

PAPER DETAILS

TITLE: Patlama, yangin ve toksik yayilim fiziksel etki alaninin belirlenmesi

AUTHORS: Saliha ÇETINYOKUS

PAGES: 845-853

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/402921>



Patlama, yangın ve toksik yayılım fiziksel etki alanının belirlenmesi

Determination of explosion, fire and toxic emission physical effect areas

Saliha ÇETİNYOKUŞ^{1*}

¹Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

salihakilicarslan@gazi.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 08.02.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 30.05.2016

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.90093

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Çalışmada, patlama, yangın ve toksik yayılım ile sonuçlanan endüstriyel kazaların etki alanlarının belirlenmesine yönelik metodoloji geliştirilmiştir. Afet riskli alanlarının derecelendirilmesi için risk matrisi oluşturulmuştur. Sanayiciler ile kontrol ve izlemede görevli ilgili kişi ya da kurumların hangi durumda hangi etki alanı belirleme aracını kullanabileceği açıklanmaya ve standart bir yaklaşım oluşturulmaya çalışılmıştır. Patlama, yangın ve toksik yayılım etkisi oluşturabilecek bir kuruluş için aynı miktarda (30000lb) toksik gaz (klor), toksik sıvı (hidrazin) ve yanabilen madde (propan) üzerinden örnek uygulama çalışmaları yürütülmüştür. Örnek uygulamalar, tesis dışı risk analizine dayanan korelasyonlar ve ücretsiz ALOHA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korelasyonlara ait alternatif senaryo sonuçları ALOHA yazılımı ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak belirlenmiştir. Böylece, etki alanını belirleyebilmek için daha az veri bilgisi gerektiren korelasyonların öncelikli olarak pratik bir şekilde uygulanabileceği tespit edilmiştir. En geniş sonlanma noktası mesafesi (54.2 km-en kötü durum senaryosu, 60 dk. kırsal alan) örnek toksik sıvı (hidrazin) için elde edilmiştir. Korelasyonlar değerlendirildiğinde, kırsal alan için tüm sonlanma noktası mesafelerinin kentsel alana göre yüksek olduğu belirlenmiştir. ALOHA yazılımında ise kırsal ve kentsel durum için tehlike alanı mesafelerinin çok büyük bir değişim göstermediği tespit edilmiştir. Örnek uygulama çalışmaları sonucunda kuruluş, yüksek risk seviyesinde belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Endüstriyel kaza, Patlama, Yangın, Toksik yayılım, Fiziksel etki alanı

Abstract

In the study, a methodology was developed for the determination of effect areas considering explosion, fire and toxic emissions of industrial accidents. A risk matrix was established for grading of disaster risk areas. It was tried to explain that manufacturers and control and monitoring of the relevant person or institution in charge of in which state and with which tool could be used to determine the impact area and to create a standard approach. The case studies were carried out over the same amount (13 620 kg) of toxic gases (chlorine), toxic liquids (hydrazine) and flammable substances (propane) which might pose explosion, fire and toxic emissions affects for an establishment. The case studies were performed with using correlations based on offsite consequence analysis and free ALOHA software. The results of alternative scenario correlation were determined in accordance with the results obtained with the ALOHA software. Thus, it was determined that correlations required less information in order to determine effect area may be implemented in a practical way primarily. The largest end-point distance (54.2 km-worst case scenario, 60 min, rural areas) was obtained for sample toxic liquid (hydrazine). When correlations were evaluated, all endpoint distance for rural areas were found to be higher than in urban areas. Threat zone distances were found to be not change so much in ALOHA software for rural and urban areas. The establishment was obtained at a high risk level as a result of case studies.

Keywords: Industrial accident, Explosion, Fire, Toxic emission, Physical effect areas.

1 Giriş

Büyük endüstriyel kaza, kuruluş işletim sürecinde, kontrolsüz gelişmelerden kaynaklanan ve kuruluş içinde veya dışında çevre ve insan sağlığı için anında veya daha sonra ciddi tehlikeye yol açabilen bir veya birden fazla tehlikeli maddenin sebep olduğu büyük bir yayılım, yangın veya patlama olayıdır. 10 Temmuz 1976 tarihinde Kuzeybatı İtalya'daki Seveso' da ICMESA kimyasal şirketine ait fabrikada triklorofenol (TCP) üretimi yapan bir reaktördeki patlama sonucu beyaz bir gaz bulutu (dioksin-bilinen en zehirli gaz) çevreye yayılmıştır. Gerçekleşen bu ölümcül kaza sonrasında, endüstriyel kazaların oluşmasının engellenmesi ve gerekli önlemlerin alınması adına çalışmalar yürütülmüştür. 9 Aralık 1996'da 96/82/EC sayılı Seveso-II Direktifi, 26 Haziran 2012'de 2012/18/EEC sayılı Seveso-III direktifi Avrupa'da yayımlanmıştır. Seveso-II Direktifi' ni ülkemiz mevzuatına uyumlaştıran "Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik" ise 30 Aralık 2013 tarihinde yürürlüğe girmiştir [1]. Yönetmelik, belirli isim ve miktarlarda tehlikeli maddelerin bulunduğu kuruluşlara (üst seviyeli ve alt seviyeli kuruluş) uygulanmaktadır ve sanayicilere ciddi yükümlülükler getirmektedir. Ülkemizde yaklaşık 1000 Seveso kuruluşu (%40 üst seviyeli; %60 alt

seviyeli) bulunmaktadır. Endüstriyel kazaların neden olduğu patlama, yangın ve toksik yayılıma ait fiziksel etki alanının belirlenmesi dolayısı ile son dönemde dikkat çeken önemli bir konu haline gelmiştir. Etki alanı belirlenmesinde, korelasyonlar ve yazılımlar (EFFECTS-TNO, FRED-SHELL, RISKCALC-AVIV, SAFETI-DNV, SAVEII-SAVE, ALOHA-EPA) kullanılmaktadır. Literatürde bu yöndeki çalışmaların yoğunlaştığı görülmüştür. Jiang ve diğ. (2016) tarafından yarı kapalı borularda metan-hava patlamasının çok parametrelili etkileri ve patlamaya dayanıklı mesafe değerleri belirlenmiştir. Maksimum yüksek basınç etkileri, sıcaklık, patlama hızı ve patlamadan korunma mesafesi değerlerinin yakıt hacmi arttıkça arttığı ve lineer bir değişim gösterdiği tespit edilmiştir [2]. Brzozowska (2016) tarafından klor tanker kazasının etkileri bilgisayar simülasyonu ile değerlendirilmiştir. Simülasyonlar, iki farklı rüzgâr yönü senaryosunda yürütülmüş, 10 ton klor kaçağı sonucunda 2 km² mesafede ölüme maruz kalabilecek 5000 insan sayısı tespit edilmiştir [3]. Cao ve diğ. (2016) tarafından enerji ve kimya sanayinde meydana gelen toksik gaz yayılım kazaları için bir entegre acil müdahale modeli geliştirilmiştir. Amonyak gazı için uygulama gerçekleştirilmiş, etki mesafesi içinde gaz konsantrasyonu dağılımı, beklenen ölüm ve hasar tahmini ile tahliye için rota bilgileri elde edilmiştir [4]. Shariff ve diğ.

