

# Toplu taşıma türü seçiminde simülasyon destekli analitik hiyerarşi yaklaşımı

**Murat AKAD\***, Ergun GEDİZLİOĞLU

*İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ulaştırma Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul*

## Özet

*Ulaştırma yatırımları ve özellikle de kentiçi koridorlarda gerçekleştirilecek olan toplu taşıma yatırımlarında hangi ulaşırma türünün tercih edileceği son derece önemli bir karardır. Bu tercihte bir bölümü nicel bir bölümü ise nitel olan pek çok faktör etkili olur. Ölçüt olarak kabul edilen bu faktörlerin hepsinin birlikte değerlendirilmede etkili olmasını sağlayacak yöntemlerden bir tanesi, bir çok ölçütlü karar verme yöntemi olan analitik hiyerarşi yöntemidir. Bu çalışmada bir kentiçi koridorda, hangi toplu taşıma sisteminin uygulanması gerektiğine ilişkin verilecek olan karar süreci için analitik hiyerarşi yöntemi uygulanmıştır. Öte yandan, toplu taşıma türünün seçimi, seçenek türlerinin performanslarının koşullara göre nasıl değişeceği öngörülerek yapılmalıdır. Toplu taşıma sistemlerinde performans göstergelerinden önemli bir tanesi taşıtların yolculuk süreleridir. Taşıtların yolculuk süreleri bir dizi etmene göre değişmektedir. Değişen yolcu talebi, durak aralıkları, ödeme türü ve buna bağlı olarak ödeme süresi, taşıt hızı, yolcuların taşıtlara binış ve iniş süresi gibi koşullara göre toplu taşıma sistemlerinin performanslarının nasıl değiştiğini görebilmek için bu çalışmada bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Bu simülasyon modeli ile elde edilen sonuçlar, toplu taşıma türleri arasında seçim yapılması amacıyla kullanılan analitik hiyerarşi yöntemine uyarlanmıştır. Analitik hiyerarşi yönteminde, toplu taşıma türü seçimi için göz önüne alınacak diğer ölçütler belirlenmiştir. Ölçütlerin kendi aralarında ve iki toplu taşıma türü seçeneği için ağırlıkları anket ve sayısal değerlerin karşılaştırılması ile saptanmıştır. Bu simülasyon destekli analitik hiyerarşi yöntemi, İstanbul kenti içerisindeki iki koridorda "otobüs yolu" ve "tramvay" seçenekleri için uygulanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** *Toplu taşıma, simülasyon, çok ölçütlü karar verme, analitik hiyerarşi yöntemi.*

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Murat AKAD. muratakad@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 36 65.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ulaştırma Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Toplu taşıma türü seçiminde simülasyon destekli analitik hiyerarşi yaklaşımı" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 15.03.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 23.05.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.10.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Simulation supported analytic hierarchy approach in public transport mode selection

### Extended abstract

Critical decisions that are taken at the stage of planning new transportation investments or improving present transportation systems usually turn out to be selecting one alternative among others. The most important condition in transport mode selection is to make a comparison between different alternatives. This comparison stage is perhaps the most precision-requiring stage in the transport mode selection process. The comparison process has many difficulties. The foremost difficulty is to decide on the factors to be included in the comparison. Some of these factors are quantitative or are capable of being quantified; many others are qualitative. Evaluation of the qualitative factors requires experience and enforces the correct jurisdictions. Therefore, defining the comparison process with just a quantitative model is not meaningful. Accordingly, expressing the results of the comparison analysis with just a single quantitative value would not be accurate. One of the important problems in comparing investment alternatives come out in including the some criteria that cannot be expressed numerically in the analysis. These kinds of criteria are either incorrectly quantified and included in the analysis or they are being tried to be evaluated verbally.

In this study, one of the methods that are developed for including both numerical and nonnumeric criteria in the evaluation, the analytical hierarchy method is used. This method is supported by a travel time simulation model; and an application that can be useful in public transport mode selection is made.

When deciding on a new investment that is going to be made within an urban public transport system, several criteria, which expand over a broad scale, should be taken into consideration. Since they make non-numerical important factors considerable, using multiple criteria decision making processes will be more meaningful in selecting a public transport mode. Analytical hierarchy method, which is one of multiple criteria decision making methods, is used in this study. This method provides meaningful results because of its simplicity and its ability to be adopted for different conditions. For evaluating some of the varying physical conditions, a simulation model is developed and used. Thus, the proposed method can

be called a simulation supported analytic hierarchy method.

Forecasting the possible performance of a public transport mode in a corridor has numerous benefits. It is important to forecast the performance in order to make accurate decisions on factors like vehicle frequency, station places and station spacing and in deciding between more than one alternative. The varying performance of a public transport based on characteristics like varying passenger demand, speed, station spacing and boarding/alighting time (according to payment type and other physical factors) system can be forecasted with the help of a simulation model. Such a simulation model is developed in this study. The performance indicator in the model is travel time. The model is run separately for busway and tram systems.

In this study, two different examples for an urban corridor on which a public transport system will be built were taken into consideration. The alternatives of "busway" and "tram" were evaluated in the two examples, which are the Beşiktaş-Levent and Taksim-Aksaray corridors. As stated above, the analytical hierarchy method was utilised in deciding on the public transport alternative. In the analytical hierarchy method, first, the weights ( $w$ ) of each alternative and each criterion should be estimated. A survey was organised in order to receive the experts' opinions. After assessing the expert opinions gathered through the survey, relative weights of each criterion was determined. In the following step, the weights of each criterion for each of the public transport alternatives were estimated. For quantitative criteria, information from different sources was used; while for non-quantitative criteria, the second part of the survey was utilised. The weights of the criteria at the lower level of the hierarchy, which was defined by the analytical hierarchy method, were estimated for busway and tram alternatives through the method explained above. In the following step, these weights were multiplied by the criteria's own weights that are placed in the middle level of the hierarchy. The results for each alternative were then summed up in order to find a total weight for each alternative. The results show that the relative weight of the busway is slightly higher than that of the tram's. With the analytical hierarchy method, the busway is found out to be a more preferable option than the tram.

