



Hızlı Otobüs Taşımacılığı İçin İstasyon Lokasyonlarının Belirlenmesine Yönelik Yaklaşımlar

İsmail Önden¹

Nurbanu Doğan²

Fahrettin Eldemir³

Öz

Yüksek Hızlı Otobüs Taşımacılığı (HOT) metro gibi uzun vadeli yatırımlara göre daha hızlı hizmete alınabilir. Ayrıca, metro sistemlerine benzer şekilde yüksek kapasitede yolculuk talebini karşılayabilirler. İstanbul'da Metrobüs özel ismi ile çalışmakta olan HOT sistemi, İstanbul'daki yolculuk talebinin en yoğun olduğu bölgedeki ulaşım talebini karşılamaktadır. Sistemin başarısı, sistemin geliştirilmesi ile ilgili tartışmaları da beraberinde getirmektedir. Dolayısı ile HOT sisteminin alternatif rotaları değerlendirildiğinde istasyonların nerelerde olması gerektiğinin tespit edilmesi araştırmacılar ve şehir planıcıları için bir araştırma konusu olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışma kapsamında rotası belirli olan bir güzergah üzerinde istasyon noktalarının nasıl tespit edileceğine yönelik Coğrafi Bilgi Sistemleri ile beslenen iki yöntem değerlendirilmiştir. Bu yöntemlerden ilki ağırlıklandırılmış merkez noktaları arayan bir p-medyaana dayalı matematiksel modeldir, diğer yöntem ise kapsama alanlarına göre hesaplama yapan bir aşamalı bir sezgisel yöntemdir. Sezgisel yöntem, matematik modelin büyük problem yapısında çözülmesi zor bir problem yapısına dönüşmesinden dolayı, ileriki çalışmalarda kullanılabilmesi için tartışılmıştır. Sonuç olarak her iki yöntem de sonuç üretebilmiştir. Sezgisel algoritma, optimum sonuçlara yakınsamıştır ve çözümü kolay bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler

İstasyon yeri seçimi • Hızlı otobüs taşımacılığı • Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) • Toplu ulaşım şehir planlama

Station Location Selection Approaches for a New Bus Rapid Transport Line

Abstract

Bus Rapid Transport (BRT) systems can be put into service with lower costs in comparison to metro systems. In addition, they can meet the demand for high-capacity travel, similar to metro systems. In İstanbul, Metrobus, which is an example of BRT, covers the highest portion of the transportation demand in its region. The success of the system has provoked discussions about the new routes of the system in the city. Thus, where to locate the new BRT line and its stations emerges as a research question for academics and city planners. In this study, two different methods, which are supported by GIS/Spatial information, are discussed to analyze where to locate the stations of a new BRT line. The first method is an adopted weighted p-median-based mathematical model that deals with a line instead of a network. The second approach is a heuristic algorithm considering the demand of coverage according to the covered population in an iterative structure. As the result, both approaches produce outcomes for station locations. The heuristic algorithm converges to the optimum results and shows that it is able to reach in a simple analysis structure.

Keywords

Station Location selection • Bus rapid transport (BRT) • Geographic Information Systems (GIS) • Public transportation • City planning

1 Sorumlu Yazar: İsmail Önden (Dr.), TÜBİTAK TÜSSİDE, İstanbul, Türkiye. Eposta: ismail.onden@tubitak.gov.tr

2 Nurbanu Doğan, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. Eposta: banunurdogan@gmail.com

3 Fahrettin Eldemir (Dr. Öğr. Üyesi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. Eposta: eldemir@yildiz.edu.tr

Atf: Önden, İ., Doğan, N. ve Eldemir F. (2018). Hızlı otobüs taşımacılığı için istasyon lokasyonlarının belirlenmesine yönelik yaklaşımlar. *Istanbul Management Journal*, 29(85), 41-58. <http://dx.doi.org/10.26650/imj.2018.29.85.0009>

Extended Abstract

Background

Istanbul is the most populous metropolis in Europe, with over 15 million inhabitants (TÜİK, 2016). Moreover, it is characterized by high mobility because of its young population. The demand of new smart cards in Istanbul is four times higher than the annual population increase (TÜSSİDE, 2016b). This reflects the complexity of the public transportation problem in the city. To meet the public transportation demand, there are various service alternatives, such as subway, bus rapid transport (BRT), tram, bus, maritime public transportation. Considering the increasing public transportation demand, high-capacity services such as subway and BRT can be a solution.

Accessibility is the one of the crucial parameter that affects the success of the stations' location. Accessibility ensures a high-capacity use of the stations due to their population coverage. Thus, it is necessary to consider the land use and transportation demand in a station location analysis. Accessibility is not the only consideration in a public transportation study. Several additional parameters, such as travel time, safety and security, capacity, and cost (Çancı, Metin, & Önden, 2013; Diaz, 2004), should be considered to ensure a better service quality. However, the aim of this study is to evaluate alternative station locations in a specific BRT route and select the most convenient areas for stations.. To this end, a potential BRT route was selected for the case study, and two different approaches are discussed. The first approach is a p-median based mathematical model approach that works with geographic data. The second approach is a heuristic algorithm that also works with geographic data. Both approaches focus on the highest population coverage.

Geographic information system (GIS) was used to create necessary geoinformation for these solution approaches. The GIS data were analyzed using spatial and network analysis. Additionally, land use data representing over one million population are considered in this study.

Method

The first approach for determining the optimum location is a mathematical modeling approach that works with geographical information. A p-median-based mathematical model is used to analyze alternative BRT station locations. In the model, notation i used to represent demand nodes, and j is used to represent candidate station locations. The methodology followed for the analysis is given in Figure 1, and the model structure is as follows:

Decision Variables

y_{ij} : service decision: service from candidate j to demand node i $\{0,1\}$

z_j : facility location decision: j^{th} location decision select or not $\{0,1\}$

Parameters

d_{ij} : distance between i^{th} district and j^{th} candidate station location

w_i : i^{th} weight according to covered population

P : station number

Objective Function

$$\min. Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_i * d_{ij} * y_{ij} \tag{1}$$

Constraints

$$\sum_j y_{ij} \geq 1, \forall_i \tag{2}$$

$$\sum_j z_j = P \tag{3}$$

$$y_{ij} - z_j \leq 0, \forall i,j \tag{4}$$

$$y_{ij}, z_j \in \{0, 1\} \tag{5}$$

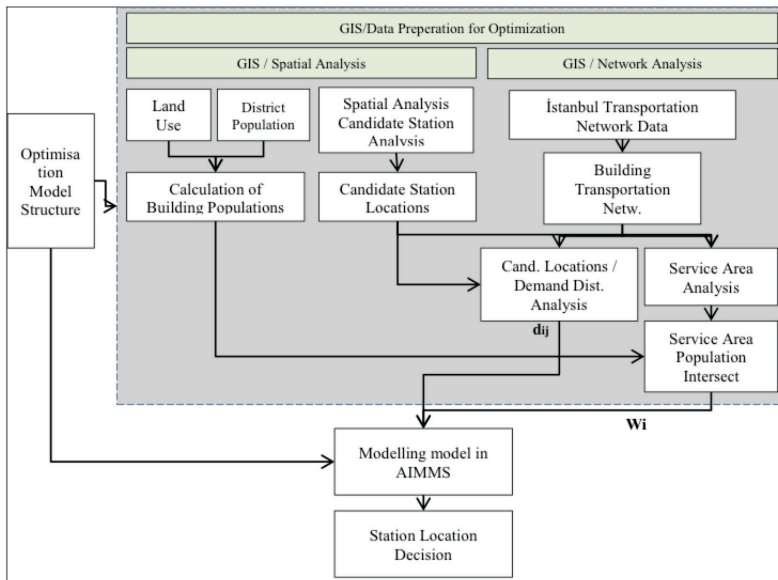


Figure 1. Mathematical Model-based Solution Approach

The second approach used for BRT station location analysis is a heuristic algorithm, which also works with geographical information. The logic behind the heuristic algorithm is for the demand nodes to be served by the closest candidate station node according to the total coverage of this facility. For this aspect, an iterative solution algorithm is discussed in the paper and illustrated in Figure 2.

