

# Kentsel Lojistikte Kullanılan Hafif Raylı Sistem Hatlarının Entegre Entropi ve EATWOS Yöntemleri Kullanılarak Analizi

## Analysis of Light Rail Systems Utilizing in Urban Areas by Using an Integrated Entropy and EATWOS Methodologies

Ömer Faruk Görçün\*

### Öz

Kentsel alanlarda kullanılan ulaşım sistemlerin etkinlik, verimlilik ve performanslarının değerlendirilmesi ve gelecekteki ulaşım altyapılarına ilişkin kararların alınması gerçekte çok kriterli bir karar verme problemidir. Dolayısıyla problemin etkin bir biçimde çözümü çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu çalışmada karar verme probleminin çözümü ile ilgili olarak sistematik ve yapısal bir çözüm yolu sağlamanın yanı sıra, karar alıcılar tarafından kolayca uygulanacak hibrid bir çok kriterli karar verme metodolojisi önerilmektedir. Bu model entropi ve EATWOS olarak tanımlanan iki ÇKKV yönteminin entegre edilmesi ile oluşturulmuş bir model olarak nitelendirilebilir. Entropi yöntemi ile faktör ağırlıkları değerlendirilirken, EATWOS yöntemi ile değerlendirmeye alınan karar noktalarının etkinlik, verimlilik ve performansları ölçülmüş ve en yüksek değerden başlanarak karar noktaları sıralandırılmıştır. Modelin sayısal bir perspektifte test edilmesi için araştırma alanı olarak en yüksek yolcu taşıma kapasitesi ve hat uzunluğuna sahip olan ve Avrupa'da kullanılan 13 Tramvay ve hafif raylı sistemleri belirlenmiş, seçilen hibrid modele göre söz konusu hatların etkinlik ve verimlilik analizi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Raylı ulaşım sistemleri, entropi yöntemi, EATWOS, verimlilik analizi, Kentsel Lojistik

### Abstract

Evaluation of the effectivity, productivity and performance of transportation systems, which operating in urban areas is a multi-criteria decision-making problem. Therefore, in order to solve this problem effectively, utilizing the multi-criteria decision-making (MCDM) methodologies is necessary. In this study, as well as providing a systematic and structural solution way, it is proposed a hybrid MCDM model, which can be applied by decision-makers easily. This model is an integrated approach, which integrated two MCDM methodologies such as entropy and EATWOS. While weights of factors are determined by the entropy method. Afterward, effectivity, productivity, and performance of decision alternatives, which analyzing are measured and they are ranked according to their productivity scores. In order to examine the hybrid model in the aspect of numerical and quantitative perspective, thirteen light rail systems, which operating in European Countries were selected and effectivity and productivity analysis for these lines by using this selected hybrid model.

**Keywords:** Rail transportation systems, entropy, EATWOS, productivity analysis, Urban Transport

**JEL:** L92, O18, R15, R42

### Araştırma Makalesi [Research Paper]

**Submitted:** 20 / 12 / 2018

**Accepted:** 15 / 03 / 2019

## Giriş

Kentsel alanlarda raylı sistemler yolcu taşıma kapasitesi ve hızlı ve kesintisiz ulaşım olanağı sunması, trafikten etkilenmemesi, emisyon, enerji tüketimi, kazalar ile çevreye etkileri açısından yüksek performansa sahip sistemler olmaları nedeniyle kentsel ulaşım açısından vazgeçilmez unsurlar haline gelmişlerdir. Bununla birlikte raylı sistemler lastik tekerlekli ulaşım sistemlerine göre daha yüksek yatırım, bakım ve onarım maliyetlerinin söz konusu olduğu ulaşım sistemleridir. Bu nedenle yatırım kararlarının rasyonel ölçekte verilmesi son derece önem arz etmektedir. Yanlış alınan bir yatırım kararı yüksek düzeyde kaynağın yanlış yönlendirilmesine yol açabileceği gibi, sınırlı kaynakların gerçekten gereksinim duyulan alanlara transfer edilmesini de olanaksız hale getirebilecektir. Dolayısıyla raylı sistem yatırımlarının rasyonel bir temelde gerçekleşmemesi geri dönüşümü olanaksız sonuçlar yaratabilmekte, öte yandan bu sistemlerin sökülmesi ve ulaşım sisteminin eski haline döndürülmesi neredeyse imkânsız bir durum olabilmektedir.

Bu çalışma kentsel ulaşım sistemlerinin yatırım maliyetlerini üstlenen, planlayan ve organize eden kamu otoriteleri, yerel otoriteler ile ulaşım operatörlerinin ulaşım sistemlerini verimlilik, etkinlik ve performans açısından değerlendirebilecekleri sistematik, yapısal ve karar alıcılar tarafından kolayca uygulanabilecek bir çözüm yolu önermektedir. Bu sayede karar alıcılar gerçekleştirecekleri ulaşım yatırımları ile daha rasyonel kararlar alabilecekleri gibi mevcut sistemlerin değerlendirilmesi ve iyileştirilebilmesi için performans açısından ne durumda olduklarını gözden geçirebileceklerdir. Ek olarak, ulaşım sistemlerinin verimlilik, etkinlik ve performansının ölçülebilmesi ulaşım sistemlerini yöneten aktörlerin dışında kullanıcıların daha yüksek performansa sahip ulaşım hizmeti alabilecekleri gibi, ulaşım yatırımlarını finanse eden bankalar, yatırımcılar vb. aktörlerin de bu modelin çıktılarını kullanabilmeleri mümkün olabilecektir.

Bu perspektifte değerlendirildiğinde, raylı ulaşım sistemleri yarattıkları faydalara karşılık son derece riskli ve tolerans kabul etmeyen yatırımlardır. Bu nedenle söz konusu sistemlerin etkinlik, verimlilik ve performansının ölçülmesi ve yatırımların bu perspektifte yapılması son derece önemlidir. Bu çalışmada dokuz kişiden oluşan ve kentsel ulaşım alanında en on beş yıl deneyime sahip profesyonellerin yer aldığı bir çalışma grubu oluşturulmuştur. Çalışma grubu üyeleri aynı zamanda kentsel ulaşım alanında kamu otoriteleri, bağlı ortaklıklar ve mesleki kuruluşlarda üst düzey yöneticilik yapmış uzmanlar arasından seçilmiştir.

Karar problemini çözmek için seçilen hibrid modelin tercih edilmesinin temel sebeplerinden birisi bu modelin karar vericiler tarafından son derece kolay bir biçimde uygulanabilecek basitlikte olmasının yanı sıra, bu modelin kullanılması ile elde edilen sonuçların son derece açık, net ve anlamlı olmasıdır. Buna ek olarak faktörlerin ağırlıklandırılmasında kullanılan entropi yönteminin AHP, SWARA vb. metodolojilerin yerine seçilmesinin en temel nedenlerinden birisi faktörlere ilişkin yeterli düzeyde sayısal verinin mevcut olması olarak gösterilebilir. Bu nedenle raylı sistemlerin performansını ve etkinlik düzeyini belirlemek üzere kullanıcıların görüşlerine odaklanan AHP vb. yöntemler tercih edilmemiştir.

