TEHLİKELİ MADDE TAŞIMA GÜZERGAHLARININ RİSK ANALİZİ YÖNTEMLERİ VE CBS ARAÇLARI YARDIMIYLA BELİRLENMESİ[2]

Burçin Bozkaya[2], Ronay Ak[3]

[2]Sabancı Üniversitesi, Yönetim Bilimleri Fakültesi, bbozkaya@sabanciuniv.edu
[3]İstanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Müh. Bölümü, akr@itu.edu.tr

ÖZET

Tehlikeli madde taşımacılığı, içerdiği tehlikeler nedeniyle bir büyük metropolde yaşayan halk üzerinde belirli bir risk oluşturmaktadır. Ne kadar önlem alınsa da tehlikeli madde taşınması esnasında engellenemeyen kazalar olmakta ve bu kazalarda binlerce, hatta on binlerce insan olumsuz etkilenebilmektedir. Söz konusu kazalar düşük olasılıklı ama sonuçları ağır olabilecek türde kazalar olduğundan kamuoyunun dikkatini fazlasıyla çekebilmektedir. Bu tür kazaların gerçekleşme olasılığını en aza indirgemek veya gerçekleştiğinde potansiyel sonuçlarını en az düzeye çekebilmek için literatürde çeşitli risk ölçüm yöntemleri ve bu yöntemler aracılığı ile en az risk ile taşıma yapmak için güzergah belirlenmesine yardımcı olacak sistemler geliştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, literatürde mevcut çeşitli risk ölçüm yöntemlerini ve bu yöntemlerin güzergâh belirlemede ne şekilde kullanıldığını incelemek ve Türkiye dâhilinde bir büyük metropolün ve bu metropolde yaşayan nüfusun tehlikeli madde taşınması esnasında maruz kaldığı risklerin sayısal ölçümünü yapabilmektedir. Bunun sonucunda ortaya çıkacak bulgulara dayanarak CBS-tabanlı bir karar destek sistemi (KDS) aracılığıyla karar vericilerin ölçülebilen risk değerlerini dikkate alarak güzergâh belirleyebilmesi hedeflenmiştir. ArcGIS tabanlı geliştirilen sistem ve bu sistem üzerinde çalışan Network Analyst eklentisi yardımıyla, karar verici sadece en az riskli güzergahı bulmakla kalmayıp, bu güzergah üzerinde hareket eden bir aracın hareketini simüle edebilmekte, araç ilerledikçe etrafına yaydığı riski görselleştirebilmekte ve ayrıca çeşitli istatistiksel verileri uygun grafiklerle görüntüleyebilmektedir. Bu sayede karar vericinin nakliye firmalarına ait araçların uygun güzergâhları kullanmasını teşvik edecek bilgileri elde etmesi mümkün olacak ve bu güzergâhların kullanılmasıyla da şehir halkı üzerindeki riskin gereksiz seviyelere çıkması engellenebilecektir.

Anahtar Sözcükler: Tehlikeli madde, risk yönetimi, karar destek sistemi, coğrafi bilgi sistemi

ABSTRACT

USING GIS AND RISK ANALYSIS TECHNIQUES TO DETERMINE HAZARDOUS MATERIALS TRANSPORTATION ROUTES

Hazardous materials (hazmat) transportation, due to its nature, exposes certain risks to the population that resides in a large metropolitan city. Occasional accidents do happen and these may have negative impact on thousands of people. These accidents are usually low-probability events, but due to the possibility of high consequences, they attract a lot of public attention. There exist many studies in the literature on hazardous materials transportation risk assessment techniques, which are aimed at determining minimum-risk transportation routes and minimizing potential consequences of such accidents. In this study, we review these techniques and how they are used in hazmat transportation, and we use our findings to assess risk exposure on residents of a large metropolitan city in Turkey. The result of this analysis is a GIS-based decision support system that allows decision makers to determine transportation routes based on measurable risk values. The system is developed on the ArcGIS software platform and using its Network Analyst extension. A decision maker can use this system to find a minimum-risk path on the street network, animate movements of a shipment truck along this path, visualize the amount of risk exposed on the immediate surroundings, and display a chart of various risk measures. Using these tools, the decision maker can gather enough information to encourage transportation companies to use one particular route and hence prevent local population from being exposed to unnecessary levels of risk.

Keywords: Hazardous materials, risk assessment, decision support system, geographic information system

1. GİRİŞ

Tehlikeli madde, insana, çevreye ve mala zarar verme yetisine sahip madde ya da malzeme olarak tanımlanmaktadır (Erkut vd., 2005). Birleşmiş Milletler, tehlikeli maddeleri fiziksel, kimyasal ve nükleer özelliklerine göre dokuz sınıfa ayırmaktadır: patlayıcılar, sıkıştırılmış gazlar, parlayıcı ve yanıcı likitler, parlayıcı ve yanıcı katılar, oksitleniciler, zehirli maddeler, radyoaktif maddeler, aşındırıcı likitler ve tehlikeli madde atığı benzeri muhtelif tehlikeli maddeler (Erkut vd., 2005). Bu maddelerin taşınması esnasında vahim sonuçları olan kazalar meydana gelebilmekte ve bundan sadece kaza

[2] Bu çalışma, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Projem İstanbul programı kapsamında kısmen desteklenmiştir.

bölgesindeki insanlar değil, doğal ve ekonomik değerler de etkilenebilmektedir. Dolayısıyla bu maddelerin doğru şekilde taşınması hayati önem taşıyan bir konudur.

