal hava koşulunda (1,5/D) maksimum

flaş ateşi mesafesinin 2269.72sn.'de 6085,48 m.'ye ve 5km/s rüzgâr hızı ve normal hava koşulunda (5/D) maksimum flaş ateşi mesafesinin 1109.7 sn.'de 4078,5 m.'ye ulaştığı görülmektedir.

#### 4.2.2 Aşırı Basınç Patlaması – Mesafe İlişkisi

Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>'lük LNG içeren atmosferik depolama tankının katastrofik patlama senaryosunda, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) patlaması sonucu ortaya çıkacak aşırı basınç patlaması ve mesafe ilişkisi şekil 23'te verilmiştir.



Şekil 23: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, aşırı basınç patlaması ve mesafe ilişkisi

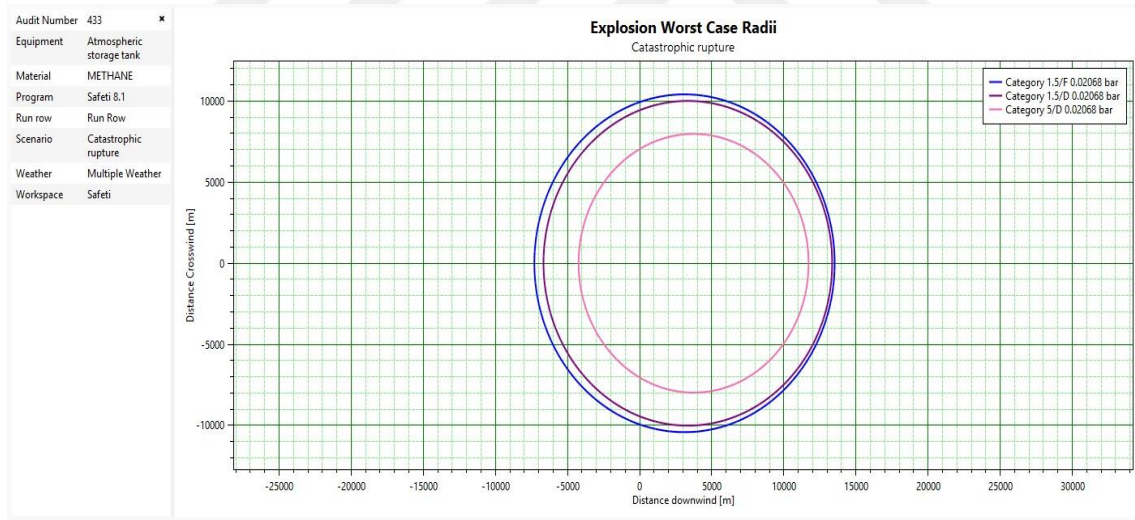
Aşırı basıncın, rüzgâr hızının 5 km/s ve normal hava koşullarında (5/D), bar seviyesindeki artış miktarının 2,5 km'de başladığı, 3,6-3,8 km aralığında aşırı basınç seviyesinin maksimum düzeye ulaştığı ve 5 km mesafe itibariyle basıncın 0 bar seviyesine gerilediği görülmektedir. Aşırı basıncın, rüzgâr hızının 1,5 km/s ve normal hava koşullarında (1,5/D), bar seviyesindeki artış miktarının 3 km'de başladığı, 4,7 km'de aşırı



basınç seviyesinin maksimum düzeye ulaştığı görülmektedir. Maksimum değerine ulaştıktan sonra mesafe arttıkça, basıncın azaldığı 7,2 km itibariyle de basınç seviyesinin 0 bara indiği gözlenmektedir. Aşırı basıncın, rüzgâr hızının 1,5 km/s ve stabil hava koşullarında (1,5/F), 5 km mesafede artış göstermeye başladığı, 6,3 km’de maksimum 20 bar seviyesine ulaştığı gözükmektedir. Maksimum değere ulaştıktan sonra, mesafe arttıkça basıncın azaldığı, 7,2 km itibariyle de basınç seviyesinin 0 bar olduğu gözlenmektedir (Şekil 23).

#### 4.2.3 En Kötü Senaryo Patlaması

Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>’lük LNG içeren atmosferik depolama tankının katastrofik patlama senaryosunda, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) patlaması sonucu ortaya çıkacak en kötü senaryo yarıçapı grafiği şekil 24’te verilmiştir.



**Şekil 24: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, en kötü senaryo patlama yarıçapı**

Rüzgâr hızı 1,5 km/s ve normal hava koşullarında (kategori 1,5/D), patlama en kötü senaryo mesafe aralığı; rüzgâr yönünde maksimum 14 km’den daha az bir değer almakta iken, rüzgârın tersi istikamette bu değer 7 km’dir. Rüzgâr hızı 1,5 km/s ve stabil hava koşullarında (kategori 1,5/F), patlama en kötü senaryo mesafe aralığının; rüzgâr

yönünde 12 km olduğu ve rüzgârın tersi istikamette 7 km olduğu gözükmektedir. Rüzgâr hızı 5 km/s ve normal hava koşullarında (kategori 5/D), patlama en kötü senaryo mesafe aralığının; rüzgâr yönünde 12 km olduğu ve rüzgârın tersi istikamette 4 km olduğu görülmektedir. Bu senaryo için güvenli mesafe, rüzgâr yönünde 13 km ve rüzgârın tersi yönde 7,5 km'dir (Şekil 24).

**Tablo 10: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, en kötü senaryo değerleri**

Yol	Hava Koşulu	Aşırı Basınç Seviyesi [bar]	Toplam Yanıcı Kütle [kg]	Patlama Yanıcı Kütle [kg]	Ateşleme Zamanı [s]	Ateşleme Kaynağı [m]	Bulut Merkezi [m]	Patlama Merkezi [m]
Atmosferik Depolama Tankı	Kategori 1,5/F	0,020	6,53064E+06	6,53064E+06	1967,08	6440	1469,97	6440
		0,13	3,1527E+06	3,1527E+06	2524,57	7590	851,40	7590
		0,20	3,1527E+06	3,1527E+06	2524,57	7590	851,40	7590
<b>Senaryo</b>	Kategori 1,5/D	0,020	1,00436E+07	1,00436E+07	1417,23	4640	1431,68	4640
		0,13	3,79556E+06	3,79556E+06	2031,56	5900	1416,63	5900
		0,20	3,707E+06	3,707E+06	2038,64	5910	1413,94	5910
Katastrofik Yırtılma	Kategori 5/D	0,020	5,46501E+06	5,46501E+06	922,98	3690	896,43	3690
		0,13	4,62101E+06	4,62101E+06	998,10	3910	912,36	3910
		0,20	3,9663E+06	3,9663E+06	1031,66	3970	924,62	3970

Tablo 10'da 85.000 m<sup>3</sup>'lük bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, en kötü senaryo değerleri;

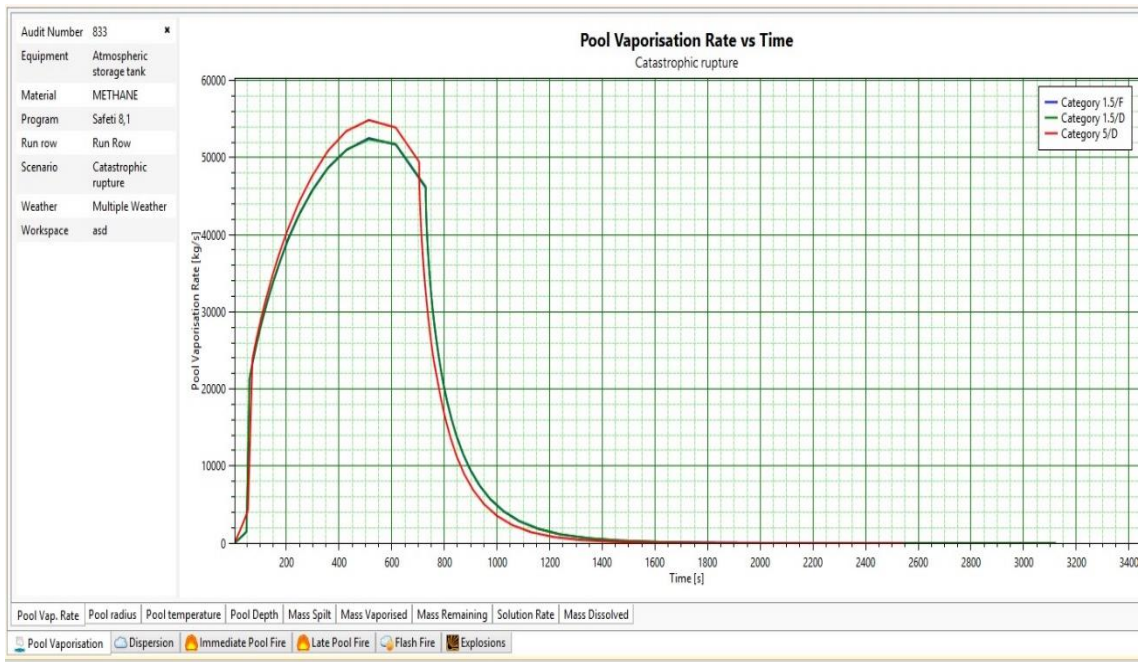
- Rüzgâr hızı 1,5 km/s ve stabil hava koşulunda (1,5/F) ve Rüzgâr hızı 1,5 km/s ve normal hava koşulunda (1,5/D);
  - Aşırı basınç seviyesi arttıkça, ateşleme zamanı gecikmekte, ateşleme kaynağının mesafesi artmakta, bulut merkezi küçülmekte ve patlama merkezi artmaktadır.
- Rüzgâr hızı 5 km/s ve normal hava koşulunda (5/D):
  - Aşırı basınç seviyesi arttıkça, ateşleme zamanı gecikmekte, ateşleme kaynağının mesafesi artmakta, bulut merkezi büyümekte ve patlama merkezi artmaktadır.