**Keywords:** Public transport, simulation, multiple-criteria decision making, analytic hierarchy process.

## Giriş

Ulaştırma yatırımları, çoğunlukla, oldukça büyük çaplı ve dolayısıyla pahalı yatırımlar olmaktadır. Gerek kentler arası gerekse kent içi ulaşım ağında yapılacak yatırımlar bu nedenle ciddi ve kapsamlı karar süreçlerini gerektirmektedir. Ulaştırma alanı doğrudan siyaset belirlemeli bir alan olduğundan, bu karar süreci, teknik içeriğinin ötesinde bir biçim almaktadır. Asıl belirleyen, teknik aşamaların ötesinde, siyasi karar süreçleri olmaktadır.

Yeni ulaşım sistemleri planlanması ya da mevcut ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi aşamasında verilecek kritik kararlar, çoğunlukla birden fazla seçenek arasından bir tanesinin seçilmesi olarak şekillenmektedir.

Kentiçi toplu taşıma sistemlerine ilişkin verilen kararlar tam da bu çerçeveye oturmaktadır. Bir kentiçi koridoru için toplu taşıma yatırımı yapılması genellikle bir toplu taşıma türünün uygulanması anlamına gelmektedir. Ancak uygulama tek bir toplu taşıma türünden ibaret olabileceği gibi, birden fazla türün bir kombinasyonu biçiminde de olabilmektedir.

Ulaşım türü seçiminin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için gereken koşulların başında, farklı seçenekler arasında bir karşılaştırmanın yapılması gelmektedir. Ulaşım türü seçimi sürecinin belki de en hassas olunması gereken aşaması bu karşılaştırma aşamasıdır. Zira karşılaştırma işleminin ortaya çıkardığı pek çok güçlük bulunmaktadır. Bu güçlüklerin başında, karşılaştırmaya dahil edilecek etmenler gelmektedir. Bu etmenlerin bazıları nicel özellikler taşımakta ya da nicelleştirilebilecek durumdadır. Buna karşılık pek çoğu da niteliklidir. Niteliksel olan unsurların değerlendirilmesi ciddi bir birikim ve deneyim gerektirmekte, doğru değer yargılarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla karşılaştırma işleminin tek başına nicel bir model ile tanımlanması anlamlı değildir.

## Ulaştırma yatırımlarının değerlendirilmesinde yaklaşımlar

Çok büyük miktarda harcama gerektiren, ekonomik, çevresel ve toplumsal etkisi çok büyük

olan ulaşım yatırımlarının, olabildiğince sağlıklı biçimde değerlendirilebilmesi için bugüne kadar çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Ulaştırma yatırımlarının değerlendirilmesi için geliştirilen çeşitli yaklaşımların iki ana başlık altında toplanması mümkündür. Genel olarak yatırımların değerlendirilmesinde kullanılan bu yöntemlerin ulaşım alanına uyarlanmış olduğu çok sayıda örnek bulunmaktadır. Bunlar,

- 1) “Fayda Maliyet Analizi”
- 2) “Çok Ölçütlü Analiz”dir.

Yatırım seçeneklerinin değerlendirilmesinde bir dizi faktör göz önüne alınmaktadır. Fayda maliyet analizi, temel olarak, yapılması düşünülen yatırım seçeneklerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla, dikkate alınan bütün faktörlerin parasal olarak ifade edilmesine dayanmaktadır. Yatırımlar, ulusal ekonomi açısından yaratacakları etkiler düzeyinde ele alınır. Fayda maliyet analizinin belirli ilkeleri ve kuralları vardır. Yatırımların olası etkileri hesaplanırken bu ilke ve kurallara bağlı kalınarak değerlendirme yapılır.

Fayda maliyet analizinin yaygın kabul gören en önemli eksikliği parasal olarak ifade edilmesi çok güç olan faktörlerin hemen hemen hiç dikkate alınmamasıdır. Bu faktörler çoğunlukla fayda maliyet analizinin geliştirildiği dönemlerin sonrasında ulaşım planlamasında önem atfedilmeye başlanan (kentsel yapıya, tarihsel dokuya uygunluk gibi) faktörlerdir (De Corla-Souza vd., 1997). O’Leary’ye (1979) göre fayda maliyet analizinde iki adet ciddi kısıt bulunmaktadır. Bu kısıtlardan biri, analizde hesaba katılan bütün verilerin doğru ve deterministik olabileceğinin varsayılmasıdır. İkinci kısıt ise finansal risk hesabının yapılmamasıdır.

Fayda maliyet analizinin, değerlendirmeye alınan bütün faktörlerin parasal olarak ifade edilmesine dayanması ve bir bölümü yukarıda sayılan olumsuzlukları barındırması, araştırmacıları daha kapsamlı yöntemler aramaya yöneltmiştir. Özellikle sayısal olarak ifade edilmesi güç bazı faktörlerin değerlendirmeye alınabileceği yöntemler üzerinde durulmuştur. Bu doğrultuda

“Çok Ölçütlü Değerlendirme” yaklaşımı ulaştırma yatırımları için düşünülen seçeneklerin değerlendirilmesinde öne çıkmıştır. Çok ölçütlü karar problemlerini iki aşamalı olarak ifade etmek mümkündür. Bu aşamalardan bir tanesinde kesikli bir problem tanımı yapılır. Örneğin, yatırım seçeneklerinden bir tanesinin tercih edilmesi gibi bir problem, kesikli bir problemdir. Diğer aşamada ise bir sürekli problem tanımı yapılır. Çok ölçütlü karar verme yaklaşımı iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar,

- 1) Sıralama Yaklaşımı,
- 2) Matematik Programlama Yaklaşımı’dır.