Gelişmiş ülkelerde tehlikeli madde taşımacılığı, endüstriyel bir ekonominin varlığı için gereklidir (Frank vd., 2000). Raporlar ve istatistiksel hesaplamalar, dünya çapında yılda dört milyar ton tehlikeli madde taşımacılığı yapıldığını göstermektedir (Zografos vd. 2004). Endüstriyel ekonomideki öneminin dışında, tehlikeli madde taşımacılığı, insan ve çevre güvenliği konusu ile de yakından alakalıdır. Her ne kadar tehlikeli madde taşıyan araçların yaptığı kazalar diğer araç kazalarına nazaran daha az sıklıkta olsalar da, sonuçları çok büyük zararlar doğurabilmektedir. Diğer bir ifadeyle, tehlikeli madde kazaları, meydana gelme olasılığı düşük ancak sonuçları büyük türde kazalardır. Bu özelliğinden dolayı da tehlikeli madde taşımacılığı belli riskler içermektedir.

Taşıma problemleri yöneylem araştırmasında yoğun ilgi gören bir uygulama alanıdır. Birçok taşıma probleminde maliyet anahtar rol oynamakta ve maliyetin enazlaması hedeflenmektedir. Yani taşınan madde, en az maliyetle kaynağından hedefine ulaştırılmak istenmektedir (Erkut vd., 1998). Bunun için de genellikle taşıyıcılar en kısa yolu veren güzergâhı seçmektedirler. Ancak, tehlikeli madde taşıma probleminde tek amaç düşük maliyet olmamalı, başta insanlar olmak üzere, çevreye ve ekonomik varlıklara verilebilecek potansiyel zararların da göz önüne alınarak taşıma yapılması söz konusu olmalıdır. Bunun için de, tehlikeli madde taşıma problemi özelinde amacımız en az maliyetli güzergâhlara ek olarak riski enazlayacak taşıma güzergâhlarını da bulmak olmalıdır. Buradan yola çıkarak, tehlikeli madde taşıma problemlerinin, risk faktöründen kaynaklı olarak ve çok amaçlı eniyileme mantığı ile diğer taşıma problemlerinden ayrıldığı söylenebilir.

Bu çalışmada, özellikle nüfus ve trafik yoğunluğunun fazla olduğu kentsel bölgeler için tehlikeli madde taşıma riskini enküçükleyecek bir model sunulmaktadır. Bu model daha sonra ArcGIS Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) platform ve araçlarının sunduğu imkanlardan faydalanılarak bir Karar Destek Sistemi (KDS)'ne dönüştürülmüştür. Bu KDS'ni kullanan bir analist veya karar verici, iki nokta arasında en az riskli güzergahları belirleyebilmekte, herhangi bir güzergah üzerinde hareket edecek aracın hareketini zamana bağlı olarak gözlemleyebilmekte, bu hareket esnasında aracın etrafa yaydığı riskleri görselleştirebilmekte ve çeşitli risk ölçütlerini grafiklerle görüntüleyebilmektedir. Böylece tehlikeli maddeyi en az maliyetli veya en kısa rotadan göndermenin bir adım ötesinde konunun risk boyutu da dikkate alınabilmektedir.

Bu çalışmanın aşağıdaki bölümlerinden Bölüm 2'de, tehlikeli madde taşımacılığı ile ilgili günümüze kadar yapılan bazı önemli çalışmalardan bahsedilmektedir. Bölüm 3'te, önerilen risk ölçüm modeli yer almaktadır. Bölüm 4'te, önerilen model ve literatürdeki diğer modeller kullanılarak, İstanbul içerisinde tehlikeli madde taşıma riskini enküçükleyecek alternatif taşıma güzergâhları oluşturulmaktadır. Sonuç bölümünde ise genel bir değerlendirme yer almaktadır.

2. GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

Risk hesaplamanın birçok yolu vardır. En genel bilinen risk hesaplama yöntemi, istenmeyen bir olayın meydana gelme olasılığı ile bu olayın sonucunun çarpılmasıdır. Tehlikeli madde taşıma problemleri ile ilgili bugüne dek yapılan çalışmalar da taşıma sırasında ortaya çıkan riskin benzer şekilde hesaplanmasını ve eniyilenecek rotaların bulunmasını amaçlamışlardır. Örneğin Verter vd., 2001 yılında yaptıkları çalışmada, Kanada'nın Quebec ve Ontario eyaletleri arasında, dört farklı tehlikeli madde türü için (benzin, fuel-oil, petrol ve alkol), ArcView 3.1 CBS yazılımını kullanarak bir risk hesaplama modeli geliştirmişlerdir. Bu dört madde için de en kısa yol, en az riskli yol, en az insanın riske maruz kalacağı yol ve en az kaza olasılığına sahip yol kriterlerine göre araçların gideceği toplam yol uzunlukları ve o yolun çevresinde etkilenecek insan sayısını ayrı ayrı hesaplamışlardır.

Tehlikeli madde taşımacılığı ile ilgili yapılan çalışmaların birçoğunda Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılmıştır. CBS, uygulamaların hem görselleştirilmesine hem de geniş alanlarda uygulama yapılmasına imkân tanımaktadır. Zhang vd., 2000 yılında yaptıkları çalışmada, hava ile yayılan amonyak ve klor gibi tehlikeli maddelerin yayılmasını Gauss Plume modeli kullanarak modellemişlerdir. İstenmeyen olayın meydana gelme olasılığını, maddenin yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak modellemişler ve bu matematiksel fonksiyonu bir CBS'den yararlanarak nüfus yoğunluğu ile birleştirip risk hesaplamışlardır.

Literatürde tehlikeli madde atıklarının taşınması ve rotalanması ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Alamur vd. 2007 yılında tehlikeli madde atık işleme merkezlerinin nereye ve hangi teknoloji ile kurulacağı, atık işlemeden kalan ve geri dönüşü olmayan son çıktının imha edileceği merkezlerin nereye kurulacağı, tehlikeli madde atıklarının işleme merkezlerine ve son imha merkezlerine hangi rotalar üzerinden taşınacağı sorularına cevap arayan bir çalışma

yapmışlardır. Toplam riski ve toplam maliyeti enküçüklemeyi hedefleyen bir çok-amaçlı tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Toplam riski hesaplarken ihtiyaç duydukları nüfus yoğunluğu verisini ArcView 3.1 CBS yazılımı yardımıyla hesaplamışlardır.

Bahsi geçen çalışmalar, bir araç bir yol segmenti üzerinde ilerlerken, ilerleme süresinin yol etrafındaki nüfusu nasıl etkilediğini dikkate almamaktadır. Çünkü bu modeller genellikle şehirlerarası tehlikeli madde taşımacılığına yönelik geliştirilmiş ve ortalama araç hız değerleri üzerinden hesaplama yapmaktadır. Oysa trafik yoğunluğunun yüksek olduğu kalabalık kentlerde, bu sürenin artmasıyla birlikte maruz kalınan riskin de arttığını söylemek yanlış olmaz. Ayrıca İstanbul gibi kalabalık metropollerde ekonomik faaliyetlerin yoğunluğu nedeniyle ekonomik değeri yüksek iş merkezi, gökdelen, alışveriş merkezi gibi tesislerin de bu nedenle daha yüksek risklere maruz kaldığı bir gerçektir. Bu nedenle önerdiğimiz modelde hem aracın bir yol segmentinde ilerleme süresi hem de bu sırada taşınan maddenin türüne bağlı olarak oluşan tehlike çemberi içerisine düşen insan sayısı dikkate alınarak risk modellenmesi yapılmıştır. İstanbul gibi büyük şehir şartlarına daha uygun düşeceğini düşündüğümüz bu yeni risk modelinin ayrıntıları aşağıda yer almaktadır.

3. ÖNERİLEN RİSK MODELİ

Tehlikeli madde taşıyan bir araç, yolda ilerlerken çevresinde bir tehlike çemberi oluşturur (Erkut ve Verter, 1998). Bu tehlike çemberinin yarıçapı taşınan maddenin türüne göre değişmektedir. Araç trafiğin belli bir hızda aktığı bir segment üzerinde ilerlerken hızı ile ters orantılı olarak değişen sürelerle segmenti geçecek, eğer yoğunluk söz konusu ise tehlike çemberi içine düşen insanlar daha uzun süre riske maruz kalacaklardır. Önerilen modelde hız ve süre faktörünü bu şekilde göz önünde bulunduran bir risk hesabı yer almaktadır. Modelin, özellikle İstanbul gibi hem trafiğin hem de nüfusun yoğun olduğu şehirlerde tehlikeli madde taşıma riskinin hesaplanmasına yönelik literatürde yer alan diğer modellere nazaran daha gerçekçi olduğu söylenebilir. Önerilen risk modeline "zaman etkili risk modeli" adı verilmiştir ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$ZER_{im} = (L_i \div V_i) \times c_{im} \tag{1}$$

V_i : i yol segmenti boyunca ortalama araç hızı
L_i : i yol segmentinin uzunluğu
c_{im} : i yol segmenti etrafında, yarıçapı m tehlikeli madde türüne bağlı oluşan tehlike çemberine düşen nüfus

Zaman etkili risk modeli kullanılarak ve CBS araçlarından da yararlanılarak bir yol segmentinin risk değeri aşağıdaki adımlar izlenerek hesaplanmaktadır:

1. Her bina etrafına bir tehlike çemberi çizilir. CBS ortamında binalar noktayla temsil edilmektedir.
2. Bir bina için çizilen tehlike çemberi yol segmentleri ile kesiştirilir ve o bina üzerinde tehlike oluşturan segmentler bulunur.
3. Kesişim sonucu ortaya çıkan her yol segmenti için, o yol segmentinin etkilediği binanın nüfusu kullanılarak formül (1)'deki şekilde risk hesaplanır ve yol segmentinin risk değerine birikimli olarak eklenir.
4. Her bina için 2. ve 3. işlemler tekrarlanır.

Bu modele göre risk hesaplanmasında kullanılan hız değerleri gerçek hayatı olabildiğince doğru yansıtabilmek için mevcut trafik yoğunlukları baz alınarak seçilmeli ve kullanılmalıdır. Ancak bu çalışmada, güncel trafik yoğunluk değerleri kullanılmamış, onun yerine yol türüne bağlı olarak tehlikeli madde taşıyan kamyonları için geçerli olabilecek hız değerleri kullanılmıştır. Yol türlerine göre hız değerleri Tablo 1'de yer almaktadır.

Yerleşim Yeri	Yol Türü	Araç Hızı (km/sa)
Şehir içi	Bulvar	70
Şehir içi	Bağlantı Yolu	50
Şehir içi	Cadde	50
Şehir içi	Otoban	80
Şehir içi	Sokak	30

Tablo 1: Yol Türlerine Göre Araç Hızları

4. KARAR DESTEK SİSTEMİ

Bu bölümde, literatürde yer alan (Erkut vd., 1998) beş farklı risk modelinin yanı sıra önerdiğimiz zaman etkili risk modeli de kullanılarak, İstanbul karayolu ağı üzerinde seçilen iki nokta arasında tehlikeli madde taşıma güzergâhlarının oluşturulabildiği bir karar destek sistemi anlatılmaktadır. Uygulaması yapılan risk modelleri şunlardır:

- En düşük zaman etkili risk
- En kısa yol
- En az riske maruz kalan nüfus
- En düşük toplumsal risk
- En düşük DoT riski
- En düşük yayılımlı kaza olasılığı

Karar Destek Sistemi uygulamasının geliştirilmesinde bir CBS yazılım platformu olan ArcInfo 9.2 kullanılmıştır. Yazılım, coğrafi verilerin görselleştirilmesi, analiz edilmesi ve üretilmesine imkân sağlamaktadır. Aynı zamanda, ArcInfo 9.2‘nin ana modüllerinden biri olan ArcMap sayesinde veriler harita üzerine birer katman şeklinde aktarılarak görselleştirilmiş ve yine ArcMap ortamında VBA (Visual Basic for Applications) makroları yazarak risk modellerinin hesaplamaları yapılmıştır.

Karar Destek Sistemi, iki temel ihtiyaca cevap vermektedir: (1)Veri hazırlama ve (2) Analiz ve Görselleştirme

4.1. Veri Hazırlama

Veri hazırlama işlemleri, uygulamada kullanılan tüm coğrafi verinin bir CBS veritabanında toplanması, gerekli katmanların oluşturulması, tüm yol segmentleri için yukarıda belirtilen risk modellerine dair risk değerlerinin hesaplanması ve rota analizi için gerekli ulaşım ağının oluşturulması adımlarından oluşmaktadır.

Tehlikeli madde taşımacılığında risk hesaplanabilmesi için yeterli ve doğru veriye ihtiyaç vardır. Bu çalışma kapsamında kullandığımız veriler aşağıda yer almaktadır:

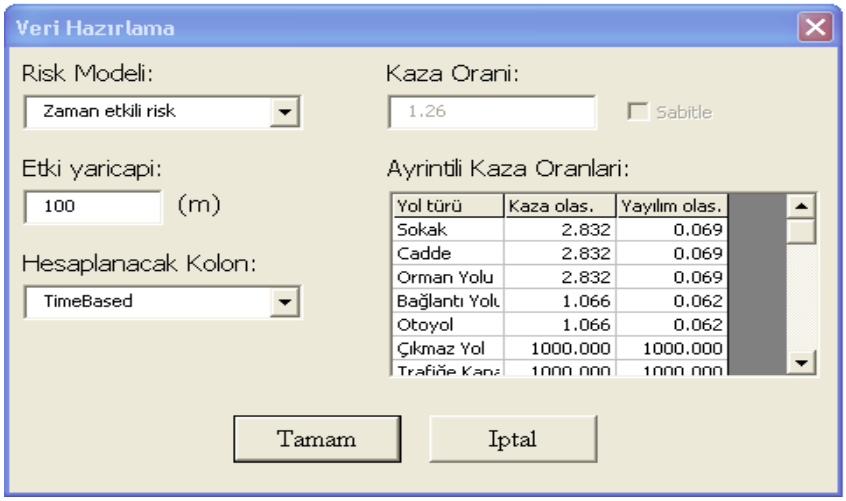
- İstanbul şehri ulaşım ağının (sokak, cadde, bulvar ve otoyolların) coğrafi formatta sayısal veritabanı
- İstanbul şehrinin bina veritabanı (noktasal coğrafi veri katmanı)
- İstanbul şehrinin ilçe, mahalle veya bina bazında nüfus verisi
- Yol türlerine göre normal kamyon veya tehlikeli madde taşıyan kamyon kaza sayısı
- Tehlikeli madde taşıyan kamyonların belirli bir zaman aralığında (örneğin yıllık) belirli bir yol türü üzerinde aldıkları toplam mesafe (km)
- Bir kaza olduğunda tehlikeli madde yayılma olasılığı
- Bir kaza olduğunda tehlikeli madde türüne göre maddenin yayılması neticesinde etki edeceği alanın yarıçapı

Yol türlerine göre tehlikeli madde yayılma olasılıkları Tablo 2’de verilmiştir. Bu değerler Harwood vd.’nin 1993’teki çalışmalarından alınmıştır.

Yerleşim Yeri	Yol Türü	Yayılımlı Kaza Olasılığı
Şehir içi	Bulvar	0.062
Şehir içi	Bağlantı Yolu	0.062
Şehir içi	Cadde	0.069
Şehir içi	Otoban	0.062
Şehir içi	Sokak	0.069

Tablo 2: Yol Türlerine Göre Yayılımlı Kaza Olasılıkları

Geliştirilen Karar Destek Sistemi’nin veri hazırlama anlamında da kullanıcıya yardımcı olması amacıyla oluşturulan veri hazırlama formu Şekil 1’de gösterilmektedir. Bu form ile kullanıcının altı ayrı risk modeli arasından seçeceği modele göre risk değerlerinin hesaplaması sağlanmaktadır. Formda ayrıca bazı risk modellerinde kullanılan yol türüne bağlı kaza oranları da yer almaktadır.



Şekil 1: Veri Hazırlama Arayüzü

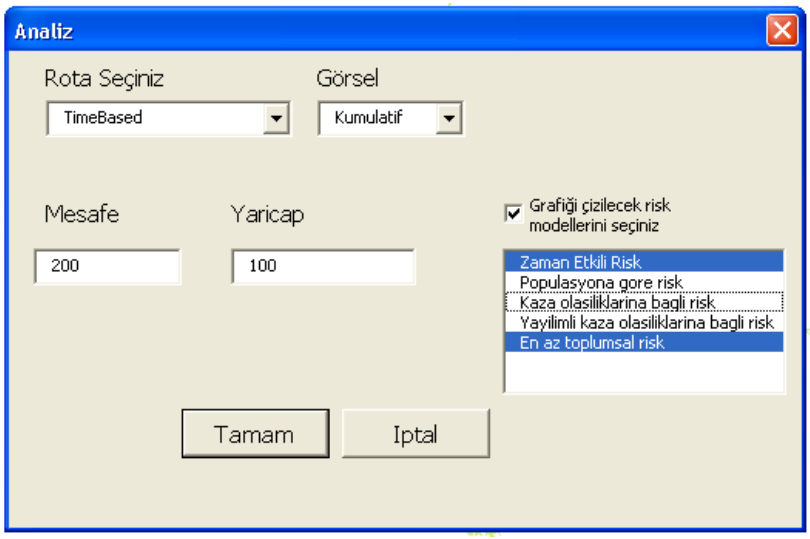
Kullanıcı, veri hazırlama formunun sol tarafında yer alan girdileri sağladıktan sonra Karar Destek Sistemi, seçilen modeli ve tehlikeli madde etki yarıçapını dikkate alarak her yol segmenti için risk değerini hesaplamakta ve bu değeri yol veri tablosunda bulunan ve kullanıcının seçerek belirttiği kolon altında kaydetmektedir.

4.2. Analiz ve Görselleştirme

Karar Destek Sistemi'nin bu kısmında, veri hazırlama bölümünde hesaplanan risk değerleri kullanılarak, seçilen iki nokta arasında istenilen risk ölçütüne (impedans) göre rotalar çizdirilebilmekte, bu rotalar üzerinde araç ilerlerken etrafında oluşan tehlike çemberlerinin hareketi animasyon olarak gösterilebilmekte, ayrıca araç rotası üzerindeki her yol segmentinin seçilen risk ölçütlerine göre risk değerleri birikimli veya birikimsiz grafik olarak ekranda görselleştirilebilmektedir.

Rota çizmek için, farklı risk modelleri kullanılarak hesaplanan risk değerlerinin, ArcGIS Network Analyst eklentisi aracılığıyla "network" veri seti tanımına birer "impedans" olarak eklenmesi gerekmektedir. Daha sonra Network Analyst içerisinde bulunan "New Route" komutu yardımıyla harita üzerinde seçilen iki nokta arasında, bütün impedans ölçütleri için farklı rotalar oluşturulabilmektedir. Bu rotalar oluşturulurken Network Analyst arayüzü içerisinde bulunan katman özellikleri penceresindeki "Accumulation" sekmesi de kullanılmıştır. Bu sayede belirli bir risk impedans ölçütüne göre en kısa rota oluşturulurken, aynı rota üzerinde diğer impedans ölçütlerinin de birikimli risk değerlerini hesaplanabilmektedir. Oluşturulan her yeni rota ArcMap dokümanına bir katman olarak eklenmekte ve otomatik olarak görselleştirilmektedir.