(2016) tarafından BLEVE' nin tehlikeleri değerlendirilmiş, doğasında var olan güvenlik konsepti ile etki mesafesi minimize edilmeye çalışılmıştır. Uygulanan bu yaklaşımın pratik bir araç olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [5]. Ebrahemzadhi ve diğ. (2015) tarafından petrokimya endüstrisindeki proses kazalarının etki mesafesi analiz çalışmaları yürütülmüştür. Maksimum alev yüksekliği ile alev uzunluğunun yarıçapa oranı sırasıyla 20 m ve 2,6 m olarak bulunmuştur. Tanktan 15 m mesafede yangının kontrol edilebileceği belirtilmiştir [6]. Sochet ve diğ. (2014) tarafından, gaz deposunun kapalı ucunda bir gaz şarjı eblamasının etkileri çalışılmıştır. Şok dalgaları ve yüksek basınç etkilerinin analizi, tesis içi ve dışı için uygulanmıştır [7]. Pitbloda ve diğ. tarafından (2014), TNO çoklu enerji modeli kullanılarak tehlike mesafesi tahmininde bulunulmuştur. Anahtar model parametreleri ile tutarlılık ve tekrarlanabilirliğin sağlandığı belirtilmiştir [8]. Ji ve diğ. (2013) tarafından sınıflandırılmış güvenlik önlem kartları kullanılarak yangın ve patlama endeksi hesaplama metodu geliştirilmiştir. Bu metod ile objektif ve değerlendirilebilir sonuçlar üzerinden tehlike birimleri için daha kabul edilebilir referans verisi sağlandığı belirtilmiştir [9]. Tauseef ve diğ. (2011) tarafından, buhar bulutu patlamaları için yüksek basınç etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla CFD (bilimsel sıvı dinamiği) temelli simülasyon çalışması yürütülmüştür. Ticari yazılıma kıyasla daha tutarlı sonuçların elde edildiği belirlenmiştir [10]. Sengupta ve diğ. (2011) tarafından bir tank çiftliği içindeki tankların konumu ile ilgili model çalışması yürütülmüştür. Tanklar güvenli mesafe ile yerleştirilirken sadece rüzgârın varlığı değil koşulları da dikkate alınmış, 4 m/s'nin üzerindeki rüzgâr hızlarında modelin daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir [11]. Sandercock (2008) tarafından yangın ve tutuşabilir sıvı kalıntı maddeleri üzerinde bir derleme çalışması yürütülmüş, tehlike kaynağının belirlenmesi ve dinamik bir yaklaşımın sağlanması için çok sayıda araştırma yapılması gereği ortaya konulmuştur [12]. Shariff ve diğ. (2006) tarafından tesis tasarımının bir aşaması olarak risk ve sonuçların tahmininde fizibilite çalışması yürütülmüştür. Bütünleşik risk belirleme aracı (iRET) kullanılarak oluşturulan metodoloji ile daha güvenli tesis tasarımının sağlanabileceği belirtilmiştir [13].

Fiziksel etki alanı belirlenmesi konusunda literatürde çok sayıda örnek olay çalışması bulunmaktadır. Siuta ve diğ. (2013) tarafından, sıvılaştırılmış doğal gazın yayılımı için belirsizlik analizleri yürütülmüştür. Doğal gaz kaçak salınım hızı, süresi, havuz yayılımı, buharlaşma konularında genel bir prosedür oluşturulmuş ve sonucun uygulanabilir olduğu gösterilmiştir [14]. Kao ve diğ. (2002) tarafından, akrilik kauçuk üretim fabrikasında belirli tehlikelerin analizleri ve kalorimetrik testler gerçekleştirilmiştir [15]. Ciccirelli ve diğ. (1999) tarafından yanma türü ve miktarı bilinmediği durumda, hidrojen selenür (H₂Se) için gaz patlama metodoloji geliştirilmiştir. Hava ile H₂Se'nin reaktörde karışarak kaza meydana getirmesini önlemek için reaktör tankları etrafında azot tampon alanının oluşturulması gereği belirtilmiştir [16]. Planas-Cuchi ve diğ. (1998) tarafından kimyasal bulunduran birbirine yakın iki gemi üzerinde BLEVE olayı modellenmiş, termal radyasyon ve duman yayılımı üzerine analizler yürütülmüştür [17].

Bu çalışmada, tehlikeli madde kullanan, bulunduran ve depolayan kuruluşlarda büyük endüstriyel kazaların patlama, yangın ve toksik yayılım fiziksel etki mesafelerinin belirlenmesi için yöntemler açıklanmış ve ilgili sanayi

kuruluşlarının hangi yöntemi hangi durumlarda kullanacağı yönünde yeni bir metodoloji geliştirilmiştir.

2 Patlama, yangın ve toksik yayılım fiziksel etki alanı belirleme yöntemleri

2.1 Korelasyonlar

Bu çalışma, yalnızca kimyasal miktarı verisi ile senaryo bazında etki mesafesi hesaplanması imkanı sağlayan "Tesis Dışı Sonuç Analizi için Risk Yönetimi Programı Kılavuzu (Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis- EPA 550-B99-009)" esas alınarak oluşturulmuştur [18]. Bu kılavuz, 2009 yılında korelasyonlar sabit alınarak güncellenmiş, kılavuza havanın kararlılık sınıfı, rüzgâr hızı, zamana göre sonlanma noktası mesafelerini veren tablolar ile madde miktarı dışında veri bilgisi gerektiren boru kaçağı, yapı içerisinde salınım belirleme gibi özel durumlar için senaryolar eklenmiştir. Kılavuz, endüstride yaygın olarak kullanılan kimyasalları (77 toksik ve 63 yanıcı madde) kapsamaktadır. Kılavuzda etki mesafesi, toksik buhar bulutu, yangın sonrası ısı ve patlama sonrası basınç etkilerine kısa süreli maruziyet ardından ciddi yaralanmaların oluşabileceği sonlanma noktası (160 m - 40 km) olarak tanımlanmaktadır. Kılavuzdaki korelasyonlar, en kötü durum senaryoları (Tablo 1) ve alternatif senaryolar (Tablo 2) olmak üzere iki başlıkta değerlendirilmiştir.

Tablo 1: En kötü durum senaryoları.