Sıralama yaklaşımlarının içerisinde ise Analitik Hiyerarşi Yöntemi, Bulanık Sıralama Yöntemi ve Çok Ölçütlü Sıralama Yöntemi gibi çeşitli yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıralama yaklaşımları, oldukça basit ve kullanılması kolay, sade yöntemlerdir. Kapsayıcı olmaları ulaştırma alanında da yaygın olarak tercih edilmelerini sağlamıştır.

### **Toplu taşıma türü seçiminde etkili olan ölçütler**

Bir kentiçi toplu taşıma sistemi bünyesinde yapılacak olan yeni bir yatırıma karar verilirken, bir dizi ölçütün göz önüne alınması gerekmektedir. Bu ölçütler, sistemin özellikleri çeşitli açılardan değerlendirilmesi gerektiği için çok geniş bir yelpazeye yayılır. Pek çok ülkede değişik çalışmalarda kullanılan ölçütler arasında da değişiklikler bulunmaktadır.

Bir toplu taşıma sistemine farklı biçimlerde dahil olan çeşitli gruplar bulunmaktadır. Söz konusu gruplar arasında bulunan uzmanlar, kullanıcılar ve işletmeler doğrudan sistemle doğrudan etkileşim içerisinde. Bir de ulaştırma sistemlerinden daha dolaylı biçimde, özellikle çevresel etkiler dolayısıyla etkilenen toplumsal kesimler bulunmaktadır.

Toplu taşıma sistemleri seçiminde etkili olan ölçütler, her bir grup açısından ayrı ayrı değerlendirme yapıldığında, çeşitlilik gösterebilirler. Ölçütlerden bazılarını bütün gruplar önem atfedecektir. Öte yandan, bazı gruplar için önemli

olup, diğerleri için aynı önemi taşımayan bazı ölçütler olabilir.

Toplu taşımanın gerek doğal yapısı gerekse toplumsal işlevi göz önüne alındığında, bunun ilkel olarak bir “kamu hizmeti” olduğu sonucuna varılacaktır. Bir kamu hizmetinin temel ilkesi, kullanıcıların, yani toplu taşıma sistemleri için yolcuların önceliklerinin, diğer önceliklerle birlikte dikkate alınmasıdır. Örneğin, ağırlıklı olarak yolcular için önem taşıyan “araç konforu” gibi bir etkenin, yatırıma karar veren kurum için teknik açıdan bir önemi bulunmayabilir. Ancak kamu hizmeti veren bir kuruluş olarak bu kurumun yolcu önceliklerini de başka etkenlerle birlikte hesaba katması gerekecektir.

Dolayısıyla kullanıcıların karar verme süreçlerinde doğrudan ya da dolaylı katılımlarının mümkün olmaması durumunda dahi, onlar için önemli olan ölçütlerin, bütün ölçütler ile aynı düzlemde karar süreçlerinde dikkate alınması gerekmektedir.

Toplu taşıma seçeneklerini karşılaştırmada kullanılan en yaygın kategoriler maliyet, kapasite ve hızdır (Gardner, 1995). Öte yandan, kapasite kavramının toplu taşıma türleri arasında bir tercih yapılması aşamasında ne denli anlamlı bir ölçüt olacağı tartışmalı bir konudur. Bir ulaşım koridorunda varolan ya da varolması öngörülen yolcu talebi, hangi kapasite düzeyinin sağlanması gerektiğini doğrudan etkiler. Sözgelimi, bir yöndeki saatlik yolcu talebinin 60 000 kişi olduğu bir koridorda metro dışındaki seçeneklerin değerlendirmeye alınması pek olası değildir. Bu durumda yapılması gereken tercih bellidir.

Ayrıca kapasite, uygulamada değişiklik gösterebilen bir etmendir. Örneğin, bir ulaşım koridorunda, yolcu talebinin daha yüksek olduğu zirve saatlerde bir tramvay dizisi çok sayıda vagonla işletilebilirken, talebin daha düşük olduğu saatlerde vagon sayısı azaltılabilir. Yani, tramvayın kapasitesi farklı saatlerde farklı değerler alabilir.

Bu durumda, “kapasite” kavramı yerine, “taşınan yolcu sayısı” gibi bir kavramın kullanılması daha doğru olacaktır.

Bir kentiçi koridorda uygulanacak toplu taşıma sisteminin türüne karar verebilmek için göz önüne alınması gereken ölçütlerin en önemlileri arasında, “yolculuk süresi” de bulunmaktadır.

Yukarıda sayılan gerekçelere dayanarak, sayısal olarak ifade edilemeyen önemli etmenleri de sağlıklı biçimde göz önünde bulundurmayı olanaklı kıldığından, çok ölçütlü karar verme süreçlerinin, bir toplu taşıma türü seçimi sürecinde anlamlı sonuç vereceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, çok ölçütlü karar vermede kullanılan yöntemlerden biri olan analitik hiyerarşi yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu yöntem gerek basitliği, gerek esnekliği gerekse farklı koşullara uyum sağlayabilme yeteneği dolayısıyla anlamlı sonuçlar alınmasını sağlamaktadır. Analitik hiyerarşi yöntemi, bugüne değin pek çok farklı disiplinel alanda karşılaşılan problemlerin çözümünde kullanılmış ve verimli olduğu kanıtlanmış bir yöntemdir. Ulaştırma alanında da pek çok problem için uygulanmış ve anlamlı sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır. Analitik hiyerarşi yöntemi sayesinde, toplu taşıma türü tercihi yapılırken göz önüne alınması gerekli görülen bütün etmenlerin değerlendirme sürecine dahil edilmesi sağlanmış olacaktır. Bu yapılırken, farklı hiyerarşik düzeyler tanımlanması ve etmenlerin bu düzeylerde değerlendirilmesi mümkündür.

Bu çalışmada, analitik hiyerarşi yönteminin sağladığı avantajların yanında simülasyon modellerinden yararlanılması da öngörülmüştür. Bu doğrultuda, bazı fiziksel koşulların değişmesi durumunun bir simülasyon modeli yardımı ile göz önüne alınması düşünülmüştür.

