
TEHLİKELİ MADDE TAŞIMACILIĞINDA DEMİR YOLU RISK MODELİ ÖNERİSİ

Aslı ÇALIŞ BOYACI¹

Cevriye GENCER²

Öz

Tehlikeli maddeler veya uluslararası kısaltmasıyla HAZMAT, kişisel kayıplara ve maddi hasarlara neden olabilen katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerdir. Patlayıcı, yanıcı, bio tehlikeli, korozif veya radyoaktif içerikli olabilen bu maddeler taşıma, elleçleme ve depolama işlemleri sırasında özel koruma gerektirmektedir. Kimyasal veya fiziksel karakteristikleri nedeni ile canlılara ve çevreye zarar verebilen tehlikeli maddelerin son yıllarda birçok sektörde kullanılıyor olması, tehlikeli madde taşımacılığının önemini arttırmaktadır. Literatürde, tehlikeli madde taşımacılığında risk değerlendirmesi için kullanılan farklı risk tanımlamaları mevcuttur. Bu tanımlamalardan bazıları olay olasılıklarını ya da olayların sonuçlarını dikkate alırken, bazıları ise etki alanı içindeki insanların sayısını dikkate almaktadır. Çalışmada geleneksel risk modeliyle uyumlu, Glickman vd. (2007) tarafından geliştirilen demir yolu risk modeli temel alınarak bazı değişikliklerle Türkiye'ye uyarlanmaktadır. Elde edilen veriler doğrultusunda demir yolu taşımacılığında risk değeri hesaplanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tehlikeli Madde Taşımacılığı, Demir Yolu, Risk Değerlendirmesi

JEL Sınıflandırması: R41, R42, R49

A RISK MODEL PROPOSAL FOR RAIL TRANSPORTATION OF HAZARDOUS MATERIALS

Abstract

Hazardous materials or HAZMAT in international shorthand are solid, liquid or gaseous substances which can cause personal casualty and property damage. These materials, which may be explosive, flammable, biohazardous, corrosive or radioactive, require special protection during transport, handling and storage. The fact that hazardous materials, which are harmful to nature and cause environmental damage due to their chemical or physical characteristics, have been used in many sectors in recent years, increasing the importance of hazardous materials transportation. There are different risk definitions in the literature used for risk assessment of hazardous materials transportation. While some of these definitions take into account incident probabilities or consequences, others consider the number of people within the impact area. Based on the railway risk model developed by Glickman et al. (2007), which is compatible with the traditional risk model, the study is adapted to Turkey by making a few changes. The risk value for railway transportation is calculated in the direction of the obtained data.

Keywords: Hazardous Materials Transportation, Railway, Risk Assessment

JEL Classification: R41, R42, R49

¹ Yrd. Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, asli.calis@omu.edu.tr

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ctemel@gazi.edu.tr

1. Giriş

Tehlikeli maddeler veya uluslararası kısaltmasıyla HAZMAT (Hazardous Materials), kişisel kayıplara ve maddi hasarlara neden olabilen katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerdir. Patlayıcı, yanıcı, bio tehlikeli, korozif veya radyoaktif içerikli olabilen bu maddeler taşıma, elleçleme ve depolama işlemleri sırasında özel koruma gerektirmektedir (Jiang and Ying, 2014: 130). Tehlikeli maddeler sanayinin neredeyse her kolunda ürün döngüsü içinde hammadde, üretime yardımcı madde, ürün veya atık olarak karşımıza çıkmakta olduğundan işletmelerin lojistik süreçlerinde ve tedarik zinciri yapılarında direkt ya da dolaylı olarak yer alabilmekteledir.

Kimyasal veya fiziksel karakteristikleri nedeni ile canlılara ve çevreye zarar verebilen tehlikeli maddelerin son yıllarda birçok sektörde kullanılıyor olması, tehlikeli madde taşımacılığının önemini arttırmaktadır. Tehlikeli madde taşımacılığı kara yolu, demir yolu, deniz yolu, hava yolu ve boru hatları gibi farklı taşıma modları kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Ülkemiz, demir yolu gibi daha düşük maliyetli ve daha az riskli taşıma modları için elverişlidir. Buna rağmen yük taşımacılığının büyük bir kısmı kara yolu ile gerçekleştirilmektedir. Akaryakıt taşımacılığının ele alındığı bu çalışmada geleneksel risk modeliyle uyumlu bir demir yolu risk modeli önerilmekte ve elde edilen veriler doğrultusunda Türkiye için demir yolu taşımacılığındaki risk değeri hesaplanmaktadır.