Toksik gazlar
Sonlanma noktasının belirlenmesi:
$D = A1 (QR)^{A2} \quad (1)$
Toksik sıvılar
Salınım hızının belirlenmesi:
<u>1.Durum (Sedde alanı bulundurmayan tank)</u>
i) Ortam sıcaklığında dökülme:
$QR = 1.4 \times LFA \times DFXQS \quad (2)$
ii) Buharlaştıran havuzun havada salınım hızı,
$QR = 1.4 \times LFB \times DFXQS \quad (3)$
<u>2.Durum (Sedde alanı bulunduran tank)</u>
i) Ortam sıcaklığında dökülme:
$QR = 1.4 \times LFB \times A_d \quad (4)$
ii) A _d , ft ² sedde alanına sahip bir havuzda buharlaşma hızı:
$QR = 1.4 \times LFA \times A_d \quad (5)$
Sonlanma noktasının belirlenmesi:
$D = B1 (QR)^{B2} \quad (6)$
Yanabilen gazlar ve sıvılar
Sonlanma noktasının belirlenmesi:
$D = 0.0037 (QxH/H_{TNT})^{1/3} \quad (7)$

Tablo 1’de toksik gaz, toksik sıvı ve yanabilen gazlar ve sıvılar için en kötü durum senaryosu bazında salınım hızı ve sonlanma noktası mesafesinin belirlenmesinde kullanılacak korelasyonlar görülmektedir. Toksik gazlar ve sıvılar için, 25°C üzerindeki sıcaklıklarda LFA (Ortam Sıvı Faktörü) aşağıdaki eşitliğe göre düzeltilir:

$$LFA(T) = TCF \times LFA(25^\circ C) \quad (8)$$

Toksik sıvılarda birikinti havuzunun 1 cm derinliğinden sıvının salındığı varsayılırsa, dökülme alanı A (ft²):

$$A = DF \times QS \quad (9)$$

şeklinde belirlenir. DF (Yoğunluk Faktörü) sıcaklıktan bağımsızdır. A_d sedde alanına sahip bir tankta buharlaşma hızı ise dökülen toplam miktardan bağımsızdır.

Özetle, toksik sıvılar için bir tankta buharlaşma hızı QR’ nin hesaplanabilmesi:

- 1) Denklem (9) kullanılarak döküntünün yayılacağı alan, A hesaplanır,
- 2) A ve A_d alanları karşılaştırılır,
- 3) A < A_d ise QR Denklem (2) ya da Denklem (8) kullanılarak hesaplanır,
- 4) A_d < A ise QR Denklem (4) ve Denklem (5) kullanılarak hesaplanır,

aşamalarından oluşmaktadır.

Sonlanma noktasının belirlenmesinde, Denklem (6) sulu çözeltiler için de kullanılabilir.

Yanabilen maddeler için temelde iki senaryo üzerinde durulur:

- i. Eğer yanabilen madde ortam şartlarında gaz halinde, basınç altında gaz veya sıvı halde ya da soğutulmuş sıvı olarak bulunuyorsa ve oluşan döküntü havuzu 1 cm veya daha az derinlikte ise tamamının gaz olarak salındığı ve buhar bulutu patlamasına neden olduğu kabul edilir,
- ii. Eğer yanabilen madde sıvı veya soğutulmuş gaz olarak bulunuyorsa ve oluşan döküntü havuzu derinliği 1 cm’den fazla ise toplam miktarın 10 dk. içinde salındığı ve buhar bulutu patlamasına yol açtığı kabul edilir.

TNT modeli uygulanacak ise, serbest kalan kütlenin %10’ unun patlamaya katıldığı kuralı uygulanır ve bu durum sabit 0.0037 içine entegre edilir (Denklem (10)).

$$D = (Q)^{1/3} \quad (10)$$

$$= 0.0037 (H/H_{TNT})^{1/3}$$

Denklem (10), uçucu yanabilen sıvılar ve yanabilen gazlar için de kullanılabilir.

Tablo 2: Alternatif senaryolar.

Toksik gazlar
Salınım hızının belirlenmesi:
i) Basınç altında sıvılaştırılmış gazın sıvı haldeki salınımının tamamının hava içinde olduğu durum,
$QR_L = 4.630 \times x_{(L)}^{1/2} \times (P_g)^{1/2} \quad (11)$
ii) Basıncı tanktaki gaz kaçığına ait buharın salınımı durumu;

$$QR_L = a_h \times p_a \times GF / (T_t + 273)^{1/2} \quad (12)$$

Sonlanma noktasının belirlenmesi:

$$D = D1(QR)^{D2} \quad (13)$$

Toksik sıvılar

Salınım hızının belirlenmesi:

P1: Kısa süreli dökülme (tank sedde alanı yok, 1cm havuz derinliği)

i) Ortam sıcaklığında;

$$QR = 2.4 \times LFA \times DF \times QS \quad (14)$$

ii) 25°C’ den yüksek sıcaklıkta;

$$QR = 2.4 \times LFB \times DF \times QS \quad (15)$$

P2: Uzun süreli dökülme (Tank sedde alanı yok)

$$QR_L = 385 \times x_L \times x(h)^{1/2} \quad (16)$$

P3: Kısa süreli dökülme (Tank sedde alanı var)

i) Ortam sıcaklığında;

$$QR = 2.4 \times LFA \times A_d \quad (17)$$

ii) 25°C’ den yüksek sıcaklıkta;

$$QR = 2.4 \times LFB \times A_d \quad (18)$$

P4: Uzun süreli dökülme (Tank sedde alanı var)

$$QR_L = 385 \times x_L \times x(h)^{1/2} \quad (19)$$

$$A_e = QR_L / (2.4 \times LFA)$$

A_e < A_d ise QR = QR_L ; A_e > A_d ise A_d P3 (i) veya P3 (ii) için kullanılır.

Sonlanma noktasının belirlenmesi:

$$D = C1 (QR)^{C2} \quad (20)$$

Yanabilen gazlar ve sıvılar

Salınım hızının belirlenmesi:

Toksik gaz ve sıvılar için açıklanan metotlar yanabilen gaz ve sıvılar için de kullanılır.

Sonlanma noktasının belirlenmesi:

- LFL (Alevlenme Alt Sınırı) ye olan mesafenin tahmini:

Kılavuz ek tablolarından temin edilir.

- Buhar Bulutu Patlaması:

Yanabilen madde miktarı üzerinden Denklem (10) kullanılarak belirlenir. (%10 verim faktörünün kullanılmasına ihtiyaç yoktur. Geçmiş buhar bulutu patlamaları dikkate alındığında %3 verim faktörü kullanılır ve Denklem (10), 0.67 ile çarpılır.)

- Havuz yangını:

$$d = PFF (A_d)^{0.5} \quad (21)$$

Tablo 2’de alternatif senaryo bazında toksik gaz, toksik sıvı ve yanabilen gazlar ve sıvılar için salınım hızı ve sonlanma noktası mesafelerinin belirlenmesinde kullanılan korelasyonlar görülmektedir. Altı toksik gaz (susuz amonyak, klor, etilen oksit, metilen klorür, fosfen, sülfür dioksit) için sıvı, buhar ve iki-fazlı salınım uygulanır (Denklem (11) - (12)).

Toksik sıvılar için sedde alanı bulundurmeyen tankta buharlaşma hızı ortam sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta olmak üzere iki farklı durumda değerlendirilir (Denklem (14)- (15)).

