



A bi-objective multi-commodity model for multimodal transportation of hazardous materials: A case study of Turkey

Aslı Çalış Boyacı^{1*}, Cevriye Gencer²

¹Department of Industrial Engineering, Ondokuz Mayıs University, Samsun, 55139, Turkey

²Department of Industrial Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- Hazardous materials transportation
- Multimodal transportation
- Bi-objective optimization

Keywords:

- Hazardous materials
- Multimodal transportation
- Preemptive goal programming

Article Info:

Research Article
Received: 18.01.2019
Accepted: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.514832

Acknowledgement:

This manuscript is based upon work supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK).

Correspondence:

Author: Aslı Çalış Boyacı
e-mail: asli.calis@omu.edu.tr
phone: +90 362 312 1919

Graphical/Tabular Abstract

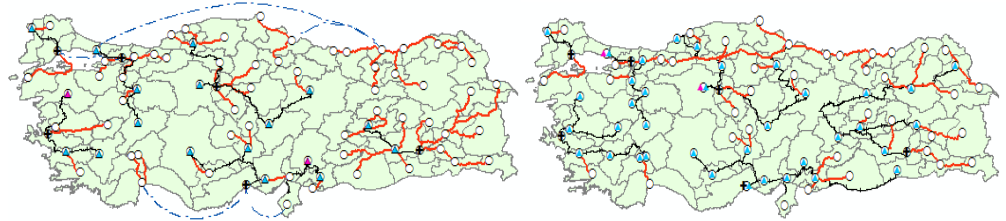


Figure A. Distribution network for cost/risk priority goal programming models

Purpose:

The fact that hazardous materials, which can cause damage to the living creatures and the environment due to their chemical or physical characteristics, have been used in many sectors in recent years so the importance of transportation of hazardous materials is on the rise. Despite the fact that railway and maritime transportation are superior in terms of risk and cost, highway is widely used for transportation of hazardous materials in our country. This study, which focuses on the transportation of fuel constitutes a significant part of the transportation of hazardous materials, a bi-objective multi-modal multi-commodity model consisting of a combination of highway, railway, and seaway has been proposed. The problem has been formulated as a mixed integer programming model.

Theory and Methods:

For the real case study of Turkey cost and risk priority goal programming models have been proposed. The necessary data were collected from organizations within Republic of Turkey Ministry of Transport, Maritime Affairs and Communications, fuel distribution companies and logistics companies for application of the proposed models in Turkey.

Results:

The results were obtained by using GAMS 23.5 modeling language and solved using the CPLEX 12.2.0.0 solver and Turkey's fuel distribution networks were drawn by using ArcGIS software. When the real case-study of hazmat transportation was analyzed, it was observed that if the fuel transportation activities were carried out using more than one mode of transportation, there were significant reductions in both cost and risk. According to the results obtained, İzmit refinery had the highest supplier fill rate for the products and Batman refinery had the lowest rate.

Conclusion:

In Turkey, due to the accidents that occurred in maritime transportation in recent years, the risk value of railway transportation was calculated to be lower than the risk value of maritime transportation. This situation allowed the railway to be preferred instead of the seaway when the risk was prioritized, and in the case of mode changes and short distances, the highway was preferred. However, in terms of cost, maritime transportation was more advantageous than railway and highway transportation and it was preferred for cost-priority model.



Tehlikeli maddelerin çok modlu taşımacılığı için çok ürünlü iki amaçlı bir model önerisi: Türkiye örneği

Aslı Çalış Boyacı^{1*}, Cevriye Gencer²

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Tehlikeli madde taşımacılığı
- Çok modlu taşımacılık
- İki amaçlı optimizasyon

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 18.01.2019
Kabul: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.514832

Anahtar Kelimeler:

Tehlikeli maddeler,
çok modlu taşımacılık,
öncelikli hedef programlama

ÖZET

Kimyasal veya fiziksel karakteristikleri nedeni ile canlılara ve çevreye zarar verebilen tehlikeli maddelerin son yıllarda birçok sektörde kullanılıyor olması, tehlikeli madde taşımacılığının önemini artırmaktadır. Demiryolu ve denizyolu taşımacılığı risk ve maliyet açısından üstünlükler arz ediyor olmasına rağmen, ülkemizde tehlikeli madde taşımacılığı için yaygın olarak karayolu kullanılmaktadır. Tehlikeli madde taşımacılığının önemli bir bölümünü oluşturan akaryakıt taşımacılığının ele alındığı bu çalışmada, arz ve talep noktaları arasındaki toplam ulaştırma maliyeti ve toplam ulaştırma riskinin minimizasyonunu hedefleyen; karayolu, demiryolu ve denizyolunun kombinasyonundan oluşan çok modlu çok ürünlü iki amaçlı bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin Türkiye uygulaması için T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı bünyesindeki kuruluşlar, akaryakıt dağıtım şirketleri ve lojistik firmalarından gerekli veriler toplanarak, öncelikle GAMS/CPLEX optimizasyon programı ile mevcut durumda yaygın olarak kullanılan tek modlu taşımacılık modeli ve önerilen çok modlu taşımacılık modeli için minimum maliyet ve minimum risk değerleri, ardından maliyet öncelikli ve risk öncelikli hedef programlama modellerine ilişkin değerler elde edilmiş ve ArcGIS yazılımı kullanılarak Türkiye'nin akaryakıt dağıtım ağları oluşturulmuştur.

A bi-objective multi-commodity model for multimodal transportation of hazardous materials: A case study of Turkey

H I G H L I G H T S

- Hazardous materials transportation
- Multimodal transportation
- Bi-objective optimization

Article Info

Research Article
Received: 18.01.2019
Accepted: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.514832

Keywords:

Hazardous materials,
multimodal transportation,
preemptive goal
programming

ABSTRACT

The fact that hazardous materials, which can cause damage to the living creatures and the environment due to their chemical or physical characteristics, have been used in many sectors in recent years so the importance of transportation of hazardous materials is on the rise. Despite the fact that railway and maritime transportation are superior in terms of risk and cost, the highway is widely used for the transportation of hazardous materials in our country. This study, which focuses on the transportation of fuel constitutes a significant part of the transportation of hazardous materials, a bi-objective multi-modal multi-commodity model consisting of a combination of highway, railway and seaway is proposed. The model aims at minimizing the total transportation cost and total transportation risk between supply and demand points. First, the minimum cost and minimum risk values for the unimodal transportation model, which is currently widely used, and for the proposed multimodal transportation model are obtained and then the values related to preemptive goal programming models for cost priority and risk priority are obtained using GAMS/CPLEX optimization software by collecting the necessary data from organizations within Republic of Turkey Ministry of Transport, Maritime Affairs and Communications, fuel distribution companies and logistics companies for application of the proposed models in Turkey. Finally, Turkey's fuel distribution networks are drawn by using ArcGIS software.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: asli.calis@omu.edu.tr, ctemel@gazi.edu.tr / Tel: +90 362 312 1919

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tehlikeli madde veya uluslararası kısaltmasıyla HAZMAT (Hazardous Material), 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 [1].

Tehlikeli maddeler sanayinin neredeyse her kolunda ürün döngüsü içinde hammadde, yardımcı madde, ürün veya atık olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, işletmelerin lojistik süreçlerinde ve tedarik zinciri yapılarında direkt ya da dolaylı olarak yer alabilmektedirler. Günümüzde tehlikeli maddelerin kimya, petrol, sağlık gibi birçok sektörde kullanılması, tehlikeli yüklerin yer değiştirmesine olan ihtiyacı artırmıştır. Bu durumun sonucu olarak canlılar ve çevre üzerinde onarılamaz etkiler bırakan büyük kazalar ve uzun yıllar etkisi silinemeyen kirlilikler meydana gelmiştir. Bu nedenle tehlikeli madde taşımacılığı, resmi otoriteler, çevreci gruplar ve lojistik firmalarının üzerinde önemle durduğu bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatürde tehlikeli madde taşımacılığı üzerine gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcuttur. Erkut [2], tehlikeli maddelerin rotalanması için geliştirilen koşullu risk modelinin güvenilirliğini araştırmıştır. Karkazis ve Boffey [3] tarafından gerçekleştirilen çalışma, tehlikeli madde taşımacılığında olası bir kaza durumunda nüfus üzerindeki beklenen zararın etkilerini minimize eden optimal rotaların seçimi üzerinedir. Optimal rotaların belirlenmesi için bir dalsınır algoritması geliştirilmiş ve test edilmiştir. Erkut ve Verter [4] çalışmalarında, tehlikeli madde taşımacılığında yaygın olarak kullanılan risk modellerine genel bir bakış sağlamışlardır. Ayrıca literatürdeki alternatif risk modellerini karşılaştırarak, tehlikeli madde rota seçimi için iki kriterli bir yaklaşım önermişlerdir. Leonelli vd. [5] çalışmalarında tehlikeli madde taşımacılığında en iyi rotanın seçimi için risk analizi tabanlı bir metodoloji öne sürmüşlerdir. Optimizasyon problemi bir minimum maliyetli akış problemi olarak formüle edilmiş ve OPTIPATH bilgisayar kodu kullanılarak amonyak taşımacılığına ait sonuçlar tartışılmıştır. Fabiano vd. [6] tarafından gerçekleştirilen çalışmada yerleşim yerine yönelik özgün bir çerçeve geliştirilerek, tehlikeli madde taşımacılığında karayolu rotalarının seçimi için geliştirilen stratejilerden kaynaklanan risk incelenmiştir. Zografos vd. [7] çalışmalarında tehlikeli maddelerin iki amaçlı araç rotalama ve çizelgeleme problemleri için bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Dell'Olmo vd. [8] tarafından tehlikeli maddelerin rotalandığı bir kaynak ve hedef nokta arasındaki alternatif yollar kümesinin bulunması için bir metodoloji sağlanmıştır. İlk aşamada çok ölçütlü en kısa yol algoritması uygulanarak kaynak ve hedef nokta arasındaki Pareto-optimal yollar kümesi bulunmuş; ikinci aşamada ise bulunan her yol için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yardımıyla olası bir kaza sonrasında tehlikeli madde salınımının oluşabileceği etki alanı tahmin edilerek bir