2. Literatür Özeti

Literatürde tehlikeli madde taşımacılığında risk değerlendirmeleri üzerine gerçekleştirilen birçok çalışma mevcuttur. Erkut (1995), tehlikeli maddelerin rotalanması için geliştirilen koşullu risk modelinin güvenilirliğini araştırmaktadır. Tehlikeli maddelerin rotalanması için önerilen modelin yol değerlendirme ve seçim modelleri için monotonluk aksiyomunu ihlal ettiğini öne sürmektedir. Çalışmada bu ihlalin tehlikeli maddelerin rotalanmasında istenmeyen çözümlerin seçimine yol açtığını gösteren küçük sayısal örneklere yer vermektedir.

Erkut ve Verter (1998)'in çalışmalarında tehlikeli madde taşımacılığı ile ilişkili risklerin ulaştırma planını zorlaştırmakta olduğu vurgulanmaktadır. Çalışmada yaygın olarak kullanılan modellere genel bir bakış sağlanmakta ve "Ulaştırma riskinin nasıl ölçüldüğü önemli midir?" sorusuna cevap aranmaktadır. A.B.D. karayolu şebekesinde gerçekleştirilen analiz sonucunda, farklı risk modellerinin tehlikeli madde sevkiyatı için verilen bir kaynak-hedef çiftinde genellikle farklı optimal yolları seçtiği öne sürülmektedir. Ayrıca bir model için seçilen optimal yolun başka bir model için çok kötü performans gösterebileceğine değinilmektedir. Literatürdeki alternatif risk modelleri karşılaştırılarak, tehlikeli madde rota seçimi için iki kriterli bir yaklaşım önerilmektedir.

Bonvicini vd. (1998)'ne ait çalışmada bireysel ve sosyal risk tahminlerini etkileyen belirsizliklerin değerlendirilmesi amacıyla karayolu ve boru hattı ile tehlikeli madde taşımacılığında risk değerlendirme için bir bulanık mantık yaklaşımı sunulmaktadır. Çalışmada öncelikle risk ölçüm hesaplamalarını gerçekleştiren matematiksel yöntemlerin temelleri tanımlanmakta, ardından bulanık mantık ve bulanık aritmetik ile ilgili bazı temel kavramlar sunulmaktadır. Son olarak, her bir belirsiz girdinin çıktısı belirsizliği üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğunu göstermek amacıyla toksik gaz salınımına ilişkin risk değerlendirmede belirsizlik ve duyarlılık analizi test sonuçları sunulmakta ve tartışılmaktadır.

Leonelli vd. (2000)'ne ait çalışmada tehlikeli madde taşımacılığında en iyi rotanın seçimi için risk analizi tabanlı yeni bir metodoloji öne sürülmektedir. Ulaştırma giderleri ve riske bağlı maliyetlerin dikkate alınması için ok maliyetleri tanımlanmaktadır. Bu doğrultuda optimizasyon problemi bir minimum maliyetli akış problemi olarak formüle edilebilmektedir.

Fabiano vd. (2002)'ne ait çalışmada yerleşim yerine yönelik özgün bir çerçeve geliştirilerek karayolu ile tehlikeli madde taşımacılığında ve karayolu rotalarının seçimi için geliştirilen stratejilerden kaynaklanan risk incelenmektedir. Rota özelliklerine ve nüfusa etkiye duyarlı bir risk değerlendirme önerilmekte, böylece risk analizinde tüm belirsizlikler azaltılabilmektedir.

Erkut ve Alp (2007)'in çalışmalarında şebeke üzerindeki tehlikeli madde akışlarından kaynaklanan toplam ulaştırma riskinin minimize edilmesi amacı ile bir tamsayı programlama problemi olarak ağaç tasarım problemi formüle edilmiştir. Ağaç tasarım probleminin çözümünü genişletmek için yol dilimleri eklenerek bir sezgisel geliştirilmiştir. Bu tarz eklemeler ile taşıyıcılara rotalama seçenekleri sunulurken genellikle risk artırılmakta ve maliyet düşürülmektedir. İtalya'nın Ravenna şehrindeki karayolu şebekesi üzerinde tam sayılı programlama modelinin ve yol eklemeli sezgiselin çözümleri gösterilmektedir.

Carotenuto vd. (2007)'ne ait çalışma verilerin bir bölgede tehlikeli maddelerin kaynak ve hedef noktaları arasında karayolu ile taşınmasında minimum riskli yolların sağlanması ile ilgilidir. Nüfus üzerindeki riskin bölgeler arasında eşit bir şekilde yayıldığı ve tehlikeli madde sevkiyatının toplam riskini minimize eden yolların seçimi amaçlanmaktadır. Problem, matematiksel olarak formüle edilmiştir ve çözümü için iki sezgisel algoritma önerilmektedir. Ayrıca verilen matematiksel formülasyonun Lagrange gevşetmesine dayalı bir alt sınırı önerilmektedir.