Denklem (14) ve Denklem (15) için $LFA(T)$ kullanılabilir, ancak Denklem (9) değişmeden olduğu gibi alınır.

Sonuç olarak, toksik sıvılar için bir tankta buharlaşma hızı QR 'nin hesaplanabilmesi,

- 1) QS hesaplanır,
- 2) Denklem (9) kullanılarak dökülmenin yayılacağı alan, A hesaplanır,
- 3) A ve A_d karşılaştırılır, küçük olan alan seçilir,
- 4) QR , Denklem (17) ve Denklem (18) kullanılarak hesaplanır,

aşamalarından oluşur.

Yanabilen maddeler için sonlanma noktası, parlama yangınları için LFL 'ye olan mesafe, havuz yangını için 40 saniye içinde ikinci derece yanığa neden olabilen mesafe; buhar bulutu patlaması için düşük miktarda yanabilen madde içeriğinin bulunduğu mesafe olarak tanımlanır.

2.2 Yazılımlar

Bu bölümde, patlama, yangın, toksik yayılım fiziksel etki mesafelerinin belirlenmesinde kullanılan yazılım programlarından öne çıkan ALOHA-EPA, Breeze Incident Analyst-BREEZE ve EFFECTS-TNO açıklanmıştır. Yazılım programlarının çoğu, Hollanda tarafından yayımlanan renkli kitaplardaki (Yellow Book, Purple Book, Green Book, Red Book) modellere dayanmaktadır [19]-[22]. Mor Kitap, kantitatif risk değerlendirmesinin nasıl yapılacağını; Sarı Kitap, patlama, yangın, toksik yayılım fiziksel etki mesafesi belirleme yöntemlerini; Yeşil Kitap, oluşan hasarların saptanmasında kullanılan yöntemleri, Kırmızı Kitap, kaza olasılıklarının belirlenmesi yöntemlerini açıklamaktadır.

BREEZE (Breeze Incident Analyst): Sınırlı ya da sınırlandırılmamış tank yangınlarında termal radyasyon maruziyeti ve sıcaklık yükselmesi, düşey ve dikey jet yangını ve Blevé modelleri ile toksik yayılım modelleri oluşturulabilmektedir. Tek noktada modelleme yapılmaktadır. Kimyasallarla ilgili kendi kütüphanesine sahiptir. Karışımlar için kullanılabilir. Breeze, üç boyutlu analist ile görüntü sağlamaktadır.

EFFECTS (TNO): Ellinin üzerinde model (kaçak, yangın, patlama, yayılım, hasar) içermektedir. Model ağacına bağlı ilişkilendirme ve model sonucunun diğer modelin girdisi olma (zincirleme) uygulamaları yapılabilmektedir. Program girdileri ve çıktıları aynı anda izlenebilmektedir. Kapsamlı kimyasal madde veri tabanına sahiptir ve karışımlar için uygulanabilmektedir. Birden fazla noktada modelleme yapılabilmektedir. Breeze ve ALOHA'dan farklı olarak kombine model senaryosu otomatik olarak yürütülebilmektedir. Harita ve uydu görüntüleri üzerine aktarma sağlayabilmektedir.

ALOHA-Areal Locations of Hazardous Atmospheres (EPA): NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ve EPA (US. Environmental Protection Agency)'nın ortaklaşa çalışarak hazırladığı ücretsiz bir yazılımdır. Bu yazılım ile toksik yayılım modellemesi, yanma durumunda zehirli ve yanıcı maddelerin salınım anındaki tehlike mesafeleri, yanıcı maddelerin yanma/patlama anındaki ısı etki miktarları hesaplanabilmektedir. Kimyasal maddenin özelliğine bağlı olarak gerçek zamanlı modeller oluşturulabilmektedir. Yazılım, kimyasallarla ilgili kendi kütüphanesine sahiptir, ancak saf maddeler ve az sayıda karışım modellemesinde

kullanılmaktadır. Yazılım, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, atmosferik kararlılık gibi seçimlere sahiptir. İki boyutlu görüntü sağlamaktadır.

Farklı yazılım programları kullanılarak elde edilen etki mesafeleri arasında ciddi farklar gözlenmemektedir. Ücretsiz ALOHA yazılımı 10 km mesafeye kadar etki mesafesinin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, ALOHA yazılımının öncelikli olarak kullanılması, daha yüksek etki mesafesi uygulamalarında ya da karışımlarda ücretli diğer yazılımların kullanılması bu çalışmada önerilmektedir.

3 Metodoloji

Bu bölümde, fiziksel etki alanı belirleme yöntemleri aracılığı ile etki alanı haritalarının nasıl oluşturulacağı metodolojisi açıklanmıştır. Metodolojiye ait aşamalar aşağıda sıralanmıştır:

- (1) Tehlikeli madde bulunduran, depolayan ve kullanan bir kuruluş belirlenir.
- (2) Bu kuruluş için tehlikeli maddelerin sebep olduğu afet ve kazalar (patlama, yangın, toksik yayılım) belirlenir.
- (3) Fiziksel etki alanının belirlenmesi için gerekli tüm veriler temin edilir. İlgili veriler aşağıda listelenmiştir:
 - a) Tehlikeli kimyasalın öncelikli tehlike özelliği (MSDS, NFPA vb. kaynaklar kullanılarak yanıcı, toksik, patlayıcı),
 - b) Kimyasal miktarı, tank boyutları, tank doluluk oranı, basınç, sıcaklık vb. bilgiler,
 - c) Kuruluşa ait tüm tesislerin tank yerleşim planı,
 - d) Atmosferik şartlar (sıcaklık, hakim rüzgâr yönü, rüzgâr hızı, nemlilik vb.).
- (4) Uygun fiziksel etki alanı belirleme aracı (korelasyonlar veya yazılım) seçilerek sonuç analiz çalışmaları yürütülür.
 - a) Tüm kimyasal madde bulunduran, kullanan ve depolayan kuruluşlarda öncelikle ücretsiz ALOHA yazılımı kullanılır.
 - b) Ekipman detaylarına (tank boyutları, operasyon koşulları vb.) ulaşılamadığı durumlarda tesis dışı sonuç analizlerine dayanan korelasyonlar kullanılır.
 - c) Kimyasal karışımlarda sulu amonyak, hidroklorik asit, hidroflorik asit, nitrik asit ve dumanlı sülfürik asit için ALOHA, sulu çözeltiler için korelasyonlar, diğer kimyasal karışımlar için yazılım programlarından faydalanılır.
- (5) Kuruluşa meydana gelebilecek yangın, patlama ve toksik yayılım olaylarının her biri için etki alanı haritaları oluşturulur.
- (6) Kaza risklerinin değerlendirmesi yapılır. Bunun için Şekil 1' de yer alan risk matrisi kullanılır.

Şekil 1'deki kaza gerçekleşme frekansı değerleri Mor Kitap referans tabloları kullanılarak G2 senaryo bazında belirlenir ya da uygun görüşü almış kuruluşa ait kantitatif risk değerlendirme sonucu elde edilen frekans değerleri kullanılır.