Seçilen model toplamda sekiz adımdan oluşmaktadır. İlk dört adımda entropi yönteminin adımları kullanılarak, belirlenen faktörlerin ağırlık değerleri hesaplanırken, sonraki dört adımda EATWIOS yönteminin adımları kullanılarak değerlendirmeye alınan karar alternatiflerinin verimlilik, etkinlik ve performans değerleri hesaplandıktan sonra karar noktaları en yüksek performansa sahip olandan en düşük performansa sahip olana doğru sıralandırılmıştır.

Öte yandan çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde araştırmanın önemi ve alanı tanımlanırken, ikinci bölümde konu ile ilgili literatür taraması gerçekleştirilmiş, üçüncü bölümde kullanılan hibrid model ve uygulama adımları aktarılmıştır. Dördüncü adımda modelin işlevliliğinin test edilmesi amacıyla sayısal bir analiz gerçekleştirilmiş, beşinci ve sonuncu bölümde elde edilen çıktılar değerlendirilmiştir.

## 1. Literatür Taraması

Konu ile ilgili literatür dört farklı perspektifte gözden geçirilebilir. İlk olarak seçilen model ya da onu oluşturan metodolojilerden en az biri kullanılarak yapılmış ve kentsel ulaşım sistemleri, raylı ulaşım sistemleri vb. alanlarda gerçekleştirilen çalışmalar gözden geçirilmiş, ikinci olarak bu modelde kullanılan yöntemlerden farklı olarak çok kriterli karar verme yöntemlerinden bir ya da birkaçı kullanılarak kentsel ulaşım sistemlerinin değerlendirildiği çalışmalar incelenmiş, üçüncü aşamada çok kriterli karar verme yöntemleri dışında kalan yöntemlerle kentsel ulaşım sistemlerinin analiz edildiği çalışmalar gözden geçirilmiştir. Nihayet, dördüncü adımda raylı ulaşım sistemleri özelinde kentsel ulaşım sistemlerinin verimlilik, etkinlik ve performansına odaklanan çalışmalar değerlendirilmiştir.

Kentsel ulaşım sistemleri ile ilgili olarak, Wang, Zhang ve Sun (2018) kentsel alanlarda kullanılan demiryolu şebekesine ilişkin kullanıcı memnuniyetini çok kriterli karar verme yöntemleri kullanarak analiz etmişler, Wang, Zang ve Sun (2018) kentsel raylı sistem hatlarına ilişkin kullanıcı memnuniyetine ilişkin araştırmalarını çok kriterli karar verme yöntemlerine dayandırmışlardır. Bunlardan farklı olarak, Nassereddine ve Eskandari (2017) tahran kentinde toplu ulaşım sistemlerini

Delphi ve Electree tekniklerinin entegre edildiği bir model ile analiz etmişler, Hamurcu, Alağaç ve Eren (2017) kentsel raylı ulaşım sistem projelerini değerlendirmişlerdir. Ranjan ve Chatterjee (2016) Hindistan demiryollarının performansını gözden geçirirken, Purahmad, Omranzadeh ve Mahdi'nin (2015) çalışmasında Tahran kentinde hızlı toplu taşıma sistemlerinin değerlendirilmesi için tercih edilmiş, Perez, Carrilo ve Torres (2015) kentsel yolcu taşımacılığı sistemleri ile ilgili çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmaları gözden geçirdikleri bir literatür taraması yapmışlardır. Zhao ve Zang (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kentsel alanlardaki karayolu kapasitesi TOPSIS yöntemi ile değerlendirilirken, faktörlerin ağırlıklandırılması için entropi yöntemi kullanılmıştır. Solecka (2014) ise Krakow kentinde kentsel ulaşım sistemlerinin değişkenlerini çok kriterli karar verme yöntemleri kullanarak analiz etmiştir. Fierek ve Zak (2012) çalışmasında makro simülasyon teknikleri ile çok kriterli karar verme yöntemlerini birlikte kullanarak kentsel ulaşım sistemlerinin en etkin bir biçimde planlanması üzerine odaklanmış, Sarı, Behret ve Kahraman (2012) kentsel raylı sistemlere ilişkin risk yönetimini değerlendirmek için bulanık AHP yöntemini kullanmışlardır.

Yaongneng (2011) Nanjing metrosunun bakım sistemlerini değerlendirirken, Kentsel alanlarda ulaşım planlaması için Alfı, Elhadary ve Elashry (2010) GIS yöntemleri ile çok kriterli karar verme yöntemlerini entegre olarak kullanmışlar, Sivilevicius ve Maskeliūnaite (2010) ise AHP yaklaşımı kullanarak demiryolu taşımacılığına ilişkin kalite beklentilerini değerlendirmişlerdir. Farkas (2009) çok kriterli karar verme yöntemleri ile Coğrafi Bilgi Sistemlerini (GIS) entegre ederek kentsel ulaşımında kullanılan istasyonların yerlerini seçmek üzere bir çalışma gerçekleştirmiştir. Zak (2009) kentsel alanlarda kullanılan raylı ulaşım sistemleri, karayolu ve denizyolu ulaşım sistemlerini çok kriterli karar verme yöntemleri kullanarak analiz etmiş, Zhang ve Xu (2009) kentsel raylı sistem istasyonlarının etkinliğini değerlendirmişlerdir. Çelik, Bilişik, Erdoğan ve Gümüş (2007) İstanbul kentinde raylı ulaşım sistemleri ile ilgili müşteri tatmin düzeyini analiz etmeye çalışan bir araştırma gerçekleştirmiş. Benzer olarak aynı yöntemler Haijun (2005) tarafından kentsel alanlarda lojistik merkezlerin seçimi için uygulanırken, Gerçek, Karpak ve Kınçarsalan (2004) AHP yöntemini kullanarak İstanbul kentinde planlanan ulaşım projelerini gözden geçirmişlerdir.