Brown ve Dunn (2007)'a ait çalışmada tehlikeli madde taşımacılığı için bir kantitatif risk değerlendirme yaklaşımı tanımlanmaktadır. Bu yaklaşım tehlikeli madde salınımı için fiziksel modelleri ve geçmiş olaylara ait büyük miktarda istatistiksel veriyi kullanmaktadır. Çalışmada toksik maddelerin salınımı ile sonuçlanabilecek bir kaza durumunda halkın korunması gereken mesafeleri değerlendiren acil müdahale planlamasına odaklanılmaktadır.

Glickman vd. (2007)'ne ait çalışmada tehlikeli maddelerin demiryolu ile taşınmasında riskleri dikkate alan bir alternatif rotalama stratejisi ele alınmaktadır. Demiryolu ulaştırma riskinin ölçülmesi amacıyla bir model önerilmektedir. Ardından maliyet ve riskin ağırlıklı kombinasyonu kullanılmakta ve alternatif rotalar üretilmektedir. Genellikle demiryolu taşımacılığında yeniden rotalama alternatifleri karayolu taşımacılığına göre daha az olduğundan, bir trenin raydan çıkmasının olası sonuçları dikkate alındığında demiryolu rotaları seçilirken riskin hesaba katılabileceği ve maliyet-risk mübadelesinin değerlendirilebileceği ifade edilmektedir.

Verma ve Verter (2007)'in çalışmalarında demiryolu ulaştırma riskinin değerlendirilmesinde trenlerin ayırt edici niteliklerini, özellikle de yük hacmini ve türünü içeren analitik bir çerçeve sunulmaktadır. Çevreye kaza sonucu serbest bırakılan toksinlere odaklanılmaktadır. Her vagon tehlikeli madde salınımı için potansiyel bir kaynak olarak düşünülmekte ve bu nedenle risk değerlendirme modelinde trenler çoklu salınım kaynağı olarak temsil edilmektedir. Tehlikeli yüklerin tren içinde konumlandırılması ile ilgili etkili bir risk tahmin yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen yaklaşım Kanada'daki bir örnek olay üzerinde uygulanmaktadır. Ultramar petrol rafinerisinden Montreal'deki bir terminale her gün "ultra-tren" adı verilen trenlerle taşınan benzin, motorin, jet yakıtı gibi petrol ürünleriyle ilişkili nüfusa etki değerlendirilmektedir.

Erkut ve Gzara (2008)'nin çalışmalarında hükümetin bir şebeke belirlediği ve nakliyecilerin şebeke üzerinde rota seçtiği tehlikeli madde taşımacılığı için şebeke tasarım problemi ele alınmaktadır. Problem iki seviyeli bir şebeke akış formülasyonu olarak modellenmekte ve iki seviyeli tasarım problemi diğer üç karar senaryosu ile karşılaştırılarak analiz edilmektedir. İki seviyeli modelin çözüm zorluğu nedeniyle daima kararlı bir çözüm bulan sezgisel çözüm yöntemi önerilmektedir. Sezgisel yöntem, iki seviyeli tam sayılı programlama modelinin zorluğunun ve kararsızlığının üstesinden gelmek için şebeke akış yapısını her seviyede kullanmaktadır. Gerçek veriler üzerinde gerçekleştirilen testler iki seviyeli modeli doğrusallaştırmanın kararlı çözümler bulmakta başarısız olduğunu, sezgiselin ise kısa sürede düşük riskli şebekeleri bulduğunu; rassal örnekler üzerindeki testler ise sezgisel olarak tasarlanan şebekelerin tek seviyeli modeller üzerinde riski önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ulaşılan risk, mümkün olan en düşük risk değerine çok yakındır. Ancak riskteki bu azalma, maliyette önemli bir artışa yol açmaktadır. İki seviyeli model, maliyet-risk mübadelesini açıklamak için birinci seviyeli amaca maliyet ilave edilerek genişletilmektedir. Zengin bir karar destek aracı olan iki amaçlı-iki seviyeli bu model ile tasarım problemleri için iyi çözümler üretilmesi sağlanmaktadır.

Dadkar vd. (2008)'nin çalışmalarında tehlikeli madde taşımacılığında bir güvenlik önlemi olarak genellikle aynı performansa sahip rotalar arasında değişiklik yapılmasıyla aynı nüfusun riske maruz kalmasının önlenmekte olduğu vurgulanmaktadır. Bu amaçla K en kısa yol algoritması geliştirilmektedir. Ayrıca yolların alt kümesinin belirlenmesi için coğrafi çeşitlilik ve performans arasındaki mübadeleyi temsil eden bir karma tamsayı programı tasarlanmaktadır. Geliştirilen modeller bir örnek olaya uygulanmaktadır.