#### 4.2.4 Havuz Yangını Buharlaşması

Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>'lük LNG içeren atmosferik depolama tankının katastrofik patlama senaryosunda, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) patlaması sonucu ortaya çıkacak, havuz yangını buharlaşma hızı ve zaman incelemesi grafiği Şekil 25'te; havuz yarıçapı ve zaman ilişkisi grafiği Şekil 26'da verilmiştir.

##### 4.2.4.1 Buharlaşma Hızı ve Zaman İlişkisi

Buharlaşmanın ilk 50 sn.de 20.000 kg/s hıza ulaştığı, maksimum buharlaşma hızına ise 550 sn. itibariyle ulaştığı şekil 25'te görülmektedir. Rüzgâr hızının 5km/s ve normal hava koşulunda (kategori 5D) buharlaşma hızının 54.000 kg/s olduğu ve rüzgâr hızının 1,5km/s- normal hava koşulunda (Kategori 1,5D) ve rüzgâr hızının 1,5km/s- stabil hava koşullarında (1,5F) 52.000 kg/s olduğu görülmektedir.



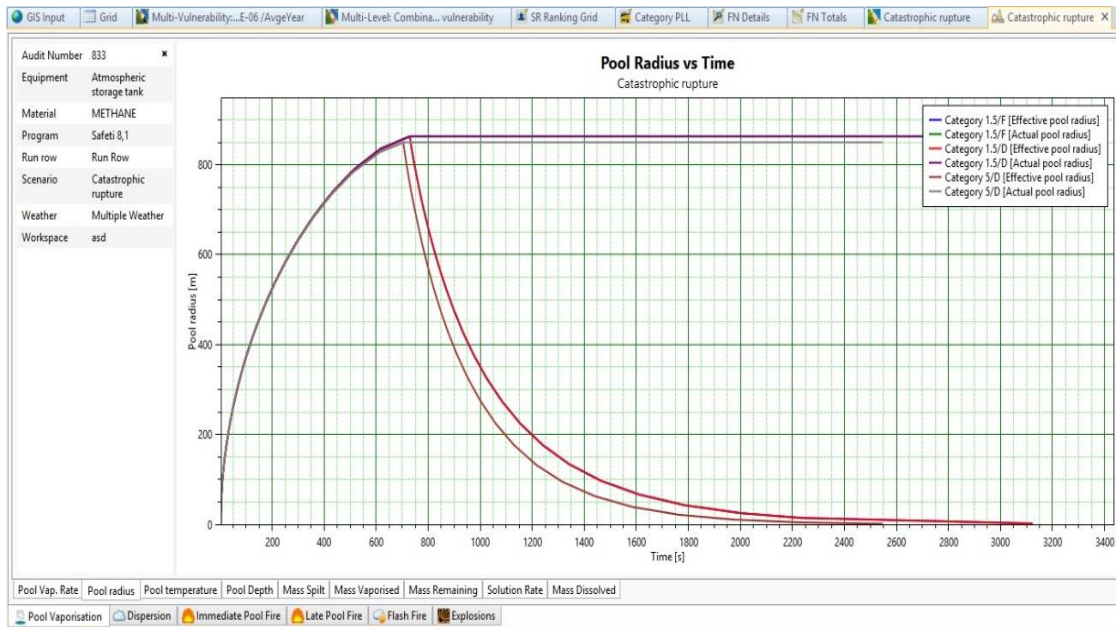
Şekil 25: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, havuz buharlaşma hızı ve zaman ilişkisi

. Havuz buharlaşma hızının maksimum seviyeye ulaştıktan sonra zamanla azaldığı, rüzgâr hızının 5 km/s, normal hava koşulu (kategori 5D) için başlangıçtan 2550 sn. sonra; rüzgâr hızının 1,5 km/s- normal hava koşulu (kategori 1,5/D) ve rüzgâr hızının 1,5 km/s, stabil hava koşullarında (1,5/F) 1.600 sn. sonra tamamen durduğu görülmektedir.

#### 4.2.4.2 Havuz Yarıçapı ve Zaman İlişkisi

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, ortaya çıkan havuz yangınının etkilediği alan, hava şartlarına bağlı olarak farklılık gösterir. Şekil 26'da havuz yarı çapının 700. sn'ye kadar zamanla doğru orantılı olarak genişlediği görülmektedir.

Rüzgâr hızı 1,5 km/s ve normal hava koşulunda (Kategori 1,5D), 700 sn ile 2700 sn aralığında, asıl havuz yarı çapının 850 m olduğu gözükmemektedir. Efektif havuz yarı çapının 700 sn sonra bir kırılma yaşayarak zamanla azaldığı ve 3150 sn sonra etkisini tamamen kaybettiği görülmektedir.

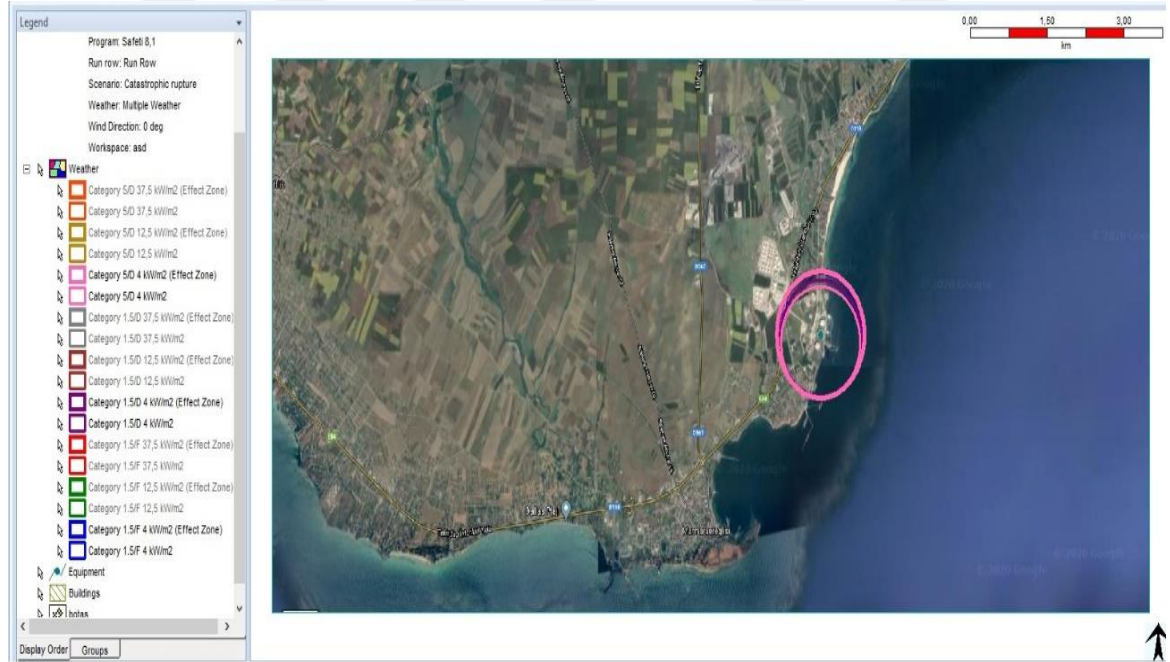


Şekil 26: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, havuz buharlaşma hızı ve zaman ilişkisi

Rüzgâr hızı 5 km/s ve normal hava koşulunda (Kategori 5D), asıl ve efektif havuz yarı çapları 700. sn'ye kadar, zamanla doğru orantılı olarak artış göstermektedir. 700 ile 2.550 sn aralığında, asıl havuz yarı çapının yaklaşık olarak 850 m genişlikte olduğu; efektif havuz yarı çapının ise 2.550 sn boyunca etkisini zamanla azalarak devam ettirdiği görülmektedir (Şekil26).

#### 4.2.5 Erken Oluşan Havuz Yangınları

Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>'lük LNG içeren atmosferik depolama tankının katastrofik patlama senaryosunda, 1,5 km/s rüzgar hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgar hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgar hızı, normal hava koşulunda (5/D) patlaması sonucu erken oluşan havuz yangınının radyasyon yoğunluk yarıçapı şekil 27'de, erken oluşan havuz yangınının radyasyon ile mesafe ilişkisi şekil 28'de ve mortalite riski ilişkisi şekil 29'da incelenmiştir.

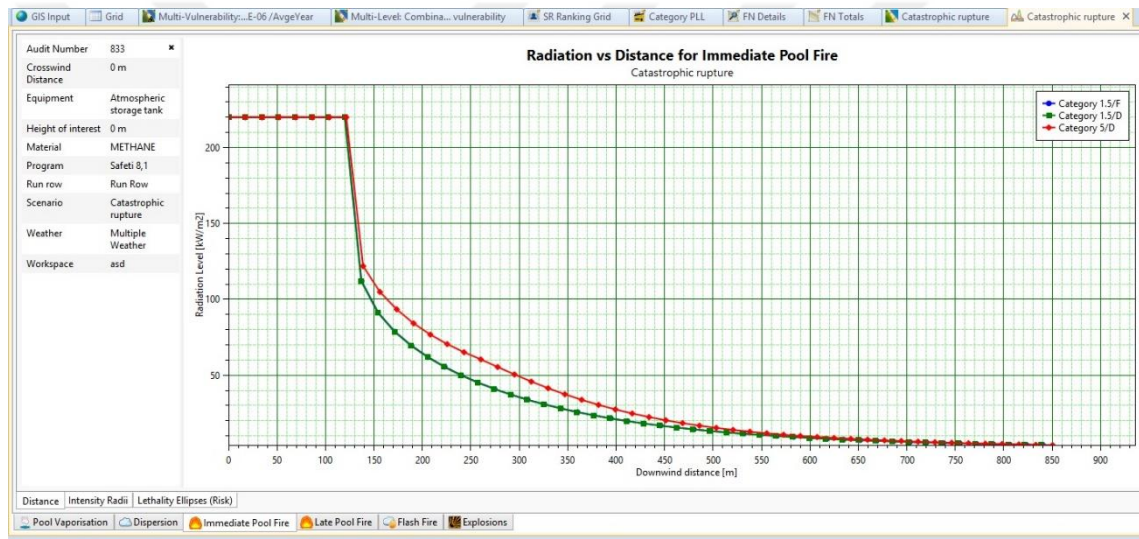


Şekil 27: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, erken oluşan havuz yangınının radyasyon yoğunluk yarıçapı

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, erken oluşan havuz yangının radyasyon yoğunluk yarıçapının GIS (Geographical Information Systems – Coğrafi bilgi sistemi) görüntüsü Şekil 27’de gösterilmiştir. Havuz yangınının etki alanının, rüzgârın etkisiyle farklılık gösterdiği Şekilde görölmektedir.

