

İSTANBUL'DA İTFAİYE İSTASYONU YER SEÇİMİNDE RISK FAKTÖRÜNE DAYALI BİR ÇOKLU KAPSAMA YAKLAŞIMI*

Bülent ÇATAY

Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 34956, Tuzla, İstanbul
catay@sabanciuniv.edu

Geliş Tarihi: 9 Mart 2010; Kabul Ediliş Tarihi: 3 Mayıs 2011
Bu makale 2 kez düzeltilmek üzere 87 gün yazarda kalmıştır.

ÖZET

Acil müdahale gerektiren afet, kaza, hastalık, yangın ve benzeri her türlü durumda hizmete ihtiyaç duyan kişiye ve bölgeye ulaşma süresi can ve mal güvenliği açısından çok kritiktir. Dolayısıyla nüfus değişimlerine paralel olarak mevcut acil yardım ve itfaiye istasyonlarının yenilenmesi veya açılacak istasyonların yerlerinin etkin planlanması çok önemlidir. Özellikle yoğun nüfus ve trafik faktörüne sahip İstanbul gibi bir büyük şehirde bu planlamanın önemi daha da artmıştır. Bu çalışmada, İstanbul'daki itfaiye istasyonlarının yerlerinin seçimine yönelik risk faktörüne dayalı bir çoklu kapsama modeli sunulmaktadır. Bu modelde bölgelere, risk sınıflarına bağlı olarak farklı müdahale süreleri içinde iki veya üç farklı itfaiye istasyonundan müdahale edilmesi söz konusudur. Makalede, önce İstanbul'da yeni açılacak itfaiye istasyonlarının yerlerini belirlemek üzere bu modelin eniyi çözümleri elde edilmekte; daha sonra eniyi çözümü elde etmenin zorluğu bir deneysel çalışmayla incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enbüyük kapsama, itfaiye istasyonu yer seçimi, çoklu kapsama, acil hizmet

A RISK-BASED MULTIPLE COVERAGE MODEL FOR LOCATING FIRE STATIONS IN İSTANBUL

ABSTRACT

The locations of emergency medical service (EMS) and fire stations are vital to achieve an effective and safe emergency response system. As a community grows, it may become necessary to replace existing emergency stations or add more stations to satisfy the increasing public demands for emergency responses. In recent years, locating EMS and fire stations has gained more importance in a city with growing population and heavy traffic conditions such as İstanbul. In this paper, we address the siting of fire stations in İstanbul using a risk-based multiple coverage model. In this model, each demand point is required to be serviced from two or three stations within the desired time limits identified for different risk categories. We first solve this model optimally to determine the locations of the new fire stations in İstanbul; then we conduct an experimental study to elaborate on the complexity of the model.

Keywords: Maximal covering, siting of fire stations, multiple covering, emergency service

* Bu çalışma İstanbul Büyükşehir Belediyesi Proje İstanbul çerçevesinde desteklenmiştir.

1. GİRİŞ

Acil müdahale gerektiren afet, kaza, hastalık, yangın ve benzeri her türlü durumda, hizmete ihtiyaç duyan kişiye ve bölgeye ulaşma süresi can ve mal güvenliği açısından çok kritiktir. Acil müdahale hizmetlerinin etkin planlaması sakatlık ve ölüm oranlarını azaltacağı gibi ekonomik kayıpların da önüne geçilmesine olanak tanır. Nüfus değişimlerine paralel olarak mevcut itfaiye istasyonlarının yenilenmesi veya yeni istasyonların açılması durumunda doğru yerlerin belirlenmesi olası bir acil çağrı durumunda müdahale süresini azaltacaktır. Hızlı nüfus artışı ve yoğun trafik özelliklerinin yanı sıra yüksek deprem riskine sahip İstanbul gibi geniş coğrafyaya yayılmış bir şehirde itfaiye istasyonlarının yerlerinin seçimi daha iyi bir hizmet sağlayabilmek açısından önemli ve öncelikli bir yer tutar.

İtfaiye istasyonların kurulması ciddi yatırımlar gerektirdiği için, uzun süreli hizmet sağlamak üzere planlamaları önemlidir. En uygun istasyon yerleri ihtiyaçlara ve belediyenin sağlamayı hedeflediği hizmet seviyesine bağlıdır. Hizmet seviyesinden kasıt belirlenecek zaman sınırı içinde olay yerine müdahale edebilmektir. Bu çalışmada, tanımlanan müdahale süreleri içinde olay yerine intikal edilmesine olanak sağlayacak şekilde İstanbul'da açılacak yeni itfaiye istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İtfaiye Daire Başkanlığının koordinasyonda ilgili ölçütler ve kısıtlar belirlenmiş, gerekli veriler derlenmiş, risk faktörleri göz önünde bulundurularak matematik programlamaya dayalı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmaya ait kapsamlı bilgiler Çatay (2009)'da raporlanmıştır.

Bu makalede sunulan modelde, bölgelerin risk sınıflarına göre farklı müdahale süreleri içinde iki veya üç farklı istasyon tarafından müdahale edilmesi öngörülmüştür. Amaç, verilen istasyon sayısı kısıtı altında kapsanan bölge sayısının enbüyüklenmesi olarak belirlenmiştir. Geliştirilen model daha önce Çatay vd. (2008) tarafından önerilen Yedek Çift Kapsama Modeli'nin şehrin risk haritasını da göz önünde bulunduran daha genel bir formülasyonu

olarak düşünülebilir. İstanbul'da yeni açılacak itfaiye istasyonlarının yerlerini belirlemek üzere bu model önce IBM ILOG OPL Studio yazılımı ile CPLEX çözümü kullanarak çözülmekte; daha sonra farklı istasyon sayıları olması durumunda eniyi çözümü elde etmenin zorluğu bir deneysel çalışmayla incelenmektedir.