(7) Oluşturulan risk matrisi ile patlama, yangın, toksik yayılım için risk seviyeleri değerlendirilir ve en yüksek risk seviyesi kuruluşun risk seviyesi olarak alınır. Farklı risk seviyeleri için

kontrol stratejileri geliştirilir [15]. Risk seviyeleri için kontrol stratejileri Tablo 3'te verilmiştir.

		Kaza Gerçekleşme Frekansı (yıl ⁻¹)				
		E	D	C	B	A
Kaza etkisi (Fiziksel Etki Mesafesi, m)	I			Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek
	II			Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek
	III			Düşük	Orta	Orta
	IV			Düşük	Orta	Orta
	V			Düşük	Orta	Orta

Kaza gerçekleşme frekansı (yıl ⁻¹) A: 10 ⁻⁴ /yıl veya daha fazla B: 10 ⁻⁵ /yıl derecesi C: 10 ⁻⁶ /yıl derecesi D: 10 ⁻⁷ /yıl derecesi E: 10 ⁻⁸ /yıl veya daha az	Kaza etkisi (Fiziksel etki mesafesi) I: 200 m – II: 100 – 200 m III: 50 – 100 m IV: 20 – 50 m V: ~ 20 m
--	--

Şekil 1: Risk matrisi.

Tablo 3: Risk seviyeleri için risk kontrol stratejileri.

Risk Seviyesi	Tanım	Kabul Edilebilir Risk Seviyesine Ulaşılması için Alınması Gereken Tedbirler
Kırmızı	Çok yüksek risk. Risk tolere edilemez ve risk azaltılmalı.	Normal kontrolün üzerinde tedbirler alınmalı.
Turuncu	Yüksek risk. Risk azaltılmalı.	Normal kontrolün biraz üzerinde tedbirler alınmalı.
Sarı	Orta risk. Risk tolere edilebilir.	Normal kontrol.
Yeşil	Düşük risk. Risk kabul edilebilir.	Normal kontrol.

Tablo 3 kullanılarak, riskli alanlar için seviyelerine uygun kontrol mekanizması geliştirilir.

4 Örnek uygulamalar

Örnek uygulamalar, toksik gaz, toksik sıvı ve yanabilen maddeler başlıkları altında seçilen her bir kimyasal için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu üç kimyasalın da aynı kuruluştaki var olduğu varsayılmıştır. Örnek uygulamalarda, tesis dışı risk analizine dayanan korelasyonlar ve ALOHA yazılımı kullanılmıştır. ALOHA yazılımı kullanarak gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında, konum olarak endüstriyel yoğunluğa sahip Kocaeli ili seçilmiş ve atmosferik veri olarak bu ilin ortalama koşulları (ortalama hava sıcaklığı: 20 °C; rüzgar hızı: 3m/s; rüzgar yönü: güney doğu, bağıl nem: %50) kullanılmıştır.

4.1 Toksik gaz

Toksik gaz için, son derece tehlikeli 13620 kg (30000lb) klor üzerinden uygulama çalışması yürütülmüştür. Tesis dışı risk analizine ait en kötü durum senaryoları ve alternatif

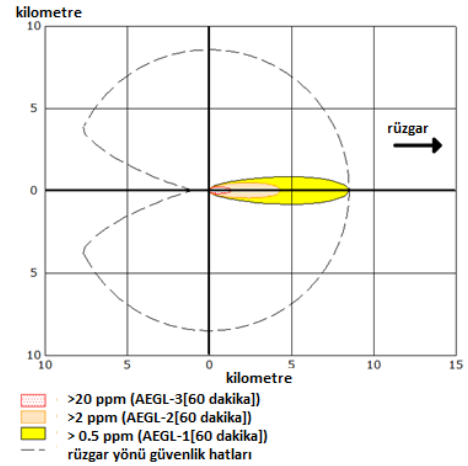
senaryolar düşünülerek belirlenen sonlanma noktası değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Sonlanma noktası değerleri kırsal ve kentsel alanda ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Tablo 4'teki değerler 10 dk. içindeki boşalma durumuna göre belirlenmiştir. 60 dk. içindeki boşalma durumunda da klor için aynı değerler elde edilmiştir. Bu durum, hafif bir gaz olan klorun salınımının süreye bağlı değişim göstermediğini belirtmiştir. Kırsal alanda belirlenen sonlanma noktası mesafesi değerleri kentsel alandan çok daha yüksek bulunmuş, ortamda nesne varlığının klor yayılımını ciddi oranda düşürdüğü görülmüştür.

Tablo 4: Toksik gaz (klor) için sonlanma noktası mesafeleri.

	En Kötü Durum Senaryosu	Alternatif Senaryo
Kırsal	18.1 km (11.285 mi)	3.52 km (2.188 mi)
Kentsel	8.6 km (5.354 mi)	1.3 km (0.789 mi)

ALOHA yazılımı ile aynı miktarda klor için 60 dk. içerisinde salınım üzerinden kentsel alanda elde edilen sonlanma noktası mesafelerine ait grafik Şekil 2'de gösterilmiştir.



Kırmızı: 1.3 km Turuncu: 4.4 km Sarı: 8.6 km

Şekil 2: Toksik gaz (klor) için sonlanma noktası tehlike alanı gösterimi (ALOHA).

ALOHA yazılımında kırsal alan için elde edilen tehlike mesafeleri kırmızı ve turuncu bölge için kentsel alan ile aynı, sarı bölge için 8.8 km olarak biraz daha yüksek olarak belirlenmiştir. ALOHA yazılımında klor gazının salınımında ortamda engel bulunmasının fark oluşturmadığı gösterilmiştir. Kırsal ve kentsel alan sonlanma mesafesi farkının atmosferik koşulların etkisi ile azaldığı düşünülmektedir. Tüm bu sonuçlar, Tablo 4 ile karşılaştırıldığında her iki senaryo sonucunun da kentsel alan için aynı olduğu belirlenmiştir.

4.2 Toksik sıvı

Toksik sıvı için, 13620 kg (30000 lb) hidrazin içeren ve sedde alanı bulundurmayan tankta kaçak olduğu düşünülerek ilgili senaryolar üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Kırsal ve kentsel alanda sonlanma noktası mesafeleri Tablo 5'te verilmiştir.