Varolan ya da yapılması planlanan bir sistemi gözlemek için yararlanılan en verimli yöntemlerden bir tanesi, belki de en önemlisi simülasyon adı verilen yöntemdir. Simülasyon, bir model aracılığıyla, sistemin davranışı ile ilgili bilgilerin elde edilmesini sağlar. Toplanan veriler, hayata geçirilmesi planlanan sistemin tasarlanmasında son derece işlevsel olabilir. Tasarımda bu bilgilerden yararlanmak, sistemin ger-

çekte nasıl işleyeceğine ilişkin önemli bir zemin sunar.

Simülasyon aracılığıyla, modellenen sistemin performansı hakkında bilgi edinilir. Daha da önemlisi, sistemin farklı koşullar altında nasıl çalışacağına simülasyon aracılığıyla tahmin edilebilmesidir. Böylece sistemin verimliliği, belirli sorunlarla karşılaşılıp karşılaşılmayacağı gibi önemli olgularla ilgili fikir sahibi olunması mümkün olacaktır.

Bir kentiçi koridorunda işletilen bir toplu taşıma sisteminin göstereceği performans, pek çok etkenin yanında bir dizi fiziksel koşulun da etkisi altındadır. Yolcu talebi, yolcuların taşıtlara binış ya da iniş süresi gibi etkenler, sistemin göstereceği performansı doğrudan etkiler. Bu fiziksel koşulların, bir toplu taşıma sistemini nasıl etkileyeceğini öngörebilmek, yatırım aşamasında büyük önem taşımaktadır. Simülasyon, bu etkileşimin öngörülebilmesi için kullanılabilir en verimli yöntemdir. Bir kentiçi koridorda, hangi toplu taşıma türünün uygulamaya geçirileceğine ilişkin karar verilirken, simülasyon sayesinde seçeneklerin performanslarının somut olarak karşılaştırılabilmesi mümkün hale gelecektir. Analitik hiyerarşi yöntemi ile değerlendirmeye dahil edilen etkenlerin yanında simülasyon ile tahmin edilen performansın bütünsel olarak ele alınması toplu taşıma türü seçiminde etkin bir süreç ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Bu nedenle, bu çalışmada önerilen yöntem, simülasyon destekli analitik hiyerarşi yöntemi olarak adlandırılmıştır.

### **Yolculuk süresi ve simülasyonu**

Bir kentiçi koridorda uygulanacak toplu taşıma sisteminin türüne karar verebilmek için göz önüne alınması gereken ölçütlerin en önemlileri arasında, “yolculuk süresi” de bulunmaktadır. Yolculuk süresi, bir dizi faktörün etkisi altında bulunan ve koşullara göre farklılık gösteren bir değişkendir. Rudnicki (1999), bir kentiçi toplu taşıma yolculuğunun süresi için, toplumsal etkenleri de içeren oldukça karmaşık bir hesap yöntemi önermiştir.

Yolculuk süresinin çeşitli bileşenleri bulunmaktadır.

Bir yolcu için yolculuk süresi taşıt içerisinde geçen süre ile taşıt dışında geçen sürenin toplamından ibarettir. Taşıt içinde geçen süre taştan binildiği anda başlar ve taşıttan inildiği anda biter. Bu zaman aralığında taşıt hareket halinde ya da duruyor (hareketsiz) olabilir. Taşıt dışında geçen süreyi ise şu bileşenlerle tanımlayabiliriz: Çıkış noktası ile taşıta binilecek nokta (durak) arasında geçen yürüme süresi, durakta beklenen süre, varsa aktarma için geçen süre (birinci taşıttan inilen nokta ile ikinci taşıta binilecek nokta arasındaki yürüme süresi ile ikinci taşıta binilecek noktadaki bekleme süresi), taşıttan inildikten sonra hedefe varılması için gereken yürüme süresi.

Bir toplu taşıma aracı için yolculuk süresi, duraklar arasındaki mesafenin kat edilmesi için geçen süre ile duraklarda harcanan süreden oluşur. Durakta harcanan süre de yolcuların araca binmeleri, inmeleri ve eğer varsa taşıtın kuyrukta beklemesi için geçen süreden ibarettir.

Bu çalışmada taşıt yolculuk süresi göz önüne alınmıştır.

Duraklar arasındaki mesafeyi kat etmek için gereken süre, taşıtın normal trafik akışı içerisinde diğer taşıtlarla birlikte hareket edip etmediği ile doğrudan ilgilidir. Yolculuk süresi bileşenlerinden durakta bekleme süresi ise öncelikle yolcu talebine bağlıdır. Yolcu talebi arttıkça yolcuların taşıta binme ya da taşıttan inme süreleri artacaktır. Taşıtların geliş sıklığına ve yine yolcu talebine bağlı olarak, durakta kuyruklanma, yani birden fazla taşıtın arka arkaya durak alanı içerisinde sıralanması olasılığı bulunmaktadır. Kuyruklanma durumunda öndeki taşıtın beklediği sürenin arkadaki taşıt ya da taşıtları etkilemesi ve durakta harcanan sürenin artması olasılığı bulunmaktadır.

Yolcuların taşıta binerken ve taşıttan inerken harcadıkları süre durakta harcanan toplam sürenin bir bileşenidir. Bir yolcunun ortalama biniş süresi, taşıtın bazı özelliklerine ve yolcunun biniş esnasında ücret ödeyip ödemediğine bağlıdır.

Bir toplu taşıma türünün bir koridordaki olası performansının değişik koşullarda nasıl gerçekleştiğinin önceden tahmin edilebilmesinin sayısız yararı bulunmaktadır. Taşıtların sıklığı, durak yerleri, durak aralıkları gibi etkenler ile ilgili kararların sağlıklı bir şekilde alınabilmesi için performansın öngörülmesi önemlidir.

Dahası, bir koridorda farklı toplu taşıma türlerinin yukarıda açıklanan bağlamda nasıl performans sergileyecekleri, birden fazla seçenek arasında karar vermede bir ölçüt oluşturması açısından önem taşıyacaktır.