tampon bölge oluşturulmuştur. Erkut ve Alp [9] şebeke üzerindeki tehlikeli madde akışlarından kaynaklanan toplam ulaştırma riskinin minimize edilmesi amacı ile bir tamsayı programlama problemi olarak ağaç tasarım problemini formüle etmişlerdir. Problemin çözümünü genişletmek için bir sezgisel geliştirilmişlerdir. Sadjadi [10] tehlikeli maddelerin optimum ulaştırma planlaması için beklenen maliyeti ve riski minimize edebilen etkili bir algoritma sunmuştur. Carotenuto vd. [11] çalışmalarında, tehlikeli madde taşımacılığında rota seçimi ve hareket zamanı belirleme problemini ele almışlardır. Her sevkiyat için bir rota atamak ve atanan rotalarda toplam gecikmeyi minimize etmek için bu sevkiyatları çizelgeleyen bir tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Brown ve Dunn [12] toksik maddelerin salınımı ile sonuçlanabilecek bir kaza durumunda halkın korunması gereken mesafeleri değerlendiren acil müdahale planlamasına odaklanan bir kantitatif risk değerlendirme yaklaşımı sunmuşlardır. Gickman vd. [13] tehlikeli maddelerin demiryolu ile taşınmasındaki riskleri dikkate alan bir alternatif rotalama stratejisi geliştirmişlerdir. Verma ve Verter [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, demiryolu taşımacılığı riskinin değerlendirilmesinde trenlerin ayırt edici niteliklerini, özellikle de yük hacmini ve türünü içeren analitik bir çerçeve sunulmuştur. Erkut ve Gzara [15] tarafından hükümetin bir şebeke belirlediği ve nakliyecilerin şebeke üzerinde rota seçtiği tehlikeli madde taşımacılığı için şebeke tasarım problemi ele alınmıştır. Problem iki seviyeli bir şebeke akış formülasyonu olarak modellenmiştir. Androustopoulos ve Zografos [16] tehlikeli maddelerin rotalanması için maliyetleri zamana bağlı olarak değişen k-en kısa yol problemini ele almışlardır. Kalkış ve varışın belirlenen zaman pencereleri içinde sınırlandırıldığı bu problemin çözümü için bir etiketleme algoritması önermişlerdir. Dadkar vd. [17] tehlikeli madde taşımacılığında yolların alt kümesinin belirlenmesi için coğrafi çeşitlilik ve performans arasındaki mübadeleyi temsil eden bir karma tamsayı programlama modeli önermişlerdir. Bonvicini ve Spadoni [18] tehlikeli madde taşımacılığında kaynaklanan riskin, rotalamada daha az riskli alternatif yolların tercih edilmesiyle azaltılabileceğini öne sürmüşlerdir. Rotalama probleminin çözümü için farklı optimizasyon stratejilerinin geniş bir yelpazesini sunan OPTIPATH modeli geliştirilmiştir. Risk analizi için OPTIPATH metodolojisi, TRAT4-GIS yazılımına entegre edilmiş ve İtalya'da gerçek bir senaryoya uygulanmıştır. Verma [19] demiryolu tehlikeli madde taşımacılığı için maliyet ve risk minimizasyonunu içeren iki amaçlı bir optimizasyon modeli önermiştir. Önerilen optimizasyon modelini Güneydoğu Amerika'da gerçekçi bir problemin çözümünde kullanarak analiz etmiş ve baskın olmayan çözümleri gösteren bir risk-maliyet sınırı geliştirmiştir. Bianco vd. [20] karayolu ulaşım ağı üzerinde belirli miktarda tehlikeli maddenin, kaynaktan hedefe taşınmasını içeren tehlikeli madde taşımacılığı şebeke tasarımı problemini ele almışlardır. Önerilen iki seviyeli model ve sezgisel algoritma İtalya'nın bölgesel bir şebekesine ait gerçek senaryolar üzerinde denenmiştir. Androustopoulos ve Zografos [21] tarafından tehlikeli

maddelerin dağıtım planlamasında ortaya çıkan iki kriterli rotalama ve çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemin hesaplama yükünün azaltılması amacıyla alternatif bir zamana bağlı k-en kısa yol algoritması önerilmiştir. Verma [22] tren kazalarının karakteristiklerini ve trenlerin ayırt edici özelliklerini dikkate alan bir risk değerlendirme metodolojisi geliştirerek tehlikeli maddelerin demiryolu taşımacılığındaki riskini minimize etmeyi amaçlamıştır. Ma vd. [23] tehlikeli madde taşımacılığı problemini zaman pencereli ve kapasite kısıtlı araç rotalama problemi olarak incelemiştir. Problemin çözümü için bir tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Samanhoğlu [24] endüstriyel tehlikeli atık yönetimi için çok amaçlı yer seçimi ve rotalama modeli geliştirerek Marmara bölgesinde uygulamıştır. Pradhananga vd. [25] tarafından tehlikeli maddeler için zaman pencereli araç rotalama ve çizelgeleme probleminin Pareto temelli iki amaçlı optimizasyonu ele alınmış ve bir meta-sezgisel çözüm algoritması önerilmiştir. Saat vd. [26] tarafından Kuzey Amerika'da demir yolu ile yaygın olarak taşınan bir grup kimyasal için bir kantitatif çevresel risk analizi gerçekleştirilmiştir. Bronfman vd. [27] tarafından kentsel alanda birden çok başlangıç ve bitiş noktaları arasında tehlikeli madde rotalama problemi sunulmuştur. Bir tamsayılı programlama formülasyonu ve sezgisel yaklaşım Santiago'nun karayolu ulaştırma şebekesindeki vaka çalışması üzerinde test edilmiştir. Siddiqui ve Verma [28] farklı yapıdaki tankerlerden oluşan ham petrol filosunun rotalarını ve çizelgelerini hazırlamak için kullanılabilen, maliyetin ve ulaştırma riskinin minimizasyonunun amaçlandığı iki amaçlı bir karma tamsayılı optimizasyon programı sunmuşlardır. Karabulut ve Öcalır Akunal [29] karayolu ile tehlikeli madde taşımacılığı için CBS destekli çevresel risk analizi gerçekleştirmişlerdir. Romero vd. [30] tehlikeli madde taşımacılığında tesis yerleşimi ve rotalama kararlarının analizi için bir model geliştirmişlerdir. Modelin çözümü için Lagrange Gevşetmesi'ni sütun ekleme ile birleştiren bir yöntem önerilmiştir. Pamucar vd. [31] tarafından bir şehrin karayolu ağı üzerindeki tehlikeli madde taşımacılığı için Yapay Arı Kolonisi algoritması ile eğitilen bir uyarlanabilir sinirsel bulanık ağ kullanılarak, maliyet ve risk kriterlerinin değerleri belirlenmiş; ardından Dijkstra algoritması ile rota seçimi gerçekleştirilmiştir. Landucci vd. [32] tarafından 2009 yılında İtalya'nın Viareggio kentinde bir yük treninin raydan çıkmasıyla LPG yüklü iki vagona meydana gelen patlama ışığında, tehlikeli madde taşımacılığında risk değerlendirme için prosedürler ve araçlar analiz edilmiştir. Torretta vd. [33] son yıllarda karar vericilere en iyi çözümleri bulmalarında yardımcı olan sistemler geliştirildiğine değinerek karar destek sistemlerini kullanan yazılımları incelemiştir. Taslimi vd. [34] tehlikeli madde sevkiyatının gerçekleştiği bir karayolu şebekesi için iki seviyeli bir şebeke tasarımı problemini ele almışlardır. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için ağgözlü yaklaşımını önermişlerdir. Kumar vd. [35] gelişmekte olan bir ülkede tehlikeli madde taşımacılığına ilişkin rotalama kararı için bir model önermişlerdir. Kamyon sayısı ve tipi ile rota tercihlerine ilişkin tamsayı değişkenlerini içeren modelin çözümü için genetik algoritma kullanılmıştır. Literatürde, tehlikeli madde taşımacılığı