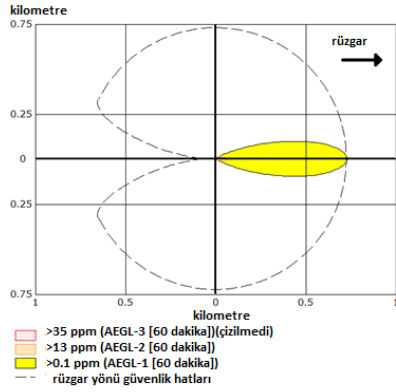
Tablo 5'ten kırsal alan için belirlenen sonlanma noktası mesafelerinin kentsel alanda belirlenen değerlerden yüksek olduğu görülmüştür. Ortamda nesne varlığı sonlanma noktası

mesafesini yine azaltmıştır. Ağır bir kimyasal olması nedeniyle hidrazin için 10 dk. ve 60 dk. içerisinde salınım senaryosunda farklı mesafeler elde edilmiştir. Hidrazinin NFPA standardına göre tehlike derecelendirmesi sağlık: 4, yanabilirlik:4, reaktivlik: 3 şeklindedir. Oldukça tehlikeli bir kimyasal olan hidrazin için dolayısı ile yüksek sonlanma noktası mesafeleri belirlenmiştir.

Tablo 5: Toksik sıvı (hidrazin) için sonlanma noktası mesafeleri.

	En Kötü Durum Senaryosu	Alternatif Senaryo
	10 dk. içerisinde salınım	
Kırsal	22.6 km (14.04 mi)	1.2 km (0.745 mi)
Kentsel	9.3 km (5.776 mi)	0.6 km (0.398 mi)
	60 dk. içerisinde salınım	
Kırsal	54.2 km (33.679 mi)	1.0 km (0.648mi)
Kentsel	0.39 km (0.244 mi)	0.5 km (0.289mi)

ALOHA yazılımı üzerinden 60 dk. içerisinde salınım olduğu durum için kentsel alanda elde edilen sonuç Şekil 3'te gösterilmiştir.



Kırmızı:36 m Turuncu: 62 m Sarı: 728 m

Şekil 3: Toksik sıvı (hidrazin) sonlanma noktası tehlike alanı gösterimi (ALOHA).

ALOHA yazılımı ile kırsal alanda toksik sıvı (hidrazin) için kırmızı, turuncu ve sarı bölgede sonlanma noktası mesafeleri sırasıyla 31 m, 56 m, 681 m olarak belirlenmiştir. Kırsal ve kentsel alanda ciddi bir farklılık yine gözlenmemiştir. Şekil 3 ve Tablo 5 birlikte değerlendirildiğinde, alternatif senaryo sonuçlarının kentsel alanda birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

4.3 Yanabilen maddeler

Yanabilen madde için 13620 kg (30000 lb) propan düşünülerek hesaplamalar yürütüldüğünde elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Yanabilen madde (propan) için sonlanma noktası mesafeleri.

	En kötü durum senaryosu	Alternatif senaryo
Kırsal	0.013 km (0.0080 mi)	0.16 km (0,1mi)
Kentsel	0.013 km (0.0080 mi)	< 0.16 km (<0,1 mi)

Korelasyonlar ile propan için kentsel ve kırsal alanda sonlanma noktası mesafesi aynı olarak belirlenmiştir. Sonlanma mesafesi kimyasalın türüne, atmosferik koşullara ve yüzey pürüzlüğü (kentsel/kırsal, orman vb.) parametrelerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Sonlanma mesafeleri değerleri genel olarak ortamda engel/nesne bulunan kentsel alanda kırsal alana göre daha yüksek değerlerde belirlenmektedir. Propan dışındaki diğer kimyasallar için bu etki gözlenmiştir. Propanın, NFPA standardına göre tehlike derecelendirmesi sağlık: 2, yanabilirlik: 4, reaktivlik: 0 şeklindedir. Propan için tutuşturucu kaynağı ve yeterli oksijen bulunan ortamda yangın ve patlamanın meydana gelmesi kaçınılmaz olmaktadır [15]. Gaz patlaması meydana geldikten sonra patlama ürünleri yanmayan gazları sıkıştırmakta ve kompresyon (sıkışma) dalgaları oluşturmaktadır. Tutuşma kaynağı yakınında yüksek basınç etkileri azalmakta ve çok sayıda yansıyan dalgalar meydana gelmektedir. Tutuşma kaynağına belli bir mesafede gaz patlaması meydana gelmektedir [2]. Gaz patlaması için korelasyona bu süreç yansıtılmadığından sonlanma noktası mesafelerinin aynı olarak belirlendiği düşünülmektedir.

ALOHA yazılımı ile aynı miktarda propan için 3 farklı senaryo (Bleve, jet yangını, buhar bulutu patlaması) üzerinden modelleme çalışması yürütülmüştür. Senaryo çalışmasında, sıvı halde propan içeren %80 doluluğa sahip küresel bir tankta modelleme gerçekleştirilmiştir. Kentsel alanda elde edilen grafikler Şekil 4'te verilmiştir.

ALOHA yazılımı ile kentsel alanda (Şekil 4) ve kırsal alanda belirlenen sonlanma noktası mesafeleri Tablo 7'de listelenmiştir.

Tablo 7'den kaçak sonucu jet yangına ait sonuçların, en kötü durum senaryosuna ait sonlanma noktası mesafeleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Alternatif senaryoya ait korelasyon sonuçlarının ise Bleve dışında diğer tüm model sonuçları ile kentsel alanda uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bleve için ALOHA yazılımında, korelasyonlar ile hesaplanan değerlerin çok daha üzerinde sonlanma noktası mesafeleri elde edilmiştir. Literatürde, yazılımın, yayılan buharın yolu üzerindeki nesnelerin etkisini birleştiremediği, nesne varlığında meydana gelen türbülant oluşumların etkisi dikkate alınarak hesaplanan sonlanma noktası mesafesi değerlerinin daha az olacağı belirtilmiştir [10]. Ayrıca alev sıcaklığının çok düşük olmasının reaksiyon gerçekleşme mesafesi ve dolayısı ile sonlanma noktası mesafesini artırdığı gösterilmiştir [16].

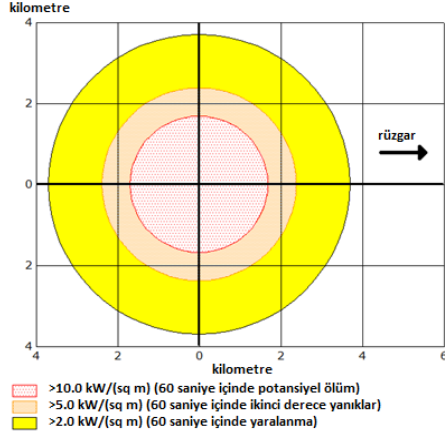
4.4 Risk matrisi

Toksik gaz (klor), toksik sıvı (hidrazin) ve yanabilen madde (propan) için korelasyon sonuçları temel alınarak belirlenen etki mesafeleri Şekil 1'deki risk matrisi üzerinde değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 8'de gösterilmiştir.