Toplu taşıma sisteminin, değişen yolcu talebi, hız, durak aralıkları, (ödeme şekilleri ve diğer fiziksel etmenlere bağlı olarak) biniş ve iniş süresi gibi özelliklerine göre performansının nasıl değiştiği, bir simülasyon modeli yardımı ile öngörülebilir.

Bu çalışmada böylesi bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. TTSIM (Toplu Taşıma Simülasyon Modeli) adı verilen model, değişik koridorlarda, değişik toplu taşıma sistemlerinin değişik koşullarda yolculuk sürelerinin nasıl değiştiğini tahmin etmektedir.

Bu model, yolcu talebi, durak aralıkları, taşıt hızı, yolcuların iniş ya da biniş süreleri gibi değişkenlerin değişmesi durumunda bir sistemin performansının nasıl değiştiğini gösterebileceği gibi, farklı güzergahlarda, farklı toplu taşıma sistemleri için de kullanılabilir.

Bu çalışmada elde edilen model, dinamik bir simülasyon modelidir; zira, sistemi, zaman içerisindeki değişimleri ile birlikte temsil etmektedir.

Modelin girdileri arasında bulunan yolcu sayıları rastgele değişkenlerdir. Dolayısıyla, bir üst ve alt sınır içerisinde kalan çıktı verileri, yani yolculuk süresi verileri de rastgeledir. Bu nedenle model aynı zamanda stokastik bir modeldir.

Modelde, gezenbirimler olan yolcular, sisteme girmekte, hizmet görerek sistemden çıkmaktadırlar. Görülen hizmet, taşıta biniş, yolculuk ve taşıttan inişi kapsamaktadır. Dolayısıyla model, kesikli bir simülasyon modelidir.

Model, aynı zamanda sayısal bir modeldir; zira belirli kabullere dayanılarak, sistemin yapay bir tarihçesi üretilmiş ve gerçek sistem performans ölçülerini tahmin etmek için veriler derlenmiş ve çözümlenmiştir.

Bu çalışmada bir simülasyon modelinin üretilme amacı, bir kentiçi koridorunda işletilen bir toplu taşıma sisteminin, değişen koşullarda nasıl bir performans göstereceğinin belirlenebilmesidir. Üretilen modelde performans göstergesi yolculuk süresidir. Model, otobüs yolu ve tramvay sistemleri için ayrı ayrı çalıştırılmıştır.

Modelin gezenbirimleri, rastgele değişkenleri yolculardır. Diğer girdiler taşıt hızı, yolcuların taşıtlara iniş ve biniş süreleri ve duraklar arası mesafelerdir.

Modele girdi oluşturması amacıyla Beşiktaş-Levent ve Aksaray-Taksim koridorlarındaki otobüs yolcularının sayıları derlenmiştir. Veriler, 2002 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Ulaştırma Uygulama Araştırma Merkezi tarafından yapılan "İETT Hatlarının Etüdü ve Rehabilitasyon Projesi" isimli çalışmadan alınmıştır (Y.T.Ü., 2002).

Duraklar arası mesafeler bilgisayar ortamındaki haritalardan ölçülmüştür. Taşıt hızları dünyadaki çeşitli sistemlerde gözlenen değerlerden uyarlanmıştır (Gardner, 1995; Gardner vd., 1994). Yolcuların ortalama biniş ve iniş süreleri ise doğrudan ölçülmüştür.

Yolcu sayılarının normal dağılıma uyup uymadığını araştırmak için MiniTab isimli bilgisayar programından yararlanılmıştır. Programın sonuçları verilerin normal dağılıma uyduğunu göstermektedir.

Bir sonraki adımda simülasyon modeli için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bunun için Microsoft Excel programından yararlanılmıştır. İlk excel sayfası veri girişi amacıyla kullanılmıştır.

Excel'in ikinci sayfası rastgele sayı üretimi ve modelin çalıştırılmasına ayrılmıştır. İlk örnekte

Beşiktaş-Levent ve Levent-Beşiktaş yönleri için, ikinci örnekte ise Aksaray-Taksim ve Taksim-Aksaray yönleri için ayrı ayrı tekrar sayfaları hazırlanmıştır. Bu sayfalarda her durak birer adım olarak tanımlanmıştır. Her durakta, o durğa geldiğinde taşıtın içinde bulunan yolcu sayısı, o durakta taşıttan inen, o durakta taşıta binen ve taşıt duraktan ayrıldığı anda taşıtın içerisinde kalan yolcu sayıları belirlenmiştir. Yolcu biniş ve iniş sürelerinden büyük olanı, taşıtın durakta geçirdiği süre olarak alınmıştır. Taşıtların duraklar arasında geçirdiği süreler ile duraklarda geçirdiği sürelerin toplamı da yolculuk süresini vermiştir.

Her adımda, yani her durakta inen ve binen yolcu sayıları için rastgele sayılar atanmıştır. Rastgele sayı atanması için visual basic programlama dilinde makrolar yazılmıştır.

Tekrar için aynı sayfada, sabah, öğlen ve akşam verileri için birer sütun ayrılmıştır. Her sütunda elde edilen yolculuk süreleri sütunların hemen yanındaki grafiklere işlenmiştir.

Tekrar sırasına göre, program önce eski değerleri sıfırlamakta, ardından yeni değerler elde etmektedir.

Sonuçlar, Excel sayfalarının sonuncusunda gösterilmektedir. Bu sayfada yolculuk süreleri, sabah, öğlen ve akşam saatleri için birer sütun ayrılarak gösterilmiştir. Aynı sayfada bu sütunların hemen yanında her üç aralık için elde edilen değerler aynı grafik üzerine işlenerek verilmiştir.

Aynı sayfada ayrıca çıktıların, yine sabah, öğlen ve akşam için ayrı ayrı olmak üzere ortalama, standart sapma, alt sınır ve üst sınır değerleri gösterilmiştir. Aynı tablocuklarda alt sınırın altında ve üst sınırın üstünde kalan çıktı değerlerinin sayıları da verilmiştir.