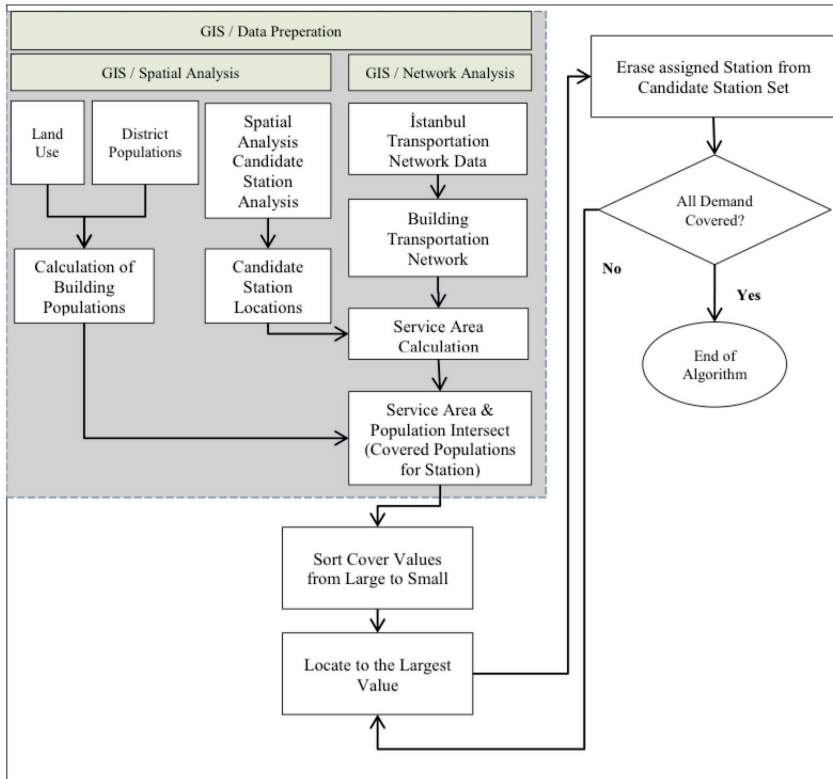


Figure 2. Heuristic-based Solution Approach

Application and Findings

Istanbul was selected as the study area. In the focus area, 154,257 features represent the existing buildings. These features include 522,287 houses and 94,504 commercial buildings in its attribute table. These numbers show that the BRT route has a potential to serve as an important route in the public transportation network.

After determining the study area, the two solution approaches were applied. To enable comparison, same dataset was used for both analyses. As the first step, candidate points were created with GIS/spatial analysis. Points along the line tool were used to create points with 100 meters distance interval. Then GIS/Network Analyst was used to calculate the service areas of all candidate locations. The service

area was calculated for a distance of 1500 meters. The results and candidate points are given in Figure 3.

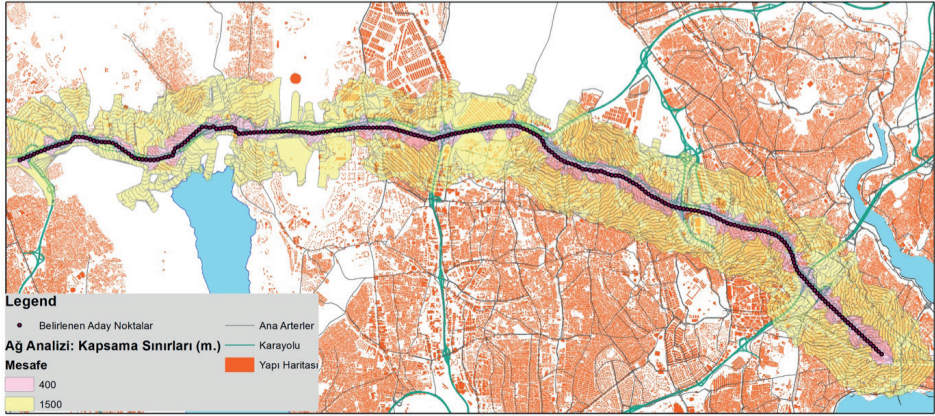


Figure 3. Candidate Points and Their Service Areas

The service areas intersected with land use data, and the covered population of each candidate point was found. The result gave the total number of covered population of each candidate station, as illustrated in Figure 4. After determining the candidate points and their covered populations, the proposed methodologies were implemented for the study area with same inputs provided by GIS.

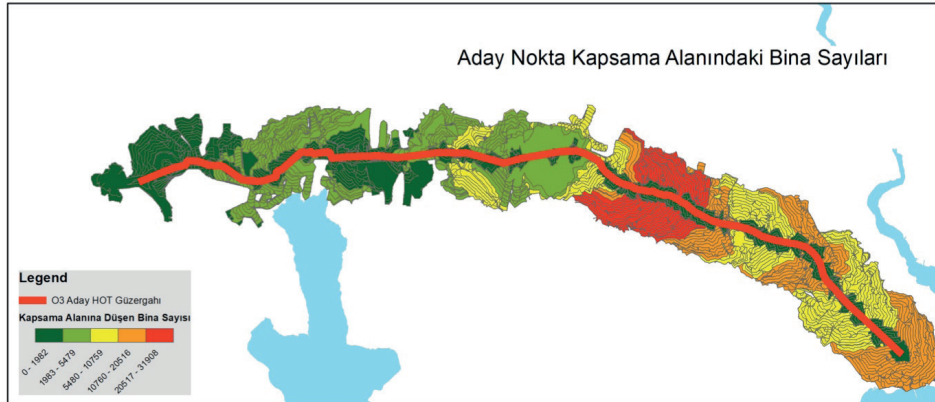


Figure 4. Route and Candidate Point's Covered Population

The results of the applied methodologies are illustrated in the Figure 5. The results of both algorithms are converged, and both solution approaches found the locations adequately.



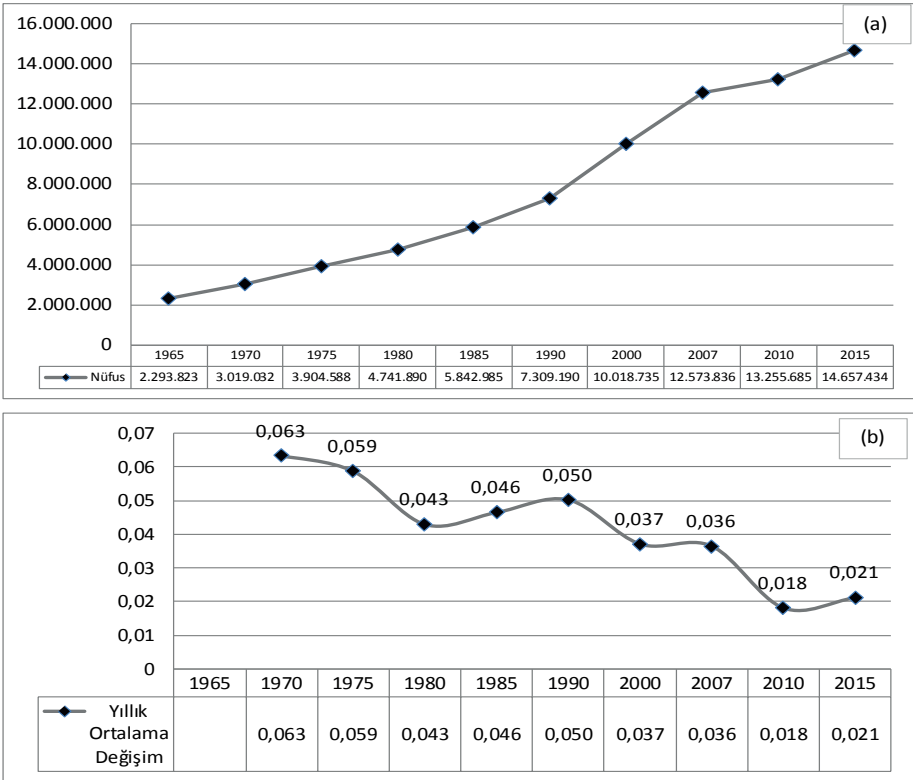
Figure 5. Results of the Methodologies

Conclusion

A BRT system is in use in Istanbul, and it serves over 900,000 passengers per day. That is why extending the existing service has emerged as a research topic for academics and public transportation professionals in the city. The optimum locations of the new route or stations cannot be determined based on solely experience or qualitative approaches. This study focuses on how to use quantitative approaches to determine the optimum locations. For this purpose, two solution approaches are discussed. The first one is an optimization approach, a p-median-based approach that works with geographic information provided by spatial and network analyses of GIS data. The second approach is a heuristic approach that also works with geographic information provided by GIS. To apply the approach, an area of dense transportation demand in Istanbul was used, and the results show that the decisions of both approaches are applicable and are in agreement.

1. GİRİŞ

İstanbul 15 milyona yaklaşan nüfusu (TÜİK, 2016) ile Avrupa'nın en kalabalık metropolü olarak öne çıkmaktadır. Nüfusun yaş dağılımına bakıldığında ise öğrenci ve çalışan nüfusu oluşturan genç nüfus oranının yüksek olduğu görülebilmektedir. Bu durum ev-iş, ev-okul hareketliliklerinin yoğunluğuna sebebiyet vermektedir. İstanbul'daki akıllı kart kullanımı ile hareketlilik göz önüne alındığında, şehirdeki yıllık nüfus artışının %1 ila %2 aralığında olmasına rağmen, hareketliliğin %6 civarında arttığı, bu da nüfus artışına oranla hareketliliğin 4 kat artmakta olduğunu göstermektedir (TÜSSİDE, 2016b). Şekil 1, 1960lardan itibaren İstanbul'daki şehir nüfusu artışı ve artış oranlarında tespit edilebilmektedir. İstanbul'daki nüfus artışı, geçmişte görülen ivme ile artmıyor olsa da artış miktarı 5 yıllık sürede yaklaşık olarak 2 milyon insana eşit olduğundan, yolculuk talebinin de ciddi oranda artacağı görülebilmektedir. Bu gerçeklik, şehir yönetimi tarafından şehir bütçesinin en önemli kalemlerini ulaşıma ayırmaya ve ulaşımdaki çeşitliliği artırmaya neden olmaktadır.



Şekil 1. İstanbul'daki nüfus artışı ve artış oranları

İstanbul'daki yoğun nüfus ve yolculuk talebi nedeni ile ulaşım hizmetinin karşılanmasına yönelik metro, metrobüs, tramvay, otobüs, deniz ulaşımı, taksi & taksi dolmuş gibi farklı taşıma türleri ile hizmet sağlanmaktadır. Ancak, bazı bölgelerdeki yüksek yolculuk talebi nedeni ile hizmet kalitesi konusunda zaman zaman sıkıntılar yaşandığı da gözlemlenebilmektedir. İstanbul'un artan ulaşım talebi göz önüne alındığında yolcuların hizmetine sunulmak üzere metro ya da yüksek hızlı otobüs taşımacılığı (HOT) gibi yüksek kapasiteli taşımacılık ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu ulaşım türleri ulaşım ağının ana omurgasını oluşturduğundan gerek insanların yolculuk taleplerini, gerekse şehrin alan kullanımını ve yapılaşmasını da etkilemektedir. Dolayısı ile rota ve istasyon seçilmesi durumunda detaylı bir çalışmanın yapılması bir gerekliliktir. Bu gereklilikten ötürü farklı ülkelerde de HOT yatırımları gerçekleştirilmiştir. BrtData.org verilerine göre HOT sistemi ile 207 şehirde, 5427 kilometre yol uzunluğunda, 34 milyonun üzerinde yolcu taşınması gerçekleştirilmektedir ("Global Bus Rapid Transit Data," n.d.). Bu kapsamda sistemi kullanmada Latin Amerika ve Çin'in ön plana çıktığı gözlemlenmektedir. Türkiye'nin de Avrupa'da bu sistemi en yoğun kullanan ülke olduğu ifade edilmektedir ("Global Bus Rapid Transit Data," n.d.).

HOT sisteminin dünyada etkin kullanılan bir sistem olması nedeni ile araştırmacılar da sistem ile ilgili çeşitli başlıklarda çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda bir elkitabı olarak oluşturulmuş olan "Characteristics of Bus Rapid Transport for Decision-Making" en önemli kaynakların başında gelmektedir (*Characteristics of BUS RAPID TRANSIT for Decision Making*, 2011; Diaz, 2004). Levinson vd. HOT sistemi ile ilgili genel bir değerlendirme gerçekleştirmişlerdir (Levinson, Zimmerman, Clinger, & Rutherford, 2002). Benzer şekilde, İstanbul Metrobüs sistemi ile ilgili çalışmalar da literatürde mevcuttur (Alpkokin & Ergun, 2012; Yazıcı, Levinson, Ilicali, Camkesen, & Kamga, 2013).