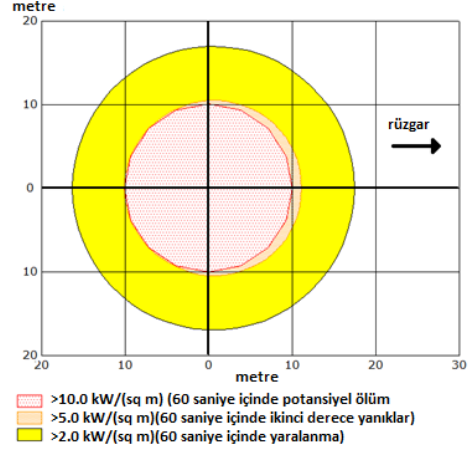
Tablo 8'den önerilen metodolojinin dayandığı G2 senaryosu bazında toksik gaz (klor) ve yanabilen madde (propan) için risk alanı dışında bir sonuç elde edilirken, toksik sıvı (hidrazin) için yüksek riskli alan sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum kuruluşun yüksek riskli olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Kuruluş için normal kontrolün biraz üzerinde tedbirlerin alınması gerektiği görülmüştür. G3 senaryo bazında değerlendirme yapıldığında ise toksik gaz (klor) ve yanabilen madde (propan) için çok yüksek riskli alan; toksik sıvı (hidrazin) için yüksek riskli alan bilgisine ulaşılmış, dolayısı ile kuruluş çok yüksek riskli olarak belirlenmiştir. Senaryo seçimine bağlı risk alanı derecelendirmesinin ciddi

farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Bu çalışmada, Mor Kitap' dan belirlenen frekans değerleri 10 dk. içerisinde boşalma senaryosunu temel alan değerlere dayandığı için ALOHA yazılımı (60 dk. içerisinde gerçekleşen olay) yerine korelasyon ile belirlenen etki mesafesi sonuçları ile değerlendirme

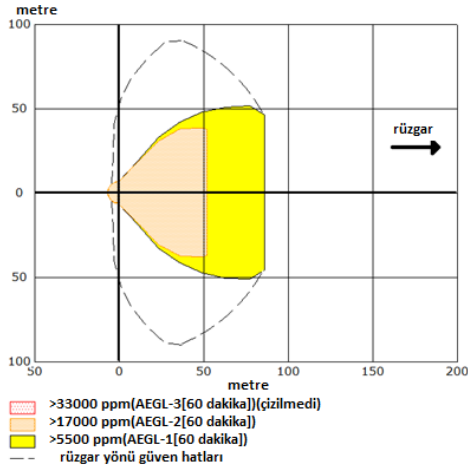
yapılmıştır. Risk matrisinde ALOHA yazılımı ile belirlenen sonuçların kullanılabilmesi için frekans değerinin kuruluş tarafından gerçekleştirilecek kantitatif risk analizi çalışması ile belirlenmesinin gereği gösterilmiştir.



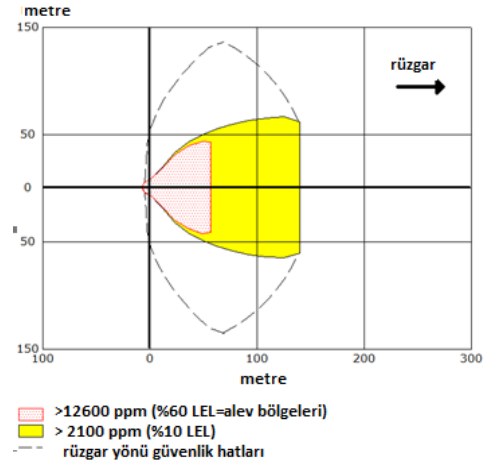
(a): Ateştopu kaynaklı termal radyasyon tehlike alanları.



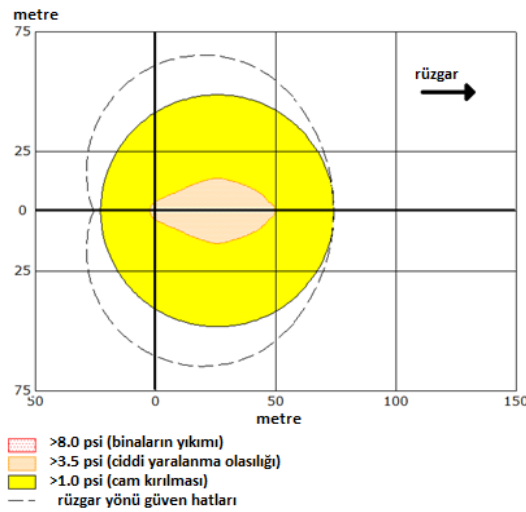
(b): Jet yangını kaynaklı radyasyon tehlike alanları.



(c): Buhar bulutu toksik alanı.



(d): Buhar bulutu alevlenebilir alan



e): Buhar bulutu patlama alanı.

Şekil 4: Propan için senaryo bazlı modelleme sonuçları (ALOHA).

Tablo 7: Yanabilen madde (propan) için sonlanma noktası mesafeleri (ALOHA).

Model	Kırmızı Alan		Turuncu Alan		Sarı Alan	
	Kentsel	Kırsal	Kentsel	Kırsal	Kentsel	Kırsal
a-Bleve (küresel bir tank içinde)	1.7 km	1.7 km	2.4 km	2.4 km	3.7 km	3.7 km
b-Kaçak sonucu jet yangını	10 m	10 m	11 m	11 m	17 m	18 m
c-Kaçak sonucu yangın yok (toksik buhar bulutu alanı)	22 m	18 m	32 m	23 m	55 m	43 m
d-Kaçak sonucu yangın yok (buhar bulutu alevlenebilir alan)	36 m	28 m	-	-	96 m	71 m
e-Kaçak sonucu yangın yok (buhar bulutu patlama alanı)	-	-	50 m	-	75 m	-

Tablo 8: Örnek uygulamaya ait risk matrisi değerlendirme sonuçları.

Kaza gerçekleşme frekansı (yıl ⁻¹)		Kazanın sonucu (mesafe, m)	Sonuç
Toksik gaz (klor)	G2: 5x10 ⁻⁷ G3: 1x10 ⁻⁵	>200 m	Risk alanı dışında Çok yüksek riskli (kırmızı)
Toksik sıvı (hidrazin)	G2: 5x10 ⁻⁶	>200 m	Yüksek riskli (turuncu)
Yanabilen madde (propan)	G2: 5x10 ⁻⁷ G3: 1x10 ⁻⁵	100-200 m	Risk alanı dışında Çok yüksek riskli (kırmızı)

*G2: Sabit akış hızında 10 dk. içerisinde boşalma, G3: 1 cm çapındaki delikten 10 dk. içerisinde boşalma senaryoları temel alınarak Mor Kitap'tan frekans değerleri belirlenmiştir.