Makalenin devamı şu şekilde düzenlenmiştir: 2. bölümde ilgili literatür incelenmektedir. 3. bölümde problem tanımlanmakta, kullanılan veriler ve geliştirilen 0-1 tamsayılı doğrusal programlama modeli sunulmaktadır. 4. bölümde İstanbul'daki yeni açılacak itfaiye istasyonları için, optimal yerler belirlenmekte ve farklı istasyon sayıları için çözümün elde edilmesine yönelik deneysel çalışma sonuçları verilmektedir. Son bölümde ise sonuçlar irdelenmekte ve ileride geliştirilebilecek çalışmalar hakkında fikirler verilmektedir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Genel olarak literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğunun acil yardım istasyonlarının ve ambulansların planlanması üzerine yoğunlaştığı, itfaiye istasyonu yer seçimi problemlerinin oldukça az ele alındığı ve genelde bu konudaki makalelerin daha eski olduğu gözlenmektedir. Bundaki önemli etmen önerilen yaklaşım ve geliştirilen yöntemlerin her iki probleme de uygulanabileceği varsayımından kaynaklanmaktadır. Her ne kadar iki problem birbirine benziyor olsa da aralarında önemli farklar da bulunabilmektedir. Örneğin, bölgelerin risk faktörü itfaiye istasyonlarının planlamasında kritik rol oynar. Bunun yanında, itfaiye istasyonlarında acil yardım istasyonlarına göre daha farklı tipte ve sayıda araç ve teçhizat yer almaktadır. Ayrıca, acil yardım istasyonlarının yerlerini daha az çaba ve maliyetle değiştirmek mümkün iken itfaiye istasyonu açmak kayda değer bir yatırım gerektirmektedir. Dolayısıyla, çoğu zaman itfaiye istasyonlarının planlanmasında probleme özgü yaklaşım ve yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Buradaki literatür incelemesinde sadece itfaiye istasyonu yeri seçimi problemine yönelik çalışmalar ele alınmıştır. Acil yardım istasyonlarına dair çalış-

malarla ilgili geniş ve güncel bilgi için okur Brotcorne vd. (2003), Goldberg (2004) ve Çatay vd. (2008) çalışmalarını inceleyebilir.

İtfaiye istasyonu yer seçimine dair literatürdeki ilk çalışma Hogg (1968) tarafından İngiltere'deki Bristol şehri için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 1-9 arasında değişen farklı istasyon sayıları için optimal yerler belirlenerek toplam ulaşım süreleri incelenmiştir. İtfaiye istasyonları için yer seçimine ait daha sonra ortaya çıkan çalışmalar Toregas vd. (1971) tarafından önerilen *Küme Kapsama Modeli (KKM - Set Covering Location Model)* ve Church ve ReVelle (1974) tarafından sunulan *Enbüyük Kapsama Modeli (EKM - Maximal Covering Location Model)*'ni temel almışlardır. İlk modelin amacı tüm bölgeleri belirli bir hizmet seviyesinde kapsayacak en az sayıdaki istasyonu belirlemek iken ikinci model belirli bir istasyon sayısı kısıtı altında kapsanan bölge sayısını enbüyüklemeyi amaçlamaktadır. Plane ve Hendrick (1977) Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) Denver şehrinde, Schilling vd. (1980) yine ABD'de Baltimore şehrinde ve Schreuder (1981) Hollanda'da Rotterdam şehrinde itfaiye istasyonu yer seçimi problemi için KKM yaklaşımları kullanmışlardır. Schreuder (1981) risk faktörlerini göz önünde bulundurarak yüksek risk sınıftaki bölgelerin çift kapsanmasını içeren bir model önermiştir. Marianov ve Revelle (1992) EKM yaklaşımını olasılıklı olarak geliştirmişler ve her bölgeyi α -güvenilirlikte kapsayacak şekilde toplam kapsanan bölge sayısını enbüyükleyecek bir model önermişlerdir. Narasimhan vd. (1992), Yedek Çoklu EKM geliştirerek Lagrange gevşetmesine dayalı bir çözüm yöntemi önererek, gerek rassal problemler üzerinde gerekse gerçek bir itfaiye istasyonu yeri seçimi problemi kullanarak test etmişlerdir.

Badri vd. (1998) KKM'ye dayanan çok amaçlı modelleme yaklaşımı sunmuş ve Birleşik Arap Emirlikleri'nin Dubai şehrindeki itfaiye istasyonlarının yerlerini hedef programlama yöntemi kullanarak belirlemişlerdir. Çalışma, istasyonlardan hizmet noktalarına olan uzaklıkları ve ulaşım sürelerini, çeşitli teknik ve politik ölçütler ile maliyet unsurlarını içeren 11 stratejik amaç kullanmıştır. Liu vd. (2006),

Singapur'da yeni itfaiye istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi için yine çok amaçlı bir model sunarak coğrafi bilgi sistemleri ile karınca kolonisi eniyilemesi yöntemini bütünleşik olarak kullanmışlardır. Buradaki amaçlar tehlikeli madde taşımacılığında kullanılan ve mevcut istasyonlar tarafında kapsanmayan yolların kapsamasını enbüyüklemek, istasyonlar arasında uygun bir mesafe bırakmak ve 6 dakika içinde ulaşılabilir alanı enbüyüklemek olarak belirlenmiştir. Yakın zamanlarda, Chevalier vd. (2007), Belçika'daki itfaiye istasyonlarının konumlandırılmasının ve tahsisinin etkin bir şekilde idare edilmesi için bir karar destek sistemi önermişlerdir.

