



Karayolu Tehlikeli Madde Taşımacılığı Kapsamında Tünel Güvenliği ve Risk Analizi

Tunnel Safety and Risk Analysis within the Scope of Dangerous Goods Transport on Roads

Alp GEYİK¹, Saliha ÇETİNYOKUŞ²

Özet

Karayolu ulaştırma altyapısında tüneller, coğrafi kısıtların aşılabilesine olanak tanınmaları nedeniyle büyük sosyal ve ekonomik öneme sahip özel ulaşım yapılarıdır. Kesintisiz hizmet sunan bu yapılarda güvenlik ise güncelliğini koruyan önemli bir konudur. Geçmiş kazalar, karayolu tünellerindeki güvenliğin sorgulanması gereksinimini doğurmuştur. Uluslararası düzeyde tünel güvenliğinin sağlanmasına yönelik yaklaşımlar geliştirilmeye çalışılmış, uygulamaların standartlaştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında karayolu tünel güvenliğinin, en riskli tehlikeli madde taşımacılığı özelinde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle dünya genelinde mevcut durum ve uluslararası mevzuat değerlendirilmiş, ülkelerin uygulamaları incelenmiştir. Ardından ülkemiz için konuya yönelik durum tespiti yapılarak olası problemler özetlenmiş, çözüm ve öneriler sunulmuştur. Çalışmada ayrıca, tünelde LPG taşımacılığı için ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres- Tehlikeli Atmosferlerin Bölgesel Yerleri) yazılımı üzerinden örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Uygulamada, Senaryo (i): Yangın meydana gelmeden kimyasal kaçağın olduğu durum, Senaryo (ii): Kimyasal kaçağı sonrası jet yangını görüldüğü durum ve Senaryo (iii): BLEVE (Kaynayan sıvı genleşen buhar bulutu patlaması) üzerinden yangın, patlama ve toksik yayılım etkileri modellenmiştir. En geniş etki mesafeleri BLEVE sonucunda kırmızı, turuncu ve sarı tehlike bölgeleri için sırasıyla 10kW/sq m (60 saniye içinde potansiyel ölüm) =355m, 5.0kW/sq m (60 saniye içinde ikinci derece yanıklar) =502m ve 2kW/sq m (60 saniye içinde acı) =781m olarak belirlenmiştir. Ücretsiz bir yazılım olan ALOHA'nın, karayolu tehlikeli madde taşımacılığı uygulayıcı ve denetleyicileri için pratik olarak kullanılabilceği gösterilmiştir. Tehlikeli maddelerin tünellerden geçişi, önceden senaryolar üzerinden modellenerek uygun yol güzergâhı belirlenebilir. Böylece, tehlikeli madde taşımacılığında zaman kaybı ve maddi giderler bertaraf edilebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Karayolu ulaşımı, tünel güvenliği, tehlikeli madde taşımacılığı, risk analizi, ALOHA yazılımı

Abstract

Tunnels are specific transport structures having great social and economic importance in road transport infrastructure due to their ability to overcome geographical limitations. Safety is an important issue in these structures since they provide uninterrupted service. Past accidents have led to the need to question the safety of road tunnels. Approaches for providing international-level tunnel safety have been developed and are intended to be standardized practices. In the study, it was aimed to evaluate the safety of road tunnels in terms of the riskiest, dangerous goods being transported. First,

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye
²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara, Türkiye

ORCID:

A.G.: 0000-0003-1836-7401

S.Ç.: 0000-0001-9955-6428

Corresponding Author:

Alp GEYİK

Email:

alpgeyik@yahoo.com

Citation: Geyik, A. ve Çetinyokuş, S. (2020). Karayolu tehlikeli madde taşımacılığı kapsamında tünel güvenliği ve risk analizi. *Journal of Humanities and Tourism Research*, 10 (3): 492-510.

Submitted: 21.05.2020

Accepted: 28.05.2020

the current situation in the world and international legislation were evaluated and country practices were examined. Afterwards, due diligence was made for our country, possible problems were summarized, and solutions and suggestions were presented. Besides, a case study was carried out through the ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) Software for the transportation of dangerous goods in the tunnel. In practice, the effects of fire, explosion and toxic dispersion were modelled on the scenarios of (i) a leaking tank where a chemical is not burning as it escapes into the atmosphere, (ii) a leaking tank, where a chemical is burning like a jet fire and (iii) BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), the tank explodes and the chemical burns in a fireball. The largest effect distances of BLEVE for red, orange and yellow threat zones were 10kW / sq m (potentially lethal within 60 sec) =355m, 5.0kW / sq m (2nd-degree burns within 60 sec) =502m and 2kW / sq m (pain within 60 sec) =781m, respectively. It has been shown that ALOHA, a free software, can be used practically to manage road hazards. The passage of hazardous materials through tunnels can be modelled on scenarios in advance and an appropriate road route can be determined. Thus, wastes of time and material expenses in dangerous goods transportation can be eliminated.

Keywords: Road transport, tunnel safety, dangerous goods transportation, risk analysis, ALOHA Software

1. GİRİŞ

Karayolu ağında kapasite anlamında arzın kısıtlı talebin yoğun olduğu kesimlerde inşa edilen tüneller, özellikle üretilen mal ve hizmetlere zaman ve mekân faydası sağlamaları ile yoğun bir şekilde ticari trafik talebine maruz kalırlar. Tehlikeli madde taşımacılığı bu talebin bir parçasıdır ve miktarı sürekli artmaktadır. Eurostat verilerine göre AB-28 ülkeleri genelinde tehlikeli madde taşınımı 2013 – 2017 yılları arasında her yıl artarak 75 milyar ton-km'den 82 milyar ton-km'ye ulaşmıştır. 2017 yılı verilerine göre tehlikeli madde taşımacılığının ülke genel ulaşımı içindeki oranı AB-28 için %4 civarındadır. Bu durum, karayolu tünellerinde güvenliği tehdit eden tehlikeli madde taşımacılığı kaynaklı kaza risk potansiyelinin artacağına dikkat çekmektedir.

Tüneller, dış ortamdan izole kapalı bir hacim içinde hizmet veren yapılarıdır ve bu durum ciddi kazaların yaşanmasına neden olmaktadır. Fransa'daki Mont Blanc tünel yangını (1999 yılı, 39 ölü), Avusturya'daki Tauern tünel kazası (1999 yılı, 12 ölü), İsviçre'deki Gothard tünel yangını (2001 yılı, 11 ölü) ve yine İsviçre'deki Viamala tünel kazası ve akabinde çıkan yangın (2006 yılı, 9 ölü) deneyimlenmiş önemli tünel kazalarındandır. Söz konusu kazalar gerek insani gerek ekonomik sonuçları ile afet boyutlarına ulaşmıştır.

Kazaların %100 önlenemesinin olanaksız olması ve tünellerin yapısal karakteristikleri, kazaları özellikle tehlikeli madde taşımacılığına açık tünellerde ciddi bir güvenlik sorunu haline getirmektedir. Tünellerde güvenlik, tünel tasarımına ilişkin minimum standartlar, tehlikeli maddeler özelinde sınıflandırma, muhafaza, işaretleme ve taşıma gereksinimlerini tanımlayan uluslararası anlaşmalar ve bilimsel çalışmalar ile farklı perspektiflerden irdelenerek global bilgi düzeyi artırılmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmalar, karayolu tünellerinde tehlikeli madde taşımacılığı kapsamında güvenliğin; planlamadan tasarıma, işletmeden iyileştirmeye her aşamada risk değerlendirmesi, güvenlik denetimleri, güvenlik uygulamaları gibi iyi geliştirilmiş araçlar içeren bütünlük bir yaklaşımla istenen hedef seviyeye çekilebileceğini ortaya koymaktadır.

Tehlikeli maddelerin karayolu tünelleri yoluyla taşınması ile ilgili risklerin yönetilmesi birçok ülkede ciddi sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Oldukça karmaşık yapıdaki bu sorunlara çözüm bulmak için, herhangi bir organizasyonda veya ülkede bulunanın ötesinde çeşitlilik içeren bilimsel deneyimler ve güçlü finansal destek önem arz etmektedir. Bu nedenle, OECD (The Organisation for Economic Co-operation and Development) "Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü" nün Karayolu Taşımacılığı ve Intermodal Bağlantıları Araştırma Programı ve PIARC (World Road Association) Dünya Karayolu Birliği'nin Karayolu Tünelleri Komitesi ve Avrupa Komisyonu'nun önemli katkıları ile bir araştırma projesi başlatılmıştır. Araştırma sonuçları tehlikeli maddelerin karayolu tünelleri yoluyla taşınmasına ilişkin hem düzenleyici hem de teknik çözümleri içeren kapsamlı bilgiler sunmuştur. Araştırmanın en önemli çıktısı tehlikeli maddelerin bir tünelden ya da tünel harici alternatif bir güzergahtan geçirilmesi durumuna yönelik risklerin

karşılaştırılmasına olanak veren kantitatif/nicel bir risk değerlendirme (QRA- Quantitative Risk Assessment) modelinin geliştirilmesidir. Bunun yanı sıra, karar vericilerin QRA sonuçlarını diğer ilgili verilerle birleştirmelerini sağlayan bir karar destek modeli (DSM- Decision Support Model) geliştirilmiştir (OECD ve PIARC, 2001). Bu çalışma, karayolu tünellerinde güvenlik ve risk analizi konusunda küresel ölçekte ana altlık oluşturan referans çalışma olma niteliğini halen korumaktadır.

Benzer yapıdaki oluşumlarla konu araştırılmaya, mevcut bilgi birikimi yeni açılımlarla artırılmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda, PIARC “Karayolu Tünel İşletmesi Teknik Komitesi” bünyesinde oluşturulan ve alanda lider sekiz ülkeden araştırmacıları içeren “Karayolu Tünel Güvenliği Yönetimi” çalışma grubunca karayolu tünellerinde risk analizi ve risk değerlendirmesine yönelik uygulama yaklaşımlarına odaklanan araştırmalar gerçekleştirilmiştir (PIARC 2008, 2012). Bu çalışmalarda, karayolu tünellerinde güvenlik kavramına hem karayolu yük taşımacılığı hem de tehlikeli madde taşımacılığı özelinde yaklaşım, ülkelerin geliştirdikleri farklı uygulamalar bir araya getirilerek irdelenmiş, üye ülkelere tavsiye niteliğinde uygulama örnekleri ile farklı alternatif yaklaşımlar sunulmuştur.