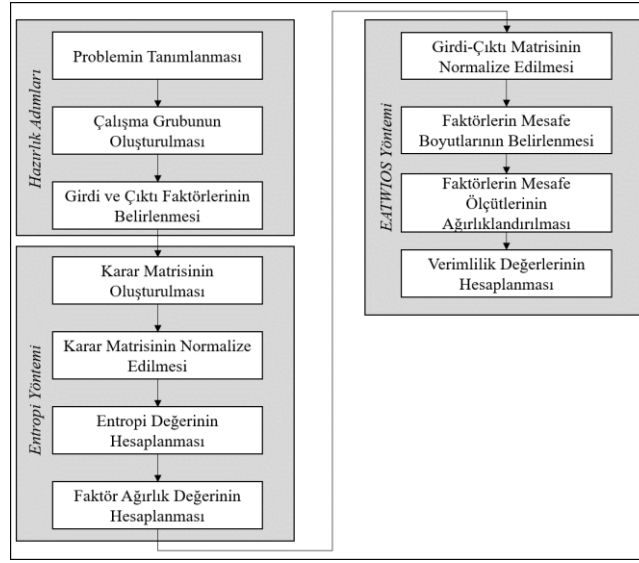
Eatwos yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalara göz atıldığında; Peters ve Zelewski (2006) çıktı faktörleri dikkate alınarak etkinlik analizi gerçekleştirmişler, Peters, Zelewski ve Burns çalışmalarında (2012) EATWOS yöntemini ileri sürmüşler ve uygulama adımlarını göstermişlerdir. Bandar, Singh ve Issar (2014) çalışmalarında satıcıların performansını EATWOS yöntemi kullanarak değerlendirmişler, Özbek (2015a) Türkiye'deki bireysel emeklilik şirketlerinin verimlilik değerlerini analiz ederken EATWOS yöntemini kullanmış, Özbek (2015b) bir başka çalışmasında sivil toplum örgütlerinin performansını değerlendirirken, ek olarak Türk Kızılay'ın (Özbek 2015c) performansını değerlendirmiştir. Ek olarak, Soni, Singh ve Banwet (2016) çalışmalarında EATWOS yöntemini kullanarak Hindistan enerji sektörünün verimliliğini analiz etmişlerdir. Aynı yöntem kullanılarak yapılan çalışmalar arasında Kumar, Singh, Verma ve Sonal (2016) tarafından Hindistan birinci lig oyuncularının performansı ölçülürken, bir başka çalışmasında hayırsever kuruluşların (Özbek 2017a) ve altın madencilik işletmelerinin (Özbek 2016), ilkokul öğretmenlerinin yardım sandıklarının (Özbek 2017b) verimliliklerini analiz etmiştir.

Son olarak literatür bütünüyle gözden geçirildiğinde, kentsel ulaşım sistemlerinden birisi olan hafif raylı sistemlerin verimlilik ve performansına odaklanan bir çalışmaya rastlanılmadığı gibi, performans perspektifinde gerçekleştirilen kentsel ulaşım ile ilgili çalışmaların neredeyse tümünde kullanıcıların tatminine odaklanılmış ve kullanıcıların kişisel yargılarına dayanan ve genellikle kalitatif nitelikte örnekler verilmiştir. Öte yandan EATWOS yöntemini kullanan çalışmaların büyük kısmında faktör ağırlıklarını ölçmek üzere Delphi tekniğinin yanı sıra, Özellikle Özbek tarafından Veri Zarflama Tekniği (VZA) tercih edilmiş, herhangi bir çalışmada Entropi ve EATWOS yöntemlerinin entegre olarak kullanıldığı hibrid bir modele rastlanılmamıştır. Bu kapsamda bu çalışma yeni bir hibrid model önermenin yanı sıra, özellikle kentsel ulaşım ve raylı ulaşım sistemleri alanlarına ilişkin literatüre kayda değer ölçekte katkıda bulunma amacındadır. Aynı zamanda çalışmanın modeline ek olarak elde edilen bulgular daha sonraki çalışmalara da ışık tutabilecektir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Kentsel alanlarda kullanılan tramvay, hafif raylı sistemler (LRT) türünde raylı ulaşım sistemlerinin verimlilik analizinin gerçekleştirilmesi için seçilen hibrid model entropi ve EATWOS yöntemlerinin entegrasyonundan oluşmaktadır. Hazırlık aşaması dışında, analiz için seçilen ve önerilen model sekiz adımda uygulanmakta, modelin ilk dört adımında entropi yöntemi kullanılarak belirlenen girdi ve çıktılara ilişkin faktörlerin ağırlık değerleri hesaplanmaktadır. Sonraki dört adımda ise EATWOS yöntemi kullanılarak değerlendirmeye alınan alternatiflerin verimlilik değerleri hesaplanarak, söz konusu alternatifler sıralanmaktadır (Bansal vd. 2014), (Peter, Zelewski ve Burns, 2012), (Özbek, 2015a).

Hazırlık sürecinde araştırmacılar problemin belirlenmesi, süreci yönetecek uzmanlar kurulu olarak da adlandırılan çalışma grubunun oluşturulması, nihai olarak da çalışma grubu ile yapılan toplantılarda değerlendirme sürecinde kullanılacak girdi ve çıktı faktörlerinin yanı sıra, değerlendirilecek alternatiflerin saptanması gibi ön adımları tamamlamaya çalışmışlardır.



Şekil 1. Hibrid modelin işlem adımları

Modelin uygulama olarak ilk dört aşaması entropi yönteminin uygulama adımlarının kullanıldığı aşamalardır. Bu süreçte kullanılan entropi yöntemi oldukça geniş kullanım alanına sahip bir yöntemdir. Çok kriterli karar verme problemlerinin çözümü ile ilgili olarak faktörlerin ağırlıklandırılmasında karar alıcıların yargılarına müracaat edilmesi zorunluluğunu ortadan kaldırmasının yanı sıra karar vericilerin subjektif ve bazen tutarlılıktan uzak yaklaşımlarını dışarıda bırakılmasına olanak sağlaması açısından kayda değer bir metodoloji olarak son derece etkin bir işleve sahiptir. Entropi yönetimi sayesinde faktörler ağırlıklandırılırken AHP, SWARA, Delphi tekniği gibi önemli ölçüde karar vericilerin tecrübelerine, kişisel yaklaşımları ile öznel yargılarına dayanan yaklaşımların kullanılmasına gerek olmamaktadır. Entropi yöntemi ile dört adımda çözüme ulaşılabilmekte, değerlendirmeye alınan faktörlerin göreceli önem değerleri hesaplanarak, ağırlık değerleri belirlenebilmektedir (Chen ve Qu, 2006), (Akyene, 2012).

Adım-1 Karar Matrislerinin Oluşturulması: Modelin ilk aşamasında bütün girdi ve çıktı faktörlerinden oluşan matrisler oluşturulmaktadır. Girdi matrisi olarak da adlandırılan matris X minimize edilmesi gereken faktörlerden oluşmaktadır. Karar noktalarının en iyi sonucu vermesi için mümkün olduğunca bu faktörleri en azlaması gerekmektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} & \dots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} & \dots & x_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ik} & \dots & x_{iK} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{l1} & x_{l2} & \dots & x_{lk} & \dots & x_{lK} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, l; \forall k = 1, 2, \dots, K$$

Eşitlik 2 de gösterildiği gibi değerlendirmeye alınan alternatiflerin her birisi için elde edilecek faydayı gösteren çıktı faktörleri de matris Y ile gösterilmektedir. Bu faktörlerin en çoklandığı alternatif için yüksek performans ve etkinlik düzeyi beklenebilmektedir.