3. PROBLEMİN TANIMLANMASI VE ÖNERİLEN MODEL

İstanbul Büyükşehir Belediyesine (İBB) bağlı İtfaiye Destek Hizmetleri Müdürlüğü bünyesindeki Araştırma, Planlama, Koordinasyon (APK) Amirliği itfaiyenin elinde bulunan 15 yıllık istatistiksel değerler, tespit edilen dar sokaklar, hidrant sayıları, ulaşım zamanları, yapıların özellikleri, konut alanları, sanayi bölgeleri, turizm alanları, vs. gibi birçok kriteri göz önünde bulundurarak şehrin yangın risk haritasını güncellemektedir. Kurulacak itfaiye istasyonlarının sayısı ve yerleriyle personel, araç, gereç ve ekip özellikleri yangın risk analizleri temel alınarak planlanacaktır. Buna göre, "çok riskli," "riskli," "orta riskli" ve "az riskli" olmak üzere dört ana risk sınıfı tanımlanmıştır. Yangın olayını haber alan bir itfaiye ekibinin istasyondan ayrılmasından yangın yerine ulaşmasına kadar geçen süre ulaşım süresi olarak adlandırılmaktadır. Bölgeler, yer aldıkları risk sınıflarına göre farklı sayıda istasyon tarafından farklı sürelerde ulaşım gereksinimine sahiptir. Tanımlanan yangın risk sınıflarına bağlı olarak APK tarafından belirlenmiş olan ulaşım süreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'de görüldüğü üzere dört farklı müdahale söz konusudur. Bunlar 5, 8, 10 ve 15 dakika içinde ulaşılabilir yetenekleridir. Ayrıca, bölgelerin yer aldıkları risk sınıfına bağlı olarak iki veya üç itfaiye istasyonu tarafından kapsanması gerekmektedir. Buna göre, verilen istasyon sayısı kısıtı altında kapsanan

Tablo 1. Bölgelerin Risk Sınıfına Göre Dakika Cinsinden Ulaşım Süreleri

| Risk Sınıfı | Risk Puanı | 1. İstasyon Ulaşım Süresi | 2. İstasyon Ulaşım Süresi | 3. İstasyon Ulaşım Süresi |
|-----------------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Çok Riskli (1) | 35-50 | 5 | 5 | 8 |
| Riskli (2) | 20-34 | 5 | 8 | 10 |
| Orta Riskli (3) | 10-19 | 8 | 10 | - |
| Az Riskli (4) | 0-9 | 10 | 15 | - |

bölge sayısını enbüyüklemeyi amaçlayan bir 0–1 tamsayı doğrusal programlama modeli önerilmiş ve Risk Faktörüne Dayalı Çoklu Enbüyük Kapsama Modeli (RFÇEKM) olarak adlandırılmıştır.

M^r r risk sınıfında yer alan bölgeler kümesi ($r = 1, 2, 3, 4$)

M tüm bölgeler kümesi ($M = \bigcup_{r=1}^4 M^r$)

N potansiyel istasyon yerleri kümesi

K en fazla açılacak istasyon sayısı

$a_{ij}^t = \begin{cases} 1, & j \text{ bölgesi } i \text{ yerindeki istasyon ile } t \text{ dakika içinde kapsanmaktaysa} \\ & (t = 5, 8, 10, 15) \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}$

Karar değişkenleri

$x_i = \begin{cases} 1, & i \text{ yerine istasyon kurulursa} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}$

$y_j = \begin{cases} 1, & j \text{ bölgesi risk sınıfının gerektirdiği biçimde kapsanmaktaysa} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}$

$y_j^t = \begin{cases} 1, & j \text{ bölgesi } t \text{ dakika içinde risk sınıfının gerektirdiği biçimde kapsanmaktaysa} \\ & (t = 5, 8, 10, 15) \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}$

Risk Faktörüne Dayalı Çoklu Enbüyük Kapsama Modeli (RFÇEKM)

$$Z = \max \sum_{j \in M} y_j$$

$$\sum_{i \in N} x_i \leq K, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij}^5 x_i \geq 2y_j^5, \quad \forall j \in M^1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij}^8 x_i \geq y_j + 2y_j^5, \quad \forall j \in M^1 \quad (3)$$

$$y_j^5 \geq y_j, \quad \forall j \in M^1 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij}^5 x_i \geq y_j^5, \quad \forall j \in M^2 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij}^8 x_i \geq y_j^8 + y_j^5, \quad \forall j \in M^2 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij}^{10} x_i \geq y_j + y_j^8 + y_j^5, \quad \forall j \in M^2 \quad (7)$$

$$y_j^5 \geq y_j, \quad \forall j \in M^2 \quad (8)$$

$$y_j^8 \geq y_j, \quad \forall j \in M^2 \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij}^8 x_i \geq y_j^8, \quad \forall j \in M^3 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij}^{10} x_i \geq y_j + y_j^8, \quad \forall j \in M^3 \quad (11)$$

$$y_j^8 \geq y_j, \quad \forall j \in M^3 \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij}^{10} x_i \geq y_j^{10}, \quad \forall j \in M^4 \quad (13)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij}^{15} x_i \geq y_j + y_j^{10}, \quad \forall j \in M^4 \quad (14)$$

$$y_j^{10} \geq y_j, \quad \forall j \in M^4 \quad (15)$$

$$x_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N \quad (16)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in M \quad (17)$$