üzerine birden fazla ulaştırma modunun kullanılması ile gerçekleştirilen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bubbico vd. [36] tehlikeli maddelerin karayolu, demiryolu ve bu iki ulaştırma modunun birlikte kullanıldığı intermodal taşımacılığında bir veri bankası ile birleştirilmiş CBS kullanımına dayanan risk analizi yaklaşımı önermişlerdir. Bubbico vd. [37] tarafından Sicilya'da tehlikeli maddelerin karayolu ve demiryolu taşımacılığına ilişkin çeşitli risklerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için minimum risk değerlerini tespit eden bir Ulaştırma Risk Analizi (Transportation Risk Analysis-TRA) aracı kullanılmıştır. Verma ve Verter [38] tehlikeli maddelerin karayolu-demiryolu intermodal taşımacılığının planlanması için analitik bir çerçeve sunmuşlardır. Reniers vd. [39] farklı ulaştırma modlarının kullanıldığı tehlikeli madde taşımacılığında göreceli risk seviyelerinin değerlendirilmesi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Elaladi [40] tehlikeli madde taşımacılığında demiryolu ve karayolunun birlikte kullanımının oluşturacağı potansiyel faydaları araştırmak amacıyla intermodal taşımacılık için matematiksel model önermiştir. Xie vd. [41] karayolu ve demiryolu şebekelerinden oluşan, aktarma noktalarının konumlarını ve taşıma rotalarını eş zamanlı optimize eden bir multimodal (çok modlu) tehlikeli madde taşımacılığı modeli önermişlerdir. Verma vd. [42] tarafından tehlikeli maddelerin demiryolu-karayolu intermodal taşımacılığında iki-amaçlı optimizasyon modeli önerilmiştir. Tabu arama tabanlı çözüm yaklaşımı geliştirilerek, önerilen model ile birlikte gerçek boyutlu problem örneklerine uygulanmıştır. Reniers ve Dullaert [43] tarafından önerilen tehlikeli madde taşımacılığı güvenlik açığı değerlendirmesi metodu ile farklı taşıma modlarının göreceli güvenlik risk düzeylerini belirleyen bir yaklaşım sunulmuştur. Jiang vd. [44] tehlikeli maddeler için karayolu ve demiryolu ağlarından oluşan şebekede aktarma noktalarının konumlarının ve taşıma rotalarının eş zamanlı optimizasyonunu sağlayan, toplam maliyeti ve toplam riski minimize etmeyi amaçlayan bir multimodal taşımacılık modeli önermişlerdir. Küçük [45] karayolu ve demiryolu taşımacılığında oluşan çok tipli bir taşıma modeli kullanarak, tehlikeli madde taşımacılığında oluşan maliyeti ve riskleri en aza indirgeyen bir iki amaçlı optimizasyon modeli geliştirmiştir. Assadipour vd. [46] mevcut çalışmalarda demiryolu-karayolu intermodal taşımacılığında terminallerdeki yoğunlukların göz ardı edildiğini vurgulayarak, literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla terminal yoğunluğunu dikkate alan ve uygun ekipman kapasitesini belirleyen iki amaçlı bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Assadipour vd. [47] bir başka çalışmada, taşıyıcı firmaların belirli terminalleri kullanmalarının önüne geçmek adına hükümetin geçiş ücreti gibi caydırıcı önlemler aldığı durumlarda, tehlikeli madde taşımacılığı için demiryolu intermodal terminallerinin kullanımını düzenlemek amacıyla iki seviyeli, iki amaçlı bir model önermişlerdir. Vaezi ve Verma [48] Kanada'daki farklı demiryolu bağlantılarındaki ham petrol hacmini 2030 yılına kadar tahmin etmek için veri güdümlü bir metodoloji sunmuş ve önerilen boru hattı projelerinin etkisini değerlendirmişlerdir. Türkiye, coğrafi konumu ve lojistik avantajları ile karma taşımacılığa elverişli olmasına rağmen,

ulaşım ağının çok geniş olması nedeniyle ülkemizde tehlikeli madde taşımacılığında yaygın olarak karayolu kullanılmaktadır. Hâlbuki demiryolu ve denizyolu gerek maliyet gerek risk açısından karayoluna göre üstünlükler arz etmektedir. Dünyada artan ticaret akışlarıyla birlikte faaliyete geçen lojistik köyler için ülkemizde de altyapı yatırımları hızla artmakta olup, bu sayede daha düşük maliyetli, hava şartlarından daha az etkilenen, emniyetli ve çevre dostu bir karma taşımacılık modelinin yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Tehlikeli madde taşımacılığının önemli bir bölümünü oluşturan akaryakıt taşımacılığının ele alındığı bu çalışmada, arz ve talep noktaları arasındaki toplam ulaştırma maliyeti ve toplam ulaştırma riskinin minimizasyonunu hedefleyen, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak karayolu, demiryolu ve denizyolunun kombinasyonundan oluşan çok modlu çok ürünlü iki amaçlı bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin Türkiye uygulaması için gerekli veriler toplanarak öncelikle GAMS/CPLEX optimizasyon programı ile mevcut durumda yaygın olarak kullanılan tek modlu taşımacılık modeli ve önerilen çok modlu taşımacılık modeli için minimum maliyet ve minimum risk değerleri, ardından maliyet öncelikli ve risk öncelikli hedef programlama modellerine ilişkin değerler elde edilmiş ve CBS yazılımlarından ArcGIS kullanılarak Türkiye'nin akaryakıt dağıtım ağları oluşturulmuştur.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde geliştirilen model incelenmiştir. Üçüncü bölümde, önerilen modelin Türkiye uygulamasına yer verilerek minimum maliyet amaçlı, minimum risk amaçlı, iki amaçlı maliyet öncelikli ve iki amaçlı risk öncelikli modeller için dağıtım ağları elde edilmiştir. Dördüncü bölümde ise sonuçlar bir bütün olarak ele alınmış ve ileriki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. GELİŞTİRİLEN MODELLER (DEVELOPED MODELS)

Bu bölümde tehlikeli madde taşımacılığı için, birden fazla taşıma modunun (karayolu, demiryolu ve denizyolu) birlikte kullanıldığı; akaryakıt dağıtım şirketleri açısından minimum maliyetli; toplum ve çevre açısından ise minimum riskli dağıtım ağının belirlenmesini hedefleyen çok-modlu çok-ürünlü iki-amaçlı matematiksel model önerilmiştir. Doğruluğu sayısal örneklerle test edilmiş olan modele ilişkin formülasyon aşağıdaki gibidir:

Küme ve indisler

N : Şehirler kümesi $i, j \in N = \{1, 2, \dots, n\}$,

P : Ürünler kümesi $k \in P = \{1, 2, \dots, p\}$

Parametreler

C_k^h : Karayolu ile bir birim k ürünü taşıma maliyeti,

C_k^r : Demiryolu ile bir birim k ürünü taşıma maliyeti,

C_k^m : Denizyolu ile bir birim k ürünü taşıma maliyeti,

FC^{tu} : Transfer ünitesi kurmak için gereken sabit maliyet,

D_{ij}^h : i ve j şehirleri arası karayolu mesafesi,

D_{ij}^r : i ve j şehirleri arası demiryolu mesafesi,

D_{ij}^m : i ve j şehirleri arası denizyolu mesafesi,

V_{ik} : i şehrinin k ürününe ait talep miktarı,

U_k^t : Terminalin k ürünü depolama kapasitesi,

U_k^{tu} : Transfer ünitesinin k ürünü aktarma kapasitesi,

U^{rf} : Rafineri kapasitesi,

Q^{tu} : Mevcut transfer ünitesi sayısı,

R_{ij}^h : (i, j) karayolu bağlantısına ait ulaştırma riski,

R_{ij}^r : (i, j) demiryolu bağlantısına ait ulaştırma riski,

R_{ij}^m : (i, j) denizyolu bağlantısına ait ulaştırma riski,

$h_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ ve } j \text{ arasında karayolu bağlantısı mevcutsa,} \\ 0 & \text{diğer durumlarda (dd.),} \end{cases}$

$r_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ ve } j \text{ arasında demiryolu bağlantısı mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$m_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ ve } j \text{ arasında denizyolu bağlantısı mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$Y_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehri tedarik noktasıysa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$t_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrinde terminal mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$w_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrindeki terminalin deniz bağlantısı mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$rf_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrinde rafineri mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.} \end{cases}$

Karar değişkenleri

X_{ijk}^h : (i, j) karayolu ile taşınan k ürünü miktarı,

X_{ijk}^r : (i, j) demiryolu ile taşınan k ürünü miktarı,

X_{ijk}^m : (i, j) denizyolu ile taşınan k ürünü miktarı,

S_{ik} : i tedarik şehrinin k ürünü için arz miktarı,

$a_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrinde mevcut transfer ünitesi kullanılacaksa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$b_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrine yeni transfer ünitesi kurulacaksa,} \\ 0 & \text{dd.} \end{cases}$

Amaç fonksiyonları

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h D_{ij}^h c_k^h + \\ & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r D_{ij}^r c_k^r + \\ & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m D_{ij}^m c_k^m + \\ & \sum_{j \in N} FC^{tu} b_j \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h R_{ij}^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r R_{ij}^r + \\ & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m R_{ij}^m \end{aligned} \quad (2)$$

Kısıtlar

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in N} X_{jik}^h h_{ji} + \sum_{i \in N} X_{jik}^r r_{ji} + \sum_{i \in N} X_{jik}^m m_{ji} - \\ & \sum_{i \in N} X_{ijk}^h h_{ij} - \sum_{i \in N} X_{ijk}^r r_{ij} - \sum_{i \in N} X_{ijk}^m m_{ij} \\ & = S_{jk} y_j - V_{jk}, \quad \forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in N} X_{ijk}^h h_{ij} - \sum_{i \in N} X_{jik}^h h_{ji} - V_{jk} \leq U^{rf} r_{fj} + U_k^t t_j, \\ & \forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in N} X_{ijk}^r r_{ij} \leq U_k^t t_j + U_k^{tu} a_j + U_k^{tu} b_j, \\ & \forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in N} X_{jik}^r r_{ji} \leq U^{rf} r_{fj} + U_k^t t_j + U_k^{tu} a_j + U_k^{tu} b_j, \\ & \forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ijk}^m m_{ij} \leq U_k^t w_j, \quad \forall j \in N, \forall k \in P \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in N} X_{jik}^m m_{ji} \leq U^{rf} r_{fj} + U_k^t w_j, \\ & \forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N} S_{jk} y_j = \sum_{j \in N} V_{jk}, \quad \forall k \in P \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N} a_j \leq Q^{tu} \quad (10)$$

$$X_{ijk}^h, X_{ijk}^r, X_{ijk}^m, S_{jk} \geq 0, \quad (11)$$

$$\forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in P$$

$$a_j, b_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in N \quad (12)$$

Eş. 1, tüm taşıma modları için toplam ulaştırma maliyetinin minimizasyonu ile transfer ünitesi açmanın doğurduğu sabit maliyetin minimizasyonunu; Eş. 2 ise kara, demir ve deniz yolu ile gerçekleştirilen tehlikeli madde taşımacılığında doğan toplam ulaştırma riskinin minimizasyonunu amaçlamaktadır.

Eş. 3 akaryakıt taşımacılığı için akış denge kısıtı olup, tüm şehirlerin akaryakıt taleplerinin karşılanmasını ve uygun taşıma modları kullanılarak tedarikçilerden elde edilen ürünlerin talep noktalarına iletilmesini sağlamaktadır.

Eş. 4, bir şehirde rafineri veya depolama terminali mevcut olmadığı durumda, şehre kara tankerleri ile gelen akaryakıtın farklı bir şehre ulaştırılması sırasında taşıma modunun değiştirilemeyeceğini ifade etmektedir. Demir yolu ile gelen akaryakıtın şehir geneline dağıtımının yapılabilmesi için o şehirde terminal ya da transfer ünitesinin olması gerekmektedir. Eş. 5 ile vagon tankerlerdeki akaryakıtın, terminal ya da transfer ünitesi vasıtasıyla kara tankerlerine aktarımı sağlanabilmektedir. Terminallerde ve rafinerilerde vagon tankerlerin direkt dolumu yapılabilmektedir. Dolayısıyla bir şehirden demir yolu ile başka bir şehre akaryakıt gönderiminin yapılabilmesi için o şehirde ya bir rafineri ya da bir terminal bulunması gerekmektedir. Bu duruma ilave olarak sadece transfer ünitesinin olduğu bir şehre demir yolu ile giren ürünlerin, şehirden kara yolu ile çıkışı söz konusu olduğu gibi mod değiştirmeksizin demir yolu ile çıkışı da Eş. 6 ile mümkün kılınmaktadır.

Eş. 7, bir şehre deniz yolu ile akaryakıt ürünlerinin girebilmesi için o şehirde deniz ile bağlantısı olan bir terminalin bulunmasını ve taşınacak ürün miktarının terminalin depolama kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Eş. 8 ise bir şehirden deniz yolu ile akaryakıt çıkışının olabilmesi için o şehirde ya bir rafinerinin ya da deniz ile bağlantısı olan bir terminalin bulunması gerektiğini ifade etmektedir.

Eş. 9, toplam arzın toplam talebi karşılamasını sağlamaktadır. Ayrıca bu kısıt ile toplam talebin hangi oranlarda mevcut arz noktalarından karşılanacağı da belirlenmektedir.

Eş. 10, kurulum maliyeti gerektirmeden kullanılacak toplam transfer ünitesi sayısının, hâlihazırda mevcut olan transfer ünitesi sayısını aşmaması gerektiğini ifade etmektedir.

Eş. 11, sol taraftaki değişkenlerin negatif olmama durumunu; Eş. 12 ise ilgili değişkenlerin 0 veya 1 değerini alabileceğini ifade etmektedir.

3. TÜRKİYE UYGULAMASI (APPLICATION IN TURKEY)

3.1. Problemin Tanımı ve Verilerin Toplanması (Problem description and data collection)

Türkiye’de, yılda yaklaşık 35 milyon ton akaryakıtın %95’i 55.000 adet karayolu tankeri ile taşınmakta ve bu durumda yılda yaklaşık 1 milyon sefer gerçekleşmektedir. Bu araçların yalnız 12.500 adedi ADR (European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road-Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşması) standartlarına uygundur [49]. Bu gerçek, tehlikeli sınıfta olan akaryakıtın bir kısmının güvenli olmayan araçlarla toplum içerisinde taşındığını net olarak göstermektedir. Akaryakıt dağıtım faaliyetlerinde birden fazla taşıma modunun birlikte kullanıldığı; akaryakıt dağıtım şirketleri açısından minimum maliyetli; toplum ve çevre açısından ise minimum riskli dağıtım ağının belirlenmesini hedefleyen çok-modlu çok-ürünlü iki-amaçlı matematiksel model önerisi Bölüm 3’te verilmiştir. Bu bölümde, önerilen modelin Türkiye uygulaması için, sektörde pazar payının %70’inden fazlasını elinde bulunduran 6 akaryakıt dağıtım şirketi baz alınmıştır. Akaryakıt ürünleri olarak ise benzin ve motorin dikkate alınmıştır. Çalışmada, rafinerilerin bulunduğu iller (İzmit, İzmir, Kırıkkale ve Batman) ile şirketlerin rafinerilere ilave olarak uluslararası kaynaklardan da ürün temin ettikleri terminallerinin bulunduğu iller (Mersin ve Tekirdağ) tedarik noktası olarak kabul edilmiştir. Rafinerilerin kapasitelerinin sınırsız olduğu; yurt içi ve yurt dışı tedarikçilerden satın alınan ürünlerin birim maliyetlerinin aynı olduğu varsayılmıştır. Ülkemizdeki 81 il merkezi ise talep noktası kabul edilmiştir. İllerin aylık akaryakıt talepleri “Petrol Piyasası Sektör Raporu” verilerinden dağıtıcı firmaların illere göre yıllık yurt içi benzin ve motorin türlerinin satış miktarları dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Akaryakıt dağıtım şirketleri, petrol ürünlerinin depolanması için kendi depolama terminallerini kullanabilecekleri gibi diğer firmaların depolarını kiralayabilme imkânına da sahiptirler. Mevcut sistemde yaygın olarak kullanılan depoların bulunduğu iller; İzmit, İzmir, Kırıkkale, Batman, Mersin, Tekirdağ, İstanbul, Antalya, Samsun, Trabzon ve Hatay’dır. Depoların özdeş ve kapasitelerinin 180.000 ton olduğu varsayılmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda benzin/motorin için terminallerin kapasitelerinin yaklaşık 1/7 oranında olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Transfer üniteleri, demiryolu tankerleri ile gelen ürünlerin herhangi bir depolama işlemi olmaksızın karayolu tankerlerine iletilmesini sağlayan ve bünyesinde her biri saatte 120 m³ akaryakıt ürünü aktarabilen iki pompa bulunduran aracı birimlerdir. Bu doğrultuda bir transfer ünitesinin günde 24 saat ve ayda 30 gün çalıştığı varsayılarak yaklaşık kapasitesi 166.000 ton/ay olarak hesaplanmıştır. Benzin/motorin için transfer ünitelerinin kapasiteleri 1/7 oranında hesaplanmıştır. Üretici firmalar ile gerçekleştirilen görüşmeler neticesinde, transfer ünitesinin birim maliyetinin yaklaşık 125.000 \$ olduğu ve mevcut sistemde 2 adet

transfer ünitesinin bulunduğu bilgisi elde edilmiştir. Mevcut sistemde kara tankerleri ile gelen ürünlerin transfer ünitelerinde vagon tankerlere aktarımı söz konusu değildir. Transfer üniteleri taşınabilir durumda olduğundan, gerektiğinde farklı şehirlerde konumlandırılmaları mümkündür. Çalışma kapsamında yeni bir transfer ünitesi kurmak için gereken maliyetin sabit olduğu varsayılmıştır.

Akaryakıt taşımacılığı yapan şirketlerle yapılan görüşmeler doğrultusunda benzin ve mazot gibi akaryakıt ürünlerinin karayolu ile birim ulaştırma maliyeti ton-km başına yaklaşık 0,30 TL; denizyolu ile birim ulaştırma maliyeti ise (14000 ton kapasiteli tanker için) ton-km başına yaklaşık 0,06 TL olarak hesaplanmıştır. TCDD ile yapılan görüşmelerde ise demiryolu ile ulaştırma maliyeti ton-km başına ortalama 0,08 TL olarak elde edilmiştir. TCDD’nin yük taşımacılığı mevzuatına göre, parlayıcı madde yüklü vagonlar yük trenlerinde baştaki ve sondaki lokomotiflerden en az bir emniyet vagonu ile ayrılmak suretiyle lokomotiflerden uzak yerlere verilmektedir. Buna göre birim taşıma maliyetine ilave olarak benzin için %6, motorin için ise %4 oranında emniyet vagonu ücreti bulunmaktadır [50]. Karayolu ve denizyolunda ise benzin ve motorin için birim taşıma maliyeti değişmemektedir.

Karayolu, demiryolu ve denizyolu şebekeleri, ArcGIS yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Karayolu için 81 il, demiryolu için akaryakıt taşımacılığının yapılabildiği iller, denizyolu için ise deniz taşımacılığının aktif olarak gerçekleştirildiği terminallerin bulunduğu iller baz alınmıştır. Çalışmada karayolu taşımacılığı için Erkut ve Verter [4], demiryolu taşımacılığı için Glickman vd. [13], denizyolu taşımacılığı için ise Siddiqui ve Verma [51] tarafından önerilen risk modelleri dikkate alınarak Türkiye’ye uyarlanmıştır. Karayolu taşımacılığı risk modeli için mesafe, karayolundaki kaza olasılığı, kaza meydana geldiğinde tehlikeli maddenin koşullu salınım olasılığı, ortalama nüfus yoğunluğu ve etki alanı parametreleri dikkate alınırken; demiryolu taşımacılığı risk modeli için mesafe, demiryolundaki kaza oranı, tren başına yüklenen vagonların toplam sayısı, hasar gören ya da raydan çıkan tehlikeli madde vagonlarından büyük bir salınım yapılma olasılığı, tehlikeli maddelerin büyük bir salınımı ile sonuçlanan bir kazanın beklenen sonucu; denizyolu taşımacılığı risk modeli için ise mesafe, büyük dökülmeler ile sonuçlanan kaza olasılığı, küçük dökülmeler ile sonuçlanan kaza olasılığı, büyük dökülmelerin boyutu, küçük dökülmelerin boyutu, denizdeki bir tonluk dökülmenin karada oluşturduğu etki alanı ve ortalama nüfus yoğunluğu dikkate alınmıştır. Risk hesaplamaları için T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı [52] bünyesindeki kuruluşlardan gerekli veriler elde edilmiştir.

3.2. Çok-Ürünlü İki-Amaçlı Matematiksel Modelin Analizi (Analysis of Multi-Commodity Bi-Objective Model)

Ülkemizde yaygın olarak karayolu taşımacılığı kullanıldığı için, çok-ürünlü iki-amaçlı matematiksel model (M1), öncelikle ulaştırma modu olarak sadece karayolunun

kullanıldığı tek modlu model (TMM) ve tüm ulaştırma modlarının (kara-demir-deniz) kullanıldığı çok modlu model (ÇMM) olarak GAMS 23.5.1/CPLEX 12.2 optimizasyon programı ile çözülmüş ve Tablo 1’deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 1. M1 için tek modlu ve çok modlu ulaştırma modellerine ilişkin değerler
(Values of single mode and multi-modal transportation models for M1)

M1	Min. Maliyet (TL)	Min. Risk
TMM	94.102.986,900	173.149,496
ÇMM	50.861.833,371	49.150,148

3.3. Çok-Ürünlü İki-Amaçlı Maliyet-Öncelikli Hedef Programlama Modeli ve Analizi

(Multi-Commodity Bi-Objective Cost-Priority Goal Programming Model and Analysis)

Maliyet önceliğinin olduğu durumda hedef programlama modeli (M2) aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$P_1 \gg P_2$ olmak üzere;

$$Min z = P_1 d_1^+ + P_2 d_2^+ \tag{13}$$

s.t.

$$Min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h D_{ij}^h c_k^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r D_{ij}^r c_k^r + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m D_{ij}^m c_k^m + \sum_{j \in N} FC^{tu} b_j + d_1^- - d_1^+ = 50.861.833,371 \tag{14}$$

$$Min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h R_{ij}^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r R_{ij}^r + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m R_{ij}^m + d_2^- - d_2^+ = 49.150,148 \tag{15}$$

$$Eş. (3) - Eş. (12) \tag{16}$$

Modelin analizi:

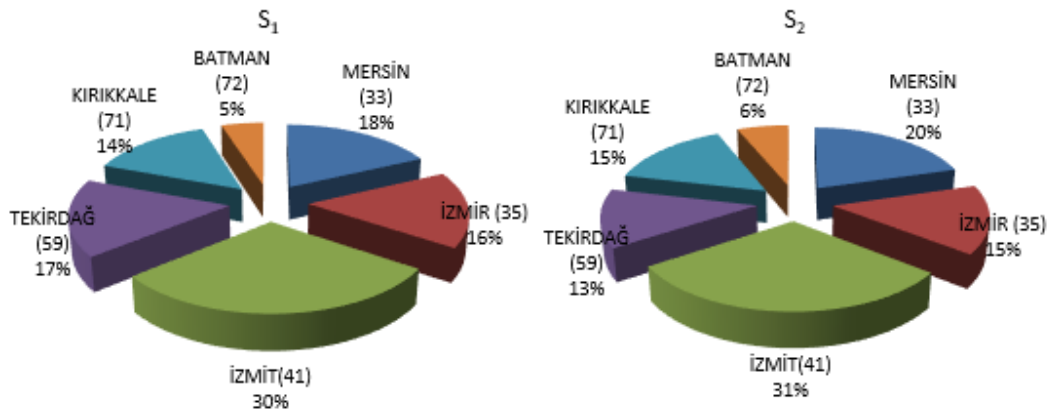
$$z = 50.977,162$$

$d_1^-, d_1^+, d_2^- = 0$, $d_2^+ = 50.977,162$ olarak elde edilmektedir. Buna göre 1. hedef tam olarak sağlanırken, 2. hedeften pozitif yönde 50.977,162 birimlik sapma gerçekleşmiştir.

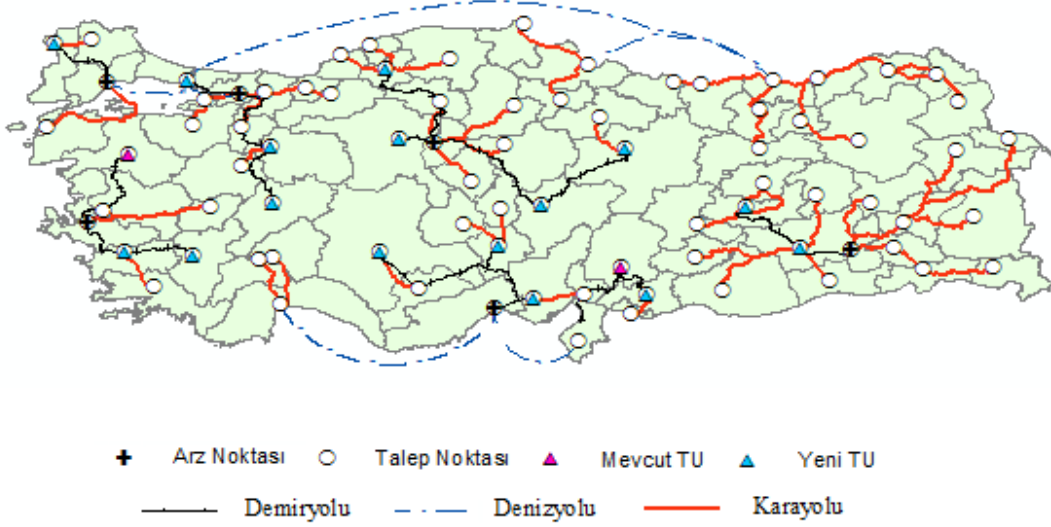
Çok-ürünlü iki-amaçlı maliyet öncelikli hedef programlama modeli (M2) için 1. ve 2. ürüne ait tedarikçilerin talep karşılama oranları Şekil 1’de, ArcGIS ile elde edilen dağıtım ağları ise Şekil 2 ve Şekil 3’te gösterilmektedir.

Şekil 1 incelendiğinde, 1. ürün (benzin) için toplam talebin %65’inin rafinerilerden, %35’inin ise yurt dışı bağlantılı terminallerden; 2. ürün (motorin) için ise toplam talebin %67’sinin rafinerilerden, kalan %33’ünün ise yurt dışı bağlantılı terminallerden karşılandığı görülmektedir. Ürünlerin taleplerinin sırasıyla %30 ve %31 oranlarında İzmit rafinerisinden karşılandığı ve en düşük tedarikçi arz yüzdesinin %5 ve %6 oranlarında Batman rafinerisine ait olduğu görülmektedir.

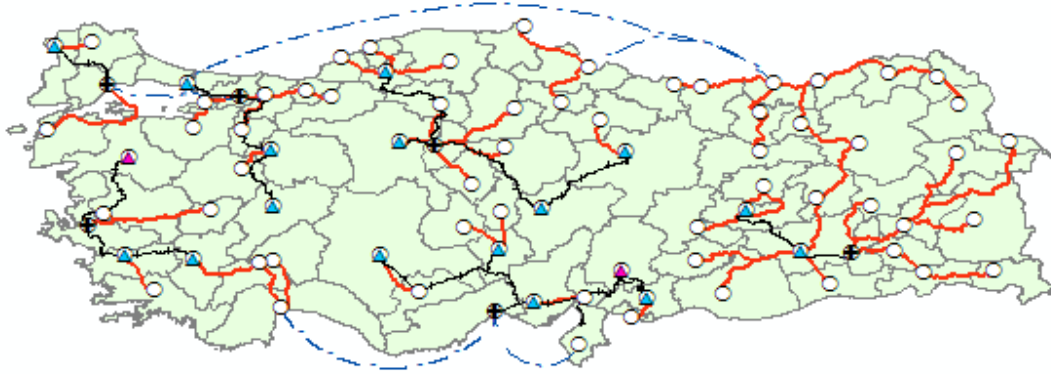
1. ürüne ait dağıtım ağı Şekil 2’de verilmektedir. Şekil 2 incelendiğinde, Hatay’dan Gaziantep ve Kahramanmaraş’a; Mersin’den Adana, Konya ve Niğde’ye; İzmir’den Aydın, Balıkesir ve Denizli’ye; Kocaeli’den Afyon, Eskişehir ve İstanbul’a; Tekirdağ’dan Edirne’ye; Kırıkkale’den Ankara, Kayseri, Sivas, Karabük’e; Batman’dan Diyarbakır ve Elazığ’a yapılan sevkiyatlarda ulaştırma modu olarak demiryolunun kullanıldığı, Mersin’den Antalya ve Hatay’a; Kocaeli’den Trabzon’a; Tekirdağ’dan İstanbul’a ve Trabzon’dan Samsun’a yapılan sevkiyatlarda ise denizyolunun kullanıldığı görülmektedir. Demiryolu ve denizyolu bağlantısının olmadığı şehirlerde ise en kısa mesafeler dikkate alınarak sevkiyatlar karayolu ile yapılmıştır. M2 için 1. ürüne ait dağıtım ağına ilişkin detaylar EK A’da yer alan Tablo 1’de verilmektedir [53].



Şekil 1. M2 için 1. ve 2. ürüne ait tedarikçi talep karşılama oranları (Supplier fill rates for product 1 and 2 of M2)



Şekil 2. M2 için 1. ürüne ait dağıtım ağı (Distribution network for product 1 of M2)



Şekil 3. M2 için 2. ürüne ait dağıtım ağı (Distribution network for product 2 of M2)

2. ürüne ait dağıtım ağı Şekil 3’de verilmektedir. Şekil 3 incelendiğinde, Hatay’dan Gaziantep ve Kahramanmaraş’a; Mersin’den Adana, Gaziantep, Konya ve Niğde’ye; İzmir’den Aydın, Balıkesir ve Denizli’ye; Kocaeli’den Afyon, Eskişehir ve İstanbul’a; Tekirdağ’dan Edirne’ye; Kırıkkale’den Ankara, Kayseri, Sivas, Karabük’e; Batman’dan Diyarbakır ve Elazığ’a yapılan sevkiyatlarda ulaştırma modu olarak demiryolunun kullanıldığı, Mersin’den Antalya ve Hatay’a; Kocaeli’den Trabzon’a; Tekirdağ’dan İstanbul’a ve Trabzon’dan Samsun’a yapılan sevkiyatlarda ise denizyolunun kullanıldığı görülmektedir. Demiryolu ve denizyolu bağlantısının olmadığı şehirlerde ise en kısa mesafeler dikkate alınarak sevkiyatlar karayolu ile yapılmıştır. M2 için 2. ürüne ait dağıtım ağına ilişkin detaylar Tablo A2’de verilmektedir [53].

Ayrıca, Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde mevcut 2 transfer ünitesinin Balıkesir ve Kahramanmaraş’a yerleştirildiği; 16 yeni transfer ünitesinin açıldığı ve ürünlerin dağıtımında üç ulaştırma modunun da kullanıldığı görülmektedir.

3.4. Çok-Ürünlü İki-Amaçlı Risk-Öncelikli Hedef Programlama Modeli ve Analizi

(Multi-Commodity Bi-Objective Risk-Priority Goal Programming Model and Analysis)

Risk önceliğinin olduğu durumda hedef programlama modeli (M3) aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$$P_1 \gg P_2 \text{ olmak üzere;}$$

$$\text{Min } z = P_1 d_1^+ + P_2 d_2^+ \quad (17)$$

s.t.

$$\text{Min } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h R_{ij}^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r R_{ij}^r + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m R_{ij}^m + d_1^- - d_1^+ = 49.150,148 \quad (18)$$

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h D_{ij}^h c_k^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r D_{ij}^r c_k^r +$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m D_{ij}^m c_k^m + \sum_{j \in N} FC^{tu} b_j + \quad (19)$$

$$d_2^- - d_2^+ = 50.861.833,371$$

Eş. (3) – Eş. (12)

Modelin analizi:

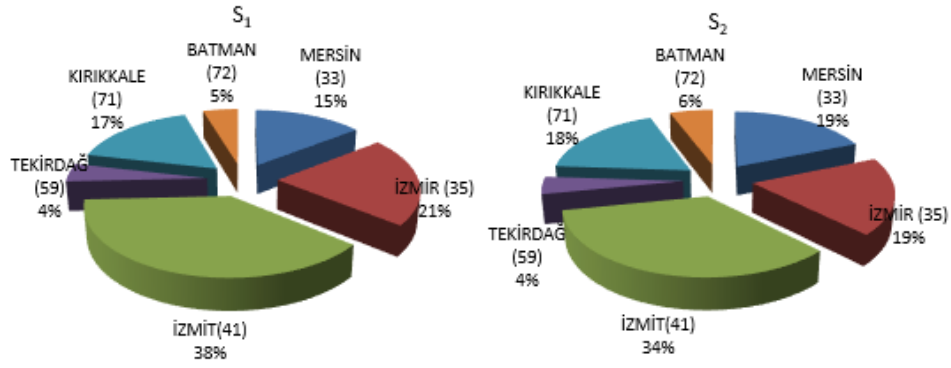
$$z = 14.314.319,183$$

$$d_1^-, d_2^- = 0, \quad d_1^+ = 2,001 \times 10^{-7}, \quad d_2^+ = 14.314.319,183$$

olarak elde edilmektedir. Buna göre pozitif yönde 1. hedeften $2,001 \times 10^{-7}$; 2. hedeften ise 14.314.319,183 birimlik sapma gerçekleşmiştir.

(20)

Çok ürünli-iki amaçlı-risk öncelikli hedef programlama modeli (M3) için 1. ve 2. ürüne ait tedarikçilerin talep karşılama oranları Şekil 4'te, ArcGIS ile elde edilen dağıtım ağları ise Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekil 4 incelendiğinde 1. ürün için toplam talebin %81'inin rafinerilerden, %19'unun yurt dışı bağlantılı terminallerden;



Şekil 4. M3 için 1. ve 2. ürüne ait tedarikçi talep karşılama oranları (Supplier fill rates for product 1 and 2 of M3)



Şekil 5. M3 için 1. ürüne ait dağıtım ağı (Distribution network for product 1 of M3)



Şekil 6. M3 için 2. ürüne ait dağıtım ağı (Distribution network for product 2 of M3)

Tablo 2. Modellere ilişkin değerler (Values for the models)

Model	a	b	Maliyet (TL)	Risk
M1				
	<i>TMM (1)</i>	-	94.102.987	-
	<i>TMM (2)</i>	-	-	173.149
	<i>ÇMM (1)</i>	2	50.861.833	-
	<i>ÇMM (2)</i>	2	-	49.150
M2	2	16	50.861.833	100.127
M3	2	37	65.176.153	49.150

2. ürün için ise toplam talebin %77'sinin rafinerilerden kalan %23'lik kısmının yurt dışı bağlantılı terminallerden karşılandığı görülmektedir. Her iki ürün için de talebin çoğunlukla İzmit rafinerisinden karşılandığı ve en düşük tedarikçi arz yüzdesinin Batman rafinerisine ait olduğu görülmektedir.

M3 için 1. ürüne ait dağıtım ağı Şekil 5'te, 2. ürüne ait dağıtım ağı ise Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde, taşıma modu olarak sadece demiryolu ve karayolunun kullanıldığı, mevcut 2 transfer ünitesinin Ankara ve İstanbul'a yerleştirildiği ve ilave olarak 37 yeni transfer ünitesi açıldığı görülmektedir. M3 için 1. ürünün dağıtımına ilişkin detaylar EK B'de yer alan Tablo B1'de, 2. ürünün dağıtımına ilişkin detaylar ise Tablo B2'de sunulmaktadır [53].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tehlikeli maddeler kimyasal ve fiziksel karakteristikleri nedeni ile canlılara ve çevreye zarar verebilecek nitelikteki maddelerdir. Tehlikeli madde taşımacılığı karayolu, demiryolu, denizyolu gibi farklı taşıma modları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Demiryolu ve denizyolu taşımacılığının risk ve maliyet açısından üstünlükleri olmasına rağmen, ulaşım ağının geniş olması nedeniyle Türkiye'de yük taşımacılığının büyük kısmı karayolu ile gerçekleştirilmektedir. Tehlikeli madde taşımacılığının önemli bir bölümünü oluşturan akaryakıt taşımacılığının ele alındığı bu çalışmada, ülkemizdeki akaryakıt dağıtım faaliyetlerinin daha düşük maliyet ve daha az riskle gerçekleştirilebilmesi için uygun taşıma modunun ve dağıtım ağının belirlenmesi hedeflenmiş ve bu doğrultuda matematiksel modeller geliştirilmiştir. Önerilen modeller incelendiğinde birbiri ile çelişen iki amaca sahip olduğu görülmektedir. Bu iki amaçlı modellerde, riskte sağlanabilecek azalma maliyette önemli bir artış; maliyette sağlanabilecek azalma ise riskte önemli bir artış doğurmaktadır. Maliyette ve riskte meydana gelebilecek artışın kabul edilebilir olup olmadığı karar vericilere bağlıdır. Akaryakıt dağıtım şirketleri, kar amacı güden kuruluşlar oldukları için toplumsal riski göz önünde bulundurmalarının yanı sıra bu şirketlerin öncelikli amacı

maliyet minimizasyonu iken, toplum açısından öncelikli amaç ise risk minimizasyonu olmaktadır.

Geliştirilen modeller 8 Gb Ram ve 2.7 GHz işlemcili bilgisayarda GAMS 23.5.1/CPLEX 12.2 optimizasyon programı yardımıyla çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar ArcGIS yazılımında kullanılarak, Türkiye'nin akaryakıt dağıtım ağı oluşturulmuştur. Tablo 2'de önerilen modellere ilişkin değerler görülmektedir.

Tablo 2 incelendiğinde taşıma modu olarak sadece karayolunun kullanıldığı tek modlu çok ürünlü taşımacılık için minimum maliyet değerinin yaklaşık 94.102.987, minimum risk değerinin yaklaşık 173.149 olduğu görülmektedir. Karayolu, demiryolu ve denizyolunun kullanıldığı çok modlu çok ürünlü taşımacılık için minimum maliyet değeri 50.861.833; minimum risk değeri 49.150 olarak bulunmuştur. Çok modlu taşımacılıkta minimum maliyet durumunda mevcut 2 transfer ünitesine ilave 16 yeni transfer ünitesini daha açılmakta iken, minimum risk durumunda maliyetler göz ardı edildiği için mevcut transfer ünitelerine ilave olarak her ile yeni bir transfer ünitesi açılmaktadır. Maliyet hedefinin öncelikli olduğu durumlarda maliyet hedefinden sapma olmazken risk hedefinden pozitif yönde 50.977,162'lik sapma gerçekleşmiştir. Yani maliyet değeri 50.861.833 iken risk değeri 100.127 olarak elde edilmiştir. Bu durumda mevcut transfer ünitelerine ilave 16 yeni transfer ünitesi açılmış ve toplam 18 transfer ünitesi kullanılmıştır. Risk hedefinin öncelikli olduğu durumda ise risk hedefinden pozitif yönde $2,001 \times 10^{-7}$; maliyet hedefinden pozitif yönde 14.314.319'luk sapma olmuştur. Bu doğrultuda risk değeri yaklaşık 49.150,148; maliyet değeri ise 65.176.153 olarak bulunmuştur. Risk hedefinin öncelikli olduğu durumda mevcut 2 transfer ünitesine ilave 37 yeni transfer ünitesi açılarak toplam 39 transfer ünitesi ile çalışılmıştır.

Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi akaryakıt taşımacılığı faaliyetlerinin birden fazla taşıma modu kullanılarak gerçekleştirilmesi durumunda hem maliyet hem de risk açısından önemli oranda azalmalar görülmektedir. Bu durum, karma taşımacılığın taşıma modlarının avantajlarını kendi içinde entegre edip, dezavantajlarını mümkün

olduğunca saf dışı bırakan ve kendini sürekli yenileyen, gelişime açık bir taşımacılık sistemi olduğunu gözler önüne sermektedir. Ayrıca, sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde akaryakıt ürünlerinin en fazla İzmit rafinerisinden temin edildiğini söylemek mümkündür.

Ülkemizde son zamanlarda denizyolu taşımacılığında meydana gelen kazalar nedeniyle, demiryolu risk oranı denizyoluna göre daha düşük olarak hesaplanmıştır. Bu durum ise modellerde görüldüğü gibi riskin öncelikli olduğu durumda denizyolu yerine demiryolunun tercih edilmesini, mod değişimlerinde ve kısa mesafelerde kara yolunun tercih edilmesini sağlamıştır. Bu açıdan bakıldığında toplam ulaştırma riski daha düşük olacaktır. Ancak maliyet açısından denizyolu taşımacılığı demiryolu ve karayolu taşımacılığına göre daha avantajlı olduğu için maliyet öncelikli modelde denizyolu taşımacılığı tercih edilmiştir.

Literatürde tehlikeli maddelerin karma taşımacılığı üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, ağırlıklı olarak karayolu ve demiryolunun birlikte kullanıldığı modlar arası (intermodal) taşımacılığın ele alındığı görülmektedir. Ülkemiz tehlikeli maddelerin karayolu, demiryolu ve denizyolu ile taşımacılığı açısından elverişli bir pozisyona sahip olduğundan, bu çalışmada bahsi geçen üç ulaştırma modunun birlikte kullanıldığı çok modlu taşımacılığa yer verilmiştir. Tehlikeli madde taşımacılığı üzerine bu üç ulaştırma modunun birlikte kullanılması ile gerçekleştirilmiş bir çalışma mevcut olmadığından, çalışma bu yönüyle literatüre katkı sağlayacak durumdadır. İleriki çalışmalarda, literatürdeki diğer risk modelleri de kullanılarak sonuçların karşılaştırılması ve teknolojideki gelişmelere bağlı olarak probleme uygun ilave taşıma modlarının kullanılması ile yeni modellerin önerilmesi mümkündür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamındaki desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Jiang M.W., Ying M., Study on Route Selection for Hazardous Chemicals Transportation, *Procedia Engineering*, 71, 130-138, 2014.
2. Erkut E., On the credibility of the conditional risk model for routing hazardous materials, *Oper. Res. Lett.*, 18 (1), 49-52, 1995.
3. Karkazis J., Boffey T., Optimal location of routes for vehicles transporting hazardous materials. *Eur. J. Oper. Res.*, 86 (2), 201-215, 1995.
4. Erkut E. and Verter V., Modeling of transport risk for hazardous materials, *Operations Research*, 46 (5), 625-642, 1998.
5. Leonelli P., Bonvicini S., Spadoni G., Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology, *J. Hazard. Mater.*, 71 (1), 283-300., 2000.
6. Fabiano B., Curro F., Palazzi E., Pastorino R., A framework for risk assessment and decision-making strategies in dangerous good transportation, *J. Hazard. Mater.*, 93 (1), 1-15, 2002.
7. Zografos K.G., Androutsopoulos K.N., A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems, *Eur. J. Oper. Res.*, 152 (2), 507-519, 2004.
8. Dell'Olmo P., Gentili M., Scozzari A., On finding dissimilar Pareto-optimal paths, *Eur. J. Oper. Res.*, 162 (1), 70-82, 2005.
9. Erkut E., Alp O., Designing a road network for hazardous materials shipments, *Comput. Oper. Res.*, 34 (5), 1389-1405, 2007.
10. Sadjadi S.J., An application of efficient frontier in transportation of hazardous materials, *Computers & Industrial Engineering*, 53 (2), 357-360, 2007.
11. Carotenuto P., Giordani S., Ricciardelli S., Rismondo S., A tabu search approach for scheduling hazmat shipments, *Comput. Oper. Res.*, 34 (5), 1328-1350, 2007.
12. Brown D.F., Dunn W.E., Application of a quantitative risk assessment method to emergency response planning, *Comput. Oper. Res.*, 34 (5), 1243-1265, 2007.
13. Glickman T.S., Erkut E., Zschocke M.S., The cost and risk impacts of rerouting railroad shipments of hazardous materials, *Accident Analysis & Prevention*, 39 (5), 1015-1025, 2007.
14. Verma M., Verter V., Railroad transportation of dangerous goods: Population exposure to airborne toxins. *Comput. Oper. Res.*, 34 (5), 1287-1303, 2007.
15. Erkut E., Gzara F., Solving the hazmat transport network design problem. *Comput. Oper. Res.*, 35 (7), 2234-2247, 2008.
16. Androutsopoulos K.N., Zografos K.G., Solving the k-shortest path problem with time windows in a time varying network, *Operations Research Letters*, 36 (6), 692-695, 2008.
17. Dadkar Y., Jones D., Nozick L., Identifying geographically diverse routes for the transportation of hazardous materials, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44 (3), 333-349, 2008.
18. Bonvicini S., Spadoni G., A hazmat multi-commodity routing model satisfying risk criteria: a case study, *J. Loss Prevent. Proc.*, 21 (4), 345-358, 2008.
19. Verma M., A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14 (5), 300-308, 2009.
20. Bianco L., Caramia M., Giordani S., A bilevel flow model for hazmat transportation network design, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17 (2), 175-196, 2009.
21. Androutsopoulos K.N., Zografos K.G., Solving the bicriterion routing and scheduling problem for hazardous materials distribution, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18 (5), 713-726, 2010.

22. Verma M., Railroad transportation of dangerous goods: A conditional exposure approach to minimize transport risk, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19 (5), 790-802, 2011.
23. Ma H., Cheang B., Lim A., Zhang L., Zhu Y., An investigation into the vehicle routing problem with time windows and link capacity constraints, *Omega*, 40 (3), 336-347, 2012.
24. Samanlıoğlu F., A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem, *Eur. J. Oper. Res.*, 226 (2), 332-340, 2013.
25. Pradhananga R., Taniguchi E., Yamada T., and Qureshi A. G., Bi-objective decision support system for routing and scheduling of hazardous materials, *Socio-Econ. Plan. Sci.*, 48 (2), 135-148, 2014.
26. Saat M.R., Werth C.J., Schaeffer D., Yoon H., Barkan C.P., Environmental risk analysis of hazardous material rail transportation, *J. Hazard. Mater.*, 264, 560-569, 2014.
27. Bronfman A., Marianov V., Paredes-Belmar G., Lüer-Villagra A., The maximin HAZMAT routing problem, *Eur. J. Oper. Res.*, 241 (1), 15-27, 2015.
28. Siddiqui A.W., Verma M., A bi-objective approach to routing and scheduling maritime transportation of crude oil, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, 65-78, 2015.
29. Karabulut S., Öcalır Akünal E.V., Geographical information system based environmental risk analysis for road transportation of hazmats, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (3), 351-359, 2015.
30. Romero N., Nozick L.K., Xu N., Hazmat facility location and routing analysis with explicit consideration of equity using the Gini coefficient, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 165-181, 2016.
31. Pamučar D., Ljubojević S., Kostadinović D., Đorović B., Cost and risk aggregation in multi-objective route planning for hazardous materials transportation- A neuro-fuzzy and artificial bee colony approach, *Expert Syst. Appl.*, 65, 1-15, 2016.
32. Landucci G., Antonioni G., Tugnoli A., Bonvicini S., Molag M., Cozzani V., HazMat transportation risk assessment: A revisit in the perspective of the Viareggio LPG accident, *J. Loss Prevent. Proc.*, 49, 36-46, 2017.
33. Torretta V., Rada E.C., Schiavon M., Viotti P., Decision support systems for assessing risks involved in transporting hazardous materials: a review, *Saf. Sci.*, 92, 1-9, 2017.
34. Taslimi M., Batt R., Kwon, C., A comprehensive modeling framework for hazmat network design, hazmat response team location, and equity of risk, *Comput. Oper. Res.*, 79, 119-130, 2017.
35. Kumar A., Roy D., Verter V., Sharma D., Integrated fleet mix and routing decision for hazmat transportation: A developing country perspective, *Eur. J. Oper. Res.*, 264, 225-238, 2018.
36. Bubbico R., Di Cave S., Mazzarotta B., Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a GIS approach, *J. Loss Prevent. Proc.*, 17 (6), 483-488, 2004.
37. Bubbico R., Maschio G., Mazzarotta B., Milazzo M.F., Parisi E., Risk management of road and rail transport of hazardous materials in Sicily, *J. Loss Prevent. Proc.*, 19 (1), 32-38, 2006.
38. Verma M., Verter V., A lead-time based approach for planning rail-truck intermodal transportation of dangerous goods, *Eur. J. Oper. Res.*, 202 (3), 696-706, 2010.
39. Reniers G. L., De Jongh K., Gorrens B., Lauwers D., Van Leest M., Witlox F., Transportation Risk ANalysis tool for hazardous Substances (TRANS)-A user-friendly, semi-quantitative multi-mode hazmat transport route safety risk estimation methodology for Flanders, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15 (8), 489-496, 2010.
40. Elaldı P., Intermodal transportation of hazardous materials with supplier selection: Application in Turkey, Master's Thesis, The Graduate School of Engineering and Science of Bilkent University, Ankara, 2011.
41. Xie Y., Lu W., Wang W., Quadrioglio L., A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation, *Journal of Hazardous Materials*, 227, 135-141, 2012.
42. Verma M., Verter V., Zufferey N., A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48 (1), 132-149, 2012.
43. Reniers G., Dullaert W., A method to assess multimodal Hazmat transport security vulnerabilities: Hazmat transport SVA. *Transport Policy*, 28, 103-113, 2013.
44. Jiang Y., Zhang X., Rong Y., Zhang Z., A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation based on multi-commodity flow model, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 138, 791-799, 2014.
45. Küçük Ö., Tehlikeli Maddelerin Taşınmasında Çok Tipli Bir Model Önerisi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Kara Harp Okulu, Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
46. Assadipour G., Ke G.Y., Verma M., Planning and managing intermodal transportation of hazardous materials with capacity selection and congestion, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 76, 45-57, 2015.
47. Assadipour G., Ke G.Y., Verma M., A toll-based bi-level programming approach to managing hazardous materials shipments over an intermodal transportation network, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 208-221, 2016.
48. Vaezi A., Verma M., Railroad transportation of crude oil in Canada: Developing long-term forecasts, and evaluating the impact of proposed pipeline projects, *Journal of Transport Geography*, 69, 98-111, 2018.

49. Yavuz S., Akaryakıt lojistiğinde demiryolu bir seçenek değil zorunluluk. <http://www.lojistikhatti.com/haber/2019/10/akaryakit-lojistikinde-demiryolu-bir-secenek-degil-zorunluluk>. Yayın tarihi Ekim 22, 2019. Erişim tarihi: Mart 15, 2020.
50. TCDD, Lojistik Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2017.
51. Siddiqui A., Verma M., An expected consequence approach to route choice in the maritime transportation of crude oil, *Risk Analysis*, 33 (11), 2041-2055, 2013.
52. T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara, 2017.
53. EK, https://personel.omu.edu.tr/tr/asli.calis/dosyalar_