Milazzo vd. (2010)'nin çalışmalarında Sicilya'da tehlikeli maddelerin karayolu taşımacılığı riskinin bir kantitatif analizi gerçekleştirilmektedir. Tehlikeli madde taşımacılığı ile ilişkili, tesadüfi ve çevresel risk değerlendirme için bir yazılım olan ve bir coğrafi bilgi sistemi ile desteklenen TRAT-GIS kodu uygulanarak risk hesaplanmaktadır. Sonuçlar bir veri tabanında toplanarak coğrafi bilgi sistemi yardımıyla risk haritalarında gösterilmektedir. Bölgesel bir ölçekte gerçekleştirilen risk analizinin ardından bazı kritik noktalar detaylıca analiz edilmektedir.

Verma (2011), tren kazalarının karakteristiklerini ve trenlerin ayırt edici özelliklerini dikkate alan bir risk değerlendirme metodolojisi geliştirerek tehlikeli maddelerin demiryolu taşımacılığındaki riskini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Önerilen yaklaşım tren uzunluğunu, tehlikeli madde taşıyan vagonun trendeki pozisyonunu, tehlikeli madde salınımına yol açan olayların sırasını ve kopan vagonlardan kaynaklanan sonucu birleştirmektedir. Değerlendirme metodolojisi Bayes Teoremini ve Mantıksal Diyagramları içermektedir.

Bagheri vd. (2011)'ne ait çalışmada tehlikeli maddelerin demiryolu ile taşınması sırasında oluşabilecek derayman riskini azaltmak için vagon yerleştirmenin etkili bir yol olabileceği öne sürülmektedir. Tehlikeli madde sevkiyatı ve farklı rota özellikleri için vagon yerleştirme ve derayman arasındaki ilişki incelenmektedir. Çalışmada, devrilen vagonların sayısı ve konumuna bağlı olarak raydan çıkma olasılığını tahmin etmek için bir model sunulmaktadır. Trenin yol boyunca raydan çıkma riskini dikkate alan bir tehlikeli madde yerleştirme modeli gösterilmektedir.

Saat vd. (2014)'ne ait çalışmada Kuzey Amerika'da demir yolu ile yaygın olarak taşınan bir grup kimyasalın bir kantitatif çevresel risk analizi tanımlanmaktadır. Tehlikeli Madde Taşımacılığı Çevresel Sonuç Modeli, Kuzey Amerika demiryolu şebekesi boyunca farklı dökülme senaryolarına maruz kalınmasına ilişkin olasılık tahminlerini geliştirmek amacıyla çevresel özelliklerin analizinin gerçekleştirildiği bir coğrafi bilgi sistemi (CBS) ile birlikte kullanılmaktadır. Risk analizi, her bir ürünün ülke çapında yıllık ulaştırma riskinin tahmin edilmesi için temizleme maliyeti, toprak tipi ve derinliğine ilişkin olasılık dağılımları, yıllık trafik hacmi, demir yolu aracı kaza oranı ve vagon güvenlik özelliklerini birleştirmektedir. Kimyasallar arasında karşılaştırma sağlanması ve bu ürünlerin sevkiyatı ile ilişkili risk maliyeti hakkında bilgi verilmesi amacıyla araç mil (araba-km) başına ve ton-mil (ton-km) başına düşen yıllık risk de hesaplanmaktadır. Analiz ve metodoloji, tehlikeli madde taşımacılığında çevresel riskin daha etkin yönetimi için bir kantitatif yaklaşım sağlamaktadır.

Torretta vd. (2017)'nin çalışmalarında ürünlerin daima ihtiyaç alanlarına taşınması gerektiğinden, tehlikeli madde taşımacılığında kaynaklanan tehlikelerden kaçınılamayacağı vurgulanarak; tehlikeli maddelerin taşınması ile ilişkili riskin sadece taşınan maddeye değil aynı zamanda yol tipi, hava şartları, sürücülerin becerileri ve seçilen rotalardaki nüfus yoğunluğu gibi karayolu şebekesinin özelliklerine de bağlı olduğu öne sürülmektedir. Bu tür bir faaliyete ilişkin riskin özellikle çevre ve halk sağlığı üzerinde olumsuz etkilerle sonuçlanan bir kaza olasılığına bağlı olduğu ifade edilmektedir. Çalışmada son yıllarda karar vericilere en iyi çözümleri bulmalarında yardımcı olan sistemler geliştirildiğine değinilerek karar destek sistemlerini kullanan yazılımlar incelenmektedir.

3. Risk Modelleri

Risk tanımlaması için bazı araştırmacıların olasılık ve sonuç ifadelerinden sadece birini kullanmasına rağmen, Covello ve Merkhofer (1998), bu iki ifadeyi birlikte kullanarak riski, istenmeyen bir olayın ortaya çıkma olasılığı ile bu olayın sonucunun bir ürünü olarak

tanımlamaktadır (Covello ve Merkhoher, 1993:2-7). “Beklenen Sonuç” olarak da tanımlanan bu kavram Erkut ve Verter (1998) tarafından “Geleneksel Risk” ya da “Teknik Risk” olarak ifade edilmektedir (Erkut ve Verter, 1998: 626).