Bu tür uluslararası çalışmalar sonrasında daha spesifik konular üzerine odaklanan çalışmalarla literatürde karşılaşılmaktadır. Xia vd. tarafından yürütülen çalışmada, 202 tehlikeli madde taşımacılığı kazası analiz edilmiş, 8: 00-10: 00 zaman diliminde kazaların sık ve çoğunun otoyolda meydana geldiği, kaza bir tünel içinde meydana geldiğinde daha ciddi sonuçlara yol açtığı belirtilmiştir. Ayrıca, tehlikeli madde kazalarının başlıca nedenlerinin sürücülerin yanlış tutumu ve araç arızası olduğu, patlamalar ve yangınların en ciddi kaza sonuçlarına neden olduğu vurgulanmıştır(Xia vd., 2020). Bing vd. tarafından yürütülen çalışmada, bir karayolu tünelinin işletme aşamasında güvenlik risk değerlendirmesi ve yönetimini gerçekleştirmek için endeks sistemi ve değerlendirme yöntemi oluşturulmuştur. Endeks puanları bulanık kapsamlı değerlendirme modelinden elde edilmiş ve genel güvenlik risk derecesi belirlenmiştir. Değerlendirme seviyesi III veya daha yüksek ise özel risk değerlendirmesi ve emniyet riski çözüm önlemleri uygulanması gereği vurgulanmıştır (Bing vd., 2020). Karayolu tünellerinin çalışma güvenliği, karmaşık bir insan-araç-tünel-çevre sistemi tarafından yönetilir ve birçok faktörden etkilenir. Bu sürecin değerlendirilmesi karmaşıktır ve belirli tünele özgüdür. Chen vd. tarafından yürütülen çalışmada, karayolu tünellerinin işletme güvenliği derecelendirme, risk değerlendirme ve esneklik değerlendirilmesi ele alınmış ve yeni bir karayolu tüneli işletme güvenliği esnekliği kavramı önerilmiştir (Chen vd., 2020). Yanıcı sıvıların karayolu ile taşınması, konum ve çevrenin zamanla değişen koşulları nedeniyle büyük belirsizliğe sahiptir ve bu da zor risk analizine yol açmaktadır. Liv vd. tarafından bulanık Bayesian ağına (FBN) dayalı karayolu tanker taşımacılığı için gerçek zamanlı bir risk analizi yöntemi önerilmiştir. Çalışma, bu yöntemin karayolu tanker taşıma kazalarının hem olasılıklarındaki hem de sonuç seviyelerindeki değişiklikleri dinamik olarak karakterize edebileceğini göstermiştir(Liv vd., 2020). Türkmen vd. tarafından Tehlikeli Madde Taşımacılığı (DGT) risklerinden etkilenebilecek varlıklar, 5 ana kriter altında sınıflandırılmıştır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile pilot alanda rota seçilirken alternatif yollar ve tüneller arasında riske dayalı bir seçim oluşturulmuştur(Türkmen vd., 2019). Tauern Tüneli özelinde yürütülen nicel risk değerlendirmesi çalışmasında, OECD/PIARC-QRA modelinin örnek olay uygulaması gerçekleştirilmiş, Tauern Tünelinde uygulanmakta olan acil durum havalandırma sistemi ile Fransız yetkililerce Mont Blanc tüneline gerçekleştirilen ağır taşıtlar arasında minimum 150 m takip mesafesini zorunlu kılan uygulamanın tünel güvenliği üzerine etkileri irdelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen QRA sonuçları doğrultusunda her iki uygulamanın da tünel güvenliğinde ağır taşıt trafiği kaynaklı riskin düşürülmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir (Knoflach vd., 2002). İtalya’da yürütülen bir çalışmada, Avrupa Birliği’nin ilgili direktifi doğrultusunda karayolu tünellerine yönelik minimum

standartları sağlayan tek yönlü trafiğe açık tünellerde, tehlikeli madde taşıyan taşıtların ağır taşıtlar içindeki oranlarının değişiminin tünel güvenliği üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçların beklenen değer (EV) ve F-N grafiği kapsamında sosyal risk olarak ifade edildiği çalışmada, tehlikeli madde taşıyan taşıt oranındaki değişimle risk seviyesi arasında doğrusal bir ilişki olduğu ortaya konulmuştur. Bu sonuç, trafik verilerinin, tünel işletmesinden sorumlu karar vericilere tünelin tehlikeli madde taşımacılığına açılmasına ilişkin düzenlemelerin planlamasında (belirli saatlerde kısıtlamalar getirilmesi, tamamen serbest bırakılması ya da yasaklanması gibi) kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir (Caliendo ve De Guglielmo, 2016). Tek yönlü trafiğe hizmet veren tünellerde, tehlikeli madde taşımacılığı kaynaklı risk değerlendirmesine yönelik basitleştirilmiş bir metot geliştirilmesine dayanan ve QRAM ilkelerini temel alan bir çalışma daha yürütülmüştür. Çalışma kapsamında risk seviyesi, tünel uzunluğunun, yıllık ortalama günlük trafik değerinin, trafikteki ağır taşıt ve tehlikeli madde taşıyan taşıt yüzdesinin bir fonksiyonu olarak beklenen değer (EV) cinsinden tahmin edilmiştir. Geliştirilen metotla trafikteki tehlikeli madde taşıyan taşıt oranının yüksek olduğu özellikle zirve saat koşullarında, tünel işletmesinden sorumlu yetkililerin trafik yönetimine ilişkin daha isabetli kararlar alacağı belirtilmiştir. Risk seviyesini düşürmek amacıyla trafiğe zaman temelli kısıtlamaların getirilmesi ya da koruma aracı eşliğinde geçiş zorunluluğu gibi uygulamaların yapılabileceği önerilmiştir (Caliendo ve De Guglielmo, 2017).

Karayolu tünellerine yönelik risk değerlendirmesi konusunda normatif ve risk temelli nitel, yarı-nitel ve nicel teknikler mevcuttur. İlgili AB direktifi doğrultusunda, minimum güvenlik kriterlerini sağlayan bir tünele ilişkin belirli trafik ve kaza verileri temel alınarak gerçekleştirilen farklı yaklaşımlarla risk analizlerinin sonuçlarının karşılaştırıldığı çalışmada, ideal risk değerlendirme ve karar alma mekanizmasının şartlara göre değişim gösterdiği belirtilmiştir. Zaman ve veri kısıtı altında, nitel ve yarı-nitel yaklaşımlar risk durumuna ilişkin genel bir bakış açısının hızlı bir şekilde elde edilebilmesi açısından; risk azaltma eylemlerinin belirlenebilmesi anlamında ise nicel (QRA) risk analiz teknikleri önemli bulunmuştur. Genel risk değerlendirme metodolojisinde şartlara göre her iki metodun birlikte değerlendirilmesi gereği belirtilmiştir (Benekos ve Diamantidis, 2017). San Demetrio tüneline yönelik bir örnek olay üzerinden karayolu tünellerinde ciddi trafik kazalarına yönelik risk analizi çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, en kötü senaryonun tehlikeli madde taşıyan taşıtların dahil olduğu durumlar olduğu düşünüldüğünden OECD/PIARC QRAM modeli kullanılmıştır. Tünele ilişkin kaza durumunda risk üzerinde önemli etkisi olan akan ve tıkalı trafik içinde yol kullanıcı yoğunluğu, trafikteki otobüs gibi potansiyel insan yoğun taşıt oranı, şerit sayısı, ortalama taşıt doluluğu gibi parametreler belirlenmiştir. Tıkanan trafik uzunluğunun kaza sonrası tünelin en kısa sürede trafiğe kapatılmasını ve kaza senaryosunun oluşum frekansını etkilediği; tehlikeli madde trafiğinin ve trafikteki ağır taşıt oranının, ilgili kesimdeki ağır taşıtların karıştığı kazaların frekansını etkilediği; tehlikeli madde trafiği içerisinde her bir tehlikeli madde türünün ise tünel güvenliği üzerinde büyük etkisi olduğu tespit edilmiştir (Bontempi ve Gkoumas, 2016). Marjinal yapısal tasarım özelliklerine sahip beş karayolu tüneline yönelik yürütülen nicel risk analizi (QRA) sonuçlarına dayanan çalışmada minimum güvenli tasarım standartları ile tünel güvenliği arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. İlgili AB direktifinin (2004/54/EC) özel taşıtlar ve hafif ticari araçlar için yeterli güvenli trafik ortamını büyük oranda sağlandığı, ağır taşıt trafiğinin özellikle de tehlikeli madde taşıyan taşıtların tünele ilişkin F-N grafiklerinde risk seviyelerini önemli derecede yükselttiği belirlenmiştir. Tünel uzunluğunun > 3000 m olduğu durumda, risk seviyesi kabul edilebilir limitlerin üzerine taşınmıştır. Bu durum, tasarım özelliklerine ek güvenlik tedbirlerinin (hız limitlerinin düşürülmesi, minimum takip mesafesi zorunluluğu getirilmesi, öndeki taşıtı geçiş yasağı getirilmesi gibi) alınmasının gerekliliğini ortaya koymuştur. QRA'nın hem tünel hem de olası alternatif güzergahlar için gerçekleştirilmesinin, güvenli tünel işletmeciliğine yönelik en

doğru kararın alınması için kaçınılmaz bir ihtiyaç olduğu belirtilmiştir (Kirytopoulos ve ark., 2010).