#### 4.2.5.1 Radyasyon- Mesafe ilişkisi

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama sonucu ortaya çıkabilecek, erken havuz yangınlarının oluşturduğu radyasyon etkisi Şekil 28’de verilmiştir.

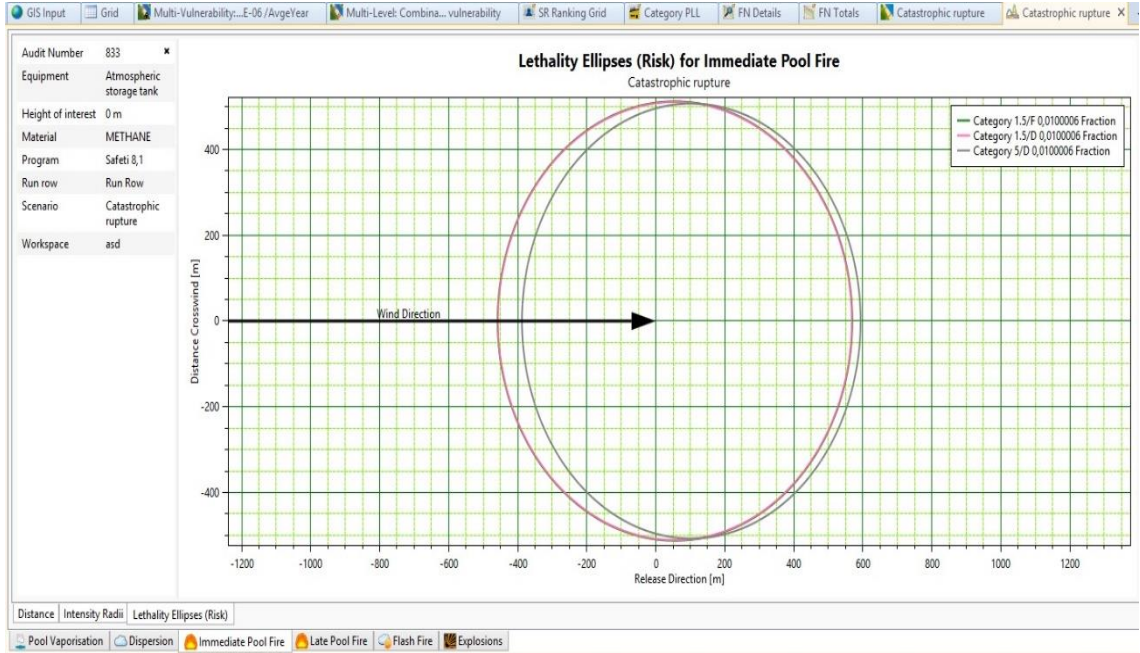


Şekil 28: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, erken havuz yangınlarının oluşturduğu radyasyon ve mesafe ilişkisi

Üç hava durumunda da (1,5/D, 1,5/F ve 5/D) erken havuz yangını sonucunda oluşan radyasyon seviyeleri 120 m içerisinde 220 kW/m<sup>2</sup> olarak gözlenmektedir. 120 m’den sonra yaklaşık 140 m’de radyasyon seviyesi 110kW/m<sup>2</sup>’ye azalmaktadır. Rüzgâr hızı 5 km/s, normal hava koşulunda (Kategori 5D) 140 m itibariyle radyasyon seviyesinin diğer iki hava koşuluna nazaran daha yüksek seviyede olduğu görölmektedir. Yine de mesafe arttıķa radyasyonun etkisinin azaldığı ve 850 m itibariyle seviyenin sıfırlandığı görölmektedir (Şekil 28).

#### 4.2.5.2 Erken Oluşan Havuz Yangınlarında Mortalite Riski

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama sonucu ortaya çıkabilecek, erken oluşan havuz yangını mortalite risk grafiği şekil 29’da gösterilmiştir.



**Şekil 29:**Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, erken havuz yangınlarının mortalite elipsi

Erken havuz yangınlarında mortalite riskinin, rüzgâr hızının 1,5 km/s ve stabil hava koşulunda (kategori 1,5/F), rüzgâr yönünde 600 m’de, rüzgârın tersi yönde yaklaşık 400 m’de ortaya çıktığı hesaplanmıştır. Rüzgâr hızının 5 km/s ve normal hava koşulunda (kategori 5D), mortalite riskinin, rüzgâr yönünde 550 m’de, rüzgârın tersi yönde 450 m’de ortaya çıktığı hesaplanmıştır. Ayrıca, havuz yangınının boşalma yönünün, rüzgâr yönü ile aynı olduğu görülmektedir (Şekil 29).

#### 4.2.6 Geç Oluşan Havuz Yangınları

Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>'lük LNG içeren atmosferik depolama tankının katastrofik patlama senaryosunda, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) patlaması sonucu; geç oluşan havuz yangınının radyasyon yoğunluğu yarıçapı Şekil 30'da farklı hava koşullarında rüzgâr yönünde tanımlanan radyasyon seviyeleri Tablo 11'de gösterilmiştir.



**Şekil 30:** Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının radyasyon yoğunluğu yarıçapı

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangını radyasyon yoğunluğu yarıçapının GIS görüntüsü şekil 30'da gösterilmiştir. Havuz yangınının etki alanının, rüzgârın etkisiyle farklılık gösterdiği şekilde görülmektedir.



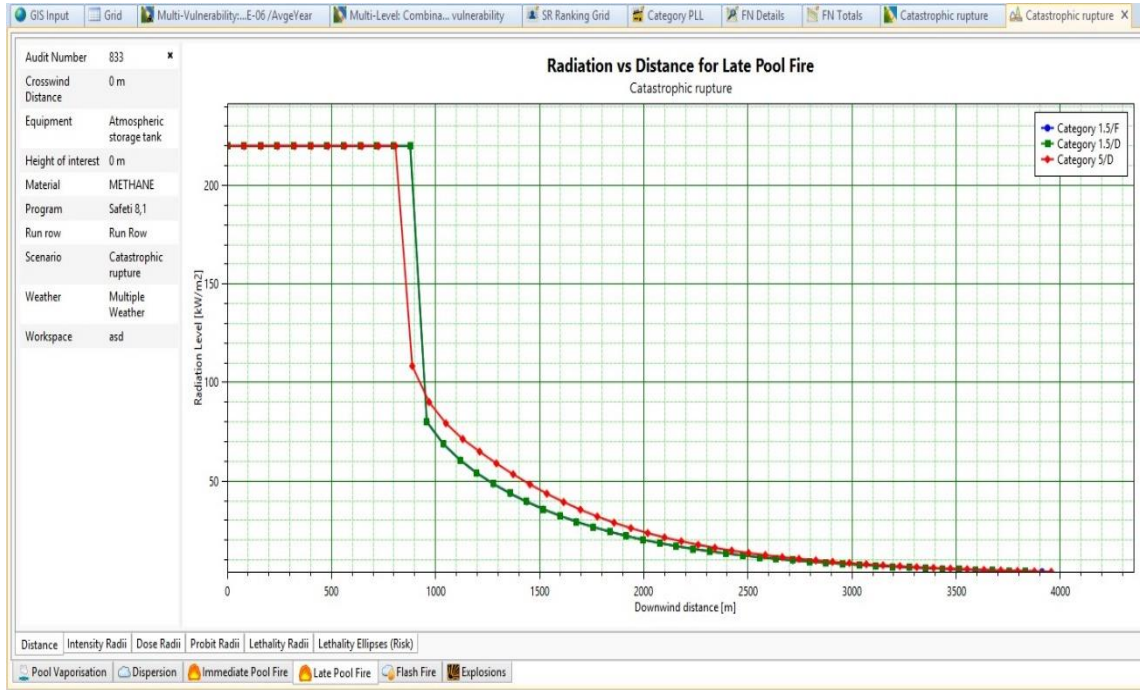
**Tablo 11: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç havuz yangınlarının üç farklı hava koşulunda, rüzgâr yönünde tanımlanan radyasyon seviyeleri**

Yol	Hava	Havuz Çapı [m]	Radyasyon Yoğunluk Seviyesi 1 (4 kW/m <sup>2</sup> ) [m]	Radyasyon Yoğunluk Seviyesi 2 (12,5 kW/m <sup>2</sup> ) [m]	Radyasyon Yoğunluk Seviyesi 3 (37,5 kW/m <sup>2</sup> ) [m]
Atmosferik Depolama Tankı	Kategori 1,5/F	1726,09	3912,25	2459,23	1479,3
Senaryo	Kategori 1,5/D	1726,66	3913,25	2459,88	1479,71
Katastrofik Yırtılma	Kategori 5/D	1699,75	3956,43	2580,07	1653,4

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangınları üç farklı hava koşulundaki üç farklı radyasyon seviyesi Tablo 9’da incelenmiştir. 1,5 km/s, normal hava koşulu (1,5/D) ve rüzgâr hızı 1,5 km/s, stabil hava koşulu (1,5/F) için, geç oluşan havuz çapının 1.726 m olduğu, rüzgâr hızı 5 km/s, normal hava koşulu (5/D) için, geç oluşan havuz çapının 1.699 m olduğu ve diğer iki hava koşuluna nazaran havuz çapının daha düşük bir değerde olduğu görülmüştür. Geç oluşan havuz yangınının rüzgârın etkisiyle radyasyon yoğunluğu seviye 1 (4 kW/m<sup>2</sup>) için; rüzgâr hızı 1,5 km/s ve normal hava koşulu (1,5/D), rüzgâr hızı 1,5 km/s ve stabil hava koşulu (1,5/F) kategorilerinde sırasıyla 3.912,25 m ve 3.913,25 m ile birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüş; rüzgâr hızı 5 km/s ve normal hava koşulunda (5/D) 3.956,43 m olduğu görülmektedir. Geç oluşan havuz yangınının rüzgârın etkisiyle radyasyon yoğunluğu seviye 2 (12,5 kW/m<sup>2</sup>) için; rüzgâr hızı 1,5 km/s ve normal hava koşulu (1,5/D) için 2.459,23 m, rüzgâr hızı 1,5 km/s ve stabil hava koşulu (1,5/F) için 2.459,88 m ve rüzgâr hızı 5 km/s, normal hava koşulunda (5/D) 2.580,07 m olduğu görülmektedir. Geç oluşan havuz yangınının rüzgârın etkisiyle radyasyon yoğunluğu seviye 3 (37,5 kW/m<sup>2</sup>) için, rüzgâr hızı 1,5 km/s, normal hava koşulu (1,5/D) ve 1,5km/s stabil hava koşulları için (1,5/F) kategorileri için değerler sırasıyla 1.479,3 m ve 1.479,71 m iken; rüzgâr hızı 5 km/s, normal hava koşulu (5/D) için 1.653,4 m olduğu görülmektedir.