Genel anlamda tehlikeli madde taşımacılığında da risk tanımı iki bileşenle ortaya konmaktadır. Bunlar, istenmeyen bir olayın meydana gelme olasılığı ve bu olumsuz olayın sonuçlarıdır (Alp, 1995). A yolu üzerinde taşınan B tehlikeli maddesi için geleneksel risk tanımı (R_{AB}), kaza yapma olasılığı (p_{AB}) ile kazanın ortaya çıkardığı sonucun (C_{AB}) çarpımı olarak ifade edilmekte ve aşağıdaki formülle gösterilmektedir (Erkut ve Verter, 1998: 626):

$$R_{AB} = p_{AB} C_{AB} \quad (1)$$

Çoğu tehlikeli madde için Erkut ve Verter kaza ihtimallerini milyon milde 0,1 ile 0,8 arası olarak ifade etmektedir. Çalışmada yol güzergâhındaki nüfus yoğunluğuna bağlı olan kaza sonucu ise etki alanı kullanılarak hesaplanmaktadır. Bir daire olarak ifade edilen bu etki alanının yarıçapının ise tehlikeli madde türüne göre 0 ile 7 mil arasında değiştiği varsayılmaktadır (Erkut ve Verter, 1998: 626).

Literatürde tehlikeli madde taşımacılığında risk değerlendirmesi için kullanılan farklı risk tanımlamaları mevcuttur. Bunlardan yaygın olarak kullanılanları Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Risk Modelleri

| Yaklaşım | Model | Kaynaklar |
|-----------------|---|--|
| Geleneksel Risk | $TR(R) = \sum_{i \in R} p_i C_i$ | Alp 1995, Erkut ve Verter 1998 |
| Nüfusa Etki | $PE(R) = \sum_{i \in R} T_i$ | Re Velle vd. 1991, Batta ve Chiu 1988 |
| Olay olasılığı | $IP(R) = \sum_{i \in R} p_i$ | Saccomanno vd. 1985, Abkowitz vd. 1992 |
| Algılanan Risk | $PR(R) = \sum_{i \in R} p_i (C_i)^q$ | Abkowitz vd. 1992 |
| Koşullu Risk | $CR(R) = \sum_{i \in R} p_i C_i / \sum_{i \in R} p_i$ | Sivakumar vd. 1993a, 1993b, 1995 |

Literatürde yaygın olarak kullanılan risk tanımlamalarından bir diğeri olan Nüfusa Etki, tehlikeli madde taşımacılığının yapıldığı güzergâh üzerindeki tehlike alanında yaşayan ve olası bir kaza riskine maruz kalan insanların toplam sayısını ifade eden bir risk modelidir (ReVelle vd., 1991).

Olay Olasılığı risk tanımlamasında, tehlike alanları içindeki nüfus yoğunluklarının eşit olduğu varsayılmakta ve olay olasılığı risk ölçütü olarak tek başına kullanılmaktadır. Saccomanno ve Chan tarafından geliştirilen bu model geleneksel riskin sadeleştirilmiş hali olarak da ifade edilmekte ve tehlike alanının çok küçük olduğu durumlarda kullanılmasının uygun olduğu öngörülmektedir (Saccomanno ve Chan, 1985).

Abkowitz ve diğerleri tarafından önerilen Algılanan Risk modelinde, tehlikeli madde taşımacılığında doğabilecek sonuçların gücünü temsil eden bir q risk tercihi parametresi kullanılarak bir birim yol segmenti için risk tanımlaması yapılmaktadır. $q = 1$ olduğu durumda model geleneksel risk (teknik risk) modeline dönüşmektedir (Abkowitz ve Cheng, 1992).

Beklenen sonuç tanımlaması, seçilen yol üzerindeki kazaların sayısını dikkate almayarak bu yolun çoğu kez rotaya dâhil edilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak tehlikeli madde taşımacılığı sırasında büyük bir felaketin meydana gelmesi durumunda ileriki sevkiyatlar için ilgili yolun yeniden

değerlendirmeye alınarak gerektiğinde rotadan çıkarılması gerekebilir (Erkut ve Verter, 1998). Sivakumar vd. (1993a, 1993b, 1995) bu tarz problemler için Koşullu Risk'i önermektedir.