### **Çok ölçütlü değerlendirme süreci**

Yukarıda da belirtildiği gibi bu çalışmada, toplu taşıma türü seçimi için bir çok ölçütlü karar verme yöntemi olan analitik hiyerarşi yönteminin (AHY) kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu yöntem, 1970'lerde Thomas L. Saaty tarafından

geliştirilmiştir. Saaty (1980), yöntemi bütünlüklü olarak ele almaktadır.

AHY’de probleme ilişkin temel hedef, ölçütler, öznitelikler, alt ölçütler ve alternatifler arasındaki ilişki hiyerarşik bir yapıda modellenir. Bu yaklaşımın en önemli özelliklerinden birisi gerek nesnel, gerekse öznel düşüncelerin karar verme sürecine dahil edilmelerine olanak sağlamasıdır. AHY ile bilgi, deneyim, bireyin öznel düşünceleri ve önsezileri belirli bir mantık çerçevesinde bir araya getirilir. AHY ile kişiler, nasıl karar vermeleri gerektiği konusunda bir yöntem kullanmaya zorunlu olmak yerine, kendi karar verme sistematüğını kavrayıp bu şekilde daha iyi kararlar vermeleri amaçlanır.

Toplu taşıma türü seçiminde tercihte etkin olacak ölçütlerin belirlenmesi için, daha önceki çalışmalarda ele alınan ölçüt kümeleri gözden geçirildi. Değişik çalışmalarda kullanıldığı gözlenen ölçütler arasından, bu çalışma kapsamında uygun olacağı düşünülenler belirlendi. Bu ölçütler Tablo 1’de verilmiştir.

*Tablo 1. Toplu taşıma türü seçiminde dikkate alınması gereken ölçütler*

Ölçüt
1) Yolculuk süresi
2) Yolculuk maliyeti
3) Durakta bekleme süresi
4) Araçlara (duraklara) ulaşabilme kolaylığı
5) Araç konforu
6) Toplam yapım maliyeti
7) İşletme ve bakım maliyeti
8) Hava kirliliğine etkisi
9) Gürültü kirliliğine etkisi
10) Görüntü kirliliğine etkisi
11) Ulaşım ana planına uygunluk
12) Kentin tarihi dokusuna uygunluk
13) Kentsel yapıya uygunluk
14) Yapım ve işletmeye açılma süresi
15) Kazaya karışma olasılığı
16) Talepteki değişimlere uyum sağlama yeteneği
17) Proje ömrü ve proje ömrü sonundaki değeri

Bu çalışma kapsamında bir kentiçi koridorunda yapımı öngörülen toplu taşıma sisteminin seçimi için iki örnek ele alınmıştır. Ele alınan örneklerden ilkinde Beşiktaş-Levent koridorunda “tramvay” ve “otobüs yolu” seçenekleri arasında değerlendirme yapılmıştır. İkinci örnekte ise Taksim-Aksaray koridorunda, yine “tramvay” ve otobüs yolu” seçenekleri arasında değerlendirme yapılmıştır.

Önemli bir koridor olmakla birlikte Beşiktaş-Levent koridorunda toplu taşıma olanakları yalnızca otobüslerle sınırlı kalmıştır. Yıllardır bu aralıkta işleyen minibüslerin çağdaş ve verimli bir taşıma sistemi oluşturmadığı açıktır.

Bu koridorda bir otobüs yolu uygulaması ya da tramvayın bu koridora doğru ilerletilmesi gibi iki hayali seçenek göz önüne alınmıştır.

Beşiktaş ile Levent arasında Barbaros, Yıldız Teknik Üniversitesi, Ertuğrul Sitesi, Darphane, Kışlaönü, Köprülü Kavşak ve Zincirlikuyu durakları bulunmaktadır. Simülasyon modelinde kullanılan yolcu verileri, 2002 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Ulaştırma Uygulama Araştırma Merkezi tarafından yapılan “İETT Hatlarının Etüdü ve Rehabilitasyon Projesi” isimli çalışmadan derlenmiştir (Y.T.Ü., 2002).

Taksim-Aksaray koridoru da belirli açılardan Beşiktaş-Levent koridoruna benzeyen yönler barındırmaktadır. Taksim ile Aksaray arası da İstanbul’daki toplu taşıma ağında önemli bir koridor teşkil etmektedir.

Bu koridorda da bir otobüs yolu uygulaması ya da bir tramvay hattı inşaatı gibi iki hayali seçenek göz önüne alınmıştır.

Taksim ile Aksaray arasında Tarlabası, Ömer Hayyam, Tepebaşı, Şişhane, Unkapanı, Müze ve Büyükşehir Belediyesi durakları bulunmaktadır. Simülasyon modelinde kullanılan yolcu verileri, bu aralık için de, 2002 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Ulaştırma Uygulama Araştırma Merkezi tarafından yapılan “İETT Hatlarının Etüdü ve Rehabilitasyon Projesi” isimli çalışmadan derlenmiştir (Y.T.Ü., 2002).



Analitik hiyerarşi yönteminde etkili olan ölçütlerin ağırlıklarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntem uzmanların görüşüne başvurulmasıdır. Bu çalışmada da aynı yöntem benimsenmiştir.

Uzmanların görüşlerinin alınması amacıyla bir anket düzenlenmiştir. Bu anket, İstanbul Teknik Üniversitesi, İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi ve Denizli Pamukkale Üniversitesi bünyesinde ulaştırma konusunda uzman 35 kişiye uygulanmıştır.

Anketin birinci bölümünde Tablo 1’de verilen ve toplu taşıma türü seçiminde etkili olan ölçütlerin birbirlerine göre ağırlıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ankete katılan her uzmandan bu ölçütlerin her biri için, o ölçütün önem derecesini belirtecek şekilde 1 ile 5 arasında bir sayı ataması istenmiştir. Bu sayede, toplu taşıma sistemine karar verilme sürecinde her bir ölçütün hangi önem düzeyine sahip olacağı, bir diğer deyişle hangi önem derecesinde sürece katılacağı belirlenmiştir.