Bu çalışmada, karayolu tünel yapılarında tehlikeli madde taşınmasına ilişkin risk analizi üzerine uluslararası mevzuat ve ülke uygulamaları değerlendirilerek ülkemize yönelik çözüm ve önerilerin sunulması amaçlanmıştır. Ardından bir çözüm önerisi olarak, tipik bir LPG aracı özelinde nicel sonuç analizine ilişkin modelleme çalışması yürütülmüş, muhtemel sonuçlar (patlama, yangın, toksik yayılım) değerlendirilmiş ve sonuçların karayolu tünel güvenliğine önemli katkıları sıralanmıştır.

2. TEHLİKELİ MADDELERİN KARAYOLUNDA TAŞINMASINA YÖNELİK ULUSLARARASI MEVZUAT

Sadece tünelleri değil tüm karayolu ulaşımını kapsar nitelikte tehlikeli maddelerin taşınmasına ilişkin en temel düzenleme 29 Ocak 1968'de yürürlüğe giren ADR (European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road) "Tehlikeli Maddelerin Karayolu ile Uluslararası Taşınmasına Yönelik Avrupa Anlaşması" dır. Türkiye'nin de aralarında bulunduğu çok sayıda ülkenin kabul ettiği düzenlemenin amacı, tehlikeli maddelerin paketlenmesi, taşınması ve elleçlenmesine yönelik genel teknik ve organizasyonel kuralların uygulanması ile insanlara ve çevreye zarar verecek kaza riskinin minimize edilerek, güvenli ulaşımın sağlanmasıdır.

Tünellerde tehlikeli madde taşıyan taşıtların karışabileceği kazalarda çok daha ciddi sonuçların meydana gelme olasılığına karşı, tünellere ADR'de özel önem verilmiştir. Bu doğrultuda, ADR Bölüm 1.9.5'te tehlikeli madde kaynaklı olası üç ana riski temel alan varsayımlar doğrultusunda tünellerin sınıflandırılmasına dayalı "Tünel kısıtlamalarına" değinilmektedir. Çok sayıda insan kaybı ve/veya tünel yapısında ciddi hasar yaratma potansiyeline sahip üç ana risk,

- i. Patlamalar
- ii. Zehirli gaz ya da uçucu zehirli sıvı yayılımı
- iii. Yangınlardır.

ADR'de tehlikeli madde taşıyan taşıtların, taşınan yükün niteliği doğrultusunda tünellerden geçişinin kısıtlanmasının, anlaşmaya taraf ülke yetkili makamınca, ilgili karayolu tünelinin Madde 1.9.5.2.2'de tanımlanan 5 farklı tünel kategorisinden birine dahil edilmesi yoluyla gerçekleştirilmektedir. Tünellerin farklı kısıtlama durumlarına yönelik kategorilere ayrıldığı sisteme ilişkin bilgiler Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1. Tünellerden Tehlikeli Madde Geçişine Yönelik ADR Sınıflandırması (ADR Volume-I, 2013)

| Tehlikeli Madde Taşınmasına Yönelik Tünel Kategorisi | Kategori Açıklaması |
|--|--|
| Kategori-A | Tehlikeli madde taşınmasına yönelik bir kısıtlama yoktur. |
| Kategori-B | Çok büyük patlamaya neden olabilecek tehlikeli maddelerin geçişi kısıtlanmıştır. |
| Kategori-C | Büyük patlamaya, çok büyük patlamaya veya büyük zehirli madde salınımına neden olabilecek tehlikeli maddelerin geçişi kısıtlanmıştır. |
| Kategori-D | Büyük patlamaya, çok büyük patlamaya, büyük zehirli madde salınımına veya büyük yangına neden olabilecek tehlikeli maddelerin geçişi kısıtlanmıştır. |
| Kategori-E | Tüm tehlikeli maddelerin geçişi kısıtlanmıştır. (UN Nos. 2919, 3291, 3331, 3359 ve 3373 hariç.) |

Herhangi bir tünel ADR'ye göre kategorize edilirken tünel karakteristikleri, alternatif güzergâh ve/veya ulaşım türünün mevcudiyet ve uygunluk durumuna yönelik risk değerlendirmesi ve trafik yönetimine ilişkin şartlar göz önünde bulundurulur. ADR'nin öngördüğü şartların ötesinde taraf olan ülkelerin yetkili makamları, kendi sınırları içerisinde karşı karşıya kalınan riskler doğrultusunda ek önlemler alma hakkına, Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu sekreteryasını bilgilendirmek koşulu ile sahiptir.

Tünellerde güvenliğin sağlanmasına yönelik önemli ve dünyada kabul gören bir diğer düzenleme Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 29 Nisan 2004'te yürürlüğe giren ve Trans-Avrupa Karayolu Ağındaki tünellere ilişkin minimum güvenlik gereksinimlerini içeren 2004/54/EC sayılı direktifdir. Direktifle insan hayatını, çevreyi ve tünel yapısını tehlikeye atabilecek kritik olayların önlenmesi, kaza durumunda ise korunmaya yönelik olarak yol kullanıcılar için minimum güvenlik seviyesinin sağlanması amaçlanmaktadır. Direktif, işletmeye açık, yapım veya tasarım aşamasında Trans-Avrupa Karayolu Ağı üzerinde >500 m uzunluğundaki tüm tünelleri kapsamaktadır. Söz konusu direktif ADR'nin aksine tehlikeli madde ve taşınmasına yönelik düzenlemelere değil tünelin yapım, işletme ve donanım özellikleri üzerine odaklı bir yapıdadır. Ancak, bu konularda minimum güvenlik seviyesinin sağlanmasını öngören kriterleri ortaya koyarken ağır taşıt trafiğinin (3,5 ton ve üzeri taşıtlar) günlük trafik içindeki oranının %15'i aşmasını ek risk doğuran bir durum olarak tanımlamakta, bu ek riskin tünelde yönelik direktif kaynaklı seçimlerde göz önünde bulundurulmasını öngörmektedir. Tehlikeli maddelerin taşınmasına yönelik ilgili maddede ise tünelde ilişkin bir karar alınması ve düzenleme yapılması süreci öncesinde Madde 13 "Risk Analizi" kapsamında risk analizi gerçekleştirilmesini şart koşmaktadır. Bu bağlamda gerçekleştirilecek risk analizinin ilgili tünelde yönelik başta trafik karakteristikleri, tünel uzunluğu ve geometrisi olmak üzere tüm tasarım faktörleri ve trafik koşullarını göz önünde bulundurur içerikte olması gerekliliği belirtilmektedir. Direktifte risk analizinin tünel yönetiminden bağımsız bir yapı tarafından gerçekleştirilmesi gerekliliğine işaret edilirken, gerçekleştirilecek risk analizi metoduna veya kabul edilebilir risk kriterlerine ilişkin bir yönlendirme yapılmamaktadır. Bu konuda her bir ülkedeki yetkili makam hatta bir ülkedeki farklı tünellerin farklı işletmecileri kendi risk analiz metodunu ve kabul edilebilir risk kriterlerini seçmekte serbest bırakılmıştır.

Tünel güvenliğini artırmaya yönelik alınabilecek önlemler, tünellerde tehlikeli madde taşımacılığına yönelik izinlerin verilmesi veya gerekli kısıtların belirlenmesi, öngörülen risk analizi çalışmaları gibi konularda hem mevcut bilgi düzeyinin yükseltilmesi hem de global ölçekte bir uyumlandırma sağlanması amacıyla "Dünya Karayolu Birliği" PIARC (World Road Association), UNECE "Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu" ve OECD "Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü" öncü rol üstlenen uluslararası kuruluşlardır. Bu kuruluşlarca hazırlanmış ve tavsiye niteliğinde olan rapor, rehber ve uygulamalar mevcuttur (Kaçan, 2018).

2.1. Tehlikeli Madde Taşımacılığı Kapsamında Tüneller İçin Risk Analizi

Tehlikeli madde geçişinin bir tünelde yasaklanması riskleri elimine etmemekte, sadece farklı bir boyuta taşımaktadır. Hatta bazı durumlarda yasaklama ile genel risk çok daha artabilmektedir (örneğin tehlikeli madde trafiğinin tünel yerine çok daha yoğun nüfuslu kentsel bir bölgeden geçişe yönlendirilmesi gibi). Bu nedenle tehlikeli madde geçişinin bir tünelde serbest bırakılması ya da kısıtlanmasının içinde tünel güzergahının da bulunduğu olası alternatifler arasında bir risk değerlendirmesine dayandırılması gerekmektedir.

OECD/PIARC tarafından yürütülen proje ile hem normal karayolu kesimlerinde hem de tünellerde tehlikeli madde taşımacılığı kaynaklı risk analizine olanak tanıyan DG-QRA "Tehlikeli Madde Nicel Risk Analizi" modeli geliştirilmiştir. ADR tünel düzenlemelerinin uygulanması sürecine yönelik olarak çeşitli ülkeler, tehlikeli maddelerin tünellerden geçişi kapsamında

tamamen ya da kısmen DG-QRAM sonuçlarını kullanan farklı risk değerlendirme prosedürleri tanımlamışlardır. DG-QRAM ayrıca tehlikeli madde geçişine yönelik bir tünele ilişkin rasyonel karar sürecinde alternatif güzergahlara ilişkin risk durumunu ortaya koyarak, 2004/54/EC direktifi doğrultusunda öngörülen risk analizi kapsamında karar destek unsuru işlevi görmektedir. Nihai karar DG-QRA sonuçlarına ek olarak, ekonomik veriler, diğer veriler ve karar vericilerin politik tercihleri (riskten kaçınma vs. gibi) ile şekillenmektedir.

2.1.1. DG-QRA Metodolojisi

DG-QRA modeli “Nicel Frekans Analizi” ve “Nicel Sonuç Analizi” araçlarıyla nicel bir yaklaşıma imkân tanımaktadır.

2.1.1.1. Nicel frekans analizi

DG-QRA modeli tetikleyici bir başlangıç olayından (kaza ya da arıza gibi) bir kaza durumuna ilişkin senaryoları elde edebilmek için koşullu olasılıklara çevrilmiş bir dizi olayın analizine ilişkin sonuçları içermektedir. Modele, farklı sınır koşulları (tünel/normal karayolu kesimleri, kentsel/kırsal alanlar) arasında ayırım yapan her senaryo için nicel rakamları içeren bir tablo oluşturulmuş ve dahil edilmiştir.