Şekil 2'de görülen Analiz formu, rotalar çizildikten sonra görselleştirme ve animasyon yapabilmek için kullanılmaktadır. Form üzerindeki "Rota Seçiniz" kutusundan karar verici, üzerinde animasyon yapmak istediği rotayı seçebilmektedir. "Görsel" kutusu da animasyon gerçekleşirken, ekranda görünecek grafiğin nasıl çizileceği (birikimli veya birikimsiz) bilgisini içermektedir. "Mesafe" kutucuğu, rota üzerinde ilerleyen aracın etrafında görünecek tehlike çemberinin kaç metrede bir ekranda çizileceğini belirler. "Yarıçap" kutucuğu ise çizilecek çemberin yarıçapını belirlemektedir. Formun sağında yer alan listede ise animasyon esnasında grafikte yer alması istenen risk ölçütlerinden istenilenlerinin seçilmesine imkan tanınmaktadır.

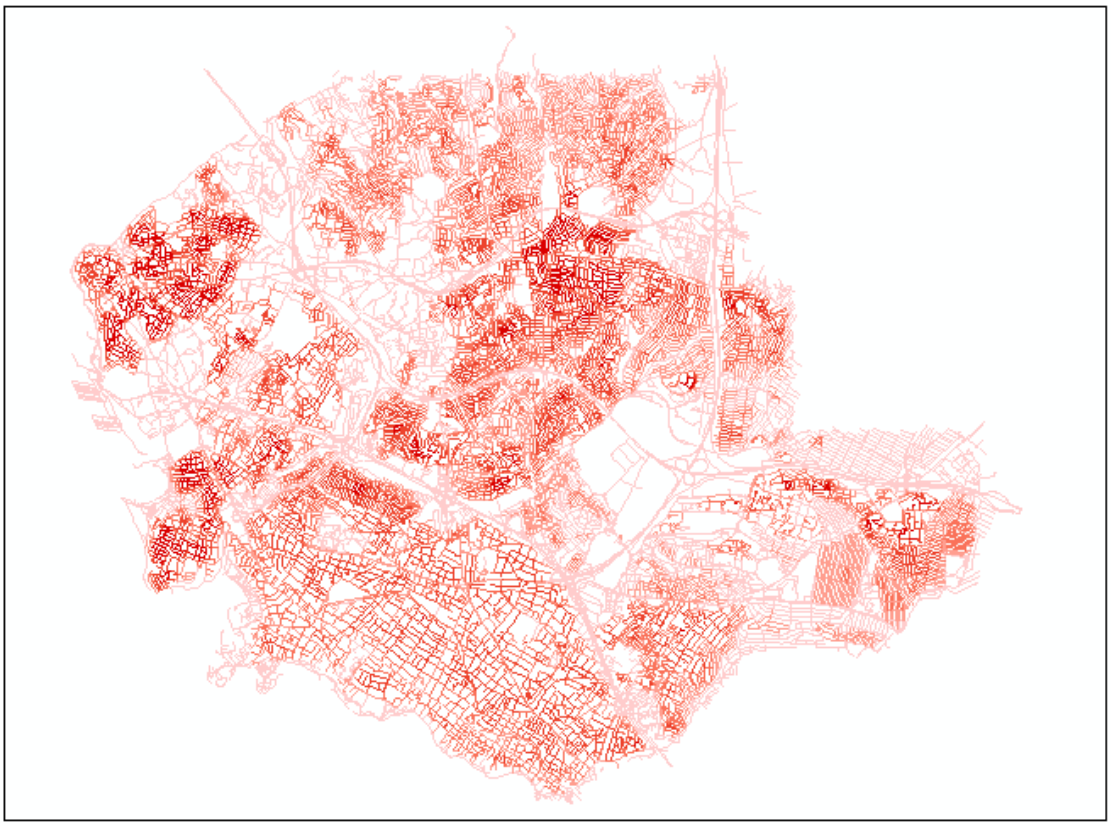


Şekil 2: Analiz Formu

Bütün bu girdiler analist veya karar verici tarafından sağlandıktan sonra "Tamam" komutunun verilmesiyle birlikte sistem seçilen rotanın zamana bağlı animasyonunu ekrana getirir.

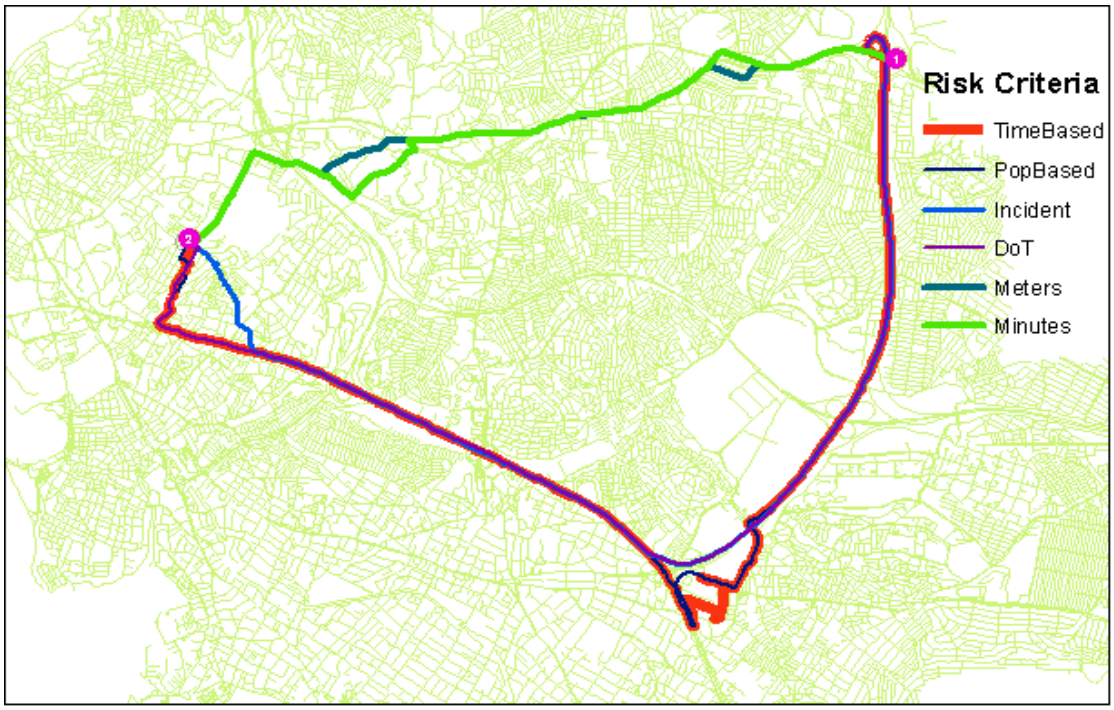
4.3. Kadıköy İlçesinde Bir Uygulama

Bu bölümde, yukarıda anlatılan Karar Destek Sistemi'nin İstanbul Kadıköy ilçesi için yapılan bir uygulaması yer almaktadır. Bu uygulama için öncelikle Veri Hazırlama formu kullanılarak bütün Kadıköy yol ağının her bir yol segmentinin 6 farklı risk hesaplama yöntemine göre risk değerleri hesaplanmış ve öznitelik tablosunda ilgili sütuna kaydedilmiştir. Bu hesaplamadan sonra, her bir yol segmenti üzerindeki risk değerleri "Layer Properties" penceresinde "Symbology" sekmesindeki "Quantities" özelliği kullanılarak yol uzunluğuna göre normalize edildikten sonra renklendirilerek harita üzerinde gösterilmiştir. Şekil 3'te gösterilen harita, Kadıköy yollarının, Zaman Etkili Risk Modeline göre normalize edilerek renklendirilmesi sonucu elde edilmiştir. Koyu renkli yollar riskin daha fazla olduğu segmentlerdir.



Şekil 3: Zaman Etkili Risk Modeline Göre İlçe Risk Yoğunluk Haritası

Daha sonra, bu risk değerleri Network Analyst aracılığı ile birer "impedans" olarak network veri setine eklenmiştir. Bunun ardından harita üzerinde biri başlangıç, diğeri de varış noktası olmak üzere iki nokta seçilmiştir. Bu iki nokta arasında, 6 farklı impedans ölçütü için rotalar oluşturulmuştur. Bir impedans ölçütüne göre rota oluşturulurken diğer impedans ölçütlerinin de o rota üzerindeki toplam risk değerleri "accumulation" özelliği kullanılarak hesaplanmıştır. Uygulama sonunda ortaya çıkan rotalar ve her bir rota üzerindeki risk değerleri aşağıda sırasıyla Şekil 4 ve Tablo 3'te gösterilmektedir.



Şekil 4: İki Nokta Arasında Farklı İmpedans Ölçütlerine Göre Oluşturulan Rotalar

Rota impedans kriteri	Zaman Etkili Risk	Mesafe (m)	Süre (min)	DoT Riski	Yayılımlı Kaza Riski	Riske Maruz Kalan Nüfus
En düşük zaman etkili risk	1085.98	16168	15.02	6856	1.579	18072
En kısa yol	4970.27	8145	10.16	18165	1.406	107103
En hızlı yol	4037.09	8556	9.99	14963	1.474	95463
En az DoT riski	1100.80	13859	11.30	6698	1.093	18674
En az yayılımlı kaza olasılığı	2171.58	13281	11.80	7288	1.073	37351
En az riske maruz kalan nüfus	1206.21	15575	13.88	7045	1.463	17130

Tablo 3: Oluşturulan Rotaların Risk Değerleri

Tablo 3'te En Kısa Yol ve En Hızlı Yol modellerinin en küçük değeri aldığı rotalara (yani en kısa ve en hızlı rotalar) baktığımızda bu rotaların zaman etkili risk değerlerinin göreceli olarak çok yüksek olduğunu görmekteyiz (aynı durum genel olarak diğer konvansiyonel risk modelleri için de söylenebilir). Yani taşıyıcı firmaların hemen her zaman kullandıkları güzergahların aslında taşıdıkları risk açısından belki de en tercih edilmemesi gereken güzergahlar olduğunu görmekteyiz. Bu, rota güzergahlarına karar veren makamlar için önemli bir bulgudur. Aslında zaman etkili risk modelinin bir güzergâh üzerinde düşük veya yüksek değerler alması, modelin yapısı gereği o güzergâh etrafındaki nüfusa ve o güzergâhta ilerlerken harcanacak zamana birlikte bağlıdır. Bu nedenle, Şekil 4'te seçilen iki noktayı birleştiren en kısa yol üzerinde Zaman Etkili Risk modeli en yüksek değerini almışsa, bu rotanın yüksek nüfuslu bir bölgeden geçtiği ya da bu rota üzerinde trafik sıkışıklığının fazla, dolayısıyla aracın harcadığı sürenin uzun olduğu söylenebilir.

Öte yandan, zaman etkili risk değerlerini enküçükleyen rotayı incelediğimizde bunun da en uzun mesafeli ve en uzun sürede tamamlanabilen bir güzergah olduğunu görebiliriz. Bunun da anlamı, sadece riski enküçükleyerek elde edilecek güzergahların taşıma maliyetler açısından cazip olamayacağı gerçeğidir. Burada asıl yapılması gereken, en düşük risk ve en kısa yol modelleri arasında bir orta yol bulacak modellerin işletilmesi ve güzergahların buna göre belirlenmesidir. Bu çalışma buna bir başlangıç oluşturması açısından faydalı olmuştur.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, anlatılan tüm risk modelleri ve bunlarla ilgili matematiksel formüllerin ve diğer tüm hesaplamaların ArcGIS coğrafi bilgi sistemi ortamında kodlanması sonucu hem veri düzenleme hem de analiz ve görselleştirme için kullanılabilecek araçlardan oluşan bir Karar Destek Sistemi oluşturulmuştur. Bu karar destek sistemini kullanarak bir büyük şehrin bir bölgesinde veya tamamında tehlike madde taşımacılığı rotalama ve risk analizi yapmak ve bir rota üzerindeki riski animasyon yoluyla görselleştirmek mümkündür.

Uygulamada sonucunda elde edilen ve Tablo 3'te yer alan değerler, başta da söylendiği gibi, genel olarak bilinen taşıma problemlerinin tehlikeli madde taşıma problemlerinden nasıl ayrıldığını göstermektedir. Bilinen taşıma problemlerinde amaç aracın en az maliyetle taşıma yapmasını sağlamaktır. Bunun için de taşıma güzergahı olarak, optimal çözümü veren yol seçilir. Bu güzergâh da genellikle en kısa yoldur. Ancak tehlikeli madde taşımacılığında en kısa yol en uygun çözüm olmayabilir. Risk faktörü, en uygun güzergâhı en az riske sahip rota olarak belirler. Ancak farklı risk modelleri için, en az riski veren rotalar da farklı olabileceğinden, hangi güzergâhın en uygun olacağı karar destek mantığı çerçevesinde karar verici tarafından belirlenecektir.

KAYNAKLAR

ALAMUR, S.; KARA, B. Y. (2007) "A New Model for the Hazardous Waste Location-Routing Problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 34, (1406-1423).

ERKUT, E.; VERTER, V. (1998), "Modeling of Transport Risk for Hazardous Materials", *Operations Research*, Vol. 46, (625-642).

ERKUT, E.; TJANDRA, S.A.; VERTER, V. (2005). "Hazardous Materials Transportation".(Editor: BARNHART, C.; LAPORTE, D.), *Operations Research Handbook on Transportation* , (1-104).

FRANK, W. C.; THILL J-C.; BATTA R. (2000), "Spatial Decision Support System for Hazardous Material Truck Routing", *Transportation Research Part C*, Vol. 8, (337-359).

HARWOOD, D.W.; VINER, J.G.; RUSSEL, E.R. (1993), "Procedure for Developing Truck Accident and Release Rates for Hazmat Routing", Journal of Transportation Engineering, Vol. 119, (189-199).

VERTER, V.; KARA, B.Y. (2001) "A GIS-Based Framework for Hazardous Materials Transport Risk Assessment", *Risk Analysis*, Vol. 21, (1109-1120).

ZOGRAFOS, K.G; KONSTANTINOS, N.A. (2004), "A Heuristic Algorithm for Solving Hazardous Materials Distribution Problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 152, (507-519).