Anketin ikinci bölümünde ise, göz önüne alınan ölçütler bir sınıflandırmaya gidilerek sadeleştirilmiştir. Ölçütlerin bir bölümü sayısal olarak ölçülebilen ve ifade edilebilen ölçütlerdir. Bu tür ölçütlerin tramvay ve otobüs yolu seçeneklerine ilişkin ağırlıklarının belirlenmesinde bu sayısal ifadelerden yararlanılmıştır.

Sayısal olarak ifade edilmesinde güçlük çekilen diğer ölçütler için ise yine uzmanların görüşüne başvurulmuştur. Her uzmandan bu ölçütlerin her biri için tramvay ve otobüs yolu seçeneklerine yönelik ayrı ayrı bir önem düzeyi belirlemesi istenmiştir.

Anketlerden elde edilen sonuçlar, uzmanların en fazla önem atfettikleri ölçütün “yolculuk süresi” olduğunu göstermektedir. Bu ölçütün önem düzeyi 4.5313 olarak elde edilmiştir. En az önem atfedilen ölçüt ise “proje ömrü ve sistemin proje ömrü sonundaki değeri” olmuştur. Uzmanların verdikleri puanların ortalaması bu ölçüt için 3.3438 olmuştur. Diğer ölçütlerin aldıkları değerler 4.5313 üst sınırı ile 3.3438 alt sınırı arasında dağılmaktadır.

Anketlerden elde edilen önem derecelerinin analitik hiyerarşi yönteminde girdi olarak kullanılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, önem derecelerinin en büyüğünü 1’e indirmek ve diğerlerini de aynı oranda küçültmek ilk adımı oluşturmaktadır. Bu hale getirilen değerlerin yardımı ile bir karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Daha sonra bu karşılaştırma matrisi normalize edilmiştir.

Normalize edilen matristeki sütunların her biri bir ölçüte aittir. Bu sütunların ortalamalarının alınması ile her ölçütün analitik hiyerarşi yöntemindeki ağırlıkları (w) elde edilecektir. Bu işlemin ardından her ölçütün ağırlığı Tablo 2’de görüldüğü gibi elde edilmektedir.

Tablo 2. Ölçütlerin, 1’e oranlanmış önem dereceleri

Ölçüt	Önem Derecesi
1) Yolculuk süresi (YS)	$w_{YS} = 0.06748$
2) Yolculuk maliyeti (YM)	$w_{YM} = 0.06143$
3) Durakta bekleme süresi (DBS)	$w_{DBS} = 0.05771$
4) Araçlara (duraklara) ulaşabilme kolaylığı (AUK)	$w_{AUK} = 0.05817$
5) Araç konforu (AK)	$w_{AK} = 0.05445$
6) Toplam yapım maliyeti (TYM)	$w_{TYM} = 0.06004$
7) İşletme ve bakım maliyeti (İBM)	$w_{İBM} = 0.06376$
8) Hava kirliliğine etkisi (HKE)	$w_{HKE} = 0.05957$
9) Gürültü kirliliğine etkisi (GKE)	$w_{GKE} = 0.05538$
10) Görüntü kirliliğine etkisi (GK)	$w_{GK} = 0.05212$
11) Ulaşım ana planına uygunluk (UAU)	$w_{UAU} = 0.06469$
12) Kentin tarihi dokusuna uygunluk (KTU)	$w_{KTU} = 0.06957$
13) Kentsel yapıya uygunluk (KYU)	$w_{KYU} = 0.05631$
14) Yapım ve işletmeye açılma süresi (YİS)	$w_{YİS} = 0.05525$
15) Kazaya karışma olasılığı (KKO)	$w_{KKO} = 0.06329$
16) Talepteki değişimlere uyum sağlama yeteneği (TDU)	$w_{TDU} = 0.06097$
17) Proje ömrü ve proje ömrü sonundaki değeri (PÖD)	$w_{PÖD} = 0.04980$

Bundan sonraki aşamada, toplu taşıma seçenekleri için her bir ölçütün ağırlığını hesaplamak gerekmektedir. Bu amaçla sayısal değerler için çeşitli kaynaklardan, sayısal olarak ifade edil-

mesi güç ölçütler için, yapılan anketin ikinci bölümünden yararlanılmıştır.

Yolculuk süresi ölçütünün ağırlığının belirlenmesinde, daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi bir simülasyon modelinden yararlanılmıştır. Bu modelin bu çalışmada hem Beşiktaş-Levent hem de Aksaray-Taksim koridorlarında uygulanması sonucunda otobüs yolu ve tramvay seçenekleri için yolculuk süresi ölçütünün ağırlıkları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Ağırlıklar belirlenirken, yolcu talebinin en yüksek olduğu akşam zirvesi göz önüne alınmıştır.

Her iki koridorda da her iki yön için ayrı ayrı ağırlıklar bulunmuş, daha sonra bunların ortalamaları alınmıştır. Beşiktaş-Levent koridorunda tramvay ve otobüs yolu seçenekleri için elde edilen yolculuk süresi ölçütü ağırlıkları aşağıdaki gibidir.

Tramvay için:  $w_{YSt} = 0.5037$

Otobüs Yolu için:  $w_{YSo} = 0.4963$

Aksaray-Taksim koridorunda ise tramvay ve otobüs yolu seçenekleri için elde edilen yolculuk süresi ölçütü ağırlıkları aşağıdaki gibidir.

Tramvay için:  $w_{YSt} = 0.5197$

Otobüs Yolu için:  $w_{YSo} = 0.4803$

Yolculuk süresi ölçütüne göre Aksaray-Taksim koridorunda tramvay, Beşiktaş-Levent koridorundakine göre daha avantajlı görünmektedir.