3.1. Demir Yolu Taşımacılığı Risk Modeli

Tehlikeli maddelerin demir yolu ulaştırma riskine ilişkin çalışmalar incelendiğinde, Bubbico ve diğerlerinin tehlikeli maddelerin taşınması sırasında oluşan kaza sonucunda belirli bir lokasyondaki ölüm olasılığı olarak tanımladıkları bireysel risk modelini (Bubbico vd., 2000: 27); Verma ve Verter'in nüfusa etkiyi temel aldıkları yeni bir risk modelini (Verma ve Verter, 2007: 1287); Glickman ve diğerlerinin ise *geleneksel risk* tanımlamasıyla uyumlu bir risk modelini önerdikleri görülmektedir (Glickman vd., 2007: 1015).

Çalışmada, geleneksel risk modeliyle örtüşen Glickman ve diğerleri tarafından geliştirilen risk modeli temel alınarak küçük değişikliklerle Türkiye'ye uyarlanmıştır. Bu kapsamda, (i, j) oku boyunca her tren için beklenen risk:

$$R_{ij}^r = f_{ij} \times N_{ij} \quad (2)$$

$f_{ij} = (i, j)$ oku üzerindeki trenlerin beklenen yüzdesi (tehlikeli maddelerin büyük bir salınımı ile sonuçlanan bir kazaya karışan trenler için)

N_{ij} = Tehlikeli maddelerin büyük bir salınımı ile sonuçlanan bir kazanın beklenen sonucu

Trenlerin beklenen yüzdesi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$f_{ij} = D_{ij}^r \times \gamma^r \times Y \times P(X_R > 0) \quad (3)$$

D_{ij}^r = Demiryolu şebekesindeki (i, j) okunun uzunluğu

γ^r = Demiryolundaki kaza oranı,

Y = Tren başına yüklenen vagonların toplam sayısı

$P(X_R > 0)$ = Hasar gören ya da raydan çıkan tehlikeli madde vagonlarından büyük bir salınım yapılma olasılığı.

Tren kazaları derayman (raydan çıkma), başka bir trene arkadan çarpma ya da başka bir trenle kafa kafaya çarpışma gibi sebeplerden meydana gelebilmektedir. Çalışmada bu tür kazalar vagonların hasar görmesi veya raydan çıkması şeklinde iki kategoride toplanmaktadır. Hasar gören ya da raydan çıkan her vagonun tehlikeli madde salınımı gerçekleşmeyebilir. X , tehlikeli madde taşıyan vagonların sayısını göstermek üzere; tehlikeli madde taşıyan ve kaza sırasında hasar gören ya da raydan çıkan vagonların sayısı, büyük bir salınım yapma ve yapmama durumlarına göre X_R ve X_D değişkenleri ile temsil edilmektedir. Buna göre hasar gören ya da raydan çıkan tehlikeli madde vagonlarından büyük bir salınım yapılma olasılığı $P(X_R)$ aşağıdaki gibi formüle edilmektedir:

$$P(X_R) = \sum_{X_D} P(X_D, X_R) = \sum_{X_D} P(X_D) \times P(X_R \setminus X_D) \quad (4)$$

X_D = Kaza sırasında hasar gören ya da raydan çıkan tehlikeli madde yüklü vagonların sayısı,

X_R = Hasar gören ya da raydan çıkan tehlikeli madde vagonlarından büyük bir salınım yapanların sayısı.

Kazanın beklenen sonucu ise aşağıdaki formülle elde edilmektedir:

$$N_{ij} = \rho \times \pi r^2 \times E(X_R) \quad (5)$$

$$N_{ij} = \rho \times \pi r^2 \times \sum_{X_R} X_R P(X_R) = \rho \times \pi r^2 \times \sum_{X_R} X_R \sum_{X_D} P(X_D) \times P(X_R \setminus X_D) \quad (6)$$

πr^2 = Etki Alanı,

ρ = Nüfus yoğunluğu,

$E(X_R)$ = Tehlikeli madde salınımı yapan vagonların beklenen değeri.

4. Bulgular

Yukarıda belirtildiği gibi tehlikeli maddeler için demir yolu taşımacılığı riski;

$$R_{ij}^r = D_{ij}^r \times \gamma^r \times Y \times P(X_R > 0) \times N_{ij} \quad (7)$$

olarak formüle edilmiştir.

Burada;

$$\gamma^r = \frac{\text{Tren kazalarının toplam sayısı}}{\text{Toplam gönderi sayısı} \times \text{Mesafe (km)}} \quad (8)$$

Toplam gönderi sayısı ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\text{Toplam gönderi sayısı} = \frac{\text{Taşınan toplam yük miktarı}}{\text{Trenin ortalama kapasitesi}} \quad (9)$$

TCDD'den elde edilen verilen doğrultusunda demir yolu risk değeri (R_{ij}^r) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$R_{ij}^r = f_{ij} \times N_{ij} = D_{ij}^r \times 5,02 \times 10^{-5} \quad (10)$$

5. Sonuç

Tehlikeli maddelerin son yıllarda birçok sektörde kullanılıyor olması, tehlikeli madde taşımacılığının önemini arttırmaktadır. Ülkemizin demir yolu gibi daha az riskli taşıma modları için elverişli olmasına rağmen, yük taşımacılığının büyük bir kısmı kara yolu ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada geleneksel risk modeliyle uyumlu, Glickman vd. (2007) tarafından geliştirilen demir yolu risk modeli temel alınarak bazı değişikliklerle Türkiye'ye uyarlanmıştır. TCDD'den elde edilen veriler doğrultusunda demir yolu taşımacılığındaki risk değeri hesaplanmıştır. Şehirlerarası demir yolu mesafeleri (D_{ij}^r) kullanılarak, tehlikeli madde sevkiyatının yapılacağı kaynak ve hedef düğümler arası risk hesaplamalarının gerçekleştirilmesi mümkündür.

Kaynakça

- Abkowitz, M., Lepofsky, M., ve Cheng, P. (1992). Selecting Criteria for Designating Hazardous Materials Highway Routes. *Transportation Research Record*, 1333(2. 2).
- Alp, E. (1995). Risk-Based Transportation Planning Practice: Overall Methodology and A Case Example. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 33(1), 4-19.

- Bagheri, M., Saccomanno, F., Chenouri, S., ve Fu, L. (2011). Reducing The Threat of Transit Derailments Involving Dangerous Goods Through Effective Placement Along The Train Consist. *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 613-620.
- Bonvicini, S., Leonelli, P., ve Spadoni, G. (1998). Risk Analysis of Hazardous Materials Transportation: Evaluating Uncertainty by Means of Fuzzy Logic. *Journal of Hazardous Materials*, 62(1), 59-74.
- Brown, D. F. And Dunn, W. E. (2007). Application of A Quantitative Risk Assessment Method to Emergency Response Planning. *Computers & Operations Research*, 34(5), 1243-1265.
- Bubbico, R., Ferrari, C., ve Mazarotta, B. (2000). Risk Analysis of LPG Transport by Road and Rail. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, 13(1), 27-31.
- Carotenuto, P., Giordani, S., ve Ricciardelli, S. (2007). Finding Minimum and Equitable Risk Routes for Hazmat Shipments. *Computers & Operations Research*, 34(5), 1304-1327.
- Covello, V. T., Merkhoher, M. W. (1993). Risk Assessment Methods: Approaches for Assessing Health and Environmental Risks. (First Edition). New York: Springer Science & Business Media, 2-7.
- Dadkar, Y., Jones, D., ve Nozick, L. (2008). Identifying Geographically Diverse Routes for The Transportation of Hazardous Materials. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 333-349.
- Erkut, E. (1995). On The Credibility of The Conditional Risk Model for Routing Hazardous Materials. *Operations Research Letters*, 18(1), 49-52.
- Erkut, E., Alp, O. (2007). Designing A Road Network for Hazardous Materials Shipments. *Computers & Operations Research*, 34(5), 1389-1405.
- Erkut, E., Gzara, F. (2008). Solving The Hazmat Transport Network Design Problem. *Computers & Operations Research*, 35(7), 2234-2247.
- Erkut, E., Verter, V. (1998). Modeling of Transport Risk for Hazardous Materials. *Operations Research*, 46(5), 625-642.
- Fabiano, B., Curro, F., Palazzi, E., ve Pastorino, R. (2002). A Framework for Risk Assessment and Decision-Making Strategies in Dangerous Good Transportation. *Journal of Hazardous Materials*, 93(1), 1-15.
- Glickman, T. S., Erkut, E., ve Zschocke, M. S. (2007). The Cost and Risk Impacts of Rerouting Railroad Shipments of Hazardous Materials. *Accident Analysis & Prevention*, 39(5), 1015-1025.
- Jiang, M. W., Ying, M. (2014). Study on Route Selection for Hazardous Chemicals Transportation. *Procedia Engineering*, 71, 130-138.
- Leonelli, P., Bonvicini, S., ve Spadoni, G. (2000). Hazardous Materials Transportation: A Risk-Analysis-Based Routing Methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 71(1), 283-300.
- Milazzo, M. F., Lisi, R., Maschio, G., Antonioni, G., ve Spadoni, G. (2010). A Study of Land Transport Of Dangerous Substances in Eastern Sicily. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, 23(3), 393-403.
- Revelle, C., Cohon, J., ve Shobry, D. (1991). Simultaneous Siting and Routing in The Disposal Of Hazardous Wastes. *Transportation Science*, 25(2), 138-145.
- Saat, M. R., Werth, C. J., Schaeffer, D., Yoon, H., ve Barkan, C. P. (2014). Environmental Risk Analysis of Hazardous Material Rail Transportation. *Journal of Hazardous Materials*, 264, 560-569.

- Saccomanno, F. F., Chan, A. W. (1985). Economic Evaluation of Routing Strategies for Hazardous Road Shipments, *Transportation Research Board*, 12-18.
- Sivakumar, R.A., Batta, R., ve Karwan, M. (1993a). Establishing Credible Risk Criteria for Transporting Extremely Dangerous Hazardous Materials. *Transportation of Dangerous Goods: Assessing The Risks*, 335-342.
- Sivakumar, R. A., Batta, R., ve Karwan, M. H. (1993b). A Network-Based Model for Transporting Extremely Hazardous Materials. *Operations Research Letters*, 13(2), 85-93.
- Sivakumar, R. A., Batta, R., ve Karwan, M. H. (1995). A Multiple Route Conditional Risk Model for Transporting Hazardous Materials. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 33(1), 20-33.
- Torretta, V., Rada, E. C., Schiavon, M., ve Viotti, P. (2017). Decision Support Systems for Assessing Risks Involved in Transporting Hazardous Materials: A Review. *Safety Science*, 92, 1-9.
- Verma, M. (2011). Railroad Transportation of Dangerous Goods: A Conditional Exposure Approach to Minimize Transport Risk. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 790-802.
- Verma, M. ve Verter, V. (2007). Railroad Transportation of Dangerous Goods: Population Exposure To Airborne Toxins. *Computers & Operations Research*, 34(5), 1287-1303.

A RISK MODEL PROPOSAL FOR RAIL TRANSPORTATION OF HAZARDOUS MATERIALS

Extended Abstract

Aim: The transportation of hazardous materials is an important problem in industrialized societies, due to the pervasiveness of these materials. Hazardous materials, or dangerous goods, include explosives, gases, flammable liquids and solids, oxidizing substances, poisonous and infectious substances, radioactive materials, corrosive substances, and hazardous wastes. For most members of industrial societies, life without hazmats is inconceivable. Unfortunately, most hazmats are not used at their point of production, and they are transported over considerable distances. (Erkut and Verter, 1998: 625). There are different risk definitions used in the literature for risk assessment of hazardous materials transportation. In this study, we propose a model for the risks that may arise during the transportation of hazardous materials by railway in our country.

Method: In general terms, the definition of risk in the transportation of hazardous materials is made up of two components. These are the likely consequences of an undesirable event and the consequences of this adverse event (Alp, 1995). Using the traditional risk definition, the risk of transporting hazmat B over a unit road segment A can be written as (Erkut and Verter, 1998: 626):

$$R_{AB} = p_{AB} C_{AB} \quad (1)$$

where

p_{AB} :probability of an incident on the unit road segment A for hazmat B,

C_{AB} :population along the unit road segment A within the neighborhood associated with hazmat B.

Although some authors define risk as only probability or consequence, it is more common to define risk as the product of both the probability of and the consequence of the undesirable event. This is an "expected consequence" definition (Covello and Merkhoher, 1993:2-7).

The population exposure, which is another of the widely used risk definitions in the literature, is a risk model that represents the total number of people living in the impact area on the route of hazardous materials transportation and at risk of a possible accident. It may be particularly relevant if the hazmat being carried imposes an exposure risk, rather than an incident risk, on the population near the route (ReVelle et al., 1991).

The incident probability, risk definition assumes that the population densities within the impact areas are equal and the incident probability is used alone as a risk measure. This model, which was developed by Saccomanno and Chan (1985), is also expressed as a simplified version of traditional risk.

In the perceived risk model proposed by Abkowitz et al. (1992), risk identification is made for a unit road segment using a risk preference parameter that represents the power of the consequences of hazardous materials transportation. In the case of $q = 1$, the model becomes a traditional risk (technical risk) model.

In the event of a major catastrophe during the transportation of hazardous materials, it may be necessary to reevaluate the relevant route for further shipment and remove it from the route if necessary (Erkut and Verter, 1998). Sivakumar et al. (1993a, 1993b, 1995) suggests Conditional Risk for such problems.

Findings: In the literature, there is a number of studies associated with risk assessment for road transportation of hazardous materials. However, there are just a few studies that focus on risk

assessment for rail transportation. When studies on railway transportation risk in hazardous materials are examined, Bubicco et al. (2000) defined the individual risk model, which they defined as the probability of death in a particular locus as the result of an accident resulting from the transportation of hazardous materials, a new risk model based on Verma and Verter (2007), which is based on the population, Glickman et al. (2007) suggest a risk model consistent with traditional risk identification.

Conclusion: Based on the railway risk model developed by Glickman et al. (2007), which is compatible with the traditional risk model, the study is adapted to Turkey by making a few changes. The risk value for railway transportation in the direction of data obtained from TCDD is calculated as follows:

$$R_{ij}^r = f_{ij} \times N_{ij} = D_{ij}^r \times 5,02 \times 10^{-5} \quad (2)$$