#### 4.2.6.1 Radyasyon Mesafe İlişkisi

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) patlaması sonucu; geç oluşan havuz yangınlarının radyasyon mesafe ilişkisi grafiği Şekil 31’de incelenmektedir.

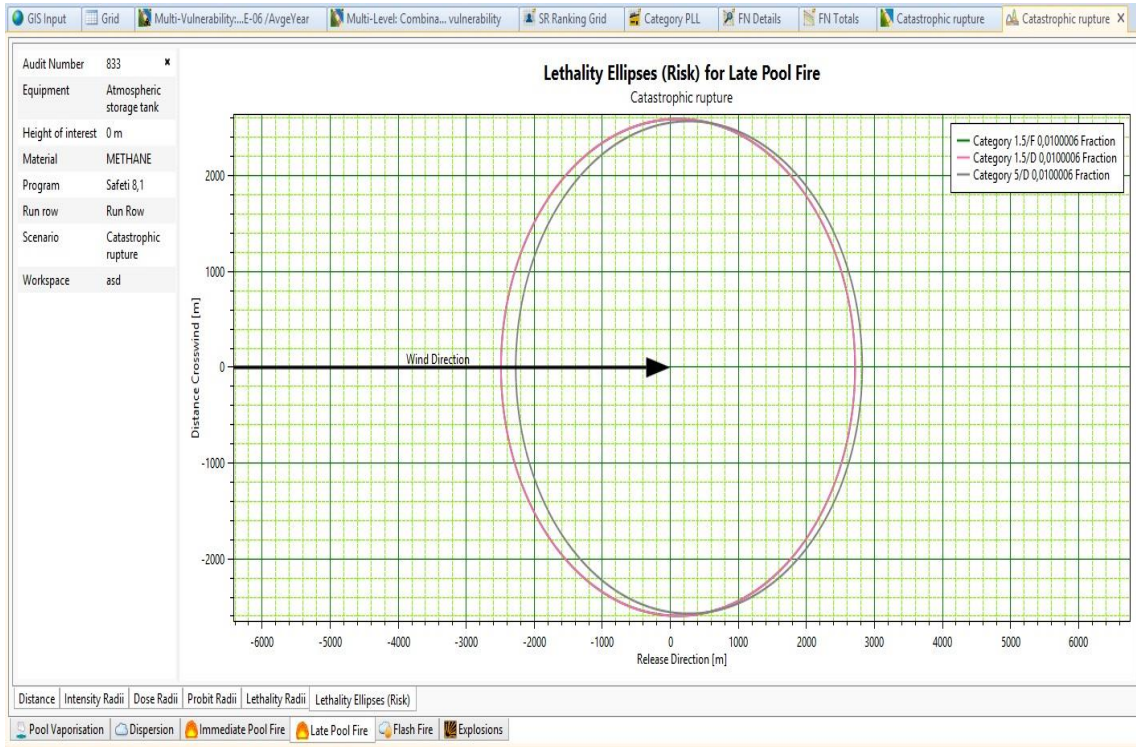


Şekil 31: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının radyasyon mesafe ilişkisi

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının radyasyon mesafe ilişkisi şekil 31’de gösterilmiştir. Rüzgâr hızının 1,5 km/s normal hava koşulları (Kategori 1,5/D) ve rüzgâr hızının 1,5 km/s stabil hava koşulları (1,5/F) için geç havuz yangını sonucunda oluşan radyasyon seviyesi ~890 m içerisinde 220 kW/m<sup>2</sup> olduğu gözlenmiştir. 900 m de radyasyon seviyesinin 80kW/m<sup>2</sup>’ye kadar azaldığı görülmüştür. Rüzgâr hızının 5 km/s ve normal hava koşulunda (5D), 800 m itibariyle radyasyon seviyesi 220 kW/m<sup>2</sup> iken 900 m de radyasyon seviyesinin 110 kW/m<sup>2</sup> olduğu görülmektedir. Üç hava durumu içinde 1 km mesafe sonrasında radyasyon seviyesinin yavaşça azaldığı ve 4 km mesafe itibariyle tamamen yok olduğu görülmektedir.

#### 4.2.6.2 Geç Havuz Yangınlarında Mortalite Riski

Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>'lük LNG içeren atmosferik depolama tankının katastrofik patlama senaryosunda, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) patlaması sonucu; geç oluşan havuz yangınının mortalite elipsi Şekil 32'de ve mortalite yarıçapı Şekil 33'te, incelenmektedir.



**Şekil 32:**Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının mortalite elipsi

Geç havuz yangınlarında mortalite riskinin rüzgâr hızının 1,5 km/s ve stabil hava koşulunda (1,5/F), rüzgâr yönünde mortalite mesafesinin 2.800 m, rüzgârın tersi yönünde 2.200 m'ye yakın bir mesafede olduğu görülmektedir. Rüzgâr hızının 5 km/s ve normal hava koşulunda (5D), rüzgâr yönünde mortalite mesafesinin 2.600 m iken rüzgârın tersi yönde 2.450 m olduğu görülmektedir (Şekil 32).

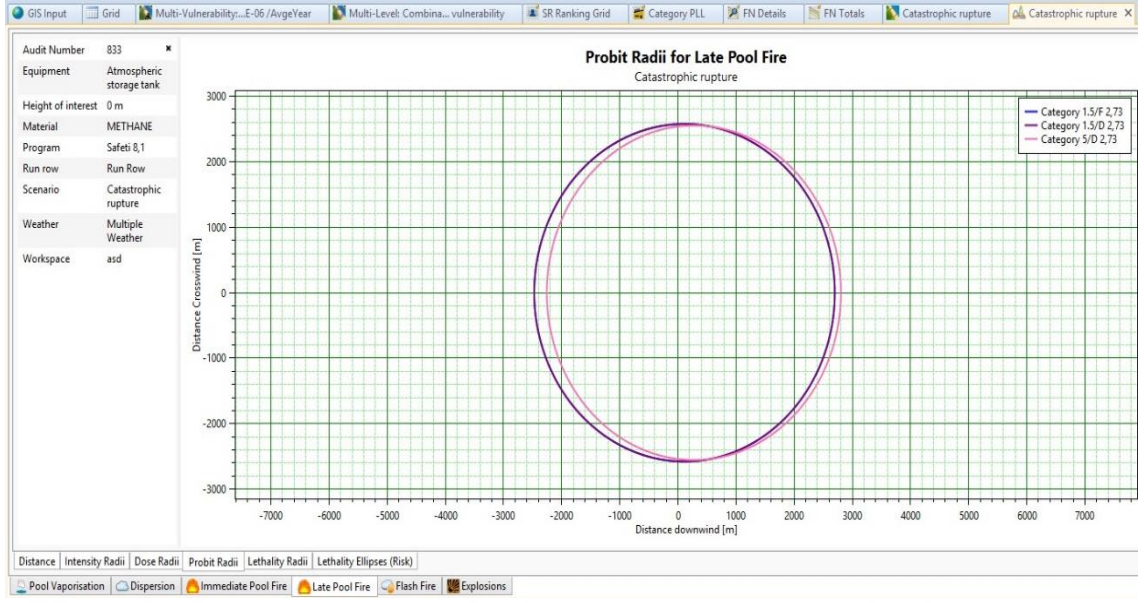


**Şekil 33: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının mortalite yarıçapı**

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangının mortalite riskinin GIS (Geographical Information Systems – Coğrafi bilgi sistemi) görüntüsü şekil 33’te gösterilmiştir. Havuz yangınının boşalma yönü ile rüzgârın yönünün aynı doğrultuda olduğu görülmektedir.

#### **4.2.6.3 Geç Havuz Yangınları Olasılık Yarı Çapı**

Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>’lük LNG içeren atmosferik depolama tankının katastrofik patlama senaryosunda, 1,5 km/s rüzgâr hızı, stabil hava koşulunda (1,5/F), 1,5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (1,5/D) ve 5 km/s rüzgâr hızı, normal hava koşulunda (5/D) patlaması sonucu geç oluşan havuz yangınlarının olasılık yarıçapı Şekil 34’te ve radyasyon doz yarıçapı şekil 35’te, incelenmiştir.



**Şekil 34: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangınlarının olasılık yarıçapı**

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangınlarının olasılık yarı çapı mesafesi, içerisinde bulunan ekipmanların ve canlıların %100 etkileneceği olasılık dahilindedir. Rüzgâr hızı 5 km/s ve normal hava koşulunda (5D) rüzgâr yönünde 2.800 m mesafede ve rüzgâr yönünün tersi istikamette 2.200 m mesafe içerisinde bulunan canlıların ve yapıların %100 etkileneceği şekil 34'te belirtilmektedir.

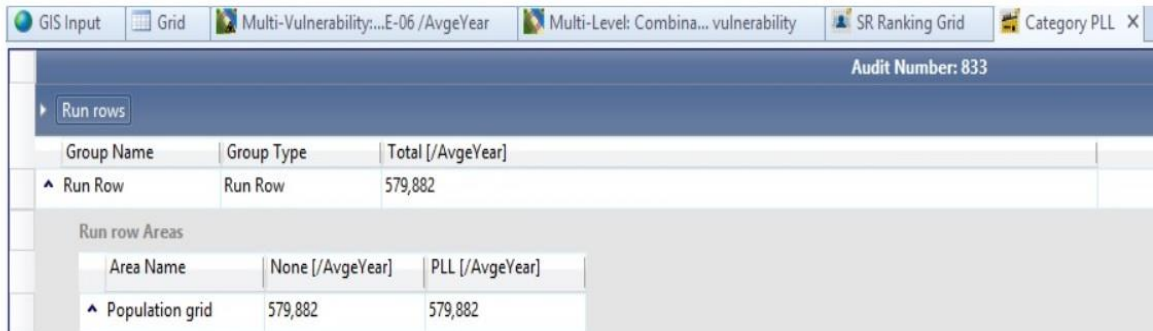


**Şekil 35: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangınların radyasyon doz yarıçapı**

Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, geç oluşan havuz yangınlarının radyasyon doz yarıçapının GIS (Geographical Information Systems – Coğrafi bilgi sistemi) görüntüsü Şekil 35'te gösterilmiştir. Geç oluşan havuz yangınlarında, radyasyon yarı çapının, hava koşullarına bağlı olarak, etki alanların birbirinden farklılık göstermektedir. Rüzgâr hızı, radyasyon doz yarıçapını doğrudan etkilemektedir, rüzgâr hızının 5 km/s ve normal hava koşulundaki etki alanının en geniş çapa sahip olduğu anlaşılmaktadır.

#### 4.2.7 Potansiyel Hayat Kaybı

Safeti programı kullanılarak oluşturulan, 85.000 m<sup>3</sup>'lük LNG içeren atmosferik depolama tankının katastrofik patlama senaryosunda, tesisin çevresinde bulunan insan popülasyonunun nasıl etkilendiği incelenmiştir. Şekil 36'da bu senaryonun simülasyonu sonucu insan popülasyonunun potansiyel hayat kaybı (Potential Loss of Life - PLL) hesaplanmıştır.



Group Name	Group Type	Total [/AvgeYear]
Run Row	Run Row	579,882

Area Name	None [/AvgeYear]	PLL [/AvgeYear]
Population grid	579,882	579,882

**Şekil 36: Bir LNG depolama tankında olası katastrofik patlama senaryosunda, potansiyel hayat kaybı (PLL)**

Bu alışmada, GIS verilerinde tesis çevresinde belirlenen popülasyon alanları ve nüfus bilgileri girildikten sonra, LNG dolu depolama tankının katastrofik patlaması sonucu ortaya çıkacak olan potansiyel hayat kaybı (PLL) yılda ortalama 579.882 kişi olarak hesaplandığı görülmektedir.

## 5. TARTIŞMA

### 5.1. Modellemeler ve Senaryolar

Depolama tanklarındaki sıvılaştırılmış petrol gazının patlaması, sızması ve katastrofik dağılımı, gaz arıtma tesislerindeki en önemli olaylardandır. Bu olayların zararlı etkilerinden korunmak amacıyla, sonuçlar uygun biçimde anlaşılmalı ve araştırılmalıdır. Bir diğer kazaların etkilerini azaltma yöntemi de şok dalgalarının, toksik etkilerin ve radyasyon etkilerinin modellenmesidir. Patlama, yüksek hasar potansiyeline sahip bir patlamaya neden olan ani ve şiddetli bir enerji salınımı olarak tanımlanır (Zareei, 2016)

Khan ve Abbasi, 1999 yılında yayınladıkları çalışmalarında, patlama sonucu açığa çıkan enerjinin fiziksel, kimyasal veya nükleer olabileceğini; çeşitli patlamaların enerji türüne ve salım ortamına bağlı olarak sınıflandırıldığını ve patlamaların hasar potansiyeli açısından çok önemli olduğunu, bunların da genellikle mülke zarar verdiğini ve ölümlerle sonuçlandığını belirtmişlerdir.

Mexico City'deki LPG patlaması yüzlerce ölüm ve binlerce yaralanmayla sonuçlandı (Lees, 1996). 1989 yılında Teksas'ın Pasadena kentinde meydana gelen büyük patlama 23 ölüm ve 314 yaralanmaya neden oldu (Lees, 1996). Geçmişte bu tür felaketlere yol açan endüstriyel olaylar meydana gelmiş ve halen dünyada yaşanmaya devam etmektedir. Bu felaketler sırasında binlerce insan ölmüş veya yaralanmıştır. Mercx ve arkadaşlarının 1997 yılında yaptıkları çalışma ile, buhar bulutu patlamaları için, çoklu enerji modelinin genellikle mesafenin bir fonksiyonu olarak aşırı basınç ve pozitif faz süresini belirlemek için kullanılmakta olduğunu raporlamışlardır.

Witlox ve arkadaşlarının 2010 yılında yaptıkları çalışmaları, bir LPG depolama tesisinde meydana gelebilecek kazara olaylarla ilişkili sonuçları değerlendirmek için geliştirilen bilgisayar kodu "Atlantide"nin prototipini sunmuştur. Bu kodda uygulanan modeller ve korelasyonlar, yanıp sönen sıvı salımları, ağır gaz dağılımı ve BLEVE / ateş topu gibi diğer tipik fenomenlerle ilgilidir. Propanın bir tankerden salınmasına bağlı endüstriyel bir LPG depolama kazası Demichela ve arkadaşları tarafından tarif edilmiş ve bir depolama tankının çökmesine yol açan olayların sırası simülasyon yazılımı kullanılarak incelenmiştir (Demichela ve diğerleri, 2004).

Belirli bir kaynaktan ortaya çıkan riskin konumu önem teşkil etmektedir. Riskin konumlandırılması, GIS üzerinde belirlenmesi risk etki alanının boyutunu göstermektedir (Bingöl, 2019). Bu çalışmada senaryomuz literatürdeki diğer çalışmalarla benzer şekilde, GIS konumlandırması yapılarak, verileri harita üzerinde görselleştirilmiştir.

## **5.2. Aşırı Patlama Basıncı ve Buhar Bulutu Patlaması**

Çalışmada buharlaşmanın ilk 50 sn'de 20.000 kg/s hıza ulaştığı, maksimum buharlaşma hızına ise 550. sn itibariyle ulaştığı görülmüştür. Rüzgâr hızının 5 km/s ve normal hava koşulunda (kategori 5/D) buharlaşma hızının 54.000 kg/s olduğu, havuz buharlaşma hızının maksimum seviyeye ulaştıktan sonra zamanla azaldığı, rüzgâr hızının 5 km/s, normal hava koşulu (kategori 5/D) için başlangıçtan 2550 sn sonra tamamen durduğu görülmüştür.

Bingöl'ün (2019) yaptığı çalışma sonucu elde ettiği bilgilerden jet yangınlarının etkisinin, parlama yangınlarının etkisine göre daha az olduğunu anlaşılma ile birlikte bu çalışmada da benzer bir sonuç elde edilmiştir.

Tom Blanchet'in 2014 yılında yaptığı araştırmada saf metanın hava ile karışımının patlamasının oldukça güç olduğu anlaşılma da bu çalışmada patlamanın sonuçları incelendiğinde etki mesafesi özellikle üç farklı hava kategorisindeki durumu birbirinden farklılık göstermiştir (Blanchet, 2014). Mohammadfam ve arkadaşlarının (2015) yaptığı çalışmada, buhar bulutu patlamasının 0,01 bar basınç etkisi üzerinden en uzak mesafeye ulaştığı kaydedilmiştir. Bu çalışmada ise, 5 km/s rüzgâr hızı ve normal hava koşulunda (5/D) aşırı basıncın 20 bar seviyesine ulaştığı mesafe yaklaşık 3,7 km civarında iken; diğer iki hava koşuluyla kıyaslandığında, katastrofik patlama senaryo alanına daha yakın bir mesafede maksimum değerine ulaştığı görülmüştür. Kategori 5/D'de bar seviyesinin neredeyse sıfır seviyesine ulaştığı mesafede, kategori 1,5/D için bar seviyesi daha yeni artmaya başlamaktadır. Bu durum, hava koşullarının senaryomuz üzerindeki etkisini göstermektedir.

## **5.3. Havuz Yangını ve Termal Radyasyon**

Bu çalışmada, termal radyasyon etkisi 4 seviyede incelenmiştir. 5 kW/m<sup>2</sup> termal radyasyon seviyesine, 15- 20 sn maruz kalan bireylerde acı oluşmaya başlayacak ve 30



sn sonra ikinci derece yanıklar ortaya çıkmaya başlayacaktır. 12,5 kW/m<sup>2</sup> seviyesinde 30 sn'den az maruz kalanlarda yüksek olasılıkla yaralanmalar oluşma olasılığı, 30 sn'den fazla maruz kalanlarda ise ölüm olasılığı yüksektir. Yanıcı malzemedan üretilen yapılarda, uzun süreli maruz kalma durumunda, nispeten daha az hasar oluşacaktır. 21 kW/m<sup>2</sup> seviyesinde ise, uzun süreli etkileşime maruz kalan kişilerde ölüm kaçınılmazdır. Yangın ve aleve karşı korumasız yapılar kısa sürede büyük zararlar alacağı gibi, yangına dayanıklı olan yapılar ise uzun süreli etkiye maruz kalma durumunda zarar görecektir. 37,5 kW/m<sup>2</sup> seviyesinde anlık etki içinde bulunan kişiler çok yüksek olasılıkla ölecek, yangına dayanıksız yapılar anında alevlenecek, dayanıklı yapılar ise kısa sürede çok ağır hasar görecektir, orta sürede ise metal bozulmaları görülecektir (Tom Blanchet,2014).

Senaryomuzda erken ve geç havuz yangınlarının mesafe açısından değerlendirilmesi sonucu ortaya çıkan radyasyon mesafe ilişkisi grafiklerinden de anlaşılacağı üzere radyasyon seviyeleri çok yüksektir. 200 kW/m<sup>2</sup> seviyeleri, anlık ölüm seviyesinin (37.5kW/m<sup>2</sup>) çok üzerindedir. Bu senaryoda ölüm kaçınılmaz olmakla beraber, patlamanın olduğu alandaki yapılar inanılmaz derecede zarar görecektir.

Termal radyasyonun etkisi, katastrofik patlamanın olduğu tesise uzak mesafede olan yerleşim yerleri üzerinde tahribat yaratacak, yapıları etkileyecek ve canlı popülasyonu üzerinde yaralanmalara ve bazı durumlarda ölüme sebep olacağı elde edilen bulgulardan ve yapılan benzer çalışmalardan (Bingöl, 2019 ve Sheets, 2019) anlaşılmaktadır.

Bingöl'ün yaptığı araştırmada, katastrofik patlama sonucu oluşan termal radyasyon etkisinin çevre popülasyonu ve yapılar üzerinde yarattığı tahribat senaryosu (Bingöl, 2019), bizim çalışmamızın sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir.

Bu çalışmada, hesaplanan toplam potansiyel hayat kaybı 579 kişi olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı; olası bir patlama sonucu tesis ve çevresinde bulunan popülasyonda 579 kişinin hayatını kaybedebilecek olmasıdır. Bu da tesis içinde depolanan LNG ile çevresinde oluşan popülasyon arasındaki ilişkinin ne kadar önemli olduğu ve tesis oluşumunda çevre faktörünün ve popülasyon oluşumunun göz ardı edilmemesinin gereğini ve son olarak oluşturulacak tesisin konumu ve çevresindeki popülasyonun seçiminin önemini ortaya koymaktadır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; LNG tesislerindeki depolama tanklarında ortaya çıkabilecek olası patlamaların, SAFETI programı kullanılarak, dağılım risk modellemesi ve katastrofik patlama risk modellemesi analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarından yola çıkılarak çevre popülasyonun ve yapıların bu patlamalardan nasıl ve ne kadar etkilendikleri incelenmiştir. Bu çalışmada sunulan modellemenin sonuçları, kazaların nedenlerini ve bunların yakındaki kişiler ile çevre binalar üzerindeki etkilerini tanımlamak için kullanılabilir. Hesaplamalı modelleme sonuçları dikkate alınarak, kontrol ve güvenlik önlemleri hazırlanabilir ve uygulanabilir.

Safeti yazılımı, tehlikeli toksik/yanıcı maddelerin depolandığı ve işlendiği bir endüstri tesisinde, risk değerlendirmeleri ve sonuç analizi hesaplamaları neticesinde, güvenlik önlemlerinin tasarlanması ve uygulanması için kullanılmaktadır. Bu yazılımın değerlendirme ve sonuç analizlerinden edinilen bilgiler neticesinde, insanlar ve çevre için güvenlik seviyesinin artmasını sağlayacak önlemler ve ölümlerle sonuçlanabilecek kazalar gibi konularda farkındalık düzeyinin artması hedeflenmektedir.

LNG tesislerindeki depolama tanklarında ortaya çıkabilecek olası patlamalar, tesiste ve çevresinde bulunan insan popülasyonunun etkilenmesine ve hatta ölümlü sonuçların doğmasına neden olacaktır. Bu çalışmada yanıcı maddelerin depolandığı tesisleri araştırmak için, hesaplama risk değerlendirme araçlarının güvenilirliği gösterilmiştir. Modelleme için dikkate alınan yanıcı malzeme miktarının artmasıyla birlikte, güvenlik mesafesinin arttırılması gerektiği bulunmuştur.

Modelleme ve hesaplama programları kullanılarak, olası patlama senaryolarının araştırılması, endüstriyel tesislerde yapılacak teknik araştırmaların analiz sonuçları ile desteklenmelidir.

Katastrofik patlama simülasyonu havuz yangının iki durumunu ve etkilerini ortaya koymaktadır. Bunlardan ilki erken oluşan havuz yangıları ikincisi geç oluşan havuz yangınlarıdır. Erken havuz yangını, havuza salınım oranının yanma oranına eşit olduğu sabit durumu gösterirken, geç havuz yangını maksimum havuz çapını alır.

Termal radyasyon seviyesine (1. Seviye- 5 kW/m<sup>2</sup>), 15- 20 sn maruz kalan bireylerde acı oluşmaya başlar ve 30 sn sonra ikinci derece yanıklar gözlenir. 2. Seviye radyasyona (12.5k W/m<sup>2</sup>), 30 sn'den az süre maruz kalanlarda yüksek olasılıkla yaralanmaların oluşması beklenirken; 30 sn'den fazla süre maruz kalanlarda ise mortalite olasılığı yükselmektedir. Bu çalışmanın senaryosunda, erken havuz yangınlarının üç hava durumunda da (1,5/D, 1,5/F, 5/D), 120 m içerisinde, radyasyon seviyesi 220 kW/m<sup>2</sup> ile, radyasyon üst limit değeri olan 37.5 kW/m<sup>2</sup>'nin çok çok üzerindedir ve bu etkene maruz kalan bireylerin kesin ölümü söz konusudur. Erken havuz yangınları mortalite elips grafiğinde belirtildiği üzere, rüzgâr yönünde 600 m, rüzgârın tersi yönde 550 m mesafenin içinde bulunan canlıların 220 kW/m<sup>2</sup> radyasyona maruz kalması durumunda ölmesi beklenmektedir. Geç oluşan havuz yangınlarındaki mesafe, erken oluşan havuz yangınlarına nazaran çok daha geniş bir alanı kapsadığı bulgulardan da anlaşılmaktadır. Geç havuz yangınlarında ilk 800 m'deki radyasyon seviyesinin 220 kW/m<sup>2</sup>'de olduğu ve bu değer radyasyon üst limit değeri 37,5 kW/m<sup>2</sup>'nin çok çok üzerinde oluşu mortalite olasılığını arttırmaktadır. Bu radyasyon seviyelerinde hayatta kalmanın normal koşullarda sağlanabilmesi için gerekli KKD'nin (kişisel koruyucu ve donanım) sağlanması ve bu KKD'lerin, olası senaryolarda belirtilen radyasyon seviyelerinde koruyuculuğu sağlanmalıdır.

Bu çalışmanın sonuçlarından da görüldüğü üzere LNG depolama tesislerinde olası patlama durumunda süreci yönetebilmek amacıyla kaçış rotaları, tahliye planları, müdahale ekiplerinin yetki alanları ve sorumlulukları, müdahale şekil ve yöntemleri, müdahale mesafeleri vb. güvenlik sistemlerine ait yaklaşımlar, kurum içi ve itfaiye, AFAD gibi kurum dışı ekipler tarafından planlanmalı ve sürekli eğitimler verilerek bu gibi tesislerde çalışanlar bilgilendirilmeli ve farkındalık düzeyi artırılmalıdır.

Bu çalışma ülkemizde henüz yaygın olmasa da dünyada oldukça fazla kullanılan QRA yazılımları ile yanıcı ve/veya patlayıcı kimyasal içeren tüm tesislerin olası dağılım, patlama ve toksik yayılım senaryolarının modellenebileceği, bu modelleme sonucunda oluşabilecek çevre üzerindeki etkileri incelenebileceği gibi, lokasyon seçimi, müdahale mesafeleri, etki dinamiklerinin izlenebilmesi açısından bilgilendirici ve farkındalığı artırıcı niteliktedir.

Kimyasal malzeme bulunan tüm tesislerde, QRA yazılımları ile olası patlama ve dağılım modellemelerinin hesaplanarak, insan sağlığı ve çevre üzerinde etkileri incelenmelidir. Bunun yanında, kimyasal malzemelerin taşınması (kara veya deniz yolu) veya iletimi (boru hatları) sırasında karşılaşılabilecek olası sızıntı, patlama gibi senaryolar yine QRA yazılımları kullanılarak araştırılmalı ve bu analizler sonucunda gerekli tedbirler alınmalıdır.



## KAYNAKÇA

- Akdoğan, Ö. (2008). Rusya'nın enerji politikasının Avrupa Birliği enerji güvenliğine etkisi. Trakya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Uluslararası İlişkiler Bölümü, Y.L. Tezi, 134s.
- American Bureau Of Shipping (2015). LNG Bunkering: Technical And Operational Advisory.2016, [Http://Ww2.Eagle.Org/Content/Dam/Eagle/Publications/2015/LNG\\_Bunkering%20Advisory.Pdf](Http://Ww2.Eagle.Org/Content/Dam/Eagle/Publications/2015/LNG_Bunkering%20Advisory.Pdf).
- Arnet, N. M. L. (2014). LNG Bunkering Operations Establish Probabilistic Safety Distances For LNG Bunkering Operations
- Avcı, A. Can, M. Kılıç, M. (1995), Doğal Gaz Sıvılaştırma Yöntemleri, Sıvılaştırılmış Doğal Gazın (Lng) Nakli ve Depolanması Üzerine Bir İnceleme
- Bahadori, A. (2014). Natural gas processing technology and engineering design (1.Baskı). Waltham: Gulf Professional.
- Bayraktar, M. (2016). Hizmetteki bir geminin sıvılaştırılmış doğalgaz (lng) yakıtlı bir gemi makinesiyle donatılmasının ekonomik analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Bingöl. N. (2019). Büyük Bir Endüstriyel Kaza Durumu İçin Yeni Bir Güvenlik Analizi Geliştirilerek Çevresel Etki Değerlendirilmesi. TC. İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul.
- Blanchat, T. Hightower, M. Luketa, A. (2014). LNG Use And Safety Concerns
- Coşkun S. (2004). Doğalgazın Sıvılaştırılmasında Kullanılan Klasik Kaskad Siteminin Modellenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 9, Sayı 1
- Deli, E. (2013). Lng prosesi incelemesi ve üç farklı lng depolama ve gazlaştırma tesisi için maliyet analizi değerlendirmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Enerji Enstitüsü. Y.L. Tezi, 162s.
- Demichela, M., Piccinini, N., and Poggio, A. (2004). Analysis of an lpg accidental release. institution of chemical engineers trans (IChemE), Part B,
- Demirpolat, S. O. (2007), Sıvılaştırılmış Dogal Gazın (Lng) Kriyojenik Enerjisini Kullanarak Güç Üretiminin Arastırılması: Örnek Çalışma Marmara Ereğlisi Lng Alım Terminali
- Economides, M. Ve Wang, X. (2009). Advanced Natural Gas Engineering. (1.Baskı). Houston: Gulf Publishing
- Finn, A., Johnson, G., Tomlinson, T.R. (1999). Developments İn Natural Gas Liquefaction. Hydrocarbon Processing 78 (4), 47–59.
- Finn, A.J., Johnson, G.L., Tomlinson, T.R. (2000). LNG Technology for Offshore and Mid-scale Plants, paper presented at the 79th Annual GPA Convention, Atlanta, GA, USA.

- Foss., M. M. (2012). An overview on liquefied natural gas (LNG), its properties, the LNG industry, and safety considerations. Center for Energy Economics.
- Humphrey G., (2009). LNG Import Terminal Cost And Schedule Basic Presentation, CBI P.18-20
- Ikealumba, W.C., Wu. H. (2014). Some recent advances in liquefied natural gas (LNG) production, spill, dispersion, and safety. 28, 3556-3586
- International Gas Union. (2019). Report, Erişim: [https://www.igu.org/sites/default/files/node-news\\_itemfield\\_file/IGU%20Annual%20Report%202019\\_23%20loresfinal.pdf](https://www.igu.org/sites/default/files/node-news_itemfield_file/IGU%20Annual%20Report%202019_23%20loresfinal.pdf), Erişim Tarihi: 04.04.2020
- International Maritime Organization (2016). Sulphur Oxides (Sox) – Regulation 14. 2016,
- İnce, A. (2012), Handbook Of Natural Gas Transmission And Processing (Fourth Edition), TMMOB Yayın No: SK72011/10, Ankara, S.:57-60.
- J.Sheets, 2018, <https://www.freeenergyplanet.biz/fermentation-biogas/fire-and-explosions.html#download>
- James I. Chang, Cheng-Chung Lin, 2005, A Study Of Storage Tank Accidents
- Jamieson, D., Johnson, P., Redding, (1998). Targeting and Achieving Lower Cost Liquefaction Plants, paper presented at the 12th International Conference and Exhibition on Liquefied Natural Gas (LNG 12), Perth, Australia.
- Johnson, A.D. (1992). A Model For Predicting Thermal Radiation Hazards From Large-Scale Lng Pool Fires, Chem E Symposium Series No. 130
- Karabay, U. (2014). İstanbul boğazında q-max lng tanker kazalarının risk analizi. İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, Denizel Çevre Anabilim Dalı, Y.L. Tezi, 122s.
- Khan, F. I. and Abbasi, S. A. (1999). Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 12, s. 361–378
- Khan, M. S. Karimi, I. A. Lee, M. (2016). Evolution And Optimization Of The Dual Mixed Refrigerant Process Of Natural Gas Liquefaction
- Kidnay, A. Parrish, W. McCartney, D. (2011). Fundamentals Of Natural Gas Processing (2. Baskı). Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group
- Klaussen, Ø. (2013). Gas course category A, B and C- for crew of gas-filled ships. Gassteknikk
- Lees, F. P. (1996). Loss Prevention in Process Industries, Vol. 2, Second Edition, Butterworth and Heinemann, UK.
- Mcghill, R. Bemley, W. Winther, K. (2013). Alternative Fuels For Marine Applications. 2016, [http://www.ieaamf.org/app/webroot/files/file/annex%20reports/AMF\\_Annex\\_41.pdf](http://www.ieaamf.org/app/webroot/files/file/annex%20reports/AMF_Annex_41.pdf).

- Mercx, W. P. M., Van den Berg, A.C. (1997). Methods For The Calculation Of Physical Effects (the Yellow book), TNO, The Netherlands
- Mohammadfam, I. Zarei, E. (2015). Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: A comprehensive risk analysis framework. International journal of hydrogen energy, 40(39), 13653-13663.
- Mokhatab, S. William, A.P., John Y. M. (2014). Handbook Of Natural Gas Transmission And Processing (Fourth Edition), Principles And Practices App 1: 499
- Mokhatab, S. William, A.P., John Y. M. (2014). Handbook Of Natural Gas Transmission And Processing (Fourth Edition), Principles And Practices 147: 147-183
- Mokhatab, S. William, A.P., John Y. M. (2019). Handbook Of Natural Gas Transmission And Processing (Fourth Edition), Principles And Practices 1:1-35
- Moon, I. Lee, I. Tak, K. Lee, S. (2014). Daeho Ko, Current Status Of Optimal Design Of Natural Gas Liquefaction Process
- Pasculescu, V. M. Ghicioi, E. Morar, M.S. Suvar, M. C. Vlasi, N.I. (2019), Consequence Modelling Of A Truck Explosion
- Petasis, A. (2016), Intractable Dilemmas In The Energy Rich Eastern Mediterranean – 72:61-92
- Riley, T. (2004). Erişim: <https://www.timrileylaw.com/LNG.htm>, Erişim Tarihi: 04.04.2020
- Wang, K., Liu, Zhenyi., Qian, X., Huang, P. (2017). Long-term consequence and vulnerability assessment of thermal radiation hazard from LNG explosive fireball in open space based on full-scale experiment and PHAST
- Witlox, H. W. M. (2010). Overview of Consequence Modeling in the Hazard Assessment Package PHAST, DNV Software, London, UK, Palace House, 3 Cathedral Street, London SE1 9DE.
- Woodyard, D. (2004). Pounder's Marine Diesel Engines And Gas Turbines.
- Yang, Y.M. Kim, J. H. Seo, H.S. Lee, K. Yoon, I.S. (2006). Development Of The World's Largest Above-Ground Full Containment Lng Storage Tank
- Zareei, H. Nikou, M. K. Shariati, A. (2016). A Consequence Analysis Of The Explosion Of Spherical Tanks Containing Liquefied Petroleum Gas (LPG)  
[Http://Www.İmo.Org/En/Ourwork/Environment/Pollutionprevention/Airpollution/Pages/Sulphur-Oxides-\(Sox\)-%E2%80%93Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/en/Ourwork/Environment/Pollutionprevention/Airpollution/Pages/Sulphur-Oxides-(Sox)-%E2%80%93Regulation-14.aspx).
- Zheleva, I. Popov, G. Rusev, P. Tujarov, K. Klimentov, K. Nikolaev, I. (2014) Air Quality Assessment Based On Road Traffic

## EKLER

### Çalışma Veri Girdi Raporu: Tez Çalışması

Tablo	Grup	Alan	Değer	Ünite
Yapı,Arazi	Yapı Arazi açıklaması	Arazi açıklaması, dağılımı	Bölge	
		Havuz malzemesi ve bund türleri	Betonarme	
Toksik parametreler	Kapalı alan toksik hesaplamalar	Rüzgâr yönü bina tipini belirtin	Seçilmemiş	
Dağılım	İlgi mesafeleri	İlgi mesafeleri	Yapı /Yapı Tipi	m

Atmosferik Depolama Tankı



Tablo	Grup	Alan	Değer	Ünite
Materyel	Materyel	Materyel	Metan	
		Birim envanteri belirtilsin mi?	Evet	
		Kütle Envanteri	3,59784E+07	kg
		Hacim Envanteri	85000	m3
		İzlenecek Materyel	Metan	
		Model için risk etkilerinin türü	Sadece Yanıcı	
	Faz	Belirtilen Koşul	Sıcaklık ve atmosfer basıncı	
		Sıcaklık	-162	degC
		Basınç		bar
		Akışkan Durumu	Sıvı	
			1	fraksiyon

Sıvı mol fraksiyonu

Tablo	Grup	Alan	Değer	Ünite
Risk	Model için risk etkilerinin türü	Dikey jet yangınları için model risk etkileri  Ateş topu risklerini göz ardı edin (örneğin, gömülü bir tank varsa)	Model dikey jet yangınları  Ateş topları riskini dahil et	
	Tutuşmama olasılığı	Tutuşmama olasılığını belirtin  Tutuşmama Olasılığı	Ateşleme yapmama olasılığını hesapla	Fraksiyon
	Anında ateşleme olasılıkları	Anında tutuşma olasılığı	Sabit kullanım- malzeme reaktivitesi	Fraksiyon



### Anında ateşleme olasılığı

	Gecikmeli ateşleme olasılıkları	Minimum gecikmeli ateşleme olasılığını belirtin	Minimum gecikmeli ateşleme olasılığını hesaplayın	
--	---------------------------------	---	---	--

Minimum gecikmeli ateşleme olasılığını belirtin

fraction

		Koşullu patlama olasılığını belirtin	Koşullu olasılığı hesapla	
--	--	--------------------------------------	---------------------------	--

fraction

### Koşullu patlama olasılığı

Senaryo	Boru ölçüleri	Boru uzunluğu		m
---------	---------------	---------------	--	---

Yükseklik

37

m

Çıkış yeri

		Tank Başı	0	m
--	--	-----------	---	---

Yön

Dış mekan serbest bırakma Yatay yönü

		Dış Mekan Serbest Bırakma Açısı	0	deg
--	--	---------------------------------	---	-----

Deşarj parametreleri

Atmosferik genişleme yöntemi DNV GLönerilen

Model ayarları

		Orifice faz değişimi?	Faz değişikliğine izin ver (denge)	
--	--	-----------------------	------------------------------------	--

Flaş korelasyonu kullanımı

Damlacık mekanizması

parçalama Damlacık

ayırma

mekanizması- anlık

Tablo	Grup	Alan	Değer	Ünite
	Boru karakteristikleri	Damlacık ayırma mekanizması - sürekli	Korelasyonu zorlama	
			0,045	mm
Kısa boru		Boru pürüzlülüğü		
	frekanslar	Borudaki kıvrımların sıklığı	0	/m
		Borudaki kaplinlerin frekansı	0	/m
	Vanaların frekansları	Borudaki bağlantıların sıklığı	0	/m
		Aşırı akış valflerinin frekansı	0	/m
		Çek valflerin frekansı	0	/m
			0	/m



Kesme vanalarının frekansı

	Hız yük kayıpları	Aşırı akış valfi hız başlığı kayıpları	0	
--	-------------------	--	---	--

0

Geri dönüşüz valf hızı kafa kayıpları

		Kesme vanası hız başlığı kayıpları	0	
--	--	------------------------------------	---	--

Zamanla sürümler

değişen Zamanla değişen sızıntıların ve hattın yırtılma modellenmesi

İşletme

Vakum emniyet valfi

		Vakum emniyet valfi ayar noktası	0	bar
--	--	----------------------------------	---	-----

Tank şekli

boyutlar

Tablo	Grup	Alan	Değer	Ünite
		Tank yüksekliği		m
		Tank genişliği		m
		Tank uzunluğu		m
		Tank çapı		m
	Inventory data	Tank hacmi	85000	m <sup>3</sup>
			0	m <sup>3</sup>
		Tank buhar hacmi		
		Tank sıvı hacmi	85000	m <sup>3</sup>
			0	m
		Tank sıvı seviyesi		
				m

		Maksimum buhar çıkış yüksekliği		
		Minimum kütle envanteri	0,1	kg
		Maksimum kütle envanteri	1E+09	kg
Dağılım	Dağılım Kapsamı	İlgili konsantrasyon	10	ppm
		İlgili konsantrasyon ortalama zamanı	Yanıcı	
		Kullanıcı tanımlı ortalama süresini belirtin	Hayır	
		User defined averaging time		s
				m





İlgi mesafeleri

İlgi mesafeleri

	Raporlar için ortalama süre	ERPG [1 hr]	Hayır	
		IDLH [30 mins]	Hayır	
		STEL [15 mins]	Hayır	
<b>Tablo</b>	<b>Grup</b>	<b>Alan</b>	<b>Değer</b>	<b>Ünite</b>
Bund, bina ve arazi	Bund, bina ve arazi	Dağılım için arazi tipi	Arazi	
		Havuz Yüzeyi ve bund türleri	Betonare bund yok	
	Yapı Açıklaması	Serbest Bina		
		Kapalı alan salımı	Dış Mekan	
		Yapı Etkisi	Çatı	
			0	deg

		Kuzeyden rüzgar veya serbest bırakma açısı		
			Hapsolmuş	
			Damlacıkların taşınması	
			3	
Patlama Parametreleri	Patlama yöntemi (Yalnızca sonuç hesaplamaları)	İç mekan kütle modifikasyon faktörü	Çoklu Enerji: Düzgün sınırlı	
		Patlama yöntemi		
	Ateşleme	Tedarik geç tutuşma yeri	Ateşleme yeri yok	
		Geç tutuşma yeri		m
	Buhar sıvı yöntemi	Patlama kütlesi değiştirme faktörü kullanın	Evet	

Patlama kütle modifikasyon 3  
faktörü

Jet Ateşi	Jet fire metodu	Jet fire metodu	Koni Modeli	
		Probit Hesaplanacak	Evet	

Hesaplanacak sonuç türleri

Tablo	Grup	Alan	Değer	Ünite
		Doz Hesaplaması	Evet	
		Mortalite Hesaplaması	Evet	
	Radyasyon seviyesi	Giriş radyasyon seviyesi sayısı	3	
			4; 12,5; 37,5	kW/m2

Yoğunluk seviyeleri

		Probit seviyesi	2,73; 3,72; 7,5	
		Doz seviyesi	1,27E+06; 5,8E+06; 2,51E+07	

		Mortalite Seviyesi	0,01; 0,1; 0,99	fraction
	Parametreler	Hız değiştirme faktörü	3	
		Jet ateşi	20	s
		Maksimum pozlama süresi		
	Koni modeli verileri	Çapraz rüzgar açısı	0	deg
		Yatay Seçenekler	Standart Model Kullanımı	
		Korelasyon	Tavsiye Edilen	
		Topraklanmışsa alev şekli ayarı	Evet	
	Yüzey Emiş Gücü	Yüzey emisyon gücü için SEP hesaplaması hesaplama yöntemi		
		Alev Emiş Gücü		kW/m2
		Emisivite kesri		fraction
Havuz Yangını	Sonuç Tipi Hesaplaması	Probit Hesaplaması	Evet	

Doz Hesaplaması

Evet

Tablo	Grup	Alan	Değer	Ünite
		Mortalite Hesaplaması	Evet	
	Radyasyon Seviyesi		3	
		Giriş radyasyon seviyesi sayısı		
		Yoğunluk seviyeleri	4; 12,5; 37,5	kW/m2
		Probit seviyesi	2,73; 3,72; 7,5	
		Doz Seviyesi	1,27E+06; 5,8E+06; 2,51E+07	
		Mortalite Seviyesi	0,01; 0,1; 0,99	fraction
	Parametreler		0,4	fraction
		Genel yangınlar için ışıma oranı	20	s



Havuz yangınında maksimum  
maruz kalma süresi

Geometri	Geometri	Doğu	5380,41	m
		Kuzey	848,154	m
		Konum ofsetini uygula	Hayır	

Catastrophic yırtılma

Fatih Varol\Çalışma\Atmosferik Depolama Tankı

Tablo	Grup	Alan	Değer	Ünite
Senaryo	Serbest Bırakılma lokasyonu	Yükseklik	37	m
		Tank Başlığı	90	m
		Kap patlama basıncı kullanın	Hayır	
		Ateş topu emisyon gücü		
		Kap patlama basıncı		Bar
Risk	Olay sıklığı	Olay sıklığı	1	/AvgeYear
	Model için risk etkilerinin türü	Ateş topu risklerini göz ardı edin (örneğin, gömülü bir tank varsa)	Ateş topları riskini dahil et	



Tutuşmama olasılığı

Tutuşmama olasılığını belirtin

Ateşleme olmama olasılığını hesapla

		Tutuşma olmama olasılığı		Fraksiyon
--	--	--------------------------	--	-----------

Anında ateşleme olasılıkları

Anında tutuşma olasılığı

Sabit kullanım- malzeme reaktivitesi

		Anında ateşleme olasılığı		fraction
--	--	---------------------------	--	----------

Gecikmeli olasılıkları

ateşleme Minimum gecikmeli olasılığını belirtin

Minimum gecikmeli ateşleme olasılığını hesaplayın

		Minimum gecikmeli ateşleme olasılığı		fraction
--	--	--------------------------------------	--	----------

Tablo

Grup

Alan

Değer

Ünite





Koşullu olasılığı hesapla

Koşullu patlama olasılığını belirtin

		Koşullu patlama olasılığı		fraction
Materyel	Materyel	Materyel Karakteristik	Sadece Alevlenebilir	
		İzlenecek Materyel	Metan	
			Sadece Alevlenebilir	

Model için risk etkilerinin türü

Deşarj parametreleri	Damlacık parçalama mekanizması	Damlacık ayırma mekanizması - anlık	Flaş korelasyon kullanın	
Dağılım	Dağılım Açısı	Konsantrasyon Yoğunluğu	10	ppm
		İlgi konsantrasyonu için ortalama süre	Alevlenir	



Hayır

Kullanıcı tanımlı ortalama  
süresini belirtin

		Kullanıcı tanımlı ortalama süresi		s
		İlgili mesafeler		m

İlgili mesafeler

	Raporlar için ortalama süre	ERPG [1 hr]	No	
		IDLH [30 mins]	No	
		STEL [15 mins]	No	

Bund, bina ve arazi

Arazi

Bund, bina ve arazi Dağılım için arazi tipi  
açıklaması

Tablo	Grup	Alan	Değer	Ünite
Patlama Parametreleri	Patlama Parametreleri	Patlama Metodu	Multi-Energy: Uniform confined	
	Ateşleme	Geç tutuşma yeri	Ateşleme yeri yok	
		Geç tutuşma yeri		m
	Buhar sıvı metodu	Patlama kütle modifikasyon faktörü	Evet	
		kullanın		
Ateştopul	Hesaplanacak Sonuç Tipi	Probit Hesaplaması	Evet	
		Doz Hesaplaması	Evet	

		Mortalite Hesaplaması	Evet	
	Radyasyon Seviyesi	Radyasyon Seviye Girdileri	3	
		Yoğunluk Seviyesi	4; 12,5; 37,5	kW/m2
		Probit Seviyesi	2,73; 3,72; 7,5	
		Doz Seviyesi	1,27E+06; 5,8E+06; 2,51E+07	
		Mortalite Seviyesi	0,01; 0,1; 0,99	fraction
	Parametreler	Kütle modifikasyon faktörü	3	
		Ateş topu maksimum pozlama süresi	20	s
	Hesaplama Metodu	Ateştopu Modeli	Martinsen time varying	
<b>Tablo</b>	<b>Grup</b>	<b>Alan</b>	<b>Değer</b>	<b>Ünite</b>
		TNO model flame temperature	1726,85	degC

Havuz Yangını	Hesaplanacak Sonuç Tipi	Probit Hesaplaması	Evet	
		Doz Hesaplaması	Evet	
		Mortalite Hesaplaması	Evet	
	Radyasyon Seviyesi	Radyasyon Seviye Girdisi	3	
		Yoğunluk Seviyesi	4; 12,5; 37,5	kW/m2
		Probit Seviyesi	2,73; 3,72; 7,5	
		Doz Seviyesi	1,27E+06; 5,8E+06; 2,51E+07	
		Mortalite Seviyesi	0,01; 0,1; 0,99	fraction
	Parametreler	Genel yangınlar için ışıma oranı	0,4	fraction
		Havuz yangınında maksimum 20 maruz kalma süresi		S