Literatürde mevcut HOT sistemlerini tanımlayan çalışmalara ek olarak operasyonel ve stratejik kararlara yönelik de çalışmalar mevcuttur. Cervero ve Dang Kore'de HOT'un alan kullanımı ve alan değerine yönelik araştırma gerçekleştirmişlerdir (Cervero & Kang, 2011). Raskin ise yürüme mesafesinde bir HOT hattının bulunmasının ev fiyatlarını yükseltici etkisinin olup olmadığını araştırmış ve bir ilişkinin varlığını tespit etmiştir (Munoz-Raskin, 2010). Deng ve Nelson, Beijing'de yer alan HOT'a ait performans ve etki analizi gerçekleştirmişlerdir ve sonuç olarak, güvenli ve konforlu yolculuk olmasının oluşabileceği ve yolculuk davranışının olumlu yönde etkilenebileceği tespit edilmiştir (Deng & Nelson, 2013).

İstasyonların başarı faktörlerini etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi erişilebilir olmasıdır. İstasyonların mevcut nüfusa yakın olarak konumlandırılması, istasyonların etki alanları içerisindeki nüfusun yüksek olması metro/HOT hatlarının başarılı yatırımlar olmasını sağlayacaktır. İstasyonların etki alanları içerisinde yeterli

nüfus olmaması durumunda ilgili hattın başarısının zayıf olacağı ve zaman içerisinde civar bölgelerde yapılaşmanın artacağı beklenebilir. Bu durumda ise yatırımın aktif olarak kullanılmasının gecikmesi ve acil ihtiyaç duyulan bölgelere hizmet götürmek yerine yeni bir alanın şehirleşmesine sebebiyet verme durumu ortaya çıkacaktır. Başarılı bir HOT sisteminin kurgulanabilmesi için yoğun talebin olduğu bölgelere istasyon konumlandırılması gereklidir.

Çalışmanın amacı güzergâhı belirli bir HOT sisteminde durak noktaları için alternatif noktaların değerlendirilmesi olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda İstanbul'da oluşturulması muhtemel bir HOT rotası göz önüne alınarak, yeni sistemin duraklarının nasıl konumlandırılabilceği ile ilgili iki farklı yöntem tartışılmıştır. Bu yöntemlerden ilki talep miktarlarını dikkate alan ve orta noktasını durak olarak işaret eden bir matematik modeldir. İkinci yöntem ise sezgisel bir akış ile kapsama alanlarındaki nüfus miktarını dikkate alan ve her atama sonucunda aday noktayı kapsamdan çıkartan ve yeni istasyon yerini arayan sezgisel bir yöntemdir. Her iki yöntem de Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) bazlı olarak istasyonların doğru konumlandırılmalarını sağlamaya çalışmakta ve arazi kullanımı/nüfus etkileşimini dikkate almaktadır. Bu kapsamda geliştirilen uygulamaların özgünlüğü ve CBS'nin arazi kullanımı ile ilişkilendirilmesi açısından literatüre katkısının olduğu ifade edilebilir. Bu durum haricinde, matematik modelde p-medyan modeli (Kariv & Hakimi, 1979) esas olarak alınmıştır ve matematik model ile ilgili bir katkı sağlanmamıştır. Bilindiği üzere p-medyan modeli karmaşık yapısı nedeni ile NP-hard modelleri sınıfında yer almaktadır. Dolayısı ile bu modelin çözülebilmesi için alternatif sezgisel yöntemler geliştirilmiştir (Mladenović, Brimberg, Hansen, & Moreno-Pérez, 2007; Senne & Lorena, 2000; Shamsipour, Shamsipour, Sandidzadeh, & Yaghini, 2012). Çalışmada tartışılmakta olan sezgisel yaklaşım iteratif olarak kapsama alanlarını dikkate alan ve durak/istasyon atamalarını ağırlıklarına göre gerçekleştiren bir yaklaşımı ifade etmektedir. Temel olarak öncelikle en yüksek talebin karşılanması, ardından da durakların kapsama alanlarını dikkate alarak yeni atamaların yapıldığı bir yaklaşımı ifade etmektedir. Yani bir atama yapıldığında, servis alanını dikkate alan yaklaşım bu etki alanında bir başka tesisin bulunmasını engelleyerek tesis sayısının minimumda tutulmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım optimizasyon yaklaşımı ile karşılaştırıldığında ilk önce en yüksek çekim merkezine atama yaptığından en uygun sonucu veremeyecek bir yapıya sahip olsa da, hizmet kalitesinin maksimize edilmeye çalışıldığı durumlarda en iyi sonucu sağlayabilecek niteliktedir. Yaklaşımın bir diğer başarısı ise nispeten kolay yapısı nedeni ile algoritmanın hızlı çalışacak olması ve çözüm süresinde sağlayacağı avantajdır.

Çalışma kapsamında, p-medyan modeli bazlı optimizasyon modeline girdi oluşturmak maksatlı CBS analiz yetenekleri ile ağırlıkların/önem seviyelerinin üretilmesi noktasında izlenen adımlar araştırmacılar için yol gösterir niteliktedir. Önerilmiş olan yöntemler, durak konumlandırma konusundaki kabiliyetleri ile gerek şehir karar ve-

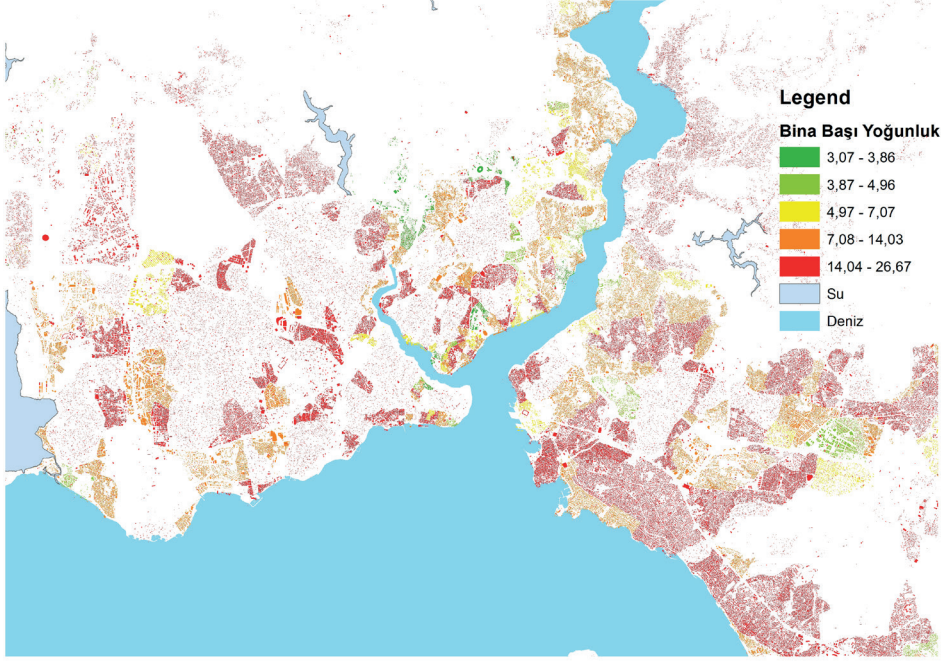
ricileri için pratik bir alternatif yöntem oluşturmakta, gerekse araştırmacılar için bir başlangıç noktası oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında tartışılan iki yöntem için de şehre ait arazi kullanımını yansıtan bina konumlarını ve özneliliklerini gösteren yapı verisine ihtiyaç vardır. Bu veri poligon formatındaki vektör veri olup, öz nitelikleri ile ilgili binanın inşa halinde mi olduğu, yoksa kullanımda mı olduğunu ifade etmekte, hazır durumda olan binalardaki otopark sayısı, kat sayısı, mesken mi yoksa konut alanı mı olduğu ile ilgili öznelilikleri de içermelidir. Bu veri seti, istasyon kapsanan nüfus söz konusu olduğundan, her iki yöntem için de elzemdir.

HOT sistemleri kendilerine özel şeritleri kullanmakta olduklarından, trafik üzerindeki etkileri sınırlıdır ve bu özelliği sayesinde sistem kullanıcılarına trafikte beklemeksizin hızlı ulaşım imkanı üretmektedir. İstanbul'daki toplu ulaşım kullanıcılarının ulaşım tercihleri hız temelli değiştiğinden (TÜBİTAK TÜSSİDE, 2016), kurgulanan sistemin yakınlarındaki bölgelerdeki nüfus tarafından kullanılacağı ifade edilebilir. Bu noktada, TÜSSİDE raporunda İstanbul özelinde HOT taşımacılığı yapan metrobüs sisteminin de çevre bölgeleri ile yüksek etkileşimde olduğu ve aktarma ile de kendisine yolcu çektiği ve 1,5 kilometre ile 10 kilometre aralığında yoğun olarak mevcut yürüyerek gelen yolculara ek olarak aktarma yolcularını da cezbediği tespit edilmiştir (TÜSSİDE, 2016a).

HOT sistemlerinin başarılı olabilmeleri için tanımlanan parametreler içinde seyahat süresi, güvenilirlik, emniyet ve güvenlik, kapasite, maliyet, konfor parametreleri mevcuttur (Çancı, Metin & Önden, 2013; *Characteristics of BUS RAPID TRANSIT for Decision Making*, 2011). HOT sistemi kurgulandığında emniyet, güvenlik, güvenilirlik gibi parametreler işletme ile ilgili olduğundan çalışma kapsamında dikkate alınmamıştır. Hız, ise doğrudan HOT sistemi tarafından sağlanmaktadır. Erişilebilirlik parametresi her bir istasyonun kapsama alanları alınarak sağlanmaktadır. Konfor, İstanbul'daki mevcut metrobüs sisteminin sıkıntısını herhangi bir alternatifin dikkate alınması sonucunda artacağından dolayı, kapsanan nüfus ile ilgili kapsama alanı ve potansiyel müşteriler dikkate alınmıştır.

Bu iki veri tipi analizler kapsamında kullanılmıştır. Bunlardan bina verisi, şehirdeki tüm nüfusu temsil etmektedir. Çalışma kapsamında her bir binaya düşen nüfus sayısı da mahalle nüfuslarına göre hesaplanmış ve bölgesel olarak istasyonların çekebilecekleri nüfus net bir şekilde hesaplanmıştır. Elde edilmiş olan harita Şekil 2'de verilmiştir. Analiz sonucunda her bir olası istasyonun oluşturulması sonucunda ne miktarda nüfusu cezbedebileceği aranmaktadır. Dolayısı ile gerçekleştirilmiş olan her iki yaklaşımın sonuçlarının da mevcut arazi kullanımının dikkate alınması sonucunda başarı oranlarını hesaplayabilmektedir.



Şekil 2. İstanbul'da bina başına düşen nüfus kırılımlarını gösteren yapı haritası

Çalışma kapsamında mevcut uygulamalı matematik literatürüne katkı sağlamak hedeflenmediğinden oluşturulmuş olan matematiksel modelin karmaşıklığından öte uygulanabilir olması odak olarak alınmıştır. Sonuçlar, değerlendirmeye alınmış olan çalışma alanında matematiksel modelin başarılı olarak sonuç verebildiğini göstermiştir.

2. ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Çalışma kapsamında, daha önce de ifade edildiği şekilde matematiksel model ve sezgisel yöntem olmak üzere iki farklı yaklaşıma ait çözüm yöntemi tartışılmaktadır. Sonuçların karşılaştırılabilir olması için iki yöntemin aynı çalışma alanına uygulanması gerçekleştirilmiştir. Matematiksel model ile Sezgisel Yöntem aynı girdilere sahip olup farklı yaklaşımlar ile çözüme ulaşabilmektedirler. Matematiksel model mesafe ve ağırlık bazlı olacak şekilde optimum konumları araştırmaktadır. Sezgisel yöntem ise istasyonlar için aynı ağırlık değerlerini kullanmak ile birlikte iteratif şekilde konum analizini çalışmaktadır.

2.1. CBS Bazlı Sezgisel Yaklaşım

CBS tabanlı olarak önerilen yöntem iteratif bir yaklaşıma sahip olacak şekilde tüm odaklanılan bölgenin nüfusunu kapsayacak şekilde ilerlemelidir. Yönteme ait metodoloji akışı Şekil 3'de verilmiştir. Yöntem dikkate alınan HOT rotasını kapsayacak bir çizgi alan olarak görmekte ve istasyon noktalarını ifade eden aday noktalar

ile tüm alana hizmet vermeye çalışmaktadır. Ancak bir diğer taraftan da yerleşimi gerçekleştirilecek istasyon sayısının yüksek olması istasyonlardaki bekleme nedeni ile toplam yolculuk süresini uzatacağından ve istasyon yapım maliyetleri nedeni ile istenen bir durum değildir. Dolayısı ile yaklaşım minimum sayıda istasyon ile maksimum kapsama alanını aramaktadır.

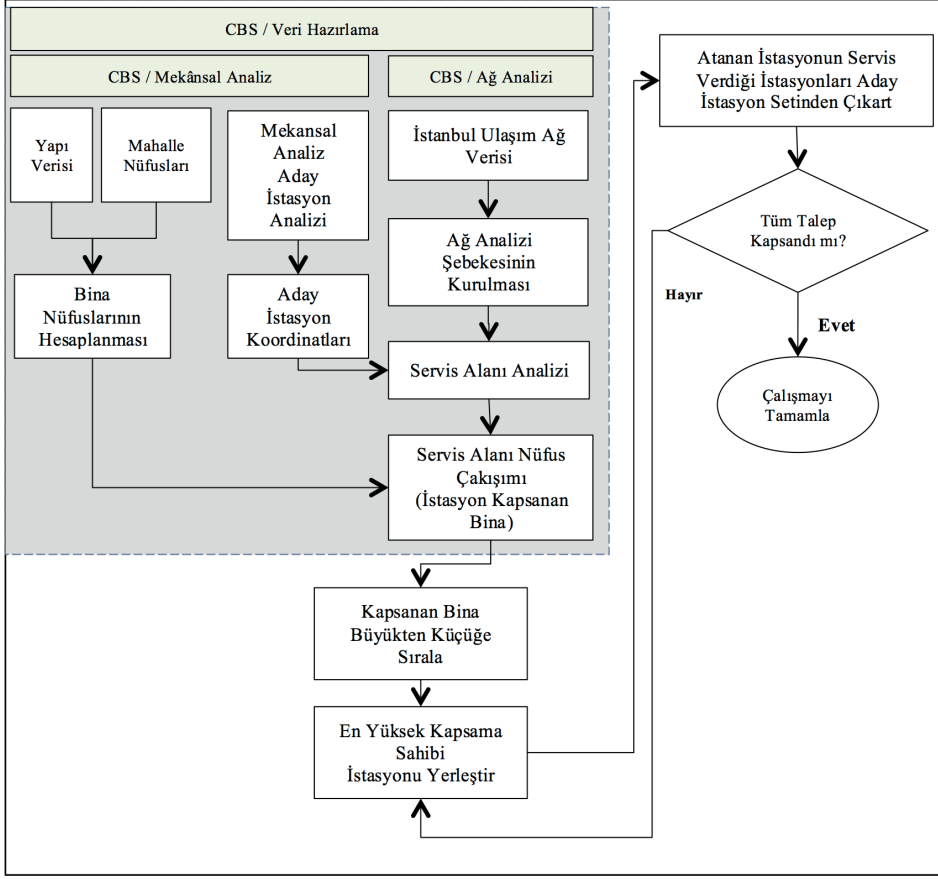
Metot, aday istasyon noktalarının belirlenmesi aşaması ile başlamaktadır. Bu işlem için CBS’de çizgi üzerinde noktaları belirleyen “*point along line*” aracının kullanılması işlemi kolaylaştırmaktadır. Bu analiz aracı ile aday HOT rotası olarak belirlenmiş olan güzergahta istenen mesafe aralığında bir nokta olacak şekilde alternatif noktanın oluşturulmasını sağlamaktadır.

İstasyon sayısının minimum olmasının istenmesi nedeni ile istasyonlar arasındaki mesafeyi kabul edilebilir seviyede tutacak CBS’nin ağ analizi yetenekleri kullanılarak istasyonlarda şehirdeki yol mesafelerine göre servis alanları belirlenmelidir. Bir istasyonun hangi mesafeye hizmet vermesinin araştırılması ayrı bir çalışma konusudur. Bu kapsamda, TÜSSİDE’nin gerçekleştirdiği “Toplu Taşıma Odaklı Trafik Planlama Projesi” kapsamında gerçekleştirilen analizler sonucunda HOT sistemlerinin etki mesafeleri belirlenmiştir (TÜSSİDE, 2016a). Bu çalışmanın çıktıları analizdeki etki sınırlarını ifade etmiştir.

Çalışma kapsamında istasyon etki alanlarının belirlenmesi gerekmektedir. Etki alanını belirlenmesinden sonra, aday noktaların her birinin etki alanında ne kadar nüfusun yaşadığının analizi aşamasına gelinmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilecek analizler için CBS’nin mekânsal ve ağ analizleri ile gerçekleştirilmelidir. İstasyon etki alanlarını ifade eden ağ analizi çıktısı poligon veriler ile nüfusu ifade eden bina yapı haritalarının kesiştirilmesi gerekmektedir. Şekil 2, analiz kapsamında kullanılabilir olan yapı haritasının örneğini ifade etmektedir. Bu harita sadece vektör veriden oluşmamakta ek olarak konut sayısı, iş yeri sayısı gibi öznitelik verilerini de içermektedir. Dolayısı ile kapsama alanları ile servis alanları karşılaştırıldığında her bir aday bölgenin kapsadığı nüfus tespit edilebilmekte ve bu veriler de istasyonların önem sıralarını vermektedir.

Etki alanları ve etki alanına düşen nüfus miktarları mevcut binalardan elde edildikten sonra bu aday noktalara ait istasyonların önem sıralanması büyükten küçüğe doğru gerçekleştirilir ve en iyi aday nokta kesinleştirilerek ilk istasyonun yerleşimi gerçekleştirilir.

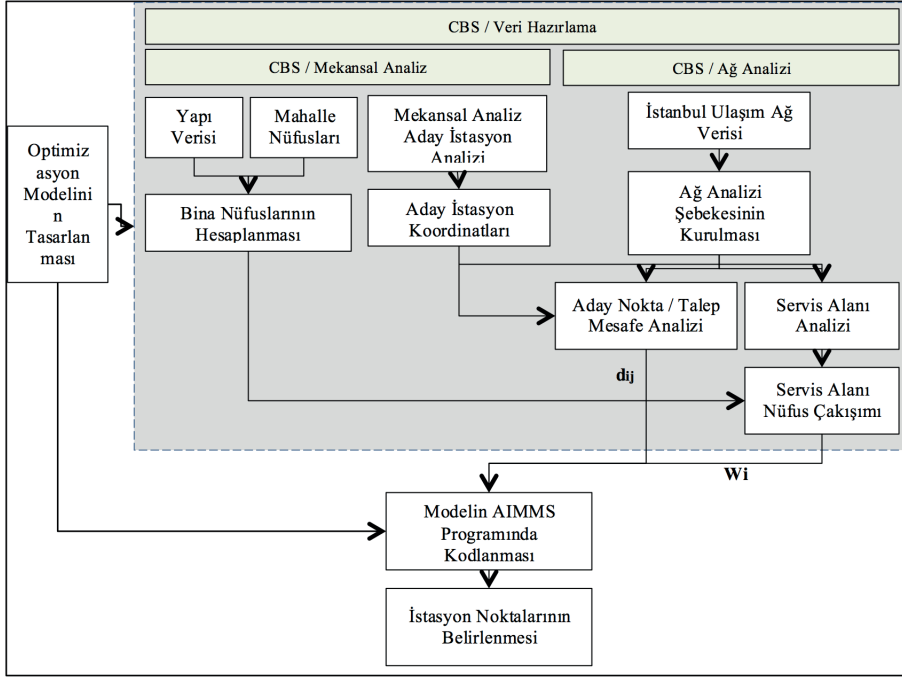
Belirlenmiş olan etki alanı miktarına göre yerleşimi gerçekleştirilen istasyonun etki alanı belirlenir. Bir aday tesisin konumu kesinleştirildiğinde, CBS üzerinde ağ analizi yeteneklerinden servis alanı analiz edilir. İstasyona ait etki mesafesine göre elde edilen servis alanı içerisindeki aday istasyon noktaları, kesinleştirilmiş olan tesis tarafından hizmet aldığından aday tesis listesinden çıkartılır. Bu işlem tüm talep noktalarına hizmet verilene kadar devam ettirilir. Tüm talep bölgelerine hizmet verildiğinde çalışma tamamlanır ve hizmet vermesi önerilen tesislerin yerleri belirlenmiş olur.



Şekil 3. CBS Yöntemi ile HOT İstasyon Yerleşim Metodolojisi

2.2. Matematiksel Modelleme Bazlı Yaklaşım

Matematiksel model p-medyan modeli tabanlı çalışmaktadır. Model ağırlıklandırılmış istasyon noktalarını dikkate almaktadır. İstasyonların ağırlıkları, servis verebildikleri nüfusu ifade etmektedir. Ek olarak hizmet verilecek bölgeler ile aday istasyonlar arasındaki mesafeler de model optimumunu ararken dikkate alınmaktadır. Dolayısı ile modele girdi sağlayacak olan parametrelerin üretilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Ek olarak analiz kapsamında dikkate alınacak olan istasyon koordinatlarının belirlenmesi de gereklidir. Bu veri ihtiyaçları CBS yetenekleri ile tamamlanabilecek niteliktedir. Bu nedenle Şekil 4’de verilmekte olan metodoloji matematiksel model için önerilmiştir. Bu metodolojiye göre CBS’nin mekânsal analiz ve ağ analizi araçları matematiksel modelin çözülebilmesi için ihtiyaç duyulan verilerin üretildiği, matematiksel model ise uygun istasyonların konumlarını analiz eden bir yöntemi ifade etmektedir. Çalışma kapsamında belirli bir rota üzerinde N sayıdaki aday istasyon noktası arasından belirli bir P sayısında istasyon sayısı aranmaktadır.



Şekil 4. Matematiksel Model Yaklaşımı İçin Uygulanan Metodoloji

Sezgisel yaklaşımda etki alanlarının belirlenmesi ve ağırlık tanımlanmasında kullanılan yöntem, matematiksel modelleme yaklaşımında da mevcuttur. Matematiksel model yaklaşımında CBS'den aday nokta talep noktası ile ilgili mesafe analizleri de ek olarak yapılmaktadır.

Merkez noktayı arayan matematiksel modellerin yapısı tek çizgiye indirilmiş olan HOT istasyonu seçimine uygun niteliktedir. Bu kapsamda *p-medyan* modeli baz model olarak alınmıştır. Modelde, *i*, haritada yer alan talep noktalarını ve *j*, aday noktalarını gösteren indisler ile kurgulanmıştır.

Kullanılan matematiksel model *p-medyan* modelinin $n*n$ 'lik yapısını çizgi yapısına çevirmekte ve HOT hattına ait rota üzerindeki en uygun lokasyonları ağırlıklarına göre konumlandırmaktadır. Kullanılmış olan matematiksel modele ait parametreler, karar değişkenleri, kısıt denklemleri ve amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Karar Değişkenleri

y_{ij} : *i*. bölge ve *j*. aday istasyondan hizmet alma durumu {0,1}

z_j : *j*. aday durağın seçilme veya seçilmeme durumu {0,1}

Parametreler

d_{ij} : i. bölge ile j. aday istasyon arası mesafe

w_i : i. aday bölgenin ağırlığı

P : seçilecek olan istasyon sayısı

Amaç Fonksiyonu

$$\min. Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I w_i * d_{ij} * y_{ij} \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_j y_{ij} \geq 1, \forall_i \quad (2)$$

$$\sum_j z_j = P \quad (3)$$

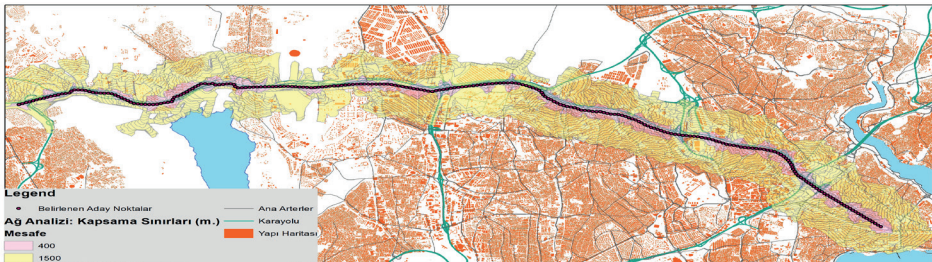
$$y_{ij} - z_j \leq 0, \forall i, j \quad (4)$$

$$y_{ij}, z_j \in \{0, 1\} \quad (5)$$

3. UYGULAMA

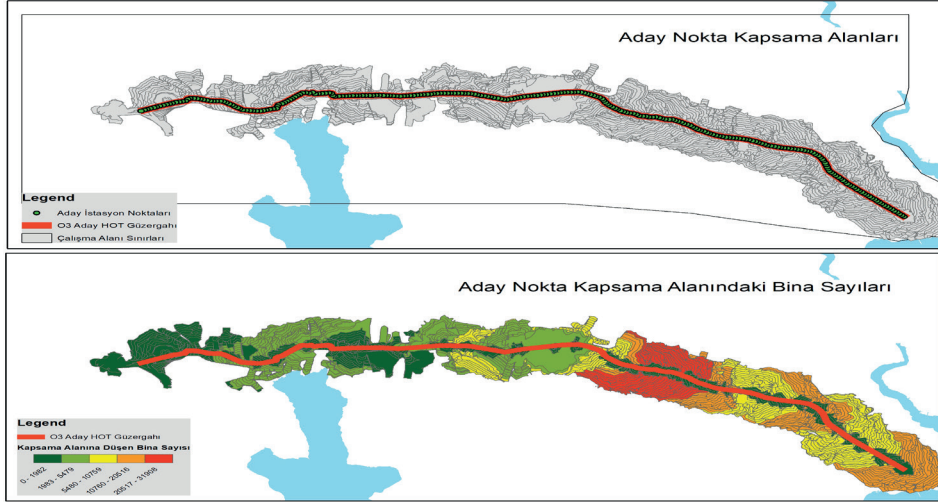
Çalışma kapsamında İstanbul'daki en yoğun yapılaşma alanlarından bir tanesi olan O3 karayolu güzergahı ele alınmıştır. Bu güzergah Fatih Vatan Caddesi'nden başlamakta ve Avcılar'ı geçerek, Büyükçekmece sınırında tamamlanmaktadır. Çalışma alanının kapsama alanına 154.257 adet bina yapısı girmekte ve bu binalara düşen konut sayısı 522.287, işyeri sayısı ise 94.504'tür. Rakamlara bakıldığında bölgenin mevcut HOT hattının bir şebekeye dönüştürülmesi için diğer hafif metro ve metro hatları ile de entegrasyon sağlama özelliği ile önemli bir aday olduğu ifade edilebilir.

Aday bölge belirlendikten sonra metodoloji bölümünde ifade edilmiş olan iki yöntem aday bölge üzerinde uygulanmıştır. Öncelikle aday güzergah üzerinde 100 metre aralıklarla aday istasyon noktaları oluşturulmuştur. Ardından ArcGIS Network Analyst özellikleri kullanılarak aday bölge üzerinde servis alanı için bir şebeke oluşturulmuştur. Her bir aday bölgeden istasyonlara en fazla yolculuğun geldiği 1500 metre mesafedeki kapsama alanı sınırı çizilmiştir. Çalışma alanı ve istasyonların etki sınırları Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 5. Aday Nokta Kapsama Sınırları

Ardından bu alanlar yapı haritası ile çalıştırılmış ve aday istasyonların bu alan içerisinde hitap edebilecekleri bina ve nüfus verileri üretilmiştir. Çalışma alanı, güzergahı ve etki alanına düşen bina sayıları Şekil 7’de görsel olarak ifade edilmiştir. Bu analiz sonucunda elde edilen bina değerleri hem sezgisel yöntemin, hem de matematik modeldeki ağırlık değerleri olarak girdi teşkil etmektedir.



Aday noktaların ağırlıkları belirlendikten sonra sezgisel yaklaşım en yüksek bina kapsamına sahip olan istasyon konumundaki tesisi kesinleştirip, servis alanındaki aday istasyonlar hizmet aldığından aday setinden çıkartarak bir sonraki en yüksek istasyona hareket eder. Bu işlemler tüm talep bölgeleri kapsanana kadar devam ettirilir. Bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için ArcGIS model üzerinde bu iteratif yapıyı izleyen bir model oluşturulmuştur. Analizlerin sonucunda elde edilen durak noktaları Şekil 7’de verilmektedir.

Matematik model yaklaşımında P-medyan bazlı oluşturulmuş model metodolojide izlenen yöntem ile çözülmüştür. Bu veriler w_i parametresini oluşturacak şekilde modele girdi oluşturmuştur. Oluşturulan model ILOG Cplex yazılımı ile çözülmüş ve uygun istasyon noktaları belirlenmiştir. Elde edilmiş olan istasyon noktaları ise Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7, her iki yöntem sonucunda konumlandırılmış olan istasyon noktalarını göstermektedir. Elde edilmiş olan istasyon noktalarının, birbirlerine yakınlık gösterdikleri belirlenmiştir.



Şekil 7. Yerleştirilen İstasyon Konumları

4. SONUÇ

HOT, metro yatırımlarına göre daha hızlı gerçekleştirilebilecek ve lastik tekerlekli alternatiflerine göre yüksek kapasiteli taşıma hizmeti sunabilecek bir taşıma türüdür. Bu üstünlükleri nedeniyle İstanbul'da da Metrobüs ismi ile ulaşımın temel yükünü almakta ve günlük 900.000'in üzerindeki sayıdaki yolculuğun gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Böylesine önemli bir ulaşım türüne ait istasyon seçimleri sadece uzman görüşüne dayalı olarak gerçekleştirilmemeli, analitik etütlere dayalı olmalıdır. Çalışma kapsamında iki çözüm yöntemi tartışılmıştır. Bunlardan ilki, CBS bazlı bir sezgisel yöntem ve optimizasyon yöntemi, diğeri ise p-medyan bazlı optimizasyon modelidir. Her iki yöntem de aynı çalışma bölgesi için, CBS ile üretilen verilerle çalıştırılmıştır. Bu sayede 500 binin üzerinde konutun bulunduğu ve yaklaşık 100 bin adet işyerinin bulunduğu bir bölge çalışma alanı olarak kullanılabilmiş ve çözüm yöntemleri test edilebilmiştir. Ulaşım planlamada arazi kullanımı en önemli girdilerden bir tanesi olduğundan bu test ortamı mevcut ulaşım talebi ile ilişkilendirilmiştir ve çözümler elde edilmiştir.

Dikkate alınan iki yöntemin sonuçları birbirine yakınsamaktadır. Bunun gerekçesi her iki yöntemin de CBS bazlı nüfus verisini girdi olarak almasıdır. Optimizasyon modeli mevcut atamaları yaparken global optimuma göre atama yapmaktadır. Modelin yapısı ise karmaşık nitelikte olduğundan problemin yapısı büyüdüğünde çözülemesiz duruma gelmektedir. CBS üzerinde oluşturulmuş olan sezgisel çözüm yaklaşımı ise nüfus talebi ile kapsama alanlarını dikkate almaktadır. Büyük veri ile şehrin yapısının yansıtılması ve ulaşım ağının şebeke modeli ile yansıtılabilmesi ve istasyonlara bu şebeke üzerinden net mesafelerin hesaplanabilmesi mümkündür. Model en yüksek ulaşım taleplerini iteratif olarak kapsayıp, kesinleştirilen istasyon ile diğer istasyonların kapsama alanlarının çalışmasını önlemektedir. Bu algoritma çözümü hızlı ola-

rak sağlamaktadır. Ancak sezgisel algoritmanın lokal optimumda takılma durumu, optimum sonuçtan daha zayıf bir sonuç vermesi söz konusudur.

Mevcut çalışmada önerisi gerçekleştirilmiş olan çalışmada kullanılan parametrelere ek olarak yol geometrisi, trafik durumu gibi faktörlerin de dikkate alınması ile yeni faktörlerin modele dahil edildiği bir çalışma araştırmacılar için öneri olarak sunulabilir. Bu kapsamda mekânsal karakteristikler ile çok kriterli yöntemlerin birleştirilmesi gerçekleştirilebileceği gibi, çok amaçlı optimizasyon da uygulanabilir.

Kaynakça/References

- Alpkokin, P., & Ergun, M. (2012). Istanbul Metrobüs: first intercontinental bus rapid transit. *Journal of Transport Geography*, 24, 58–66.
- Çancı, M. & Önden, İ. (2013). Sürdürülebilir otobüs sistemi oluşturmak için başarı kriterlerinin belirlenmesi. *Transist 2013*. İstanbul, Türkiye.
- Cervero, R., & Kang, C. D. (2011). Bus rapid transit impacts on land uses and land values in Seoul, Korea. *Transport Policy*, 18(1), 102–116.
- Characteristics of BUS RAPID TRANSIT for Decision Making*. (2011). *Federal Transit Administration*.
- Deng, T., & Nelson, J. D. (2013). Bus Rapid Transit implementation in Beijing: An evaluation of performance and impacts. *Research in Transportation Economics*, 39(1), 108–113.
- Diaz, R. (2004). *Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making*.
- Global Bus Rapid Transit Data. (n.d.).
- Kariv, O., & Hakimi, L. (1979). An Algorithmic Approach to Network Location Problems. II: The p-Medians. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 37(3), 539–560.
- Levinson, H., Zimmerman, S., Clinger, J., & Rutherford, G. (2002). Bus Rapid Transit: An Overview. *Journal of Public Transportation*, 5(2), 1–30.
- Mladenović, N., Brimberg, J., Hansen, P., & Moreno-Pérez, J. A. (2007). The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 927–939.
- Munoz-Raskin, R. (2010). Walking accessibility to bus rapid transit: Does it affect property values? The case of Bogotá, Colombia. *Transport Policy*.
- Senne, E. L. F., & Lorena, L. A. N. (2000). Lagrangean/surrogate heuristics for p-median problems. In M. Laguna & J. L. Gonzalez Verdala (Eds.), *Computing tools for modeling, optimization and simulation* (pp. 115–130). Berlin, DE: Springer.
- Shamsipour, H., Shamsipour, H., Sandizadeh, M. A., & Yaghini, M. (2012). Solving capacitated p-median problem by a new structure of neural network. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 19(8), 305–319.
- TÜBİTAK TÜSSİDE. (2016). *Ulaşımında sosyo-ekonomik etkileşim çalıştay raporu*.
- TÜBİTAK TÜSSİDE. (2016a). *İstanbul için yeni hızlı otobüs taşımacılığı sistemleri raporu*. İstanbul.
- TÜBİTAK TÜSSİDE. (2016b). *Marmaray ve M1 sistemi proje etki analizi raporu*. Gebze-Kocaeli.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2016). Adrese dayalı nüfus sisteminden elde edilen il bazlı nüfus bilgileri.
- Yazıcı, M., Levinson, H., Ilicali, M., Camkesen, N., & Kamga, C. (2013). A bus rapid transit line case study: Istanbul's metrobüs system. *Journal of Public Transportation*, 16(1).