Her iki seçenek için de günümüzde bu koridorda varolan durakların kullanılacağı varsayılmıştır. Geliştirilen simülasyon modeli durakların yer ve sayılarının değişmesi durumuna da duyarlı olduğundan, değerlendirmeye alınan projede bu tür değişiklikler olması durumu için de kullanılabilir.

Gerek tramvay gerekse otobüs yolunun, diğer motorlu taşıt trafiğinden ayrı, kendilerine ait birer yola sahip olduğu varsayılmıştır.

Bu çalışma için Beşiktaş ile Levent arasındaki duraklar arası mesafeler ve Aksaray ile Taksim arasındaki duraklar arası mesafeler bilgisayar

ortamındaki haritalardan ölçülmüştür. Taşıt hızları ile yolcuların ortalama binış ve iniş süreleri ise arazide yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Bu ölçümlere göre otobüs için yolcu binış süresi ortalama 1.4 saniye, iniş süresi 1.2 saniye alınmıştır. Aynı değerler tramvay için 0.9 saniye ve 0.8 saniye olarak kabul edilmiştir. Bu değerlerden de görülebileceği gibi iki sistemin süreleri arasında belirli bir fark bulunmaktadır. Bu fark, taşıtların fiziksel özellikleri ile ödeme biçimlerinden kaynaklanmaktadır.

Yolculuk süresi haricindeki on altı ölçüt için tramvay ve otobüs yolu seçeneklerine göre elde edilen ağırlıklar Beşiktaş-Levent ve Aksaray-Taksim koridorları için değerlendirilmiştir. Analitik hiyerarşi yöntemi ile tanımlanan hiyerarşinin alt basamağındaki ölçütlerin ağırlıkları, tramvay ve otobüs yolu seçenekleri için. Daha sonraki aşamada bu ağırlıklar, hiyerarşinin orta basamağında yer alan, ilgili ölçütlerin ağırlıkları ile çarpılmıştır. Her iki seçenek için bu çarpım sonuçlarının toplanması, seçenekler için birer toplam ağırlık değeri elde edilmesini sağlamıştır.

İşlem sırası aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Tramvay için:

Toplam ağırlık =  $(w_{YS} * w_{YSt}) + (w_{YM} * w_{YMt}) + (w_{DBS} * w_{DBSt}) + (w_{AUK} * w_{AUKt}) + (w_{YTK} * w_{YTKt}) + (w_{AK} * w_{AKt}) + (w_{TYM} * w_{TYMt}) + (w_{iBM} * w_{iBMt}) + (w_{HKE} * w_{HKEt}) + (w_{GKE} * w_{GKEt}) + (w_{GK} * w_{GKt}) + (w_{UAU} * w_{UAUt}) + (w_{KTU} * w_{KTUt}) + (w_{KYU} * w_{KYUt}) + (w_{YIS} * w_{YISt}) + (w_{KKO} * w_{KKOt}) + (w_{TDU} * w_{TDUt}) + (w_{PÖD} * w_{PÖDt})$

Otobüs yolu için:

Toplam ağırlık =  $(w_{YS} * w_{YSo}) + (w_{YM} * w_{YMo}) + (w_{DBS} * w_{DBSo}) + (w_{AUK} * w_{AUKo}) + (w_{YTK} * w_{YTKo}) + (w_{AK} * w_{AKo}) + (w_{TYM} * w_{TYMo}) + (w_{iBM} * w_{iBMo}) + (w_{HKE} * w_{HKEo}) + (w_{GKE} * w_{GKEo}) + (w_{GK} * w_{GKo}) + (w_{UAU} * w_{UAUo}) + (w_{KTU} * w_{KTUo}) + (w_{KYU} * w_{KYUo}) + (w_{YIS} * w_{YISo}) + (w_{KKO} * w_{KKOo}) + (w_{TDU} * w_{TDUo}) + (w_{PÖD} * w_{PÖDo})$

Sonuçlar, gerek Beşiktaş-Levent, gerekse Aksaray-Taksim koridorlarında, tramvayın görece ağırlığının otobüs yolunun görece ağırlığına göre

biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir. Analitik hiyerarşi yaklaşımı ile, tramvay, daha tercih edilebilir bir seçenek olarak belirlenmiştir.

### Sonuç

Bu çalışmada, bir kentiçi koridorunda gerçekleştirilecek bir toplu taşıma uygulaması için simülasyon ve analitik hiyerarşi yöntemlerinin kullanıldığı bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulamaya, simülasyon destekli analitik hiyerarşi yöntemi adı verilmiştir. Yapılan uygulama, gerek simülasyon gerekse analitik hiyerarşi yöntemi düzlemlerinde esnekliğe sahiptir. Bir diğer deyişle, her iki düzlemde de girdilerin değiştirilmesi ve uygulamanın farklı durumlar için kolayca tekrarlanabilmesi mümkündür.

### Kaynaklar

De Corla-Souza, P., Everett, J., Gardner, B., Culp, M., (1997). Total cost analysis: an alternative to benefit-cost analysis in evaluating transportation alternatives, *Transportation*, 24/2, 107-123.

Gardner, G., (1995). Choosing a mass transit system for a developing city, *Proceedings of the 7th World Conference on Transport Research*, 3, Sydney, Australia, 113-122.

Gardner, G., Rutter, J., Kuhn, F., (1994). *The Performance and Potential of Light Rail Transit in Developing Cities*, Research Report 69, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

O'Leary, T. J., (1979). The cost/benefit analysis: it can be a misleading tool for transportation planners, *Transportation Planning and Technology*, 5, 189-193.

Rudnicki, A., (1999). Equivalent travel time of passengers as a synthetic performance measure in urban public transport, *Proceedings from the 2nd KFB-Research Conference on Urban Transport Systems*, Lund, Sweden, 174-183.

Saaty, T. L., (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill Company, USA.

Y. T. Ü. (Yıldız Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Uygulama-Ar Merkezi), (2002). *İETT Hatlarının Etüdü ve Rehabilitasyon Projesi (Sonuç Raporu)*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul