

## Bleve Temelli Kaza Etkilerinin Değerlendirilmesi

Özgün VATANSEVER<sup>1</sup>, Hacı Ahmet KIRTAŞ<sup>1\*</sup>, Tolga BARIŞIK<sup>2</sup>

### Öz

BLEVE; aşırı ısıtılmış bir sıvının atmosferinde basınç altında ani salınım olarak bilinir. Bu ani salınımların nedeni, tankın etrafındaki yangınlar, korozyon, tankın içinde aşırı ısınma nedeniyle oluşmaktadır. Yangın vs. olay bir kabı veya tankı etkiliyorsa, kabın sıvılaştırılmış gazında yüksek basınç olan bazı değişiklikler gözlenir. Bu çalışmada BLEVE olaylarına odaklanılmıştır. Bu tür olayların insanlar ve çevre üzerinde belirli bir olumsuz etkisi vardır. Bu sonuçlar, damarların parçalanması, alev oluşumu, aşırı basınç ve termal radyasyon etkileridir. Bu çalışmada, aşırı basınç, ateş topu gibi BLEVE sonucunda ortaya çıkabilecek etkileri analiz edilmiş ve insanlar ile çevre üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Patlama / yangın kaynağından uzaklaştıkça yanıkların yoğunluğunun azaldığı tahmin edilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** BLEVE, Ateş Topu, Termal Radyasyon, Parça, Probit.

## The Assessment of Bleve Based Accident Impacts

### Abstract

BLEVE; is known as a sudden release under pressure in the atmosphere of a superheated liquid. Because of the fires around the tank, corrosion, overheating inside the tank, the reason for these sudden swings. Fire, etc. If the event affects a vessel or tank, some changes are observed in the vessel's liquefied gas, which is high pressure. In this research was focussed on BLEVE incidents. Such incidents forms have a certain negative effect on people and the environment. Such results are formation of fragmentation of the vessels, formation of flame, overpressure and thermal radiation effects. In this study, analyze the effects that could occur as a result of BLEVE, such as overpressure, fireball, and assess the impact it had on people and environment. The intensity of the burns as we step away from the source of the explosion / fire has been estimated to decrease.

**Keywords:** BLEVE, Fireball, Thermal Radiation, Fragments, Probit.

### 1. Giriş

Endüstriyel güvenlik uzmanları ve proses güvenlik mühendisleri için büyük kazaların insan ve çevre üzerinde oluşturduğu etkilerin araştırılması çok önemli bir konudur. Kimya ve petrokimya sanayisinde kazalar; yangınlar, patlamalar ve zehirli (toksik) salınımlar olarak sınıflandırılabilir. Teknolojinin gelişmesi ve endüstriyel tesislerin büyümesiyle proses güvenliğinin sağlanması için ileri düzeyde risk analizi metotlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Risk analistleri kazalar sonucu meydana gelen termal radyasyon, aşırı basınç ve zehirlilik gibi olguları değerlendirilebilmek amacıyla kantitatif risk analizi (QRA) metodunu kullanmaktadırlar. Endüstriyel prosesler'de en

<sup>1</sup> Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

<sup>2</sup> İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul

\*İlgili yazar/Corresponding author: haciahmetkirtas@mu.edu.tr

Gönderim Tarihi / Received Date: 21.03.2021

Kabul Tarihi / Accepted Date: 01.11.2021

Bu makaleye atf yapmak için- To cite this article

Vatansever, Ö., Kırtas, H. A., Barışık, T., (2021). Bleve Temelli Kaza Etkilerinin Değerlendirilmesi. Resilience, 143-157.

çok gözlenen kazalardan birisi LPG veya diğer hidrokarbon içerikli maddelerin de sebep olduğu Kaynayan Sıvı Genleşen Buhar Patlaması (BLEVE)'dir. (Sellami, Manescau, Chetehouna, de Izarra, Nait-Said & Zidani, 2018, sf: 69-84).

BLEVE; basınçlı halde fazla ısınmış bir sıvının atmosfere ani salınımı olarak tanımlanmaktadır. Bu ani salınımların sebebi tankı çevreleyen yangınlardan, korozyonlardan, tank içi aşırı ısınmalardan kaynaklanmaktadır. Herhangi bir yangın vb. olay basınçlı bir kabı veya tanki etkilerse kaptaki bulunan yüksek basınçtaki sıvılaştırılmış gazda birtakım değişimler gözlemlenir. Kaptaki sıvı hızlı bir şekilde buhar fazına geçer ve genleşir. Böylece kabın iç basıncı artar. Sıcaklığın artmasıyla da kabın çeperleri zayıflamaya başlar. Zayıflayan kap çeperi en sonunda yırtılır ve BLEVE olayı oluşur. Kaynayan sıvı genleşen buhar patlaması aşağıdaki olaylara sebebiyet verebilir (Ahlert, 2000, sf:320, Lees, 2012, Khan & Abbasi, 1998 sf: 261-277, Planas-Cuchi, Salla & Casal, 2004 sf: 431-436, Birk & Cunningham, 1994, sf:474-480).

**Patlama/basınç dalgaları:** Bir patlama olayında hızlı bir şekilde enerjinin salınımından dolayı patlama/basınç dalgaları üretilir. Ayrıca patlama basınçları havada uçan parçalara da etki eder.

**Uçan parçacıklar:** Patlama sonucu oluşan enerji, aşırı basınç ve tank parçalarının oluşumuna sebep olur. Oluşan patlama basıncı ile tank parçaları etrafa saçılır ve şarapnel etkisi gözlemlenir.

**Yanıcı ya da zehirleyici gaz salınımı:** Amonyak, Klor gibi zehirleyici gazlar ortama salınırsa insan sağlığına ciddi zarar verebilecek ters etkiler oluşabilir.

**Tankın/Kabın zarar görmesi:** Tankın üretildiği metalin sıcaklığı yangın vb. etkisiyle arttığı durumda metale ısı yük biner ve güç kaybedip, zayıflar. En sonunda tamamen yırtılmalar meydana gelir. Örneğin; Çelik, LPG tanklarının yapımında kullanılır ve yaklaşık 650 °C ve 15 atmosfer basınç altında yırtılmalar gözlemlenir (Ahlert, 2000, sf:320, Lees, 2012, Khan & Abbasi, 1998 sf: 261-277, Planas-Cuchi, Salla & Casal, 2004 sf: 431-436, Birk & Cunningham, 1994, sf:474-480).

**Ateş topları:** Havuz ya da jet yangını gibi bir yangın, basınçlı kap içerisinde bulunan sıvılaştırılmış gazı etkilerse BLEVE olayı görülebilir. İç basıncın da artışı ile kimyasal madde salınımı gözlemlenir. Eğer salınan madde yanıcı bir özellik gösteriyor ise; kimyasal tutuşur ve patlama-şarapnel etkisinin yanı sıra ateş topu oluşumundan dolayı termal radyasyon tehlikesi ile karşılaşılır. Termal radyasyondan dolayı çevreye ve insanlara çok ciddi zararlar meydana gelir. Oluşan termal radyasyonun sebebi ise ateş topundan yayılan ısı enerjisidir. Salınan ısı enerjisine ait akı değeri yüzey emisyon gücüyle belirlenir. Risk analizlerinde bu ısı akısının büyüklüğünün belirlenmesi çok önemlidir. Bir ateş topunun sebep olduğu termal tehlikeler ise ateş topu oluşum süresine, radyasyon yoğunluğuna bağlıdır.

Bir ateş topu olayında yanıcı maddenin tamamı yanar. Çünkü yanıcı kütlede içerisinde başlangıçta hava yoktur. Ateş topunun büyümesinin sebebi havanın ateş topu içerisine girerek hacmini arttırmasıdır. Oluşan ateş topunun çapı belirli bir zaman diliminde en büyük boyutuna ulaşır. Bu zaman dilimi sonrası ateş topu gökyüzüne yükselir (gelişim fazı) ve Küre-mantar şeklini alarak (Şekil 1), tamamen dağılır (Zhang & Liang, 2013 sf: 602-606, Bubbico & Marchini, 2008, sf: 558-565, Hemmatian, Planas & Casal, 2015, sf: 141-148, Bonilla, Àgueda, Muñoz, Vilchez & Planas, 2019, sf: 372-384).

Tüm süreç içerisinde ateş topu büyüklüğünü korur. Bir ateş topu büyüme evresinde gökyüzüne yükselmez. Bu durumda ateş topunun zeminden itibaren olan yüksekliği (kalkış yüksekliği), ateş topu yarıçapına eşittir.

LPG ve benzer bileşenlerden oluşan ateş topları çok ciddi tehlikelere sebebiyet vermektedir. Tarihte BLEVE temelli ateş toplarının sebep olduğu birçok kaza ve bu kazaların etkisi detaylı olarak raporlanmıştır (Abbasi & Abbasi, 2007, sf: 489-519).



Şekil 1. BLEVE sonrası oluşan gerçek bir ateş topu ve şekli

**PEMEX LPG Faciası:** 19 Kasım 1984 tarihinde Mexico City'deki PEMEX LPG terminalinde patlama olmuştur. Kaza, tankın bağlı bulunduğu 8 inç çaplı boru hattının yırtılması ile meydana gelmiştir. Sızıntı, 5-10 dakika boyunca devam etmiş ve buhar bulutu oluşmuştur. Oluşan bulut, kıvılcım ile etkileşerek ilk BLEVE gerçekleşmiştir. Hemen ardından etrafa tank parçaları saçılmış ve tesisteki diğer proses ekipmanları da zarar görmüştür. Bunun sonucunda birden çok BLEVE ile karşılaşılması ve oluşan BLEVE'ler ateş topları üretmişlerdir. Olayın sonucunda 90 dakika süresince 200 ev tahribata uğramıştır (Abbasi & Abbasi, 2007, sf: 489-519).

**Boral LPG Dağıtım Deposu:** 1 Nisan 1990 tarihinde saat 08:45 dolaylarında Avustralya'da LPG Depolama Ünitesi'nde ilk BLEVE olayı görülmüştür. Bu durum başka kazalara da sebep olarak gece boyunca da devam etmiştir. Küçük bir tankın patlaması ile istenmeyen bir yangın oluşmuştur ve yangın LPG depo tanklarına ulaşmış, 15 cm kalınlıktaki çelik duvarlı tankları eriterek BLEVE ve ateş toplarının oluşumuna sebep olmuştur. Oluşan ateş topları yüzlerce metre yüksekliğe çıkmıştır. Gerçekleşen patlama ve yangınlar ile güç kesintileri yaşanmış ve camlar parçalanmıştır.

**Laurel, Birleşik Devletler Tren Yolu Kazası:** 25 Ocak 1969 tarihinde Misissipi'de 15 tanklık sıvılaştırılmış gaz yüklü tren raydan çıkmıştır. Bunun sonucunda tanklardan birisinde büyük bir yırtık oluşarak BLEVE olayı görülmüştür. Gözlenen BLEVE ile diğer tanklarda patlamış ve bu patlamalar ateş toplarının oluşumuna öncülük etmiştir. Oluşan ilk ateş topu 400 fit (feet) uzaklıktaki binalarda yangın başlatmıştır. 5 km uzaklıkta bulunan binaların camları parçalanmıştır. Oluşan kaza sonucu; 2 kişi yaşamını yitirmiş ve 976 kişi yaralanmıştır (Abbasi & Abbasi, 2007, sf: 489-519).

Ayrıca yukarıda kazalara ek olarak Tablo 1 de kronolojik bir özet halinde ateş topları ile ilintili farklı kazalar ve oluşumları verilmiş, kazaların istatistiği- etkisi-yapısı tabloda belirtilmiştir:

Tablo 1. BLEVE-Ateş topları ile ilişkili çeşitli kazalar (Mahgerefteh & Atti, 2006, URL-1, Salamonowicz & Majder-Łopatka, 2013, Krausmann & Cruz, 2013, sf: 811-828, URL-2, Al-Shanini, Ahmad & Khan, 2014, sf:319-334).

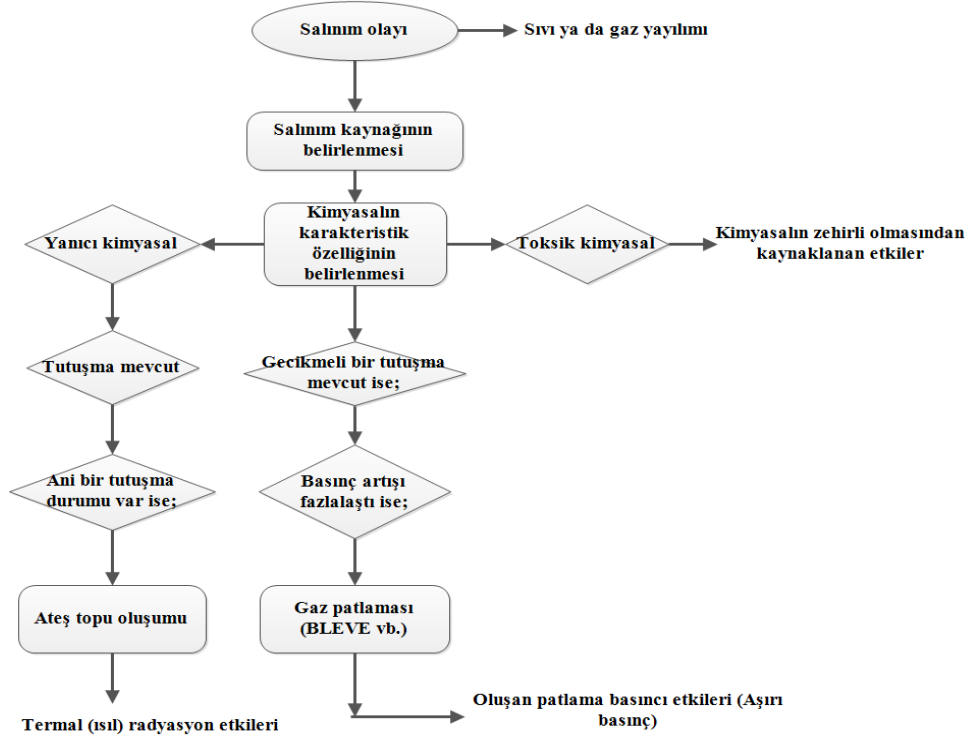
Tarih:	Konum:	Kaza Tipi:	Kaza Sebebi:	Kaza Sonucu Oluşan Etki:
1997 yılı	Varşova, Polonya	Patlama, yangın ve ateş topu oluşumu	Sarhoş bir sürücünün LPG dolum istasyonu depolama tanklarına çarpması sonucu ortama LPG sızması	2 can kaybı, 12 yaralı, ciddi maddi kayıp ve tesis zararı
30 Haziran 2004	Gişlenghayn, Belçika	Ateş topu oluşumu ve buhar bulutu patlaması	Boru hattı üzerinde meydana gelen bir yırtıktan dolayı gerçekleşen salınım	24 can kaybı, 120'den fazla yaralı ve etrafta gözlenen ciddi hasarlar
23 Mart 2005	BP Teksas Şehir Rafinerisi	Ateş topu oluşumu ve buhar bulutu patlaması	Rafinat ayırıcı kulenin aşırı miktarda benzinle dolması ve sızıntı oluşması	15 can kaybı, 180 yaralı ve 1.5 milyar dolar ve fazlası maddi kayıp
17 Haziran 2007	Kansas Vadisi Merkezi	Patlama ve ateş topu oluşumu	Tank içerisinde biriken hava-kimyasal buhar karışımının tutuşması	Ciddi düzeyde mal-mülk zararı
1 Kasım 2007	Karmaykıl, Misissipi, Birleşik Devletler	Ateş topu oluşumu ve buhar bulutu patlaması	Sıvı propanın ortama salınımı	2 ölüm, 7 yaralı ve 33.772.247 Amerikan doları maddi kayıp
11 Mart 2011	Çiba, Doğu Japonya	Deprem ile tetiklenen patlama, yangın ve ateş topu oluşumu	Çiba rafinerisinde bulunan LPG tanklarının ve boru hatlarının deprem etkisiyle çökmesi ve ortama LPG salınımının gerçekleşmesi	600 metre çaplı ateş topu oluşumu, tesisin ve ekipmanların ciddi zarar görmesi, büyük ölçekli maddi kayıp
20 Ekim 2011	Zaroliko, Lurko-Munisya, İspanya	Patlama, yangın ve ateş topu oluşumu	46000 litre sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) taşıyan kamyonun kaza yapması ve LNG kimyasalının ortama salınımı	1 ölüm, alanın yakınında bulunan evlerde ve gaz istasyonunda hasar oluşumu

Pek çok araştırmacı basınçlı bir kaptan gerçekleşen LPG ve benzer salınımlar için BLEVE-Ateş topu temelli termal radyasyon ve benzer tehlikeleri araştırmıştır. Roberts, 1981 yılında ateş topu çapına, süresine ve ısı akısı değerine yanıcı madde kütlelerinin etkisini araştırmıştır (Roberts, 1981, sf: 197-212). Bu çalışma temel alınarak LPG'nin yangın ve patlama ile ilişkili matematiksel formülleri Crocker ve Napier tarafından ortaya konarak; jet yangınların, ateş toplarının ve BLEVE patlama etkilerinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir (Crocker & Napier, 1988, sf: 109-135). Ayrıca Prugh, 1991 yılında yanıcı madde miktarının ve yanıcı madde çeşidinin ateş topu yarıçapına, süresine ve enerjisine olan etkisini araştırmıştır (Prugh, 1991, sf: 9-24). Roberts ve arkadaşları, 2000 yılında İş Sağlığı ve Güvenliği Laboratuvarı'nda basınçlı sıvı içeren kapların jet yangınları ile olan etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler esnasında; pek çok propan tankı yangına maruz bırakılmıştır. Bunun sonucunda ateş toplarının karakteristik özelliklerini ortaya koymuşlardır (Roberts, Gosse & Hawksworth, 2000, sf: 184-192). Planas-Cuchi ve arkadaşları, 2004 yılında daha gerçekçi bir yaklaşımla BLEVE'den kaynaklanan aşırı basınç oluşumlarının hesaplanması için bir model öne sürmüşlerdir (Planas-Cuchi, Salla & Casal, 2004, sf: 431-436). 2008 yılında, Bubbico ve Marchini bir yol tankerinden LPG aktarımı esnasında gerçekleşen kazayı analiz etmişlerdir. Buna göre; ampirik BLEVE formülleriyle gerçekleştirilen hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile kaza alanında görülen fiziksel hasarları incelemişlerdir (Bubbico & Marchini, 2008, sf: 558-565).

## 2. Bleve Temelli Sonuçların Modellenmesi

Bu çalışmanın amacı, BLEVE sonucu oluşan/oluşabilen aşırı basınç, ateş topu gibi etkilerin incelenmesi ve insanlar ve çevre üzerinde yaratacağı sonuçların belirlenmesidir. Çalışma kapsamında, bir patlama sonucu oluşan etkilerin modellenmesi için bir sonuç analiz yöntemi temel alınmış ve bu analiz metoduna göre çalışma adım adım gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

Ayrıca, BLEVE kaynaklı sonuçların sayısal olarak belirlenebilmesi amacıyla bir kaza senaryosu oluşturulmuştur.



Şekil 2: Bir kimyasal salınımında sonuç analizi

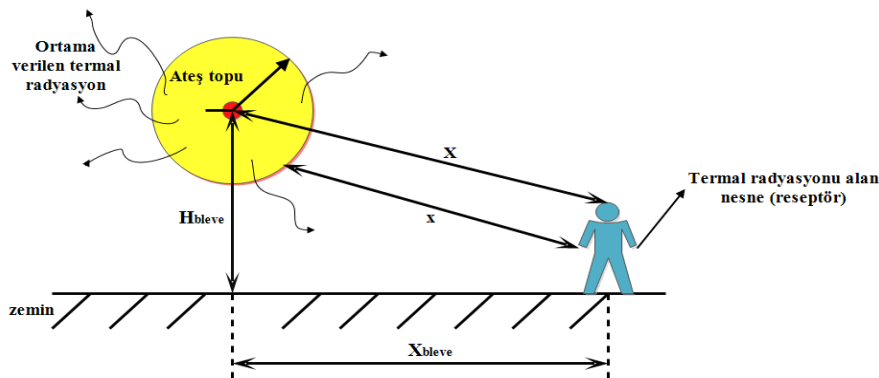
Kaza senaryosuna göre; LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı) içeren bir yatay konumlu bir tanktan olası bir yangın etkisiyle BLEVE ve ateş topu oluştuğu kurgulanmıştır. LPG; oldukça yanıcı, düşük kaynama noktalı ve havada düşük derişimlerde dahi patlayıcılık özelliği gösteren bir kimyasal olduğundan dolayı çalışmada bu madde tercih edilmiştir. LPG kimyasalında ağırlıkça fazla bileşen olarak propan bulunduğu için yatay silindirik tank içerisinde saf propan olduğu kabulü yapılmıştır. Bubbico ve arkadaşları, 2000 yılında LPG tanklarının doluluk oranlarının yaklaşık %80 olduğunu ileri sürdüklerinden çalışmada tankın doluluk oranı %80 olarak belirlenmiştir (Bubbico, Ferrari & Mazzarotta, 2000, sf:27-31). Çalışmada oluşturulan senaryo için kullanılan ayrıntılı veriler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Göz önüne alınan ayrıntılı senaryo verileri (Edgar, Smith, Shinsky, Gassman, Waite, McAvoy & Seborg, 2008).

Tankın hacmi (V):	1200 m <sup>3</sup>
Havanın bağıl nemi (RH):	%48
Ortam sıcaklığı (T <sub>a</sub> ):	303 K
Propanın yoğunluğu (ρ):	483.1059 kg/m <sup>3</sup>
Propanın yanma ısı (ΔH <sub>c</sub> ):	- 46.434*10 <sup>6</sup> j/kg
Propanın buharlaşma ısı (ΔH <sub>v</sub> ):	328.0309*10 <sup>3</sup> j/kg
Propanın molekül ağırlığı (M <sub>A</sub> ):	44 g/mol ya da 44 kg/kmol
Propanın özgül ısı değeri:	1.6188*10 <sup>3</sup> j/kgK
Tankın doluluk oranı (f):	%80
Propanın kritik sıcaklığı (T <sub>c</sub> ):	370 K
Propanın doygunluk basıncı (P <sub>sv</sub> ):	1.0720*10 <sup>6</sup> Pa
Yangındaki sıcaklık farkı (ΔT):	1697 K
Patlama etkinlik yüzdesi (η):	%2
Bleve oluşum mesafesi (X <sub>bleve</sub> ):	500 m

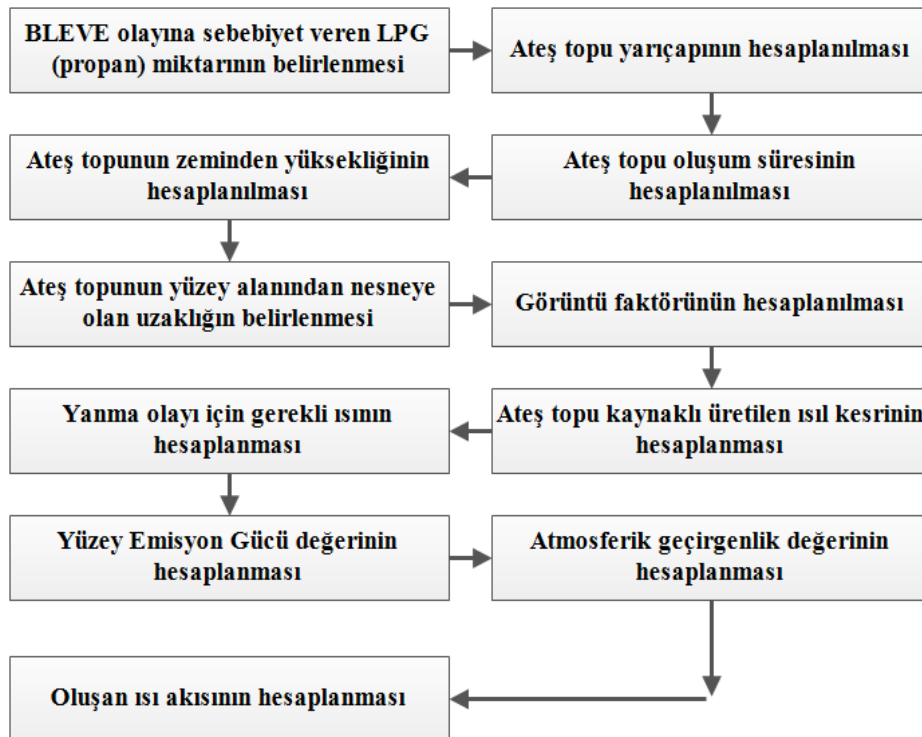
Oluşan patlama basınçlarının ve patlama etkinliğinin değerlendirilmesi için TNT Eşdeğerlik Yöntemi ve formülasyonları kullanılmıştır. TNT yönteminde patlama sonucu oluşan enerji belirli düzeyde şok dalgalarına sebep olur. Bu şok dalgaları ölçeklendirilmiş bir uzaklığa etki eder. Ölçeklendirilmiş uzaklık değeri ile patlama basıncı etkileri hesaplanabilmektedir (Mishra, 2016, sf: 60-67, Shariff, Wahab, & Rusli, 2016, sf: 303-314). TNT Eşdeğerlik Yöntemi, hesaplama parametreleri açısından basit ve düzgün bir korelasyon sunduğu için tercih edilmiştir.

BLEVE sonucu oluşan ateş toplarında tanktaki kimyasalın kütlesi, ateş topunun büyümesi ve oluşumu için geçen süre, ateş topunun çapı, atmosferik geçirgenlik, şekil faktörü ve ateş topu yüzeyinden oluşan ısı radyasyonu gibi parametreler dikkate alınır. Şekil 3’de bir ateş topunun oluşturduğu radyasyonun şekli ve etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3: Ateş topu radyasyon etkisi

BLEVE kaynaklı ateş topu etkisi için gerekli hesaplamalar ise Şekil 4’te verilen adımlar göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4: Bir ateş topu etkisi hesaplama adımları

Literatürde ateş topu için pek çok model eşitlik önerilmesine rağmen (katı alev metodu da dahil), çalışmada ön görülen ateş topu oluşumu için gerekli hesaplamalar TNO (Hollanda Sarı Kitap) yaklaşımının da kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Dünyada patlama ve yangın gibi kazaların modellenmesinde paket yazılımlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu paket yazılımlar, özellikle BLEVE-Ateş topu olaylarında sarı kitap yaklaşımını benimsediklerinden, çalışmada ateş topu sonuç analizi için TNO-Katı alev yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu iki metodun birleştirilmesi literatürde ilk defa çalışmamızda gerçekleştirilmiştir.

Yangın ve patlamaların oluşturduğu sonuçlar genellikle termal (ısı) radyasyon ve patlama basınçları (aşırı basınç etkisi) ile karakterize edilmektedir. Isıl radyasyon ve basınçlar; ekipmanlara, binalara ya da insanlara doğrudan etki ederek, kötü sonuçlara sebep olmaktadır. Bu kötü sonuçlara sebebiyet veren risklerin belirlenmesi için etki-hasar değerlendirmesi yapılmalıdır. Özellikle termal radyasyon ve aşırı basınçlardan kaynaklanan insan sağlığını ciddi tehdit eden etkilerin (Örneğin; 1. Derece yanıklar, 2. Derece yanıklar vb.) sayısal bir ifadeyle değerlendirilebilmesi için Probit eşitlikleri kullanılmaktadır. Probit eşitlikleri kullanılarak, insan sağlığını tehdit eden ciddi tehlikelerin nüfusa dağılım yüzdesi-sayısı, bu tehditlerden dolayı hayatını kaybeden/kaybedebilecek olan nüfus dağılım yüzdesi-sayısı, oluşabilecek akciğer hasarından dolayı hayatını kaybedebilecek olan nüfus dağılım yüzdesi-sayısı vb. belirlenebilir. Literatürde, çeşitli probit eşitlikleri kazaların insanlara ve çevreye olan etkilerini araştırmak üzere ortaya konmuştur. Çalışmada, literatürde belirtilen klasik probit eşitlikleri yerine BLEVE temelli ateş topu etkilerini ortaya koymak için geliştirilmiş probit eşitlikleri kullanılmıştır. Çalışmada geliştirilmiş probit eşitliklerinin kullanılması, literatür açısından bir ilktir. Çalışmada belirtilen TNO-TNT-Probit eşitlikleri ve formülleri Tablo 3'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 3. TNO-TNT ve Probit Eşitlikleri (Mishra, 2016 sf: 60-67, Shariff, Wahab & Rusli, 2016, sf: 303-314, Book, 2005, Malviya & Rushaid, 2018, sf: 4359-4367, Pula, Khan, Veitch & Amyotte, 2006, sf: 79-91, Rashid, Yeong, Alias, Ahmad & Ali, 2018, Rashid, Alias, Hamid, Bani & El Harbawi, 2015, sf: 381-390, Pérez, Ferradás, Alonso, García, Cano & Cotorruelo, 2010, sf: 109-113, Crowl & Louvar, 2001).

Eşitlikler	Eşitlik Numarası
$m = V \times f \times p$	(1)
$r_{fb} = c_9 \times m^{0.325}$ ve $c_9 = 3.24$	(2)
$t = c_{10} \times m^{0.26}$ ve $c_{10} = 0.852$	(3)
$H_{bleve} = 2 \times r_{fb}$	(4)
$X = \sqrt{(x_{bleve}^2 + H_{bleve}^2)}$	(5)
$F_{görüntü} = \left(\frac{r_{fb}}{X}\right)^2$	(6)
$F_s = c_6 \times (P_{sv})^{0.32}$ ve $c_6 = 0.00325$	(7)
$\Delta H = \Delta H_c - \Delta H_v - C_p \Delta T$	(8)
$SEP = \Delta H \times m \times \frac{F_s}{4 \times \pi \times r_{fb}^2 \times t}$	(9)
$x = X - r_{fb}$	(9)
$P_w = 101325 \times (RH) \times \exp\left(14.4114 - \frac{5328}{T_a}\right)$	(11)
$\tau_a = 2.02 \times (P_w \times x)^{-0.09}$	(12)
$q'' = SEP \times F_{görüntü} \times \tau_a$	(13)
$Y_1 = -11.65 + 6.95 \times \log(D)$	(14)
$Y_2 = -13.87 + 6.95 \times \log(D)$	(15)
$Y_3 = -36.38 + 2.56 \times \ln(D)$	(16)
$Y_4 = -77.1 + 69.1 \times \ln(P_o)$	(17)
$D = \left[ t \times \left( \frac{q''}{1000} \right)^{\frac{4}{3}} \right]$	(18)

$$D = \left[ t \times (q'')^{\frac{4}{3}} \right] \quad (18)$$

$$P = 50 \times \left[ 1 + \frac{Y - 5}{|Y - 5|} \times \operatorname{erf} \left( \frac{|Y - 5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (20)$$

$$m_{TNT} = \frac{\eta \times m \times \Delta H_c}{E_{TNT}} \quad (21)$$

$$Z_e = \frac{1}{\frac{m_{TNT}^{\frac{3}{3}}}{4.5}} \quad (22)$$

$$P_0 = \frac{1616 \times \left[ 1 + \left( \frac{Z_e}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z_e}{0.048} \right)^2} \times \sqrt{1 + \left( \frac{Z_e}{0.32} \right)^2} \times \sqrt{1 + \left( \frac{Z_e}{1.35} \right)^2}} \times P_\alpha \quad (23)$$

Cp	: Kimyasalın özgül ısı [J/kgK]	P <sub>sw</sub>	: Kimyasalın doygunluk basıncı [Pa]
C <sub>6</sub>	: 0.00325 katsayısı [-]	P <sub>w</sub>	: Yangında oluşan suyun kısmi basıncı [Pa]
C <sub>9</sub>	: 3.24 katsayısı [-]	q	: Nesne/reseptör tarafından algılanan ısı radyasyon miktarı [W/m <sup>2</sup> ]
C <sub>10</sub>	: 0.852 katsayısı [-]	r	: Yangın/patlama kaynağından olan mesafe [m]
D	: Reseptörün absorpladığı ısı radyasyon dozu [-]	r <sub>fb</sub>	: Ateş topu yarıçapı [m]
Erf	: Matematiksel hata fonksiyonu [-]	RH	: Havanın bağıl nemi [-]
E <sub>TNT</sub>	: 468600 J/kg değerine sahip TNT patlama enerjisi [J/kg]	SEP	: Yüzey emisyon gücü [W/m <sup>2</sup> ]
Exp	: Ekspansiyon (üstel) [-]	t	: Ateş topu oluşum süresi [s]
f	: Tankın/kabın doluluk derecesi [-]	TNT	: Trinitrotoluen [-]
F <sub>s</sub>	: Ateş topu kaynaklı üretilen ısı kesr. [-]	T <sub>a</sub>	: Atmosferik sıcaklık [K]
F <sub>görüntü</sub>	: Ateş topunun zemine etki eden görüntü/şekil faktörü, [-]	V	: Tankın/kabın hacmi [m <sup>3</sup> ]
H <sub>bleve</sub>	: Ateş topunun zeminden olan yüksekliği [m]	x	: Radyasyon gerçek yol uzunluğu [m]
ΔH	: Radyasyon kaynaklı net ısı değeri [J/kg]	X	: Ateş topu merkezi ile nesne arasındaki uzaklık [m]
ΔH <sub>c</sub>	: Kimyasalın yanma ısı [J/kg]	Y <sub>1</sub>	: 1.derece yanıklar için probit değeri [-]
ΔH <sub>v</sub>	: Kimyasalın buharlaşma ısı [J/kg]	Y <sub>2</sub>	: 2.derece yanıklar için probit değeri [-]
log	: Doğal logaritma [-]	Y <sub>3</sub>	: 3.derece yanıklar için probit değeri [-]
ln	: Logaritma e tabanı [-]	Y <sub>4</sub>	: Akciğer yırtığı için probit değeri [-]
m	: Ateş topu oluşturan/ortama verilen kimyasal kütlesi [kg]	Ze	: Ölçeklendirilmiş uzaklık [m/kg <sup>1/3</sup> ]
P	: Probit genel etki yüzdesi değeri [-]	ρ	: Kimyasalın yoğunluğu [kg/m <sup>3</sup> ]
Π	: Pi sayısı [-]	η	: Patlama etkinliği değeri [-]
P <sub>0</sub>	: Aşırı basınç (patlama basıncı) [kPa]	T <sub>a</sub>	: Atmosferik geçirgenlik [-]

Çalışmada, bir patlama sonucu oluşan aşırı basınçların, insanlara ve çevreye verdiği hasarların belirlenmesi için Tablo 4'te görülen için aşırı basınç-hasar etkisi ilişkilerinden yararlanılmıştır.

Tablo 4: Aşırı basınç-hasar etkisi (Clancey, 1972).

Basınç değeri [kPa]:	Hasar Etkisi:
0.21	Belirli bir gerilimle büyük camların parçalanması
0.69	Küçük boyutlu camların parçalanması
1.03	Tüm camların kırılması için gerekli basınç
2.07	Bazı uçan parçaların oluşumu ve evlere zararı
2.76	Küçük ölçekli yapısal hasarlar
3.4-6.9	Camların çerçevelerinin hasar görmesi
4.8	Küçük ölçekli evsel hasarlar
6.9	Evlerin kısmi çökmesi, çelik ya da alüminyum panellerin zarar görmesi
6.9-13.8	Duvarların kısmi çökmesi, evlerin çatılarının zarar görmesi
13.8	Sıvasız binaların %50'sinin hasar görmesi
13.8-20.7	Yağ depolama tanklarının parçalanması
17.2	Hafif endüstriyel binaların ön panellerinin hasarı
20.7-27.6	Bina kolonlarının hafif yapısal hasarı
34.5-48.2	Evlerin birçoğunun hasarı

Ateş topundan kaynaklanan ısı tehlikeleri termal radyasyon yoğunluğunun bir sonucudur. Bu tehlikeler ölüm ihtimali ve çeşitli yanık dereceleri ile ifade edilmektedir. Tablo 5'de ateş topundan kaynaklanan farklı ısı zarar dereceleri görülmektedir.



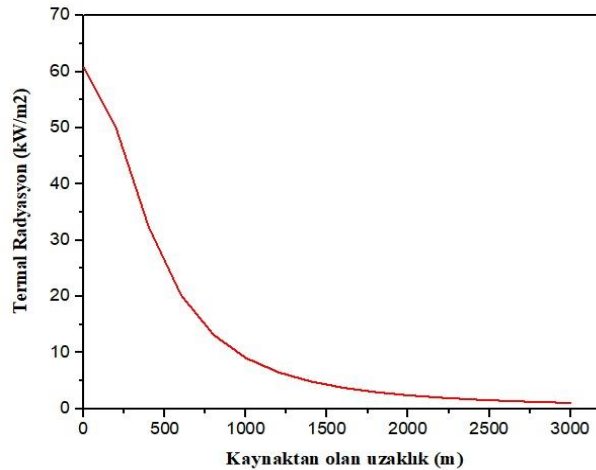
Tablo 5: Farklı ısı zararı dereceleri (Wang, Qian, He, Shi &amp; Zhang, 2020).

Termal yoğunluk: (Kw/m <sup>2</sup> )	Çevreye olan termal zarar:	İnsanlara olan ısı zarar:	Sınıflandırma:
37.5	Tesislere çok ciddi zarar	1 dakikada %100 ölüm oranı ve 20 saniyede %50 ölüm oranı	ÖLÜMCÜL
25	Ahşabı tutuşturmak için minimum enerji	1 dakikada %50 ölüm oranı	AĞIR KAYIP
Termal yoğunluk (kW/m <sup>2</sup> ):	Çevreye olan termal zarar:	İnsanlara olan ısı zarar:	Sınıflandırma:
12.5	Plastik malzemelerin erimesi	1 dakikada %1 ölüm ve 1. dereceden yanık oluşumu	ORTA DERECE
4.0	PVC izolasyon malzemelerinin hasar görmesi	20 saniye ve daha fazla sürede ağır oluşumları	HAFİF
1.6	Ekipmanlara, binalara vb.'ye zarar görülmez	Minimum acı eşiği	ZARARSIZ

Bu ısı derece tablosu da kullanılarak, çalışmada oluşan termal radyasyon etkisinin insan ve çevre üzerinde oluşturacağı etkiler yorumlanmıştır.

### 3. Araştırma Bulguları ve Tartışma

Ortama verilen bir kimyasalın yarattığı termal radyasyon etkileri insanlar ve çevre için çok büyük tehlike teşkil etmektedir. Bu tehlikelerin belirlenebilmesi amacıyla Tablo 5'de verilen ısı zarar dereceleri kullanılmıştır. Bu bağlamda; Tablo 3'de belirtilen 1-13 numaralı eşitliklerin de kullanılmasıyla senaryoda belirtilen ateş topunun oluşturduğu değişen termal radyasyon miktarına karşı ateş topu kaynağından olan uzaklık grafiğe geçirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5: BLEVE temelli Ateş topu termal radyasyon grafiği.

Şekil 5'de Ateş topundan farklı uzaklıklarda ısı radyasyon miktarının da değiştiği görülmektedir. Ateş topu oluşumu sonrası oluşan maksimum termal enerji değeri 61.9 Kw/m<sup>2</sup>'dir. Başlangıç anında oluşan ısı akısı değeri (maksimum termal enerji) oldukça yüksektir. Bunun sebebi ise ateş topunun zemine yakın bir şekilde genişleyerek küre şeklini almasıdır. Senaryoda belirtilen yatay silindirik tanktan uzaklaştıkça ateş topu ısı radyasyon enerjisi azalmaktadır. Grafikte görülen termal radyasyon azalış hızı 250-550 metre arasında daha hızlı gerçekleşmektedir. Ateş topu merkezinden 400 metre uzaklıkta ısı radyasyon

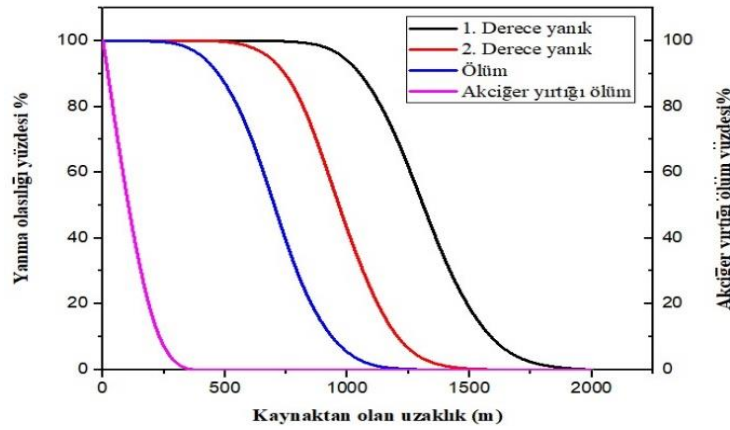
değeri 37.5 Kw/m<sup>2</sup>'dir. Farklı ısı zarar derecelerine göre; insanlar 37.5 Kw/m<sup>2</sup> 'lik ısı radyasyon bölgesinde 1 dakika kalır iseler kesinlikle öleceklerdir. 20 saniye boyunca aynı bölge kalırlar ise; ölüm olasılığı %50'ye düşecektir. Bu esnada çevrede bulunan binalar, tesisler çok ciddi zarar görecektir. Bu bölge ölümcül bölge olarak sınıflandırılabilir. Ateş topundan olan uzaklık 570 metreye çıktığında oluşan ateş topu termal radyasyon miktarı 25 Kw/m<sup>2</sup>'ye gerileyecektir. Termal radyasyon hasarı olan bu bölge ağır kayıp bölgesi olarak da düşünülebilir. Bu alanda 1 dakika süresince kalındığı takdirde ölüm tehlikesi %50 olmaktadır. Uzaklık 875 metre olduğu durumda ısı radyasyon değeri 12.5 Kw/m<sup>2</sup> olacaktır. Bu bölgede insanlar 1 dakika boyunca radyasyona maruz kalır iseler; alandaki insanların %1'i hayatını kaybedecektir. 10 saniye maruziyet süresinde ise; vücutlarında 1. Dereceden yanık oluşumları gözlemlenecektir. Bu alan orta derecede tehlikeli olarak sınıflandırılabilir. Ateş topundan itibaren uzaklık 1520 metreye çıktığında ısı radyasyon değeri 4 Kw/m<sup>2</sup> olacaktır. Bu alanda insanların vücutlarında yanıklardan ziyade ağır oluşumları gözlemlenecektir. Bu ağır oluşumları alanda en az 20 saniye boyunca ısı radyasyona maruz kalındığında oluşacaktır. Bu alan hafif tehlikeli olarak değerlendirilebilir. Literatürde bu termal radyasyon enerjisi değeri değişkenlik gösterebilir. Örneğin; 1986 yılında Crocker ve Napier 14.5 saniye boyunca 4.7 Kw/m<sup>2</sup> değerinde bir ısı radyasyona maruz kalındığında ağır oluşumlarının gözlemlendiğini bildirmişlerdir. 10-12 Kw/m<sup>2</sup> termal radyasyon değerinde bir alanda bulunan tüm bitkiler yanarlar. Bu durumda 875 metre ile 1000 metre mesafeler arasında bulunan bölgedeki bitkiler ve bitki örtüsü yanacaktır (Wang, Qian, He, Shi & Zhang, 2020, Wang, Liu, Qian & Huang, 2017, sf:13-22, Zhang, Laboureur, Liu & Mannan, 2016, sf:315-322, Dhurandher, Kumar & Dhiman, 2015, sf:499-506, Bariha, Mishra & Srivastava, 2016, sf:449-460, Planas, Pastor, Casal & Bonilla, 2015 sf:127-138, Bariha, Mishra & Srivastava, 2014, sf:7-9).

Çalışmada senaryoya göre BLEVE sonucu oluşan bir ateş topunun sabit bir uzaklıktaki karakteristik özellikleri (ateş topunu oluşturan kimyasal kütlesi, ateş topu yarıçapı, ateş topu oluşum süresi, ateş topu havalanma yüksekliği, ateş topu merkezi ile reseptör arası uzaklık, ısı radyasyon gerçek yol uzunluğu ve ısı radyasyon miktarı) Tablo 2'de verilen ayrıntılı senaryo verilerinin ve Tablo 3'de verilen eşitliklerin (Eşitlik 1-13) de kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6 içerisinde özetlenmiştir:

Tablo 6: Oluşan ateş topunun karakteristik özellikleri

Parametreler:	Sonuç:
Ateş topu oluşturun LPG miktarı, m	463781.66 kg
Ateş topu yarıçapı, rfb	224.96 m
Ateş topu oluşum süresi, t	25.33 s
Ateş topunun zeminden havalanma yüksekliği, Hbleve	449.91 m
Ateş topu merkezi-nesne arası uzaklık, X	672.62 m
Isı radyasyonun gerçek yol uzunluğu, x	447.67 m
Ateş topu merkezi ile nesne arasındaki yatay uzaklık, Xbleve	500 m
Belli bir noktada ısı akısı/Isı radyasyon miktarı, q''	25532.52 W/m <sup>2</sup>

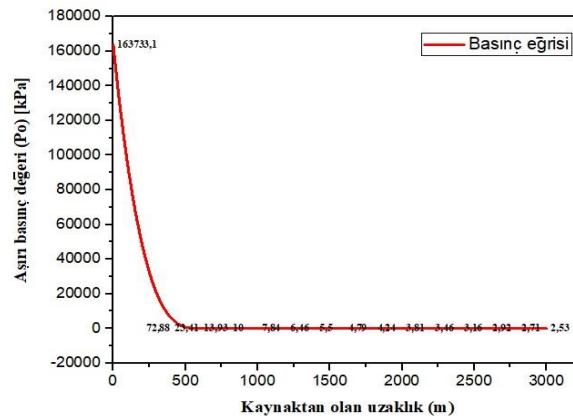
Meydana gelen kazaların insanlar ve hayvanlar üzerine etkilerinin araştırılması için literatürde çeşitli probit eşitlikleri geliştirilmiştir. Bu eşitlikler çoğunlukla kaza etki sonuçlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Lees, 1994, sf: 127-134). En çok kullanılan eşitlikler mevcuttur. TNO (Book, 1992, Eisenberg, Lynch & Breeding, 1975). Ancak çalışmada probit eşitlikleri olarak Alonso ve arkadaşlarının 2010 yılında geliştirdiği yeni eşitlikler 1. ve 2. Derece yanıklar için kullanılmıştır. Böylece literatürde ilk defa bu eşitlikler kullanılarak sonuç etkileri araştırılmıştır. Şekil 6'da ateş topundan kaynaklanan termal radyasyonun oluşturduğu yanma dereceleri ve akciğer yırtığı hasar olasılık yüzdelere karşı ateş topundan olan uzaklık grafiği geçirilmiştir. Grafiğin oluşturulması için Tablo 3'de belirtilen 14-20 numaralı eşitlikler kullanılmıştır.



Şekil 6: Ateş topu temelli termal radyasyonun probit dağılımı.

İnsanlarda ateş topundan dolayı oluşabilecek akciğer yırtığı hasarı, yatay silindirik tanktan 260 metrelik mesafe için söz konusudur. Tanktan veya ateş topundan olan ilk 50 metrelik mesafede alanda bulunan insanların %100'ü akciğer yırtığından dolayı da hayatını kaybedecektir. Ateş topundan 550 metre uzaklıktaki bölgede bulunan insanların tamamı termal radyasyondan dolayı yaşamını yitirecektir (ölüm eğrisi). Tanktan 550-750 metre uzaklıkta insanların tamamı 2. Derece yanıklara sahip olacaktır. Ateş topundan 750-1250 metre uzaklıktaki alanda bulunan insanların tamamı 1. Derece yanıklara sahip olacak ve termal radyasyon etkilerini hafif atlatacaklardır. Grafikten görüldüğü üzere ateş topundan itibaren yaklaşık 50-1600 metre mesafeli bölge içerisinde bulunan insanlarda birincil-ikincil yanıklara, akciğer yırtığı ve ölüm gibi etkiler görülecektir. Ateş topundan ya da tanktan olan uzaklık arttıkça alanda bulunan insanların, termal radyasyon etkilerinden zarar görme tehlikesi azalmaktadır [32,38]. Rashid ve arkadaşları, 2010 yılında 34.5 m<sup>3</sup> (13000 kg) hacme sahip bir LPG yol tankerinin kazasını modellemişlerdir. Yaptıkları termal radyasyon kaynaklı etki modellemesinde Probit analizi de gerçekleştirmişlerdir. Buna göre; 100-210 metre mesafe içerisinde bulunan insanların ısı radyasyon tehlikelerine (birinci derece, ikinci derece yanıklar vb.) maruz kalacaklarını bildirmişlerdir (Rashid, El-Harbawi, Shariff, 2010, sf:115-116). Rashid vd. belirlediği etki mesafeleri ile çalışmamızda elde ettiğimiz probit etki mesafeleri arasındaki farklılığın sebebi ise tank hacmi ya da salınan kimyasal miktardır.

Bir BLEVE sonucu oluşan patlama dalgası etkileri için TNT eşitlik metodu kullanılmıştır. Aşırı basınç etkilerinin belirlenmesi amacıyla Tablo 3'de verilen Eşitlik 21-23 ile aşırı basınç hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen basınç değerlerine karşı ateş topundan/tanktan olan mesafe grafiği ise Şekil 7'de verilmiştir. Oluşan aşırı basınç etkilerinin değerlendirilmesi için Tablo 4'de verilen aşırı basınç-hasar etkisinden yararlanılmıştır.



Şekil 7: Uzaklığın aşırı basınç üzerine etkisi.

Senaryoda sözü edilen yatay silindirik tanktan 300 metrelik mesafe içerisinde bulunan insanların hemen hemen hepsi BLEVE sonucu yaşamını yitirecektir ve etrafta bulunan evler, tesisler tamamen zarara uğrayacaktır. Ancak alandaki insanlar, patlamadan kaçınmak için dayanımı güçlendirilmiş sığınaklar, binalar bulunduğu ölüm oranı düşebilir (Bariha, Mishra & Srivastava, 2016, sf:449-460). 50-300 metrelik mesafe içerisinde patlama sonucu oluşan aşırı basınç değeri (patlama basıncı) grafikten görüldüğü üzere keskin bir şekilde azalmaktadır. 500 metrelik mesafede bulunan binaların kolonlarda hafif hasarlar oluşacaktır. 750 metre mesafe içerisinde bulunan sıvasız-inşaat halindeki binaların duvarlarında ve çatılarında hasar oluşacaktır. 1000-1500 metrelik mesafede küçük ölçekli hasarlar, ev panellerinin sökülmesi gibi durumlarla karşılaşılabılır. 1500 metreden fazla mesafelerde ise cam parçalanmaları, uçan parçaların oluşumu vb. gibi etkilerle karşılaşılabılır.

#### 4. Sonuçlar

Aşırı basınç oluşumları (patlama basınçları), ateş topu oluşumları (termal radyasyon etkisi), uçan parça oluşumları vb. bir BLEVE olayının sonuçlarıdır. Çalışmada TNO-Katı alev-TNT (Patlama eş değeri) ve probit (hasar-etki değerlendirme) analizleri ve eşitliklerinin kullanılmasıyla örnek bir kaza senaryosunda oluşan aşırı basınç, termal radyasyon ve ölüm-yanık dereceleri gibi sonuçların çevreye ve insanlar üzerine etkilerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

BLEVE temelli oluşan ateş topundan kaynaklanan ısı radyasyon değeri 61.9 kW/m<sup>2</sup> olarak belirlenmiş olup, bu değer kaza alanında bulunan insanların tamamının ölümüne sebep olacaktır. Dahası alanda bulunan tesislerde, binalarda, ekipmanlarda vb. tamamen tahribat etkisi gözlemlenecektir.

- Termal (ısı) radyasyon değeri patlamanın/yanığın kaynağından uzaklaştıkça azalacaktır. Buna bağlı olarak insanlara ve çevreye olan ısı radyasyon hasar seviyesi de düşecektir.
- Ateş topunu oluşturan kimyasal kütlesi, ateş topu yarıçapı, ateş topu oluşum süresi, ateş topu havalanma yüksekliği, ateş topu merkezi ile reseptör arası uzaklık, ısı radyasyon gerçek yol uzunluğu parametreleri bir ateş topunun oluşmasına ve ısı radyasyon değerine etki eden parametreleri oluşturacaktır.
- Elde edilen sayısal verilerin literatürle değişkenlik göstermesi senaryo parametrelerine (kimyasalın cinsi, kimyasal miktarı, sıcaklık vb.) bağlı olduğu tespit edilmiştir.
- Ateş topuna sebebiyet veren LPG kimyasal kütlesi 463781.66 kg ve ateş topunun yarıçap değeri 224.96 metre olarak belirlenmiştir.
- Alonso ve arkadaşları tarafından geliştirilen yeni probit eşitlikleri modelleri, probit analizlerinin güncel bir şekilde gerçekleştirilmesi açısından yarar sağladığı gözlemlenmiştir.
- Termal (ısı) radyasyonun yüksek olduğu bölgede insanlar üzerinde hem ölümcül yanıklar hem de akciğer hasarı görülebileceği düşünülmektedir.
- Patlamanın/yanığın kaynağından uzaklaştıkça, yanıkların şiddetinin azalacağı belirlenmiştir.
- Patlama/yanığın kaynağından olan ilk 300 metrelik uzaklık içerisinde oluşan patlama basıncı ağır tahribat etkisine ve insanların yaşamlarını kaybetmesine önemli rol oynadığı kanısı ortaya çıkmıştır.
- Patlama/yanığın kaynağından olan uzaklık arttıkça cam kırılmaları, uçan parça oluşumları, bina duvarları zararları vb. gibi ölüm etkisine kıyasla hafif etkiler daha çok fazla olduğu gözlemlenmiştir.

## 5. Kaynaklar

Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2007). The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 489-519.

Ahlert, R. C. (2000). Guidelines for consequence analysis of chemical releases. Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), New York, NY, (1999,) 320 Pages, [ISBN No.: 0-8169-0786-2], US. List Price: \$129.00. *Environmental Progress*, 19(3), F6-F6.

Al-Shanini, A., Ahmad, A., & Khan, F. (2014). Accident modelling and analysis in process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 319-334.

Bariha, N., Mishra, I. M., & Srivastava, V. C. (2014). Analysis of fire and explosion hazards during surface transport of liquefied petroleum gas: a case study. In *Institution of Chemical Engineers Symposium Series (Vol. 159, pp. 7-9)*.

Bariha, N., Mishra, I. M., & Srivastava, V. C. (2016). Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India. *Journal of loss prevention in the process industries*, 40, 449-460.

Birk, A. M., & Cunningham, M. H. (1994). The boiling liquid expanding vapour explosion. *Journal of loss prevention in the process industries*, 7(6), 474-480.

Bubbico, R., Ferrari, C., & Mazzarotta, B. (2000). Risk analysis of LPG transport by road and rail. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13(1), 27-31.

Bubbico, R., & Marchini, M. (2008). Assessment of an explosive LPG release accident: A case study. *Journal of Hazardous Materials*, 155(3), 558-565.

Bonilla, J. M., Àgueda, A., Muñoz, M. A., Vilchez, J. A., & Planas, E. (2019). Thermal radiation model for dynamic fireballs with shadowing. *Process Safety and Environmental Protection*, 128, 372-384.

Book, T. G. (1992). Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials. Report CPR E, 16.

Book, T. Y. (2005). *Methods for Calculation of Physical Effects due to Releases of Hazardous Materials*. Gevaarlijke Stoffen, Netherland.

Clancey, V. J. (1972). Diagnostic features of explosion damage. In *Sixth International Meeting of Forensic Sciences*, Edinburgh, 1972.

Crocker, W. P., & Napier, D. H. (1988). Assessment of mathematical models for fire and explosion hazards of liquefied petroleum gases. *Journal of Hazardous Materials*, 20, 109-135.

Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2001). *Chemical process safety: fundamentals with applications*. Pearson Education.

Dhurandher, B. K., Kumar, R., & Dhiman, A. (2015). Impact assessment of thermal radiation hazard from LPG fireball. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 499-506.

Edgar, T. F., Smith, C. L., Shinskey, F. G., Gassman, G. W., Waite, A. W., McAvoy, T. J., & Seborg, D. E. (2008). Perry's Chemical Engineers' Handbook. Section 8. McGraw-Hill Publishing.

Eisenberg, N. A., Lynch, C. J., & Breeding, R. J. (1975). Vulnerability model. A simulation system for assessing damage resulting from marine spills. Enviro control inc rockville md.

Hemmatian, B., Planas, E., & Casal, J. (2015). Fire as a primary event of accident domino sequences: the case of BLEVE. Reliability Engineering & System Safety, 139, 141-148.

Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1998). Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 11(4), 261-277.

Krausmann, E., & Cruz, A. M. (2013). Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. Natural Hazards, 67(2), 811-828.

Lees, F. P. (1994). The assessment of major hazard: a model for fatal injury from burns. Process safety and environmental protection, 72(3), 127-134.

Lees, F. (2012). Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control. Butterworth-Heinemann.

Mahgerefteh, H., & Atti, O. (2006, April). An analysis of the gas pipeline explosion at Ghislenghien, Belgium. In 2006 Spring Meeting and 2nd Global Congress on Process Safety.

Malviya, R. K., & Rushaid, M. (2018). Consequence analysis of LPG storage tank. Materials Today: Proceedings, 5(2), 4359-4367.

Mishra, K. B. (2016). Multiple BLEVE's and fireballs of gas bottles: Case of a Russian road carrier accident. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 41, 60-67.

Pérez, J. F. S., Ferradás, E. G., Alonso, F. D., García, D. P., Cano, M. V. M., & Cotorruelo, J. Á. B. (2010). New Probit equations for the calculation of thermal effects on humans. Process Safety and Environmental Protection, 88(2), 109-113.

Planas, E., Pastor, E., Casal, J., & Bonilla, J. M. (2015). Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: the Zarzalico accident. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 34, 127-138.

Planas-Cuchi, E., Salla, J. M., & Casal, J. (2004). Calculating overpressure from BLEVE explosions. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 17(6), 431-436.

Prugh, R. W. (1991). Quantitative evaluation of "bleve" hazards. Journal of Fire Protection Engineering, 3(1), 9-24.

Pula, R., Khan, F. I., Veitch, B., & Amyotte, P. R. (2006). A grid based approach for fire and explosion consequence analysis. Process Safety and Environmental Protection, 84(2), 79-91.

Rashid, Z. A., Alias, A. B., Hamid, K. H. K., Bani, M. S., & El Harbawi, M. (2015). Analysis the Effect of Explosion Efficiency in the TNT Equivalent Blast Explosion Model. In ICGSCE 2014 (pp. 381-390). Springer, Singapore.

Rashid, Z. A., El-Harbawi, M., Shariff, A. R. (2010). Assessment on the consequences of Liquefied Petroleum Gas Release Accident in the Road Transportation via GIS Approaches. *Journal of Applied Science* 10(12):1157-116.

Rashid, Z. A., Yeong, A. M. S., Alias, A. B., Ahmad, M. A., & Ali, S. A. (2018, May). Study of vapour cloud explosion impact from pressure changes in the liquefied petroleum gas sphere tank storage leakage. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 358, No. 1, p. 012073). IOP Publishing.

Roberts, A. F. (1981). Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage. *Fire Safety Journal*, 4(3), 197-212.

Roberts, T., Gosse, A., & Hawksworth, S. (2000). Thermal radiation from fireballs on failure of liquefied petroleum gas storage vessels. *Process safety and environmental protection*, 78(3), 184-192.

Salamonowicz, Z., & Majder-Łopatka, M. (2013). Emergency scenarios during accidents involving LPG. BLEVE explosion mechanism. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*.

Sellami, I., Manescau, B., Chetehouna, K., de Izarra, C., Nait-Said, R., & Zidani, F. (2018). BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, 69-84.

Shariff, A. M., Wahab, N. A., & Rusli, R. (2016). Assessing the hazards from a BLEVE and minimizing its impacts using the inherent safety concept. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 303-314.

Wang, K., Qian, X., He, Y., Shi, T., & Zhang, X. (2020). Failure analysis integrated with prediction model for LNG transport trailer and thermal hazards induced by an accidental VCE: A case study. *Engineering Failure Analysis*, 108, 104350.

Wang, K., Liu, Z., 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. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 46, 13-22.

Zhang, J., Laboureur, D., Liu, Y., & Mannan, M. S. (2016). Lessons learned from a supercritical pressure BLEVE in Nihon Dempa Kogyo Crystal Inc. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 315-322.

Zhang, Q. X., & Liang, D. (2013). Thermal radiation and impact assessment of the LNG BLEVE fireball. *Procedia Engineering*, 52, 602-606.

İnternet Erişim Kaynağı:

URL-1: <https://www.csb.gov/bp-america-refinery-explosion>, Erişim tarihi Mayıs 17, 2020.

URL-2: <https://www.csb.gov/barton-solvents-explosions-and-fire>, Erişim tarihi Mayıs 17, 2020.