$$y_j^t \in \{0,1\}, \quad \forall j \in M, t = 5,8,10,15 \quad (18)$$

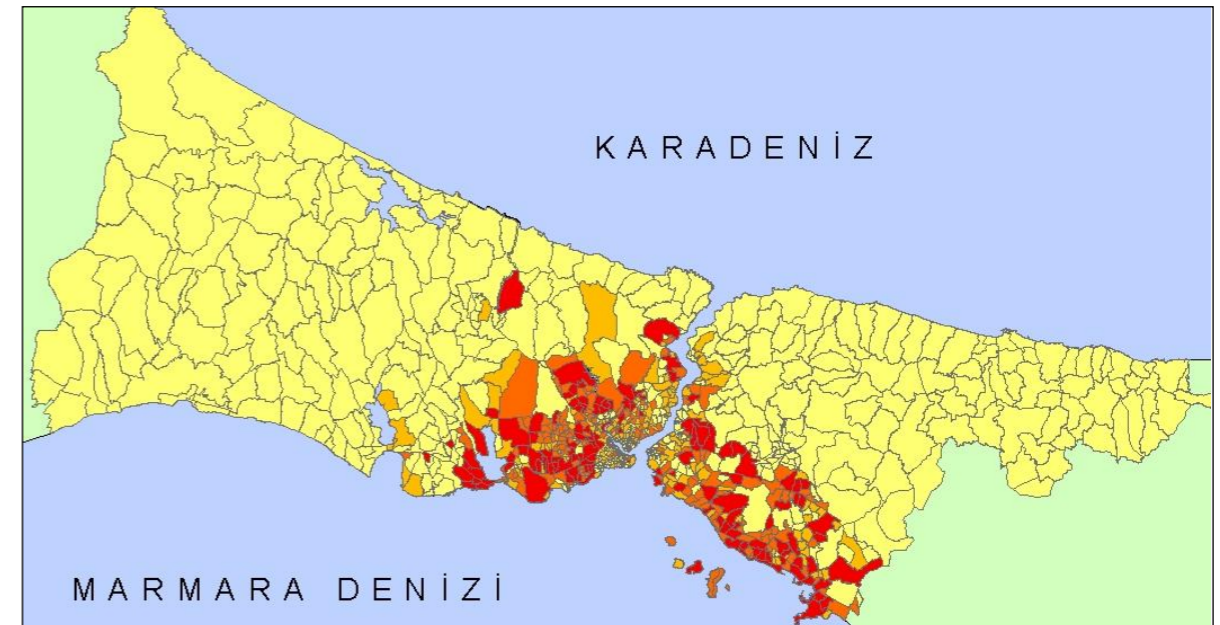
Bu modelde, amaç fonksiyonu risk kategorilerinin gerektirdiği biçimde kapsanan bölge sayısını enbüyüklemektedir. Kısıt (1) açılacak toplam itfaiye istasyon sayısını göstermektedir. Kısıt (2)-(4) 1. risk sınıfında (çok riskli) yer alan bir bölgenin kapsanmış sayılabilmesi için beş dakikada iki farklı istasyon ve sekiz dakika içinde de üçüncü bir istasyon tarafından kapsanması gerektiğini göstermektedir. Kısıt (5)-(9) 2. risk sınıfındaki (riskli) bir bölgenin kapsanmış sayılabilmesi için, sırasıyla beş, sekiz ve 10 dakika içinde üç farklı istasyon tarafından kapsanması gerektiğini ifade etmektedir. Kısıt (10)-(12) 3. risk sınıfındaki (orta riskli) bir bölgenin kapsanmış sayılabilmesi için sekiz ve 10 dakika içinde, Kısıt (13)-(15) 4. risk sınıfında (az

riskli) yer alan bir bölgenin kapsanmış sayılabilmesi için, 10 ve 15 dakika içinde farklı iki istasyon tarafından kapsanması gerektiğini göstermektedir. Son olarak da kısıt (16)-(18) karar değişkenlerinin sadece 0 ve 1 değerlerini alabileceğini ifade etmektedir. Bu problemin NP-zor olduğu özel bir halinin Enbüyük Kapsama Modeli'ne dönüştüğünü göstererek kolaylıkla kanıtlanabilir.

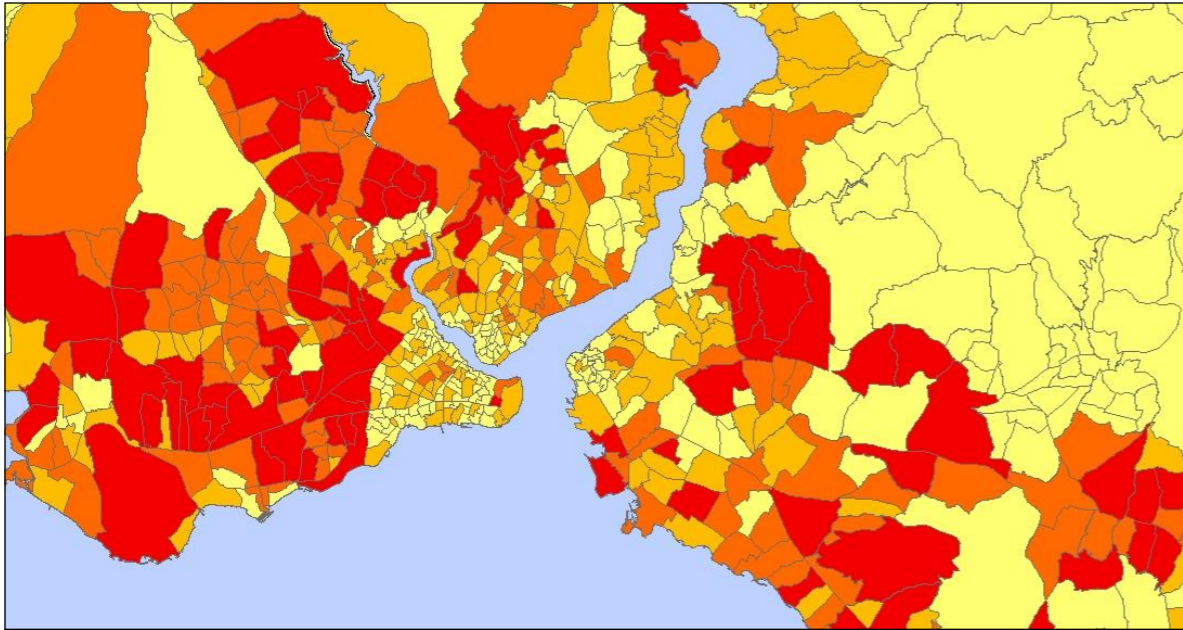
APK ile yapılan görüşmeler sonucunda planlamanın mahalle ve köy¹ bazında gerçekleştirilmesi uygun görülmüştür. Diğer bir ifadeyle her mahalle potansiyel bir istasyon yeri olarak kabul edilecek ve mahallelerin risk faktörlerinin gerektirdiği biçimde kapsanabilmesi için itfaiye istasyonlarının kurulması gereken mahalleler belirlenecektir. Mahalleler arası kapsama veri tabanının oluşturulması için ArcGIS coğrafi bilgi sistemi (CBS) yazılımından yararlanılarak tüm mahallelerin birbirleriyle olan “karayolu” uzaklıkları çıkarılmıştır. Buradaki uzaklıklar mahallelerin coğrafi alanlarının merkez noktaları arasındaki uzaklıklardır. Dolayısıyla bir mahallenin merkezi kapsama uzaklığındaysa tüm mahallenin belirlenen süre içinde kapsanabildiği varsayılmıştır. Toplamda