5 Sonuçlar

Patlama, yangın ve toksik yayılım ile sonuçlanan endüstriyel kazalara ait etki mesafelerinin belirlenmesinde, tesis dışı risk analizine dayanan korelasyonlar ile yaygın olarak kullanılan yazılım programları konuları açıklanmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. İlgili sanayi kuruluşunun hangi fiziksel etki alanı belirleme aracını hangi aşamada kullanacağına yönelik metodoloji geliştirilmiştir. Kaza etkisi ve kaza gerçekleşme frekansı bileşenlerinden oluşan risk matrisi geliştirilmiş ve kuruluş risk seviyesi derecelendirilmiştir. Toksik gaz (klor), toksik sıvı (hidrazin) ve yanabilen maddeler (propan) içeren bir kuruluş için aynı madde miktarı üzerinden korelasyon ve ALOHA yazılımı kullanılarak örnek uygulamalar gerçekleştirilmiştir. ALOHA yazılımı ile elde edilen sonuçların alternatif senaryo sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu şekilde, atmosferik veriler, ekipman detayları ve operasyon şartları hakkında bilgi temin edilemediğinde alternatif senaryoların kullanılabileceği ön görüşü desteklenmiştir. Çalışmanın, sanayicilere ciddi yükümlülüklerin getirildiği şu günlerde, patlama, yangın ve toksik yayılım etki alanı belirlenmesine yönelik uygulamalarda standardın sağlanması ve bu yöndeki kontrol ve izlemelerin daha kolay yapılabilmesi konularına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Tüm mesafelerde etki alanlarının hesaplanabilmesi ve tüm kimyasal madde ile kimyasal karışımlara yönelik uygulamaların gerçekleştirilebilmesi için pahalı yazılımların kullanılması yerine sürekliliğin sağlanması açısından ulusal bir yazılım geliştirilmesinin önemli olduğu ön görülmektedir.

6 Semboller

D	: Sonlanma noktası mesafesi (m),
$A1, A2$	: Sabitler (kılavuz ek tabloları [14]),
QR	: Buharlaştırma hızı (lb/min) veya toplam salınan miktarın onda biri,
QS	: Toplam dökülen miktar (lb),
LFA	: Ortam sıvı faktörü (Liquid Factor Ambient),
DF	: Yoğunluk faktörü (Density Factor),
$LFA(T)$	: Düzeltilmiş LFA,
TCF	: Sıcaklık düzeltme faktörü,
$LFA(25\text{ }^{\circ}\text{C})$	: 25 °C'deki LFA (kılavuz ek tabloları [14]),
$B1, B2$	: Sabitler (kılavuz ek tabloları [14]),
a_h	: Kaçak delik alanı (in ²),

P_a	: Tank basıncı (lb/in ² , psia),
T_t	: Tank sıcaklığı (°C),
DF	: Gaz faktörü,
$D1, D2$	: Sabitler (kılavuz ek tabloları [14]),
Q	: Serbest kalan yanabilen madde miktarı (lb),
H	: Yanabilen maddenin yanma ısısı,
H_{TNT}	: TNT (trinitro toluen) yanma ısısı,
$C1, C2$	: Sabitler (kılavuz ek tabloları [14]),
ρ_L	: Tank içindeki sıvının yoğunluğu (lb/ft ³),
A	: Kaçak delik alanı (ft ²),
H	: Sabit baş (Static head) (ft),
PFF	: Havuz yangını faktörü (Pool Fire Factor)
A_d	: Havuz alanı (ft ²),
LFB	: Kaynama sıvı faktörü (Liquid Factor Boilling),
QR_L	: Sıvının salınım hızı (lb/min),
P_g	: Tank geç basıncı (psia),
LFL	: Alevlenebilir alt sınırı (Lower Flammable Limit).

7 Kaynaklar

- [1] Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik, 30.12.2013 Tarih, 28867 Mükerrer Sayılı Resmi Gazete.
- [2] Jiang B, Su M, Liu Z, Cai F, Yuan S, Shi S, Lin B. "Effects of changes in fuel volume on the explosion-proof distance and the multiparameter attenuation characteristics of methane-air explosions in a semi-confined pipe". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 39, 17-23, 2016.
- [3] Brzozowska L. "Computer simulation of impacts of a chlorine tanker truck accident". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 43, 107-122, 2016.
- [4] Cao H, Li T, Li S, Fan T. "An integrated emergency response model for toxic gas release accidents based on cellular automata". *Annals of Operations Research*, 255(1-2), 617-638, 2016.
- [5] Shariff AM, Wahab NA, Rusli R. "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, 2016.

- [6] Ebrahimzadih M, Maleki A, Darvishi E, Abadi MM, Dehestaniathar S. "The analysis of process accidents due to risks in the petrochemical industries-the case study of radiation intensity determination proportional to distance from tank level". *Open Journal of Safety Science and Technology*, 5(2),21-26, 2015.
- [7] Sochet I, Sauvan PE, Boulanger R, Nozeres F. "Effect of a gas charge explosion at the closed end of a gas storage system". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 27, 42-48, 2014.
- [8] Pitblado R, Alderman J, Thomas JK. "Facilitating consistent siting hazard distance predictions using the TNO multi-energy model". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 30, 287-295, 2014.
- [9] Ji W, Wen-hua S. "Fire and Explosion Index calculation method incorporating classified safety measure credits". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26, 1128-1133, 2013.
- [10] Tauseef SM, Rashtchian D, Abbasi T, Abbasi SA, "A method for simulation of vapour cloud explosions based on computational fluid dynamics (CFD)". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 638-647, 2011.
- [11] Angan S, Gupta AK, Mishra IM. "Engineering layout of fuel tanks in a tank farm". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 568-574, 2011.
- [12] Sandercock P, Mark L. "Fire investigation and ignitable liquid residue analysis-a review: 2001-2007". *Forensic Science International*, 176(2-3), 93-110, 2008.
- [13] Shariff AM, Rusli R, Leong CT, Radhakrishnan VR, Buang A. "Inherent safety tool for explosion consequences study". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(5), 409-418, 2006.
- [14] Siuta D, Markowski AS, Mannan MS. "Uncertainty techniques in liquefied natural gas (LNG) dispersion calculations". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(3), 418-426, 2013.
- [15] Kao CS, Hu KH. "Acrylic reactor runaway and explosion accident analysis". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(3), 213-222, 2002.
- [16] Ciccarelli G, Fthenakis VM, Boccio JL. "A method of analysis for gas explosions: H₂Se case study". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12(2), 157-165, 1999.
- [17] Planas-Cuchi E, Viñchez JA, Pe´rez-Alavedra FX, Casal J. "Effects of fire on a container storage system-a case study". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 11(5), 323-331, 1998.
- [18] Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis. "United States Environmental Protection Agency".
<https://www.hsd1.org/?abstract&did=32802&advanced> (01.12.2015).
- [19] Yellow Book. "Methods for the Calculation of Physical Effects Due to releases of hazardous materials (liquids and Gases)".
<http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf> (24.12.2015).
- [20] Purple Book. "Guidelines for Quantitative Risk Assessment".
<http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS3/PGS3-1999-v0.1-quantitative-risk-assessment.pdf> (06.01.2016).
- [21] Green Book. "Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials".
<http://tr.scribd.com/doc/61170131/Green-Book-Methods-for-the-Determination-of-Possible-Damage-CPR-16E#scribd> (06.01.2016)
- [22] Red Book "Methods for determining and processing probabilities".
<http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS4/PGS4-1997-v0.1-probabilities.pdf> (06.01.2016).