Tüneller ve normal karayolu kesimlerine yönelik kaza oranları, ülke istatistikleri (tünel projelendirilmesinde genel olarak kullanılan varsayılan değerler) ya da yerel istatistikler (işletilmekte olan tüneller/karayolu kesimlerine yönelik kazaların gözlemlenmesi) temel alınarak kullanıcı tarafından tanımlanır.

2.1.1.2. Nicel sonuç analizi

Normal karayolu kesimlerinde bir dizi meteorolojik şarta ilişkin fiziksel sonuçların önceden belirlenmiş hesaplamalarını temel alan 2 boyutlu ve basit tek boyutlu bir araç, DG-QRA modeline uygulanmıştır. Model gözlemlenen tehlikeli madde trafiğini temsil eden bir dizi senaryo doğrultusunda karayolu kesimi çevresindeki yerel nüfus ve yol kullanıcılar için sonuçları hesaplayabilmektedir.

Tünellere yönelik senaryoların fiziksel ve fizyolojik sonuçlarının hesaplanabilmesi için ayrı bir tek boyutlu araç modeli eklenmiştir.

Nicel frekans ve nicel sonuç analizlerinin bileşimi FN grafiklerinin hesaplanabilmesine olanak sağlamaktadır. DG-QRA modeli Tablo 2’de yer alan temsili senaryolar üzerine kuruludur.

Tablo 2. OECD/PIARC DG-QRA Modeli Baz Senaryolar (OECD ve PIARC, 2001)

| Senaryo No | Açıklama | Tank Kapasitesi | Yarık/Çatlak Boyutu (mm) | Madde Akış Hızı (kg/s) |
|------------|--|-----------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | Ağır Taşıt Yangını (20 MW) | - | - | - |
| 2 | Ağır Taşıt Yangını (100 MW) | - | - | - |
| 3 | Silindir Tanktaki LPG – BLEVE* | 50 kg | - | - |
| 4 | Motorlu Taşıt Yakıt Yangını | 28 t | 100 | 20,6 |
| 5 | Motorlu Taşıt Yakıtının Buharlaşmasıyla Oluşan Patlama | 28 t | 100 | 20,6 |
| 6 | Klor Salınımı | 20 t | 50 | 45 |
| 7 | Büyük Hacimde LPG – BLEVE* | 18 t | - | - |
| 8 | Büyük Hacimde LPG Yakıtın Buharlaşmasıyla Oluşan Patlama | 18 t | 50 | 36 |
| 9 | Büyük Hacimde LPG'nin Alev Alması | 18 t | 50 | 36 |
| 10 | Amonyak Salınımı | 20 t | 50 | 36 |
| 11 | Büyük Hacimde Akrolein Salınımı | 25 t | 100 | 24,8 |
| 12 | Silindir Tanktan Akrolein Salınımı | 100 t | 4 | 0,02 |
| 13 | Büyük Hacimde Sıvılaştırılmış CO ₂ – BLEVE* | 20 t | - | - |

* BLEVE: Kaynayan sıvı, genleşen buhar patlaması

Tablo 2'deki ağır taşıt yangınına denk gelen ilk iki senaryo dışındaki senaryolar özellikle tehlikeli madde taşınmasına yöneliktir. Modelde uygulanan senaryolar tünellerden tehlikeli madde geçişi durumunda karşı karşıya kalınabilecek tehlikeli maddelerin ana etkilerini temsil etmektedir. Bunlar termal etkileri olan veya olmayan büyük patlamalar, gazların veya uçucu sıvıların kazara salınmasından kaynaklanan büyük toksik etkiler ve büyük yangınlardır. Böylelikle gözlemlenen tehlikeli madde trafiği kapsamında taşınan maddelerin çoğu bu senaryolarla temsil edilebilmektedir.

2.1.2. Risk analizi sonuçları ve risk değerlendirme stratejisi

OECD/PIARC DG-QRA modeli ile;

- Beklenen risk değeri (EV) ve FN grafikleri (toplumsal risk)
- Bireysel risk değerleri

hesaplanabilmektedir.

Dikkate alınan sonuçlar, yol kullanıcılar ve/veya yerel halka yönelik ölümler ve yaralanmalar olabilir. Model, daha sıklıkla bireysel risk değerlerine oranla toplumsal risk figürlerinin (EV ve FN grafikleri) eldesinde kullanılmaktadır.

Model iki aşamalı kullanılmaktadır. Birinci aşamada, tünelin kendisinden kaynaklanan beklenen risk değeri (toplumsal risk) hesaplanır. Yapısal risk olarak da nitelendirilen bu değer, tüm tehlikeli madde geçişinin serbest olduğu kabulü ile ilgili tünelde tehlikeli madde taşımacılığı nedeniyle yıllık beklenen kurban sayısına denk gelmektedir. Birbirini takip eden seri tüneller olması durumunda kümülatif beklenen değer hesaplanır. Bu aşamada gereksinim duyulan veriler şu şekildedir:

- Tehlikeli madde taşınmasına yönelik trafik hacmi ve kompozisyonu,
- Genel trafik hacmi ve kompozisyonu (otomobil, ağır taşıt, otobüs),
- Günlük/sezonzluk değişimler,
- Güzergâh boyunca kaza oranı,

- Tünel karakteristikleri (uzunluk, en kesit, boy kesit, havalandırma, drenaj sistemi, acil durum çıkışları, vb.)

Tünele ilişkin hesaplanan yapısal risk değeri belirli bir eşik değerinde ise aşağıdaki amaçlar doğrultusunda ikinci aşamaya geçilir:

- Tünel güzergahının ve olası alternatif güzergahların risklerinin karşılaştırılabilmesi,
- Tehlikeli madde taşınmasına ilişkin çeşitli kısıtlama seçeneklerinin karşılaştırılabilmesi,
- Kabul kriterleri ile hesaplanan risk değerlerinin karşılaştırılabilmesi.

İkinci aşama analizleri, karşılaştırılacak her bir alternatif güzergâh için homojen detay seviyesinde tamamlayıcı veriye gereksinim duyar. Model, karayolu tünellerindeki tehlikeli madde trafiğine ilişkin kararlar alınması sürecine yönelik geliştirilmiştir. Tünellere ilişkin genel risk analizlerine uygun değildir.

2.2. Ülke Uygulamaları

Bu bölümde, tehlikeli maddelerin karayolunda taşınması ve tünel güvenliği konularında öne çıkan Avusturya, Almanya, İsviçre ve Fransa ülkelerine ait risk analizi uygulamalarına yer verilmiştir.

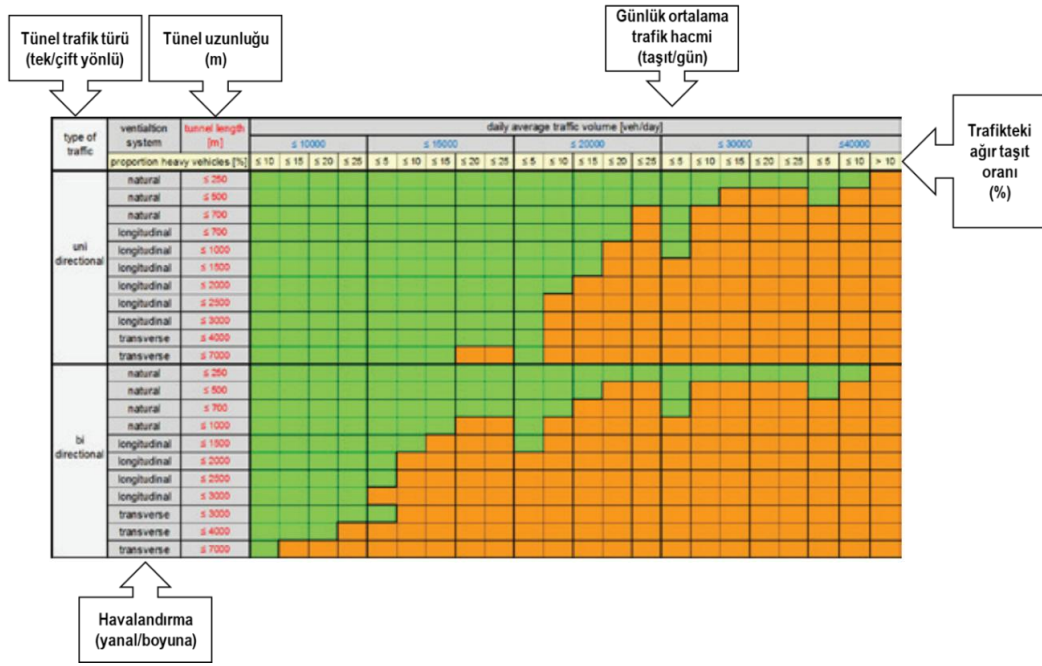
2.2.1. Avusturya

Avusturya'da, çok aşamalı risk değerlendirme süreci uygulanmaktadır:

- a. Basitleştirilmiş yaklaşım, sınıflandırma matrisi uygulaması,
- b. Tünel için DG-QRAM kullanılarak risk analizi yapılması,
- c. DG-QRAM sonuçları doğrultusunda ek risk azaltma önlemlerinin araştırılması,
- d. Tehlikeli madde taşınmasına yönelik olarak DG-QRAM kullanılarak farklı güzergâh alternatiflerinin araştırılması

Süreç basitleştirilmiş değerlendirme ile başlamaktadır (Aşama-a). Tünel tipi (tek yönlü – çift yönlü trafik), havalandırma sistemi, trafik hacmi, ağır taşıt oranı göz önünde bulundurularak tehlikeli madde taşınmasına yönelik düşük riskli tünellerin basit bir şekilde tanımlanması sağlanır. Sınıflandırma matrisinin detaylı bir şekilde hazırlanabilmesi için DG-QRAM kullanılarak bir dizi seçilmiş tünel için sistematik risk hesaplamaları gerçekleştirilir. Sınır değer olarak beklenen risk değeri $EV = 1 \times 10^{-3}$ ölü/yıl'dır. Daha fazla risk hesaplamasına girilmeksizin sınıflandırma matrisi uygulanır (Şekil 1).

Karayolu Tehlikeli Madde Taşımacılığı Kapsamında Tünel Güvenliği ve Risk Analizi



Şekil 1. Tünelde Tehlikeli Madde Trafik Kaynaklı Risk Değerlendirmesine Yönelik Basitleştirilmiş Yaklaşım İlişkin Avusturya Sınıflandırma Matrisi (PIARC, 2013)

Eğer tünel matriste turuncu bölgeye denk gelirse, DG-QRAM kullanılarak özel risk analizi uygulanır (Aşama-b). Risk değerlendirmesi için F-N grafiğindeki referans doğrusu mutlak risk kriteri olarak kullanılır (Şekil 2). Referans doğrunun formülü,

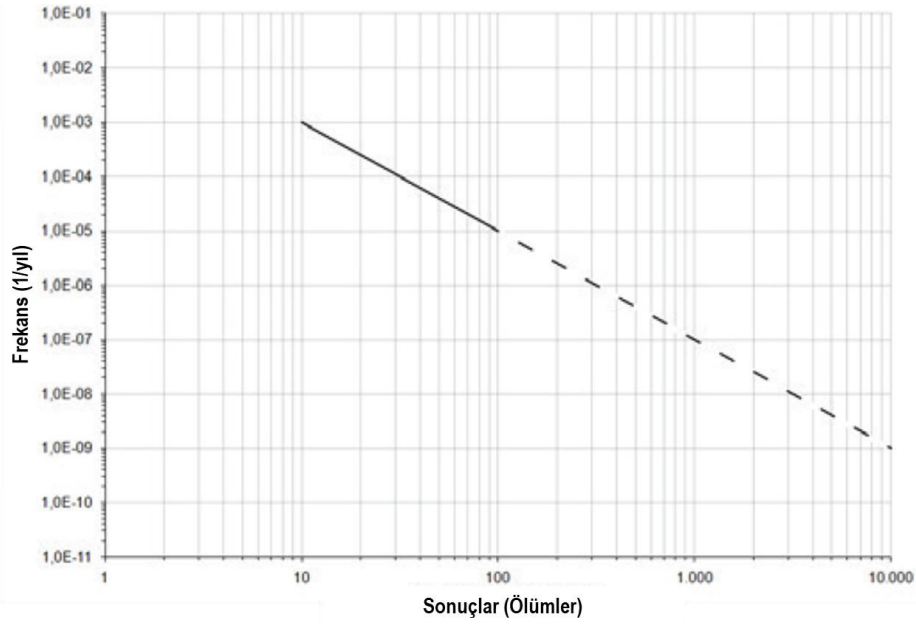
$$N > 10 \text{ ölüm durumu için } F = 0,1 \times N^2$$

şeklindedir, sadece tünellerden tehlikeli madde geçişine yönelik risk için çok aşamalı değerlendirme prosedürünün ikinci aşamasında kullanılabilir ve DG-QRAM modeli ile bağlantılıdır.

Referans doğru 1 km uzunluktaki tünel için geçerlidir. Formül diğer uzunluktaki tünellere şu şekilde uyarlanmıştır:

$$N > 10 \text{ ölüm durumu için } F = 0,1 \times N^2 \times L^{0,5}; L = \text{tünel uzunluğu}$$

Eğer referans doğru aşılsa, hesaplanan risk kabul edilir değildir ve tünel tehlikeli madde taşınması kapsamında artık Kategori A'da değerlendirilemez. Aşama-c kapsamında ek risk azaltıcı önlemler uygulanır ya da Aşama-d çerçevesinde alternatif güzergahlar araştırılır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda tünel ADR tünel kategorilerine göre sınıflandırılır.



Şekil 2. Karayolu Tünellerinden Tehlikeli Madde Geçişine Yönelik Avusturya Risk Kriteri (PIARC, 2012)

2.2.2. Almanya

ADR şartlarına göre gerekenlerin yapılabilmesine yönelik birçok aşamalı risk değerlendirme süreci geliştirilmiştir. Avrupa direktifi EC/54/EG ve ilgili Alman standardı RABT 2006'nın gereksinimleri göz önünde bulundurularak Federal Karayolu Araştırma Enstitüsü öncülüğünde bir araştırma projesi kapsamında özel bir süreç tasarlanmıştır.

Geliştirilmiş çok aşamalı yöntem tüm karayolu tünelleri için risk analizi temelinde tehlikeli madde kaynaklı riskin standartlaştırılmış bir şekilde hesaplanmasına ve tanımlanmış ADR tünel kategorileri temel alınarak tehlikeli madde taşınması için olası kısıtlamaların belirlenebilmesine imkân tanımaktadır. Metot aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- Adım-1a: Tünel karakteristikleri ile ilintili riskin basitleştirilmiş analizi (incelenecek tünellerin ilk seçimi)
- Adım 1b: DG-QRAM aracılığı ile yapısal tünel riskinin analizi
- Adım 2a: Özel sonuç modelleri kullanılarak tünelin detaylı risk analizi
- Adım 2b: Normal karayolu kesimleri için özel sonuç modelleri kullanılarak alternatif ulaşım güzergahlarının detaylı risk analizi.

İlk aşamada kaba bir değerlendirme gerçekleştirilir. Bunu ikinci aşamada gerçekleştirilen derinlemesine analiz takip eder. İlk aşamada değerlendirilmesi yapılan tünel ADR uyarınca Kategori A olarak tanımlanamazsa sonraki aşamaya geçilir. Bu aşamada derinlemesine analiz metodları ve derlenen amaç veriler aracılığıyla tünelle ilişkin tehlikeli madde riski belirlenir. Tünel Kategori A olarak sınıflandırılmazsa bir sonraki aşamada sadece tünel için değil aynı zamanda alternatif güzergahlar için tehlikeli madde riski belirlenir. Son aşama sonucuna göre yetkili makamın tünel kategorisini B, C, D veya E olarak belirlemesi kararına yönelik temel oluşur. Bu durum tehlikeli madde taşınmasının farklı bir güzergaha kaydırılması durumu kaynaklı bir tehlikeli madde riski değerlendirmesini içermektedir.

2.2.3. İsviçre

İsviçre, ADR gereklerine göre karayolu tünellerinin kategorizasyonu için transit karayollarında tehlikeli madde taşınması kaynaklı risklerin hesaplanması ve değerlendirilmesini içeren mevcut milli standart "Büyük Kazalara Karşı Korunma Yönetmeliği"ni (OMA) de göz

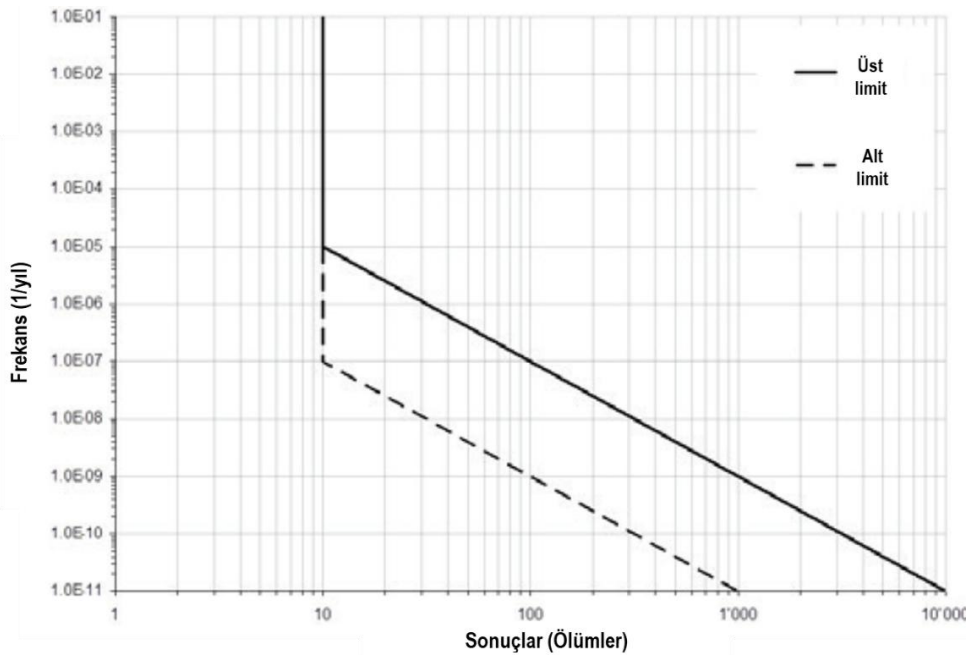
önünde bulunduran özel bir metodoloji geliştirmiştir. Özellikle OMA'nın risk kabul edilebilirlik kriterleri dikkate alınmıştır. Bu bağlamda DG-QRA uyarlanmıştır.

Diğer ülkelerde olduğu gibi aşağıdaki adımları içeren çok aşamalı risk değerlendirme süreci geliştirilmiştir:

1. İlk değerlendirme

- a. Uzunluğu 300 m'den kısa tünellerin güvenli ve Kategori-A Tünel olarak sayılabilmesi için herhangi bir kısıtlama ve/veya detaylı analiz gerekliliğinin kontrolü yapılır; tünel işletmecisinin raporu ve/veya tünelin güvenlik düzeyine ilişkin diğer analizler baz alınarak yetkili makam ek risk analizine gereksinim olup olmadığına karar verilir.
- b. Basitleştirilmiş ve uyarlanmış DG-QRAM modeli uygulanarak tünel riskinin analizi; FN grafiği ile risk kabul edilebilirlik kriterlerinin karşılaştırılması ve OMA'ya göre detaylı analiz gereksinimi kontrol edilir (Şekil-3).

2. Basitleştirilmiş ve uyarlanmış DG-QRAM modeli uygulanarak tünelin detaylı risk analizi yapılır. Analiz temel alınarak risk azaltma önlemlerine veya tehlikeli maddelerin taşınmasına yönelik kısıtlamalara gereksinim olup olmadığının kontrolü (OMA'ya göre risk kabul edilebilirlik kriteri doğrultusunda) yapılır. Eğer bir tünel Kategori-A olarak sınıflandırılmaz ise alternatif güzergahlara yönelik riskler araştırılır.



Şekil 3. Karayollarında (Tüneller Dahil) Tehlikeli Madde Taşınmasına Yönelik İsviçre Risk Kriteri (PIARC, 2012)

Deneyimler, DG-QRAM modelince en kötü durum senaryoları üzerinden üretilen sonuç FN grafiklerinin mevcut OMA risk kabul edilebilirlik kriterlerine uymadığını göstermiştir. Bu nedenle İsviçre uygulamalarında modelde aşağıdaki düzenlemeler yapılmaktadır:

- a. Tehlikeli Madde Verisi: İsviçre koşulları için tehlikeli madde verisinde ve senaryo olasılıklarında ayarlamalar yapılır;
- b. Model Parametreleri: İsviçre koşulları için kaza oranları ve tehlikeli madde salınımı olasılıklarında ayarlamalar yapılır;
- c. DG-QRAM'da mevcut modellerin uzatılması/ayarlanması yapılır,

- Havalandırma (hesaplamalar için ek modül içerir)
- Algılama süresi (mevcut teknik altyapıya göre)

d. DG-QRAM'de ek modüller (yeni bir tahliye modelinin uygulanması) uygulanır.

2.2.4. Fransa

Fransa'da tünellerde tehlikeli madde taşınmasına yönelik risk analizi için iki aşamadan oluşan çoklu bir model sistemi kullanılmaktadır. Modele ilişkin süreç, uzunluğu 300 metrenin üzerindeki tünellere uygulanmaktadır.

Risk analizinin ilk aşamasında IR (Intrinsic Risk) "Yapısal Tünel Riski" değeri DG-QRA aracılığıyla elde edilir. Elde edilen IR değeri ülkenin eşik değeri ile kıyaslanır.

- Eğer $IR > 0,001$ ise, tehlikeli madde trafiğinin tünel güzergahından geçişinin yasaklandığı yerlerde alternatif güzergahlar bulunmasının mümkün olması şartıyla, ADR uyarınca Kategori B ile Kategori E arasında yer alan söz konusu tünel güzergahını ve olası alternatifleri karşılaştırmak için bir QRA çalışması yürütülür. Tünel uzunluğunun 300 m'den kısa olması durumunda tünel güzergahı tehlikeli madde trafiği için düşünülmemektedir.
- Eğer $IR < 0,001$ ise, tünelden tehlikeli madde taşınmasına yönelik risk bir problem yaratmamaktadır ve tehlikeli madde taşımaya ADR uyarınca ne derecede izin verileceğine ilişkin karar diğer kriterler temelinde yapılabilir.

Tam bir QRA çalışması gerekmesi durumunda (risk analizinin ikinci aşaması), tehlikeli madde trafiğinin tamamen ya da kısmen alternatif güzergahlara yönlendirildiği olası diğer çözümler ve tünel güzergahı için tehlikeli madde taşınmasına yönelik risk seviyesinin karşılaştırılabilmesi için OECD/PIARC DG-QRA modeli kullanılır. Risk analizinin sonucu analiz edilen tünelde tehlikeli madde trafiğine tamamen ya da kısmen izin verilmesi veya bu trafiğin tamamen yasaklanmasına yönelik yetkili idari makamın kararı için bir tavsiye niteliği taşımaktadır.

3. TÜRKİYE'DE TEHLİKELİ MADDE TAŞIMACILIĞI VE TÜNEL GÜVENLİĞİ

Türkiye, karayolunda tehlikeli madde taşımaya ve konuya yönelik tünel güvenliği açısından mevzuat anlamında dünya ve AB ile uyumludur. Gerek dünya üzerinde öncü birlik, kurum ve oluşumlara üye olunması (UN, OECD, PIARC vb.) gerekse Avrupa Birliği'ne katılım sürecinde konu ile ilgili müzakereler doğrultusunda gerçekleştirilen düzenlemeler bu durumun ana nedenidir.

Türkiye, ADR'ye taraf ülkedir ve bu anlaşma paralelinde 24 Ekim 2013 tarihli ve 28801 sayılı Resmî Gazete 'de yayınlanan ve ilgili tarihte Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı tarafından çıkarılan "Tehlikeli Maddelerin Karayolu ile Taşınması Hakkındaki Yönetmelik" ile mevzuatını uyumlaştırmıştır. Bu yönetmelik çerçevesinde karayolu tünellerinde tehlikeli madde taşımaya yönelik hüküm Madde 21.b kapsamında şu şekilde verilmektedir: "Karayolları üzerindeki tünellere ilişkin tünel kategorilerinin, ADR'ye uygun olarak belirlenmesi ve işaretlenmesi Karayolları Genel Müdürlüğüne yapılır. Karayolları üzerindeki tünellerden tehlikeli madde taşıyan araçların geçişlerine ilişkin hususlar Bakanlık tarafından belirlenir."

Aynı yönetmeliğin "Tünel kategorilerinin belirlenmesi ve işaretlenmesi" ne yönelik geçici maddesinde ise;

"GEÇİCİ MADDE 5 – (1) Karayolları Genel Müdürlüğüne, karayolları üzerindeki tünellere ilişkin tünel kategorilerinin ADR'ye uygun olarak belirlenmesi ve işaretlenmesi 31/12/2014 tarihine kadar tamamlanır." ifadesi yer almaktadır.

Karayolları Genel Müdürlüğü'nce 4 Ağustos 2015 tarih ve 29435 sayılı Resmî Gazete 'de yayınlanan "Tünel İşletme Yönetmeliği" ile de tünel güvenliğine ilişkin işletme esasları tanımlanmaktadır. Bu yönetmeliklerden de anlaşılacağı üzere konu ile ilgili karar makamı "T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı", uygulayıcı ise "Karayolları Genel Müdürlüğü"dür.

Tünel tasarımı konusunda küresel ölçekte güncel uygulama ve standartlar takip edilmekle birlikte Avrupa direktifi EC/54/EG benzeri minimum güvenlik standartlarını tanımlayan bir ana referans belge ülkemizde bulunmamaktadır.

Mevzuata yönelik günceli takip etme konusundaki genel olumlu yaklaşım, uygulamalar boyutunda aynı derecede iyi durumda değildir. ADR gereğince tünellerin tehlikeli madde taşımacılığı kapsamında risk analizi temel alınarak kategorize edilmesi süreci işletme ve denetime ilişkin çeşitli kısıtlar nedeniyle gerçekleştirilememektedir. Bu nedenle ülkemizdeki tüm tüneller risk analizine tabi tutulmaksızın Kategori-E olarak sınıflandırılarak tehlikeli madde trafiğine kapalı tutulmaktadır. Bu durumun yarattığı ekonomik kaybın boyutu bilinmemektedir. Ayrıca genel riskin artıp artmadığı bilinmeksizin tehlikeli madde trafiğinin diğer karayolu güzergahlarına yönlendirilmesi gibi taraf olunan anlaşmalarla çelişen riskli tünel işletme uygulamaları söz konusudur.

Tünellerde tehlikeli madde trafiğine ilişkin risk analizlerinin gerçekleştirilmiyor ve analiz sonuçlarının bir karar destek unsuru olarak kullanılmıyor olması, ülke şartlarına yönelik uyarlanmış özel, milli bir risk analiz modeli geliştirilmesi çalışmalarının da önünü kapatmaktadır. Bu durum ayrıca konu ile ilgili yetişmiş uzman sayısını da kısıtlamaktadır.

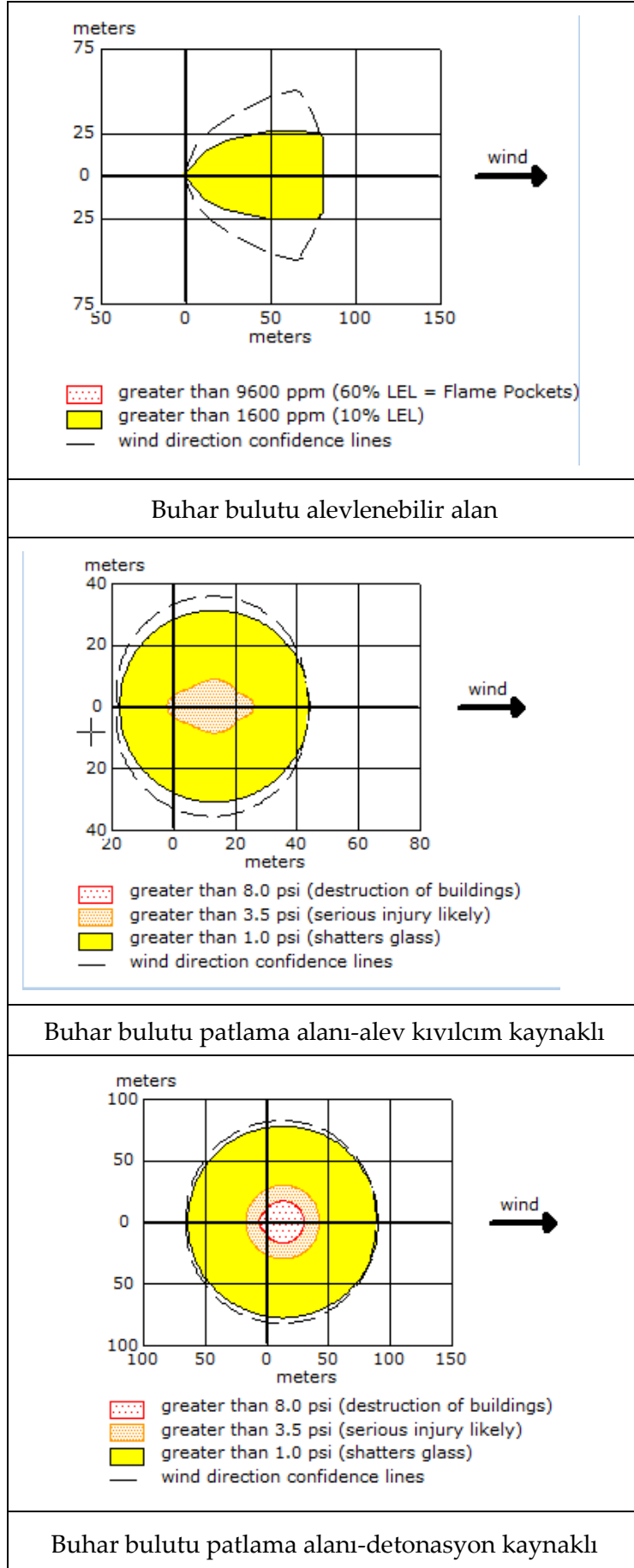
4. ÖRNEK UYGULAMA

Ülkemiz tehlikeli madde taşımacılığının %90'ını akaryakıt (benzin, mazot) ve LPG oluşturmaktadır. Bunlar içinde en tehlikeli olan LPG'dir. ADR mevzuatı kapsamında tipik tanker (L=10.8m, D=2,35m) net tank hacmi 37,25 m³ tür. LPG içeriğinin %70 bütandan oluştuğu varsayımı ile aşağıdaki senaryolar özelinde ALOHA yazılımı ile risk değerlendirmesinin sonuç analizine yönelik modelleme çalışmaları yürütülmüştür.

- Senaryo (i): Yangın meydana gelmeden kimyasal kaçağın olduğu durum
- Senaryo (ii): Kimyasal kaçağı sonrası jet yangını görüldüğü durum
- Senaryo (iii): BLEVE (Kaynayan sıvı genişleyen buhar bulutu patlaması)

Senaryo (i) için elde edilen tehlike bölgeleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Senaryo (i) için elde edilen tehlike bölgeleri



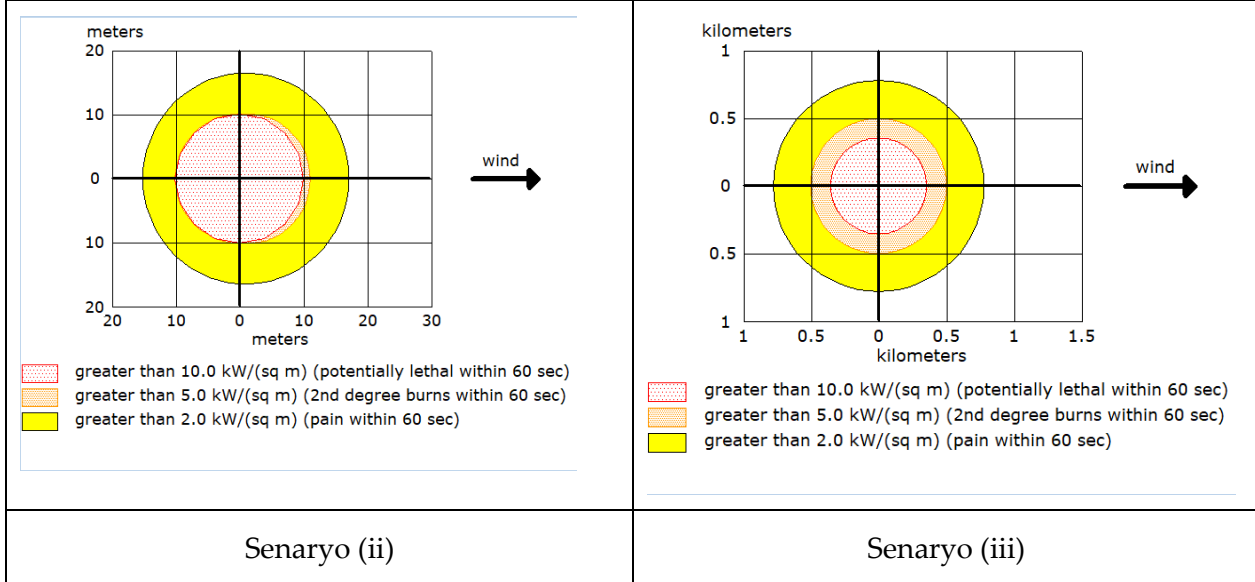
Tablo 3'te kırmızı tehdit bölgesi en tehlikeli alanı, sarı tehdit bölgesi en az tehlikeli alanı ifade etmektedir. LPG buhar bulutu toksik alanı için kırmızı, turuncu ve sarı tehlike bölgelerine karşılık gelen eşik değerleri (Acute exposure guideline levels- AEGL) sırasıyla, 5300 ppm (AEGL-3), 17000 ppm (AEGL-2) ve 5500 ppm (AEGL-1)'dir. Buhar bulutu alevlenebilir alan için kırmızı ve sarı tehlike bölgelerine karşılık gelen eşik değerleri sırasıyla 9600ppm (%60 LEL) ve 1600ppm (%10 LEL)'dir. Buhar bulutu patlama alanı alev/kıvılcım ve detonasyon kaynaklı olarak iki şekilde değerlendirilmiştir. LPG buhar bulutu patlama alanına ait eşik değerleri kırmızı, turuncu ve sarı bölgeler için sırasıyla 8psia (binaların yıkılması), 3,5psia (ciddi yaralanma olasılığı) ve 1psia (camların kırılması) şeklindedir. Senaryo (i) için elde edilen etki mesafesi değerleri Tablo 4'sunulmuştur.

Tablo 4. Senaryo (i) için belirlenen etki mesafesi değerleri

| Senaryo (i) "Yangın meydana gelmeden kimyasal kaçağın olduğu durum" | Kırmızı Tehdit Bölgesi | Turuncu Tehdit Bölgesi | Sarı Tehdit Bölgesi |
|--|------------------------|------------------------|---------------------|
| Buhar bulutu toksik alanı | 12m | 23m | 43m |
| Buhar bulutu alevlenebilir alanı | 32m | - | 81m |
| Buhar bulutu patlama alanı (alev/kıvılcım kaynaklı) | - | 26m | 44m |
| Buhar bulutu patlama alanı (detonasyon kaynaklı) | 30m | 43m | 91m |

Tablo 4'den en geniş etki mesafesi kırmızı tehlike bölgesi için buhar bulutu alevlenebilir alanı için elde edilmiştir. Senaryo (ii) ve Senaryo (iii) sonucu elde edilen termal radyasyon tehlike bölgeleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Termal radyasyon tehlike bölgeleri (Senaryo ii & Senaryo iii)

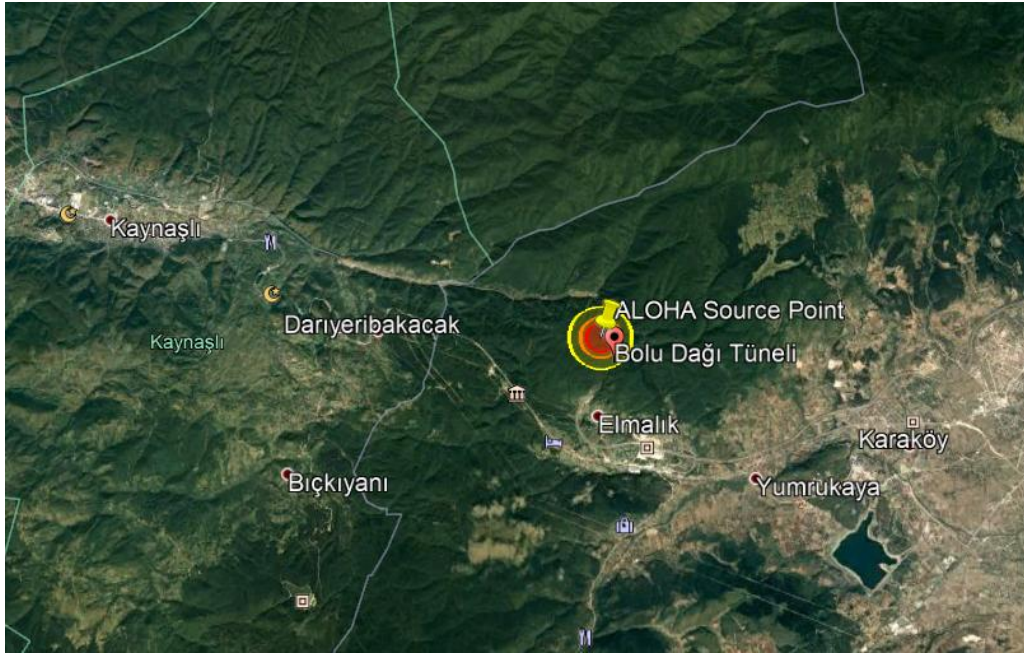


LPG'ye ait termal radyasyon kırmızı, turuncu ve sarı tehlike bölgeleri için eşik değerler sırasıyla 10kW/sq m (60 saniye içinde potansiyel ölüm), 5.0kW/sq m (60 saniye içinde ikinci derece yanıklar) ve 2kW/sq m (60 saniye içinde acı) şeklindedir. Senaryo (ii) ve Senaryo (iii) için elde edilen etki mesafesi değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Senaryo (ii) & Senaryo (iii) için elde edilen etki mesafesi değerleri

| | Kırmızı Tehdit Bölgesi | Turuncu Tehdit Bölgesi | Sarı Tehdit Bölgesi |
|---|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Senaryo (ii) "Kimyasal kaçağı sonrası jet yangını" | 10m | 11m | 17m |
| Senaryo (iii) "BLEVE" | 355m | 502m | 781m |

Tablo 6'dan en geniş etki mesafelerinin Senaryo (iii) BLEVE kaynaklı olduğu görülmektedir. Yazılım sonucu elde edilen tehlike bölgeleri Google Earth üzerine aktarılabilir. En geniş etkilerin belirlendiği Senaryo (iii)'e ait Google Earth görüntüsü Bolu Tüneli için Şekil 4'te örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4. Senaryo (iii) sonucu belirlenen etki alanına ait örnek Google Earth görüntüsü (Bolu Tüneli)

Şekil 4'ten tünelin etrafına etkileri kolaylıkla gözlemlenebilir. Olası bir kaza sonrası tünel güvenliği ve tünelin çevre güvenliği birlikte değerlendirilebilir.

Yürütülen örnek uygulama ile hiçbir koruyucu önlemin mevcut olmadığı en kötü durum özelinde LPG taşıyan bir tankerin olası kaza senaryoları değerlendirilmiş ve kantitatif değerler elde edilmiştir. Toksik etki alanının bilinmesinin tüneller için uygun havalandırma sistemi ve süresinin tasarımında yararlı olacağı düşünülmektedir. Yanabilirlik mesafelerinin bilinmesi ise tünellerde kullanılan elastomer türü yalıtım malzemelerinin doğru seçimini, yeterli sayı ve yapıda yangın söndürücü sistemlerinin kullanımını vb. etkin hale getirecektir. Patlama etki mesafelerinin bilinmesi tünelin yıkılıp yıkılmayacağı öngörüsünü sağlayacak olup, bu bilginin yeni tünellerin yapımında ya da mevcut tünellerin desteklenmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ücretsiz bir yazılım olan ALOHA, ilgili uygulayıcı ve denetleyiciler için pratik olarak akaryakıt ve farklı tehlikeli maddeler için kullanılabilir. Bu şekilde, tehlikeli maddelerin tünellerden geçişi önceden test edilerek, uygun yol güzergâhı belirlenebilir. Tehlikeli madde taşımacılığında zaman kaybı ve maddi giderler bertaraf edilebilir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

OECD/PIARC tarafından yürütülen araştırma çalışmaları, karayollarında tehlikeli madde taşımacılığına yönelik küresel ölçekte hemen hemen her ülkede düzenleyici ve kısıtlayıcı katı uygulamalar olduğunu, ancak aynı konuda tünel geçişlerine yönelik durumun belli bir standartta olmayıp çeşitlilik arz ettiğini göstermiştir. Bu duruma, ülkelerin farklı topoğrafik koşulları nedeniyle karayolu ağlarındaki tünel sayıları ve karakteristiklerinin farklılıklar göstermesinin ve küresel ölçekte bağlayıcı, uyumlandırılmış bir düzenlemenin olmamasının etkisi büyüktür.

Avrupa direktifi EC/54/EG benzeri tünel tasarımına ilişkin minimum güvenlik standartlarını tanımlayan düzenlemelerin, küresel ölçekte üretilerek benimsenmesi önem taşımaktadır. Tünel işletmesi kapsamında ise ADR'de öngörülen tehlikeli madde trafiğine yönelik tünel kategorizasyonu sürecinde; sınıflandırmanın sınırları risk analizi sonuçlarına dayanılarak belirlenmeli, tünellerden tehlikeli madde geçişi için öznellikten uzak, daha objektif ve homojen bir değerlendirme sistemi hâkim kılınmalıdır.

Diğer ülke uygulamalarında da aktif kullanılan OECD/PIARC DG-QRAM modeli, konuya yönelik standardizasyonun sağlanması, ortak dilin kullanılması adına ülkemizde uygulamaya başlanmalıdır. Uygulama sürecinde ülke ihtiyaçlarımızın ne ölçüde karşılandığı değerlendirilebilecek, elde edilecek deneyim ve veri zenginliği üzerinden ülke şartlarımıza uygun yeni ve milli bir model ve/veya risk değerlendirme sürecinin geliştirilmesi sağlanabilecektir.

Ülkemizde tehlikeli maddelerin dahil olduğu karayolu kazalarının kayıt sistemi mevcut değildir. Öncelikle, tehlikeli madde kaynaklı kazaların kaza kaydının tutulması risk analizleri çalışmaları için gerekmektedir. Kazaya dahil olan tehlikeli madde adı, miktarı, ölü/yaralanma sonuçları, yapısal hasarlar özellikle kayıt altına alınmalıdır. Ülke uygulamalarında temel olarak her ülkenin kendi toplumsal riskini tanımlayan F-N grafiğini oluşturduğu ve bu grafik üzerinde bir sınır eğrisi belirlediği görülmüştür. Doğru kaza verileri üzerinden ülkemiz için spesifik F-N grafiği ve limit eğri oluşturulmalıdır.

Tünellerde tehlikeli madde kaynaklı kazalar sonucunda toksik etkiler ve yangın sonucu toksik salınımlar meydana gelebilmektedir. Bu durumda tünellerde doğru havalandırma sisteminin tasarımı ve kullanılması özellikle önemlidir. Yangınla sonuçlanan kazalarda tünellerde yangına dayanıklı malzeme kullanımı dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir konudur. Patlama ile sonuçlanan kazalarda ise oluşan şok dalgalarının tünel yıkımına yol açıp açmadığının muhtemel kaza öncesinde tespiti son derece önemlidir.

Ülkemizde karayolunda taşınan tehlikeli kimyasalların büyük bir bölümünü akaryakıt (benzin, motorin) ve LPG oluşturmaktadır. Tehlikeli maddelerin taşınması ile ilgili bilgileri ihtiva eden Emergency Response Guidebook'a göre LPG yanıcı gazı taşınırken meydana gelebilecek bir kazadan sonra olay merkezinin 1600 metre yarıçaplı; benzin ve motorinin yanıcı sıvıları taşınırken meydana gelebilecek bir kazadan sonra ise olay merkezinin 800 metre yarıçaplı alanında bulunan insanların boşaltılması gerekmektedir (Emergency Response Guidebook, 2016). İlgili konuya dair düzenlemelerde bu bilgilerden yararlanılabilir.

Nicel patlama, yangın ve toksik yayılım etkilerinin belirlenmesinde ücretsiz ALOHA- Areal Locations of Hazardous Atmospheres (EPA) yazılımı kullanılabilir. Bu yazılım ile tehlikeli kimyasal maddenin özelliğine bağlı olarak atmosferik seçimler ve senaryolar üzerinden gerçek zamanlı modeller oluşturulabilmektedir. LPG tankeri için örnek bir uygulama bu çalışmada yürütülmüş tünellerde tehlikeli madde taşımacılığına yönelik faydalı sonuçların elde edildiği gösterilmiştir. Bu yazılım üzerinden ayrıca karayolunda sık taşınan diğer klor, amonyak, CO₂ gibi tehlikeli kimyasalların patlama, yangın ve toksik yayılım etkilerinin belirlenmesi mümkündür.

KAYNAKÇA

- Benekos, I. and Diamantidis, D. (2017). On Risk Assessment and Risk Acceptance of Dangerous Goods Transportation through Road Tunnels in Greece. *Safety Science*, 91, 1-10.
- Bing, Z., Chuan-sheng, W., Fang-liang, L. and Er-jue, W.(2020). Whole Risk Assessment System and Management System of Urban Road Tunnel Operation Stage. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 14,1.
- Bontempi, F. and Gkoumas, K. (2016). Risk Analysis for Severe Traffic Accidents in Road Tunnels. *Int. J. Forensic Engineering*, 3(1/2): 106-126.
- Caliendo, C. and De Guglielmo, M.L (2016). Quantitative Risk Analysis on the Transport of Dangerous Goods Through a Bi-Directional Road Tunnel. *Risk Analysis*, 37(1): 116-129.
- Caliendo, C. and De Guglielmo, M.L. (2017). Simplified Method for Risk Evaluation in Unidirectional Road Tunnels Related to Dangerous Goods Vehicles. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*,8(6): 960-968.
- Chen, S., Xia, Y., Ma, F. and Liao, H. (2020). Research on Assessment of Highway Tunnel Operating Safety. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 741, 012069.
- EC, (2004). Directive on Minimum Safety Requirements for Tunnels in the Trans-European Road Network, *Official Journal of the European Union*, L 167 (30.04.2004).
- EuroStat, Dangerous Goods Transportation Statistics, (2017).
- İnternet: Emergency Response Guidebook, 2016
<https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/docs/ERG2016.pdf> (05.02.2020).
- Kaçan, Ö. (2018). Karayolu Tünellerinde Tehlikeli Madde Taşımacılığı Risk Analizi. *Karayolları Bülteni*, 594: 26-31.
- Kirytopoulos, K., Papadopoulos, G., Rentizelas, A. and Tatsiopoulou, I. (2010). Quantitative Risk Analysis for Road Tunnels Complying with EU Regulation. *Journal of Risk Research*, 13(8): 1027-1041.
- Knoflachner, H., Nussbaumer, H. and Pfaffenbichler, P. C. (2002). Quantitative Risk Assessment of Heavy Goods Vehicle Transport through Tunnels - the Tauern tunnel Case Study. *1st International Conference "Tunnel Safety and Ventilation"*,181-188.
- Li, Y., Xu, D. and Shuai J.(2020). Real-time risk analysis of road tanker containing flammable liquid based on fuzzy Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*, 134, 36-46.
- OECD & PIARC, (2001). Safety in Tunnels: Transport of Dangerous Goods Through Road Tunnels, France.
- PIARC, (2008). Risk Analysis for Road Tunnels, *World Road Association (PIARC)*, France.
- PIARC, (2012). Current Practice for Risk Evaluation for Road Tunnels, *World Road Association (PIARC)*, France.
- Türkmen, A., Özçınar, B., Aydoğdu, G. and Özbiltekin, T.M. (2019). A Framework of Route Selection for Hazardous Goods Transportation in Tunnels. *Proceedings of the International Symposium for Production Research*, 621-635.
- UNECE, (2008). General Guideline for the Calculation of Risks in the Transport of Dangerous Goods by Road.
- United Nations, (2012), ADR "European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road, New York, Geneva.
- Xia Y., Ma, F., Liao H. and Liao Z.(2020). Study on Features of Hazardous Goods Transport Accidents on Highway. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 741, 012071.