867 mahalleye ait veriler mevcuttur. Bu uzaklıklar kullanılarak yine APK tarafından belirlenen ortalama 40 km/saat ulaşım hızı ile her mahalleden beş, sekiz, 10 ve 15 dakika içinde erişilmesi mümkün olan diğer mahalleler ayrı ayrı belirlenmiş ve a_{ij}^t değerlerini içeren bu veriler dört tablo şeklinde kaydedilmiştir. 40 km/saat ortalama hızın özellikle daha kırsal mahalleler ve köyler için muhafazakar bir hız olduğunu belirtmekte fayda vardır.

Kapsama verilerinin yanında her mahallenin hangi risk sınıfında yer aldığı da belirlenmesi gerekmektedir. İstanbul'un risk haritası henüz tamamlanmamış olduğu için APK tarafından sağlanan “itfai olay sayısı”na bağlı olarak tahmini bir risk puanı elde edilmeye çalışılmıştır. Buna göre, her mahallenin risk puanı o mahallede son beş yılda (2004–2008) meydana gelen itfai olay sayısının son beş yılda bir mahallede gözlemlenen en fazla itfai olay sayısına bölünüp 50 ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle en fazla itfai olay sayısına bağlı bir normalizasyon yapılarak her mahallenin 50 üzerinden risk puanı hesaplanmış ve Tablo 1'deki skalaya göre risk sınıfı belirlenmiştir. Buna göre, 867 mahallenin %47'si az riskli, %22'si

**Şekil 1.a.** İstanbul'un Risk Haritası (Ölçek 1:600.000)

¹ Bundan sonra mahalle ve köy için sadece mahalle terimi kullanılacaktır.



Şekil 1.b. Merkezi Mahallerin Daha Büyük Ölçekli Risk Haritası (Ölçek 1:150.000)

orta riskli, %17'si riskli ve %14'ü ise çok riskli olarak sınıflandırılmıştır. ArcGIS CBS yazılımıyla elde edilen risk haritası Şekil 1.a ve 1.b'de verilmiştir. Bu şekillerde risk durumu koyu renkten açık renge doğru azalan şekilde ifade edilmiştir. Genel olarak daha riskli bölgelerin, ilin orta-güney bölümündeki merkezi mahalleler ile Anadolu yakasının doğu kesimindeki sanayi bölgelerinde yoğunlaştığı, kırsal ve ormanlık alanlar ile köylerin az risk grubuna dahil oldukları gözlenmektedir.

4. MODEL ÇÖZÜMÜ VE SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde öncelikle İstanbul'daki tüm mahalleleri kapsayabilmek için gerekli olan en az istasyon sayısı belirlenmiştir. Bunun için 3. Bölüm'de verilen modelin bir küme kapsama uyarlaması çözülmüştür. Temel olarak bu modelde bütün "y" değişkenleri 1 olarak sabitlenir ve 1. kısıt kaldırılarak kısıtın sol tarafı amaç fonksiyonunda enküçükleme olarak yer alır.

Coğrafi konumu nedeniyle Adalar ilçesi bu çalışmanın dışında bırakılmıştır. Bu kapsamda, mevcut itfaiye istasyonu yerlerinin göz ardı edilmesi durumu

ve mevcut itfaiye istasyonlarına ek olarak açılması gereken istasyonların yerlerinin bulunması durumları ayrı ayrı irdelenmiştir. Buna göre, mevcut itfaiye istasyonlarından bağımsız çözümde İstanbul'un tümünü kapsayabilmek için, 160 istasyon gerekirken mevcut itfaiye istasyonlarına ek olarak yeni istasyonların açılması durumunda toplamda 182 istasyon gerekmektedir. 160 ve 182 istasyon arasındaki sayısal fark itfaiye istasyonlarının yerlerinin belirlenmesinde matematik modellemeye dayalı bir yaklaşımın kullanılmasının önemini göstermektedir. Burada önemli bir nokta bu sayılarla ancak %99,4 kapsama (862 mahalle) sağlanabilmesidir. Bu durum, Binkılıç, Karamandere, Yalıköy (Çatalca), Ziya Gökalp (K. Çekmece) ve Aydınlı (Tuzla) mahallelerinin belirlenen süreler içinde çoklu kapsanmasının olurlu olmamasından kaynaklanmaktadır.

Mevcut durumda İstanbul'da (Adalar ilçesi hariç) toplam 64 itfaiye istasyonu bulunmaktadır. Bu 64 istasyon ile 532 mahalleyi yani İstanbul'un %61,4'ünü kapsamak mümkündür. İstasyonlar ve kapsanan mahalleler Şekil 2'de gösterilmiş, bu istasyonların yerleri Ek 1'de verilmiştir. Şekildeki noktalar itfaiye istasyonlarının yerlerini (mahalle olarak) ve koyu renkli



Şekil 2. Mevcut İtfaiye İstasyonları ve Kapsanan Mahalleler

alanlar ise kapsanan mahalleleri göstermektedir. Buna göre, mahallelerin %61,4'ü kapsanmakla birlikte bu mahallelerin nispeten küçük bir coğrafi alana yayıldıkları görülmektedir. Ayrıca, bazı (kırsal) mahallelerde istasyon yer almakla birlikte bunların buldukları mahallelerin bile kapsanamadıkları gözlenmektedir. Bu durum, İstanbul İtfaiyesi'nin hedef olarak koyduğu çoklu kapsama amacının yüksek standartta bir hedef olduğunun göstergesidir.

Aynı sayıda istasyon ile RFÇEKM modeli CPLEX v.11.0 çözücü ile IBM ILOG OPL eniyileme yazılımında 1GB RAM bellekli Intel Pentium T2130 1,86 Ghz işlemci kullanarak 13,5 saatte optimal olarak çözülmüştür. Optimal çözümde 709 mahalleyi (ilin %81,8'ini) kapsamak mümkündür.

Tablo 2. 96 ve 120 İstasyon Durumları İçin Optimal Çözümler

| | 96 İstasyon | 120 İstasyon |
|-------------------------|-------------|--------------|
| Kapsanan Mahalle Sayısı | 724 | 791 |
| Kapsama Oranı (%) | 83,5 | 91,2 |
| Çözüm Süresi (saniye) | 13 | 14 |

İstanbul İtfaiyesi'nin stratejik planlarında istasyon sayısını önce 96'ya, daha uzun vadede de 120'ye

çıkarmak yer almaktadır. Bu iki durum için mevcut 64 itfaiye istasyonunun yerleri de göz önünde bulundurulurken model yine CPLEX ile optimal olarak çözülmüştür. Sonuçlar Tablo 2'de, optimal istasyon yerleri ise Ek 2 ve Ek 3'te sunulmuştur. Optimal çözümdeki istasyonlar ve kapsanan mahalleler ayrıca Şekil 3.a ve 3.b'de gösterilmiştir. Buna göre 96 istasyon ile 724 mahalleyi (%83,5) kapsamak mümkünken 120 istasyon ile 791 mahalle (%91,2) kapsanabilmektedir. Bu sonuca göre, 96 istasyon durumunda yeni eklenecek istasyonlarla ulaşılabilecek hizmet seviyesi 64 tane "yeni istasyon" açmakla yaklaşık aynıdır. Bu durum mevcut istasyonların yerlerinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 2'de göze çarpan önemli bir durum, 64 yeni istasyonun yerleri belirlenirken çözüm 13 saatten fazla sürmüşken mevcut 64 istasyona ek olarak sırasıyla 32 ve 56 tane daha istasyon eklenmesi durumunda modelin çözümünün 15 saniyeyi aşmamış olmasıdır. Bu durum problemin büyüklüğünün çözüm süresini ne kadar etkilediğini net bir şekilde göstermektedir. 64 istasyon ile zaten 532 mahalle kapsanabilmektedir. Ekleneyecek 32 (56) istasyon ile aslında henüz kapsanmamış 335 (867-532) mahallenin kapsanmasına yönelik RFÇEKM çözülmektedir. Yine de çözüm



Şekil 3.a. 96 İstasyon İçin Optimal Çözüm



Şekil 3.b. 120 İstasyon İçin Optimal Çözüm

süresindeki bu büyük fark nedeniyle istasyon sayısı kısıtının çözüm süresine olan etkisinin daha detaylı incelenmesinin faydalı olacağı düşünülmüş; bu amaçla, CPLEX'in çözüm süresi 15 dakikayla sınırlandırılarak RFÇEKM 3 ile 80 arasında değişen farklı sayıda is-

tasyon sayıları için çözülmüştür. Elde edilen çözümler ve bunların optimal çözüme uzaklıkları (üst ve alt sınırlar arasındaki fark) Tablo 3'te raporlanmıştır. Bu sonuçlara göre, yukarıdaki gözlemimize benzer şekilde istasyon sayısı arttıkça çözüm elde etmek CPLEX

için kolaylaşmaktadır. Burada 2 ve 3 gibi çok küçük istasyon sayıları istisnaidir. Tahmin edilebileceği gibi 2 istasyon durumu için optimal çözüm birkaç saniye içinde elde edilebilmektedir. Bu sonuçlar literatürdeki EKM çalışmalarıyla paralellik göstermektedir: istasyon sayısı arttıkça çözüm süresi önce artmakta, sonra her eklenecek istasyonun kapsamaya olan marjinal katkısının azalmasına paralel olarak çözüm süresi azalmaktadır.

Tablo 3. Farklı İtfaiye İstasyonu Sayıları İçin Deneysel Çalışma Sonuçları

| İstasyon Sayısı | Kapsanan Mahalle Sayısı | Kapsama Oranı (%) | Optimale Uzaklık (%) |
|-----------------|-------------------------|-------------------|----------------------|
| 3 | 214 | 24,7 | 2,33 |
| 5 | 278 | 32,1 | 7,85 |
| 10 | 381 | 43,9 | 6,91 |
| 20 | 494 | 57,0 | 4,54 |
| 30 | 565 | 65,2 | 2,32 |
| 40 | 617 | 71,2 | 1,46 |
| 50 | 659 | 76,0 | 1,16 |
| 60 | 696 | 80,3 | 0,67 |
| 70 | 727 | 83,9 | 0,59 |
| 80 | 754 | 87,0 | 0,52 |

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, İstanbul'da yeni açılacak itfaiye istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi için bir 0-1 tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiş ve CPLEX kullanarak optimal sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan deneysel bir çalışmayla istasyon sayısı parametresine bağlı olarak optimal çözümü elde etmenin zorluğu irdelenmeye çalışılmıştır. Her ne kadar İstanbul örneğinde en iyi çözümler elde edilmişse de önerilen model NP-zor olduğu için benzer başka problemlerin çözümü için sezgisel ve ileri sezgisel yöntemlere ihtiyaç duyulabilir. Hızlı ve iyi çözümler üretebilen sezgisel ve ileri sezgisel yöntemlerin CPLEX'e göre en büyük avantajı bir yazılım lisans maliyeti olmamasıdır.

Çözümlerde göze çarpan önemli bir nokta belirli bir kapsama seviyesine ulaşıldıktan sonra açılacak her yeni istasyonun getirdiği marjinal kapsama miktarının düşüyor olmasıdır. Bunun nedeni, bu yeni

istasyonların Çatalca, Silivri, Şile gibi il merkezine uzak ilçelerde açılma gereksiniminin olması ve bunların da uzaklıkları nedeniyle çevre mahallelere "kapsama" katkısının düşük olmasıdır. Dolayısıyla, böyle mahalleler (köyler) için "gönüllü itfaiye istasyonu" yaklaşımı benimsenebilir.

Önerilen modeldeki kapsanan mahalle sayısını enbüyüklenme şeklindeki amaç fonksiyonu yerine kapsanan nüfusun enbüyüklenmesi veya toplam maliyetin enküçüklenmesi gibi değişik amaç fonksiyonları kullanılabileceği gibi, birden fazla amaç fonksiyonuna sahip çok amaçlı modeller de geliştirmek mümkündür. Örneğin, açılacak itfaiye istasyonlarının yerlerinin yanı sıra bu istasyonların büyüklüklerine bağlı olarak ekipman ve çalışan sayılarını da planlayan modeller daha kapsamlı bir çalışma bünyesinde geliştirilebilir. Ayrıca, gün içindeki nüfus hareketlerini ve ilgili diğer etmenleri göz önünde bulundurarak itfaiye araçlarının ve personelinin yer değiştirmesine dayalı yaklaşımlar da incelenebilir.

Burada göz önünde bulundurulması gereken diğer önemli nokta elde edilen optimal çözümlerin yapılan varsayımların, belirlenen model kısıtlarının ve kullanılan verilerin sonucu olmasıdır. Doğal olarak, yeni açılacak istasyon yerleri belirlenirken bu sonuçlar da irdelenerek daha kapsamlı bir inceleme ve analizin yapılması gerekmektedir. Sonuç olarak, İstanbul gibi geniş bir coğrafyaya yayılmış, yüksek deprem riskine sahip, trafik yoğunluğunun önemli bir sorun olarak ortaya çıktığı, dinamik ve sürekli artan nüfusa sahip bir metropolde itfaiye istasyonlarının planlanması ve afet koordinasyonu için çok boyutlu ve sistematik çalışmalara gereksinim duyulmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu projenin gerçekleştirilmesine destek olan İtfaiye Daire Başkanlığına, proje boyunca gerek fikir alışverişinde gerekse gerekli verilerin toplanmasında yardımlarını esirgemeyen İtfaiye Destek Hizmetleri Müdürlüğünden Mustafa Özsert ve İsmail Yazıcı'ya teşekkür ederiz. Ayrıca böyle bir projenin yapılmasına olanak tanıdığı için İstanbul Büyükşehir Belediyesine ve yardımları için Stratejik Planlama Müdürlüğü personeline de teşekkür ederiz.

Ek 1. Mevcut İtfaiye İstasyonlarının Listesi

| İlçe | Mahalle |
|-----------------|-------------------|
| Avcılar | Üniversite |
| Bağcılar | Fevzi Çakmak |
| Bahçelievler | Koca Sinan Merkez |
| Bakırköy | Kartaltepe |
| Bakırköy | Yeşilköy |
| Bayrampaşa | Ortamahalle |
| Beşiktaş | Yıldız |
| Beykoz | Merkez |
| Beykoz | Rüzgarlıbahçe |
| B.Çekmece | Bahçeşehir |
| B.Çekmece | Beylikdüzü |
| B.Çekmece | Cumhuriyet |
| B.Çekmece | Kıraç |
| B.Çekmece | Kumburgaz |
| B.Çekmece | Mimar Sinan |
| B.Çekmece | Yakuplu |
| Çatalca | Binkılıç |
| Çatalca | Durusu |
| Çatalca | Ferhatpaşa |
| Çatalca | Hadımköy |
| Çatalca | Karacaköy |
| Eminönü | Alemdar |
| Eyüp | Çırçır |
| Eyüp | Mithat Paşa |
| Eyüp | Rami Cuma |
| Fatih | Balat Karabağ |
| Fatih | Sinanağa |
| Gazi Osman Paşa | Arnavutköy |
| Gazi Osman Paşa | B. Hayrettin Paşa |
| Gazi Osman Paşa | Habibler |
| Güngören | M. Nesih Özmen |
| Kadıköy | Erenköy |

| İlçe | Mahalle |
|-------------|----------------------|
| Kadıköy | Rasimpaşa |
| Kağıthane | Nurtepe |
| Kağıthane | Seyrantepe |
| Kartal | Çavuşoğlu |
| K.Çekmece | Altınşehir |
| K.Çekmece | İnönü |
| K.Çekmece | Ziya Gökalp |
| Maltepe | Bağlarbaşı |
| Pendik | Bahçelievler |
| Pendik | Kurtköy |
| Sarıyer | Çayırbaşı |
| Sarıyer | İstinye |
| Şile | Ağva |
| Şile | Balı Bey |
| Silivri | Büyük Çavuşlu |
| Silivri | Çanta |
| Silivri | Selimpaşa |
| Silivri | Yenimahalle |
| Şişli | Halil Rıfat Paşa |
| Şişli | Harbiye |
| Sultanbeyli | Battal Gazi |
| Tuzla | Akfırat |
| Tuzla | Aydınlı |
| Tuzla | Aydıntepe |
| Tuzla | Orhanlı |
| Ümraniye | Çakmak |
| Ümraniye | Ömerli |
| Ümraniye | Yenidoğan |
| Üsküdar | Ahmet Çelebi |
| Üsküdar | Arakıyeci Hacı Cafer |
| Üsküdar | Güzeltepe |
| Zeytinburnu | Beştelsiz |

Ek 2. 96 İstasyon Durumu İçin Optimal İstasyon Yerleri

| İlçe | Mahalle |
|-----------------|------------|
| Avcılar | Cihangir |
| Bahçelievler | Çobançeşme |
| Beykoz | Bozhane |
| Beykoz | Çiğdem |
| B.Çekmece | Ahmediye |
| Çatalca | Baklalı |
| Çatalca | Başakköy |
| Çatalca | Hisarbeyli |
| Çatalca | Kestanelik |
| Çatalca | Subaşı |
| Çatalca | Yeşilbayır |
| Gazi Osman Paşa | Boğazköy |
| Gazi Osman Paşa | Esentepe |
| Gazi Osman Paşa | Uğur Mumcu |
| Kadıköy | Kayışdağı |
| Kartal | Cevizli |

| İlçe | Mahalle |
|-------------|------------------|
| Kartal | Yakacık Çarşı |
| K.Çekmece | Fatih |
| K.Çekmece | Güvercinstepe |
| K.Çekmece | İkitelli Atatürk |
| Maltepe | Aydınevler |
| Pendik | Güzelyalı |
| Sarıyer | Cumhuriyet |
| Sarıyer | Demirciköy |
| Sarıyer | Uskumruköy |
| Şile | Çayırbaşı |
| Şile | Göce |
| Sultanbeyli | Akşemseddin |
| Sultanbeyli | Turgut Reis |
| Tuzla | Yayla |
| Ümraniye | Atakent |
| Ümraniye | Hüseyinli |

Ek 3. 120 İstasyon Durumu İçin Optimal İstasyon Yerleri

| İlçe | Mahalle |
|-----------------|-------------------|
| Avcılar | Cihangir |
| Bahçelievler | Yeni Bosna Merkez |
| Beykoz | Anadolu Feneri |
| Beykoz | Bozhane |
| Beykoz | Çiğdem |
| Beykoz | Mahmut Ş. Paşa |
| B.Çekmece | Ahmediye |
| B.Çekmece | Atatürk |
| Çatalca | Baklalı |
| Çatalca | Başakköy |
| Çatalca | Hisarbeyli |
| Çatalca | Kestanelik |
| Çatalca | Subaşı |
| Çatalca | Yaylacık |
| Çatalca | Yeşilbayır |
| Eyüp | Çiftalan |
| Eyüp | Odayeri |
| Gazi Osman Paşa | Bolluca |
| Gazi Osman Paşa | Esentepe |
| Gazi Osman Paşa | Zübeyde Hanım |
| Kadıköy | İnönü |
| Kartal | Cevizli |
| Kartal | Yakacık Çarşı |
| K.Çekmece | Fatih |
| K.Çekmece | Güvercinstepe |
| K.Çekmece | İkitelli Atatürk |
| K.Çekmece | Kartaltepe |
| Maltepe | Aydınevler |

| İlçe | Mahalle |
|-------------|----------------|
| Pendik | Güzelyalı |
| Pendik | Kurtdoğan |
| Sarıyer | Cumhuriyet |
| Sarıyer | Rumeli Feneri |
| Sarıyer | Uskumruköy |
| Şile | Ağaçdere |
| Şile | Akçakese |
| Şile | Göce |
| Şile | Hasanlı |
| Şile | İmrendere |
| Şile | İmrenli |
| Şile | Sortullu |
| Şile | Ulupelit |
| Şile | Üvezli |
| Şile | Yaylalı |
| Şile | Yeşilvadi |
| Silivri | Beyciler |
| Silivri | Çeltik |
| Silivri | Danamandıra |
| Silivri | Küçük Kılıçlı |
| Sultanbeyli | Fatih |
| Sultanbeyli | Orhangazi |
| Tuzla | Cami |
| Ümraniye | Esenşehir |
| Ümraniye | Hüseyinli |
| Ümraniye | Yukarı Dudullu |
| Üsküdar | Örnek |
| Üsküdar | Yavuztürk |

KAYNAKÇA

1. Badri, M.A., Mortagy, A.K., Alsayed, A. 1998. "A Multi-Objective Model For Locating Fire Stations," *European Journal of Operational Research* 110, 243-260.
2. Brotcorne, L., Laporte, G., Semet, F. 2003. "Ambulance Location and Relocation Models," *European Journal of Operational Research* 147, 451-463.
3. Chevalier, P., Thomas, I., Geraets, D., Goetghebeur, E., Janssens, O., Peeters, D., Plastria, F. 2007. "Locating Fire Stations in Belgium: An Integrated GIS Approach," *Proceedings of the 47th Congress of the European Regional Science Association, Paris*.
4. Church, R.L., ReVelle, C. 1974. "The Maximal Covering Location Problem," *Papers of the Regional Science Association* 32, 101-118.
5. Çatay, B. 2009. "İstanbul'da Yeni İtfaiye İstasyon Yerlerinin Belirlenmesi," *İBB Proje İstanbul Projesi Sonuç Raporu, İstanbul*.
6. Çatay, B., Başar, A., Ünlüyurt T. 2008. "İstanbul'da Acil Yardım İstasyonlarının Yerlerinin Planlanması," *Endüstri Mühendisliği Dergisi* 19, 20-35.
7. Goldberg, J.B. 2004. "Operations Research Models for the Deployment of Emergency Services Vehicles," *EMS Management Journal* 1, 20-39.
8. Hogg, J. 1968. "The Siting of Fire Stations," *Operational Research Quarterly* 19, 275-287.
9. Liu, N., Huang, B., Chandramouli, M. 2006. "Optimal Siting of Fire Stations Using GIS and ANT Algorithm," *Journal of Computing in Civil Engineering* 20, 361-369.
10. Marianov, V., ReVelle, C. 1992. "A Probabilistic Fire-Protection Siting Model with Joint Vehicle Reliability Requirements," *Papers in Regional Science* 71, 217-241.
11. Narasimhan, S., Pirkul, H., Schilling, D.A. 1992. "Capacitated Emergency Facility Siting with Multiple Levels of Backup," *Annals of Operations Research* 40, 323-337.
12. Schilling, D.A., ReVelle, C., Cohen, J., Eizinga, D.J. 1980. "Some Models for Fire Protection Locational Decisions," *European Journal of Operational Research* 5, 1-7.
13. Schreuder, J. 1981. "Application of a Location Model to Fire Stations in Rotterdam," *European Journal of Operational Research*, 6, pp. 212-219
14. Toregas, C.R., Swain, R., ReVelle, C.S., Bergman, L. 1971. "The Location of Emergency Service Facilities," *Operations Research* 19, 1363-1373.