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1j} & \dots & y_{1J} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2j} & \dots & y_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \dots & y_{ij} & \dots & y_{iJ} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{l1} & y_{l2} & \dots & y_{lj} & \dots & y_{lJ} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\forall i = 1,2 \dots, l; \forall j = 1,2 \dots, J$$

**Adım-2 Karar Matrislerinin Normalize Edilmesi:** ikinci adımda eşitlik 3a ve 3b yardımıyla karar matrislerinin bütün elemanları normalize edilmekte ve normalize matrisler oluşturulmaktadır.

$$x^*_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (3a)$$

$$y^*_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (3b)$$

Bunun için matrislerin her bir elamanı kendi sütun toplamına bölünerek eşitlik 4 de gösterilen normalize matris  $X^*$  ile eşitlik 5 de gösterilen normalize matris  $Y^*$  elde edilmektedir.

$$X^* = \begin{bmatrix} x^*_{11} & x^*_{12} & \dots & x^*_{1k} & \dots & x^*_{1K} \\ x^*_{21} & x^*_{22} & \dots & x^*_{2k} & \dots & x^*_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ x^*_{i1} & x^*_{i2} & \dots & x^*_{ik} & \dots & x^*_{iK} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x^*_{l1} & x^*_{l2} & \dots & x^*_{lk} & \dots & x^*_{lK} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\forall i = 1,2 \dots, l; \forall k = 1,2 \dots, K$$

$$Y^* = \begin{bmatrix} y^*_{11} & y^*_{12} & \dots & y^*_{1j} & \dots & y^*_{1J} \\ y^*_{21} & y^*_{22} & \dots & y^*_{2j} & \dots & y^*_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ y^*_{i1} & y^*_{i2} & \dots & y^*_{ij} & \dots & y^*_{iJ} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y^*_{l1} & y^*_{l2} & \dots & y^*_{lj} & \dots & y^*_{lJ} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\forall i = 1,2 \dots, l; \forall j = 1,2 \dots, J$$

**Adım-3 Entropi Değerlerinin Hesaplanması:** Bu aşamada eşitlik 6a ve 6b kullanılarak her iki normalize matriste yer alan elemanların entropi değerleri hesaplanmaktadır.

$$e^*_{ij} = x^*_{ij} \cdot \ln x^*_{ij} \quad (6a)$$

$$e^-_{ij} = y^*_{ij} \cdot \ln y^*_{ij} \quad (6b)$$

Bütün elemanlar için entropi değeri hesaplandıktan sonra girdi ve çıktı faktörlerinin entropi değerlerini gösteren matrisler oluşturulmaktadır. Bunun için her bir normalize matris elemanının kendi değeri ile ln değeri çarpılarak entropi değeri elde edilmekte, ardından girdi faktörleri ve çıktı faktörleri için entropi değerlerini gösteren matrisler oluşturulmaktadır.

$$E^* = \begin{bmatrix} e^*_{11} & e^*_{12} & \dots & e^*_{1k} & \dots & e^*_{1K} \\ e^*_{21} & e^*_{22} & \dots & e^*_{2k} & \dots & e^*_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^*_{i1} & e^*_{i2} & \dots & e^*_{ik} & \dots & e^*_{iK} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^*_{l1} & e^*_{l2} & \dots & e^*_{lk} & \dots & e^*_{lK} \end{bmatrix} \quad (7a)$$

$$\forall i = 1,2 \dots, l; \forall k = 1,2 \dots, K$$

$$E^- = \begin{bmatrix} e^-_{11} & e^-_{12} & \dots & e^-_{1k} & \dots & e^-_{1K} \\ e^-_{21} & e^-_{22} & \dots & e^-_{2k} & \dots & e^-_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^-_{i1} & e^-_{i2} & \dots & e^-_{ik} & \dots & e^-_{iK} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^-_{l1} & e^-_{l2} & \dots & e^-_{lk} & \dots & e^-_{lK} \end{bmatrix} \quad (7b)$$

$$\forall i = 1, 2 \dots, l; \forall j = 1, 2 \dots, J$$

Her bir eleman için entropi değeri hesaplandıktan sonra her faktör için entropi değeri eşitlik 8a ve 8b yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$E^*_{ij} = \left( \frac{-1}{\ln(m)} \right) \sum_{i=1}^m [x^*_{ij} \cdot \ln x^*_{ij}]; \forall j \quad (8a)$$

$$E^-_{ij} = \left( \frac{-1}{\ln(m)} \right) \sum_{i=1}^m [y^*_{ij} \cdot \ln y^*_{ij}]; \forall j \quad (8b)$$

Sürecin devamında belirsizlikleri gösteren ve  $d_j$  olarak da tanımlanan belirsizlik değeri eşitlik 9a ve 9b kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$d^*_{ij} = 1 - E^*_{ij}; \forall j \quad (9a)$$

$$d^-_{ij} = 1 - E^-_{ij}; \forall j \quad (9b)$$

**Adım-4 Faktör Ağırlık Değerlerinin Hesaplanması:** Bu aşamada eşitlik 10a ve 10b kullanılarak her bir faktörün ağırlık değeri hesaplanmaktadır.

$$w^*_{ij} = \frac{d^*_{ij}}{\sum_{i=1}^m d^*_{ij}}; \forall j \quad (10a)$$

$$w^-_{ij} = \frac{d^-_{ij}}{\sum_{i=1}^m d^-_{ij}}; \forall j \quad (10b)$$

**Adım-5 Girdi – Çıktı Matrislerinin Normalize Edilmesi:** Beşinci adım EATWOS yönteminin çözüm adımlarının başlangıcı olarak tanımlanabilir. Modelin birinci aşamasında oluşturulan karar matrisleri eşitlik 11a ve 11b kullanılarak normalize edilmektedir. Normalize edilecek faktörün girdi olması halinde eşitlik 11a, çıktı olması durumunda 11b kullanılmakta, hem girdi, hem de çıktı faktörleri için iki farklı normalize matris oluşturulmaktadır.

$$s_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; \forall j \quad (11b)$$

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}; \forall j \quad (11a)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{11} & \dots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{l1} & r_{l2} & \dots & r_{lj} \end{bmatrix} \quad (12a)$$

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{11} & \dots & s_{1j} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{l1} & s_{l2} & \dots & s_{lj} \end{bmatrix} \quad (12b)$$

**Adım-6 Faktörlerin Mesafe Ölçütlerinin Belirlenmesi:** Girdi ve çıktı faktörleri için mesafe ölçülerinin belirlenmesi için iki farklı uygulama söz konusu olmaktadır. Girdi faktörleri için öncelikli olarak girdi matrisinin her bir sütununun en küçük değeri belirlenmektedir. Ardından eşitlik 13b yardımıyla girdi faktörleri için mesafe boyutları belirlenmektedir.

$$s^*_k = \min\{\vec{r}_j\}; \forall j = 1, \dots, J \quad (13a)$$

$$ip_{ik} = 1 + (s_{ik} - s^*_k); \forall i = 1, \dots, k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (13b)$$

Çıktılar için eşitlik 13c ve 13d kullanılarak her bir sütun için en büyük çıktı miktarı belirlenir. Ardından eşitlik 13d kullanılarak çıktı mesafe boyutları hesaplanır.

$$r_{ij} = \max\{\overrightarrow{s_k}\}; \forall k = 1, \dots, K \quad (13c)$$

$$op_k = 1 - (r^*_j - r_{ij}); \forall i = 1, \dots, l \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (13d)$$

**Adım-7 Mesafe Ölçütlerinin Ağırlıklandırılması:** Yedinci adımda entropi yöntemi kullanılarak ilk dört adımda belirlenen faktör ağırlıkları ile altıncı adımda elde edilen mesafe boyut değerleri ayrı ayrı çarpılır ve mesafe boyutları ağırlıklandırılır. Bu adımda aşağıda gösterilen eşitlik 14a ve eşitlik 14b kullanılmaktadır.

$$ip_{ja} = ip_{ik} \cdot w^*_{ij} \quad (14a)$$

$$op_{ka} = op_k \cdot w^-_{ij} \quad (14b)$$

**Adım-8 Verimlilik Değerlerinin Hesaplanması:** Öncelikle her karar alternatifi için girdi ve çıktı faktörlerinin ağırlıklandırılmış mesafe ölçüleri ayrı ayrı toplanarak faktörlerin her bir karar alternatifine ait girdi faktörü için elde edilen ağırlıklı mesafe ölçüsü aynı alternatif için hesaplanan çıktılar için mesafe ölçüsü toplamına bölünerek verimlilik değeri hesaplanmaktadır.

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^J ip_{ja}}{\sum_{k=1}^K op_{ka}} \quad (15)$$

Bir karar alternatifi için  $F_i$  değerinin yüksek olması halinde alternatifi performans ve verimlilik düzeyi yüksek, düşük olması halinde ise söz konusu alternatifi görece olarak düşük performansa sahip olduğu söylenebilir. Sonuç olarak karar alternatifleri verimlilik puanlarına göre sıralandırılabılır.

### 3. Sayısal Analiz

Entegre entropi ve EATWOS yöntemlerini kullanarak Avrupa'da işletilen tramvay hatlarının verimlilikleri ve performansları analiz edilmiştir. Bunun için daha öncede bahsedildiği gibi, kentsel ulaşım ile ilgili kamu kuruluşları, mesleki kuruluşlar ve taşıma operatörlerinin yönetim kurulu üyeleri, genel müdürleri, başkanları gibi üst düzey yetkililerinin yer aldığı bir uzmanlar kurulu oluşturulmuştur. Uzmanlar kurulu üyelerinin profilleri dikkate alındığında üyelerin dört tanesi mühendis unvanına sahip olup, üç üye makine mühendisi iken, diğeri ise elektrik mühendisidir. Bu dört üyeden biri doktor unvanına biri de profesör unvanına sahiptir. Bir diğeri üye kentsel ulaşım alanında elektronik sistemler üreten bir işletmenin sahibi iken, aynı zamanda elektrik-elektronik mühendisi unvanına da sahiptir. Üyeler arasında aynı zamanda iki öğretim görevlisi doktor unvanı sahibi üye yer alırken, biri finans, diğeri ise ekonometri alanında çalışmalar yürütmektedir. Ek olarak üyelerden birisi yüksek elektrik mühendisi unvanına sahip olup, kamu adına üretim yapan bir kuruluşun Ar-Ge müdürlüğünü icra etmektedir.

Çalışma grubu üyelerine bir kent içi raylı sistemin performansına olumlu ya da olumsuz yönde etki eden faktörlerin ne olduğu sorulmuş, aynı zamanda girdi ve çıktı faktörleri olarak değerlendirilebilecek faktörlerin neler olduğu sorusu yöneltilmiştir. Elde edilen yanıtlar araştırmacılar tarafından kaydedilerek, daha sonraki toplantılarda söz konusu faktörler ışığında sorular yinelenmiş ve karar alıcılardan belirlenen faktörler arasından elenebilecekler olup olmadığını değerlendirmeleri istenmiştir. Nihai olarak bütün çalışma grubu üyelerinin çalışmaya dahil edilmesi konusunda oybirliği ile mutabık oldukları girdi ve çıktı faktörleri aşağıda görüldüğü gibi saptanmıştır. Bu kapsamda çalışma grubu ile yapılan toplantılarda; P1: kullanılan araç sayısı, P2: kullanılan araç türü, P3: personel sayısı, P4: hat sayısı, P5: koltuk sayısı, P6: istasyon sayısı, P7: sistem uzunluğu gibi faktörler raylı sistemler için girdiler olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda kurul üyeleri tarafından çıktı faktörleri olarak Ç1: günlük taşıma kapasitesi, Ç2: taşınan yolcu sayısı, Ç3: gelir miktarı gibi faktörler tespit edilmiştir. Ek olarak, Roma, İstanbul, Atina, Viyana, Amsterdam, Brüksel, Prag, Lizbon, Belgrad, Zagreb, Berlin, Frankfurt, Manchester gibi tramvay ve hafif raylı sistemlerin bulunduğu kentler ise karşılaştırma için karar noktaları olarak seçilmiştir.

Karşılaştırmalı performans analizi açısından seçilen karar noktaları operasyonel açıdan ve sistem olarak benzer niteliğe sahip olmaları, aynı zamanda birbirine benzer bir biçimde büyük metropollerde yolcu taşıma hizmeti veriyor olmaları tercih edilmelerinde öncelikli kriter olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla büyük kentler ve metropoller dışında yer alan küçük ölçekli raylı ulaşım sistemleri çalışmanın kapsamında dikkate alınmamıştır. Raylı ulaşım sistemlerinin performansları ve etkinliklerinin analizi için kullanılacak girdi ve çıktı faktörlerinin yanı sıra, karar noktaları belirlenmiş ardından söz konusu

faktörlere ilişkin veriler toplanıktan sonra seçilen hibrid modelin uygulama adımlarına geçilmiştir. Bu çalışmada ele alınan girdi ve çıktı faktörleri raylı ulaşım sistemlerinin performansı ile ilgili bir çalışmada rastlanılmamıştır. Bu kapsamda çalışmada dikkate alınacak faktörler açısından araştırmamızın literatüre önemli katkı sağlayabileceği öngörülebilmektedir.

Değerlendirmede kullanılmak üzere verilere ilişkin sayısal değerler söz konusu hatları işleten operatörler ile kamu otoritelerinin yayınladıkları resmi yıllık raporlar, finansal raporlar, sürdürülebilirlik raporları ile bağımsız denetçi rapor ve dokümanlarından elde edilmiştir. Bunlara ek olarak, söz konusu kuruluşların internet siteleri gözden geçirilerek, söz konusu rapor ve dokümanların yanı sıra bunlarda yer almayan ya da farklı dillerde açıklanmış veriler için ilgili otorite ile irtibat kurulmuş ve e-posta ile bu veriler talep edilerek önemli bir kısmı toplanmıştır. Toplanan veriler gerçekçi olmaları açısından aynı zamanda çalışma grubu tarafından da gözden geçirilmiştir.

**Adım-1 Karar Matrislerinin Oluşturulması:** çeşitli vasıtalar ile girdi ve çıktılara ilişkin veriler toplandıktan sonra eşitlik 16 ve 17 de gösterilen karar matrisleri elde edilmiştir.

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
K <sub>1</sub>	164	4	6208	6	76018	162	36.0
K <sub>2</sub>	172	5	504	2	12278	63	34.6
K <sub>3</sub>	35	2	1123	3	2590	118	59.3
K <sub>4</sub>	525	2	8700	29	90115	1071	176.9
K <sub>5</sub>	242	4	4000	15	17908	500	132.7
K <sub>6</sub>	343	5	8773	21	25382	2168	196.8
X = K <sub>7</sub>	1025	5	10994	37	115440	301	207.6
K <sub>8</sub>	133	3	1426	31	9842	56	76.0
K <sub>9</sub>	244	11	5614	12	18056	27	43.5
K <sub>10</sub>	277	9	10394	15	20498	256	54.2
K <sub>11</sub>	391	3	14417	22	28934	377	193
K <sub>12</sub>	112	7	2147	10	8288	136	67.3
K <sub>13</sub>	120	2	773	7	7920	111	100

Tramvay ve hafif raylı sistemler için elde edilecek çıktılar matris Y ile ifade edilmiştir.

	Ç <sub>1</sub>	Ç <sub>2</sub>	Ç <sub>3</sub>
K <sub>1</sub>	1.800.000	99.200.000	379.747.000
K <sub>2</sub>	490.000	17.227.999	121.16.333
K <sub>3</sub>	77.000	51.144.000	15.376.000
K <sub>4</sub>	2.600.000	293.600.000	421.200.000
K <sub>5</sub>	500.958	71.000.000	102.000.000
K <sub>6</sub>	761.460	123.500.000	208.692.000
Y = K <sub>7</sub>	2.275.500	913.400.000	176.375.614
K <sub>8</sub>	442.438	301.643.000	88.104.000
K <sub>9</sub>	541.680	108.336.000	117.097.000
K <sub>10</sub>	558.900	204.000.000	519.985.735
K <sub>11</sub>	461.563	147.700.000	525.100.000
K <sub>12</sub>	155.938	49.900.000	249.458.000
K <sub>13</sub>	105.500	42.200.000	39.780.000

**Adım-2 Karar Matrislerinin Normalize Edilmesi:** Eşitlik 3a ve 3b yardımıyla karar matrislerinin bütün elemanları normalize edilmiş ve normalize matrisler oluşturulmuştur.

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
K <sub>1</sub>	0,04335184	0,06451613	0,08269285	0,02857143	0,19287594	0,03571429	0,02612671
K <sub>2</sub>	0,04546656	0,08064516	0,00671347	0,00952381	0,03229400	0,01171875	0,02511068
K <sub>3</sub>	0,00925192	0,03225806	0,01495877	0,01428571	0,00657145	0,02194940	0,04303650
K <sub>4</sub>	0,13877875	0,03225806	0,11588720	0,13809524	0,22864341	0,19921875	0,12838377
K <sub>5</sub>	0,06397039	0,06451613	0,05328147	0,07142857	0,04543690	0,09300595	0,09630597
K <sub>6</sub>	0,09066878	0,08064516	0,11685959	0,10000000	0,06440023	0,40327381	0,14282604
Y* = K <sub>7</sub>	0,27094898	0,08064516	0,14644413	0,17619048	0,19244968	0,05598958	0,15066405
K <sub>8</sub>	0,03515728	0,04838710	0,01899485	0,14761905	0,02497152	0,01041667	0,05515640
K <sub>9</sub>	0,06449907	0,17741935	0,07478055	0,05714286	0,04581241	0,00502232	0,03156978
K <sub>10</sub>	0,07322231	0,14516129	0,13845191	0,07142857	0,05200835	0,04761905	0,03933522
K <sub>11</sub>	0,10335712	0,04838710	0,19203975	0,10476190	0,07341251	0,07012649	0,14006822
K <sub>12</sub>	0,02960613	0,11290323	0,02859883	0,04761905	0,02102865	0,02529762	0,04884244
K <sub>13</sub>	0,03172086	0,03225806	0,01029664	0,03333333	0,02009494	0,02064732	0,07257421

Ç<sub>1</sub>                      Ç<sub>2</sub>                      Ç<sub>3</sub>



$$X = \begin{bmatrix} K_1 & 0,16711640 & 0,04095142 & 0,12811615 \\ K_2 & 0,04549280 & 0,00711057 & 0,04087885 \\ K_3 & 0,00714887 & 0,02110884 & 0,00518744 \\ K_4 & 0,24139035 & 0,12117855 & 0,14210125 \\ K_5 & 0,04651016 & 0,02930408 & 0,03441198 \\ K_6 & 0,07069581 & 0,05097259 & 0,07040692 \\ K_7 & 0,21126298 & 0,37699077 & 0,05950426 \\ K_8 & 0,04107702 & 0,12449817 & 0,02972386 \\ K_9 & 0,05029089 & 0,04471390 & 0,03950529 \\ K_{10} & 0,05188964 & 0,08419763 & 0,17542883 \\ K_{11} & 0,04285259 & 0,06096074 & 0,17715424 \\ K_{12} & 0,01447762 & 0,02059540 & 0,08416024 \\ K_{13} & 0,00979488 & 0,01741735 & 0,01342067 \end{bmatrix}$$

**Adım-3 Entropi Değerlerinin Hesaplanması:** Bu aşamada eşitlik 6a ve 6b kullanılarak her iki normalize matriste yer alan elemanların entropi değerleri hesaplanmıştır.

$$E^+ = \begin{bmatrix} K_1 & -0,136055674 & -0,176828389 & -0,206122022 & -0,101581373 & -0,317417494 & -0,119007304 & -0,095226569 \\ K_2 & -0,140527053 & -0,203040038 & -0,033591765 & -0,044323432 & -0,110861215 & -0,052108185 & -0,092519335 \\ K_3 & -0,043326027 & -0,110773781 & -0,062863607 & -0,060692789 & -0,033021683 & -0,083825112 & -0,135380216 \\ K_4 & -0,274070589 & -0,110773781 & -0,249752909 & -0,273402568 & -0,337384309 & -0,321409931 & -0,263537385 \\ K_5 & -0,175876036 & -0,176828389 & -0,156230155 & -0,188504095 & -0,140465029 & -0,220897673 & -0,225377639 \\ K_6 & -0,217654234 & -0,203040038 & -0,250872082 & -0,230258509 & -0,176626531 & -0,366228884 & -0,277957740 \\ K_7 & -0,353811882 & -0,203040038 & -0,281335469 & -0,305900076 & -0,317141785 & -0,161394992 & -0,285162266 \\ K_8 & -0,117703892 & -0,146541392 & -0,075287733 & -0,282413001 & -0,092145389 & -0,047545294 & -0,159820214 \\ K_9 & -0,176798698 & -0,306800488 & -0,193920727 & -0,163554336 & -0,141248838 & -0,026587482 & -0,109091110 \\ K_{10} & -0,191421800 & -0,280148198 & -0,273751576 & -0,188504095 & -0,153754942 & -0,144977259 & -0,127274414 \\ K_{11} & -0,234575718 & -0,146541392 & -0,316875745 & -0,236349675 & -0,191728587 & -0,186357965 & -0,275321691 \\ K_{12} & -0,104206889 & -0,246267252 & -0,101651381 & -0,144977259 & -0,081209896 & -0,093020484 & -0,147462933 \\ K_{13} & -0,109461725 & -0,110773781 & -0,047116799 & -0,113373246 & -0,078516713 & -0,080115111 & -0,190372719 \end{bmatrix}$$

Girdi faktörlerinin entropi değeri hesaplanarak ilgili matris oluşturulduktan sonra, eşitlik 6b kullanılarak çıktı faktörleri için de entropi değerleri hesaplanarak, çıktı faktörleri için entropi matrisi oluşturulmuştur.

$$E^- = \begin{bmatrix} K_1 & -0,298982049 & -0,130854882 & -0,263255375 \\ K_2 & -0,140581898 & -0,035170117 & -0,130695508 \\ K_3 & -0,035321136 & -0,081439247 & -0,027293784 \\ K_4 & -0,343097747 & -0,255746145 & -0,277270155 \\ K_5 & -0,142697109 & -0,103444232 & -0,115946032 \\ K_6 & -0,187299279 & -0,151718236 & -0,186822207 \\ K_7 & -0,328440322 & -0,36776753 & -0,167903614 \\ K_8 & -0,131130445 & -0,259387485 & -0,104503294 \\ K_9 & -0,150366316 & -0,138947131 & -0,127654272 \\ K_{10} & -0,153522565 & -0,20835449 & -0,305337712 \\ K_{11} & -0,134985195 & -0,170539201 & -0,306606959 \\ K_{12} & -0,061314905 & -0,079965506 & -0,208299347 \\ K_{13} & -0,045310082 & -0,070545301 & -0,057855973 \end{bmatrix}$$

Girdi ve çıktı faktörleri için entropi değerleri hesaplanarak matrisler oluşturulduktan sonra, eşitlik 8a ve 8b kullanılarak  $E^*_{ij}$  ve  $E^-_{ij}$  değerleri belirlenmiştir.

$$E^*_{ij} = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ 0,91572463 & 0,97444182 & 0,90521387 & 0,93920408 & 0,87388491 & 0,76601496 & 0,95959510 \end{bmatrix}$$

$$E^-_{ij} = \begin{bmatrix} \zeta_1 & \zeta_2 & \zeta_3 \\ 0,866450676 & 0,826541917 & 0,917315841 \end{bmatrix}$$

Bu işlemin ardından belirsiz değeri olarak adlandırılan  $d^*_{ij}$  ve  $d^-_{ij}$  değerleri eşitlik 9a ve 9b yardımıyla hesaplanmıştır.

$$d^*_{ij} = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ 0,084275372 & 0,025558181 & 0,094786128 & 0,060795924 & 0,126115095 & 0,233985037 & 0,040404905 \end{bmatrix}$$

$$d^-_{ij} = \begin{bmatrix} \zeta_1 & \zeta_2 & \zeta_3 \\ 0,133549324 & 0,173458083 & 0,082684159 \end{bmatrix}$$

Adım-4 Faktör Ağırlık Değerlerinin Hesaplanması: Nihai olarak girdi ve çıktı faktörleri için ayrı ayrı ağırlık değerleri eşitlik 10a ve 10b kullanılarak hesaplanmıştır.

$$d^*_{ij} = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ 0,12655 & 0,03838 & 0,14234 & 0,09130 & 0,18938 & 0,35137 & 0,06068 \end{bmatrix}$$

$$d^-_{ij} = \begin{bmatrix} \zeta_1 & \zeta_2 & \zeta_3 \\ 0,34271 & 0,44512 & 0,21218 \end{bmatrix}$$

Girdi faktörleri için hesaplanan ağırlık değerlerine bakıldığında en yüksek değeri 0,35137 ile P6: istasyon sayısı olarak belirlenmiş, bu faktörü 0,18938 değeri ile P5: Koltuk sayısı, 0,14234 ile P3: personel sayısı faktörleri izlemektedir.

Diğer faktörlerde önem derecelerine göre; P1: kullanılan araç sayısı, P4: hat sayısı, P7: sistem uzunluğu ve P2: kullanılan araç türü şeklinde sıralanmaktadır. Çıktı faktörleri için değerlendirme yapıldığında 0,44512 değeri ile Ç2: taşınan yolcu sayısı öncelikli faktör olurken, 0,34271 değeri ile Ç1: günlük taşıma kapasitesi ikinci, 0,21218 değeri ile de Ç3: gelir miktarı üçüncü önemli faktör şeklinde sıralanmışlardır.

**Adım-5 Girdi – Çıktı Matrislerinin Normalize Edilmesi:** Bu aşamada girdi ve çıktı faktörleri için eşitlik 11a ve 11b kullanılarak başlangıç adımı hazırlanan karar matrisleri normalize edilmekte ve normalize matrisler oluşturulmaktadır.

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
K <sub>1</sub>	0,11916808	0,20306923	0,23733053	0,08581944	0,50568692	0,07539582	0,08067517
K <sub>2</sub>	0,12498116	0,25383654	0,01926781	0,02860648	0,08466920	0,02473925	0,07753780
K <sub>3</sub>	0,02543221	0,10153462	0,04293205	0,04290972	0,01722920	0,04633701	0,13288994
K <sub>4</sub>	0,38148318	0,10153462	0,33259916	0,41479394	0,59946298	0,42056728	0,39642883
K <sub>5</sub>	0,17584558	0,20306923	0,15291915	0,21454859	0,11912759	0,19634327	0,29737765
K <sub>6</sub>	0,24923568	0,25383654	0,33538993	0,30036802	0,16884613	0,85134442	0,44102427
K <sub>7</sub>	0,74480049	0,25383654	0,42029829	0,52921985	0,50456935	0,11819865	0,46522683
K <sub>8</sub>	0,09664241	0,15230192	0,05451568	0,44340041	0,06547095	0,02199045	0,17031425
K <sub>9</sub>	0,17729885	0,55844039	0,21462203	0,17163887	0,12011212	0,01060254	0,09748250
K <sub>10</sub>	0,20127779	0,45690577	0,39736042	0,21454859	0,13635679	0,10052775	0,12146095
K <sub>11</sub>	0,28411414	0,15230192	0,55115886	0,31467126	0,19247475	0,14804283	0,43250856
K <sub>12</sub>	0,08138308	0,35537116	0,08207936	0,14303239	0,05513343	0,05340537	0,15081775
K <sub>13</sub>	0,08719616	0,10153462	0,02955163	0,10012267	0,05268542	0,04358821	0,22409770

	Ç <sub>1</sub>	Ç <sub>2</sub>	Ç <sub>3</sub>
K <sub>1</sub>	0,432703134	0,093588023	0,37006665
K <sub>2</sub>	0,117791409	0,016250094	0,11807956
K <sub>3</sub>	0,018510079	0,048240938	0,01498404
K <sub>4</sub>	0,625015638	0,276934526	0,41046295
K <sub>5</sub>	0,120425609	0,066969862	0,09939986
K <sub>6</sub>	0,183047849	0,11648983	0,20337211
K <sub>7</sub>	0,547008879	0,86155312	0,17187952
K <sub>8</sub>	0,106357950	0,284520985	0,08585809
K <sub>9</sub>	0,13021480	0,102186576	0,11411201
K <sub>10</sub>	0,134354323	0,192420447	0,50673048
K <sub>11</sub>	0,110955300	0,139316177	0,51171437
K <sub>12</sub>	0,037485914	0,047067551	0,24309892
K <sub>13</sub>	0,025361211	0,039804622	0,03876594

**Adım-6 Faktörlerin Mesafe Ölçütlerinin Belirlenmesi:** Girdi faktörleri için mesafe ölçülerinin belirlenmesi için eşitlik 13a kullanılarak öncelikle her bir sütun için en küçük değer belirlenmiş, ardından eşitlik 13b kullanılarak girdi faktörlerinin her birisi için mesafe ölçütleri hesaplanmıştır.

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
K <sub>1</sub>	1,09373587	1,10153462	1,21806271	1,05721296	1,48845773	1,06479328	1,00313737
K <sub>2</sub>	1,09954894	1,15230193	1,00000000	1,00000000	1,06744000	1,01413672	1,00000000
K <sub>3</sub>	1,00000000	1,00000000	1,02366424	1,01430324	1,00000000	1,03573448	1,05535213
K <sub>4</sub>	1,35605097	1,00000000	1,31333135	1,38618746	1,58223379	1,40996475	1,31889103
K <sub>5</sub>	1,15041337	1,10153462	1,13365134	1,18594211	1,10189840	1,18574073	1,21983984
K <sub>6</sub>	1,22380347	1,15230193	1,31612212	1,27176155	1,15161694	1,84074190	1,36348650
K <sub>7</sub>	1,71936828	1,15230193	1,40103048	1,50061337	1,48734016	1,10759611	1,38768902
K <sub>8</sub>	1,07121019	1,05076731	1,03524787	1,41479394	1,04824175	1,01138791	1,09277645
K <sub>9</sub>	1,15186668	1,45690577	1,19535422	1,14303240	1,10288290	1,00000000	1,01994470
K <sub>10</sub>	1,17584558	1,35537116	1,37809261	1,18594211	1,11912759	1,08992522	1,04392315
K <sub>11</sub>	1,25868193	1,05076731	1,53189104	1,28606478	1,17524555	1,13744029	1,35497076
K <sub>12</sub>	1,05595087	1,25383654	1,06281154	1,11442591	1,03790423	1,04280283	1,07327995
K <sub>13</sub>	1,06176394	1,00000000	1,01028381	1,07151620	1,03545622	1,03298567	1,14655990

	Ç <sub>1</sub>	Ç <sub>2</sub>	Ç <sub>3</sub>
K <sub>1</sub>	0,807687496	0,232034903	0,858352278
K <sub>2</sub>	0,492775771	0,154696974	0,606365189
K <sub>3</sub>	0,393494443	0,186687818	0,503269673
K <sub>4</sub>	1,000000000	0,415381406	0,898748575
K <sub>5</sub>	0,495409971	0,205416742	0,587685487
K <sub>6</sub>	0,558032211	0,254936714	0,691657742
K <sub>7</sub>	0,921993241	1,000000000	0,660165151
K <sub>8</sub>	0,481342311	0,422967865	0,574143718
K <sub>9</sub>	0,505199158	0,240633456	0,602397641
K <sub>10</sub>	0,509338685	0,330867327	0,995016106
K <sub>11</sub>	0,485939662	0,277763057	1,000000000
K <sub>12</sub>	0,412470275	0,185514431	0,73138455
K <sub>13</sub>	0,400345573	0,178251502	0,527051573

**Adım-7 Mesafe Ölçütlerinin Ağırlıklandırılması:** Bu aşamada eşitlik 14a kullanılarak, girdi faktörleri için mesafe ölçütleri ağırlıklandırılırken, eşitlik 14b kullanılarak çıktı faktörleri için mesafe ölçütleri ağırlıklandırılmıştır. Ardından ağırlıklandırılmış mesafe ölçütlerini gösteren matrisler oluşturulmuştur.

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
K <sub>1</sub>	0,13841739	0,04227714	0,17337719	0,09651937	0,28189093	0,37413722	0,06086562
K <sub>2</sub>	0,13915306	0,04422560	0,14233847	0,09129605	0,20215667	0,35633798	0,06067526
K <sub>3</sub>	0,12655468	0,03838022	0,14570681	0,09260188	0,18938457	0,36392680	0,06403376
K <sub>4</sub>	0,17161459	0,03838022	0,18693758	0,12655344	0,29965067	0,49542037	0,08002405
K <sub>5</sub>	0,14559019	0,04227714	0,16136220	0,10827183	0,20868256	0,41663461	0,07401409
K <sub>6</sub>	0,15487805	0,04422560	0,18733481	0,11610681	0,21809848	0,64678286	0,08272989
K <sub>7</sub>	0,21759410	0,04422560	0,19942054	0,13700007	0,28167928	0,38917688	0,08419839
K <sub>8</sub>	0,13556666	0,04032868	0,14735560	0,12916510	0,19852081	0,35537213	0,06630449
K <sub>9</sub>	0,14577411	0,05591636	0,17014489	0,10435434	0,20886901	0,35137075	0,06188540
K <sub>10</sub>	0,14880876	0,05201944	0,19615560	0,10827183	0,21194550	0,38296784	0,06334030
K <sub>11</sub>	0,15929208	0,04032868	0,21804703	0,11741263	0,22257337	0,39966325	0,08221320
K <sub>12</sub>	0,13363552	0,04812252	0,15127897	0,10174268	0,19656305	0,36641042	0,06512154
K <sub>13</sub>	0,13437119	0,03838022	0,14380226	0,09782520	0,19609943	0,36296095	0,06956781

	Ç <sub>1</sub>	Ç <sub>2</sub>	Ç <sub>3</sub>
K <sub>1</sub>	0,27679870	0,10328253	0,18212387
K <sub>2</sub>	0,16887682	0,06885815	0,12865764
K <sub>3</sub>	0,13485259	0,08309780	0,10678299
K <sub>4</sub>	0,34270519	0,18489305	0,19069509
K <sub>5</sub>	0,16977957	0,09143435	0,12469421
K <sub>6</sub>	0,19124054	0,11347649	0,14675488
K <sub>7</sub>	0,31597187	0,44511634	0,14007283
K <sub>8</sub>	0,16495851	0,18826991	0,12182093
K <sub>9</sub>	0,17313438	0,10710988	0,12781581
K <sub>10</sub>	0,17455301	0,14727445	0,21112099
K <sub>11</sub>	0,16653405	0,12363687	0,21217847
K <sub>12</sub>	0,14135571	0,08257550	0,15518405
K <sub>13</sub>	0,13720051	0,07934266	0,11182899

**Adım-8 Verimlilik Değerlerinin Hesaplanması:** Eşitlik 15 kullanılarak faktörler için verimlilik ve performans değeri hesaplanmış, faktörler aldıkları verimlilik puanına göre sıralandırılmıştır.

	Girdiler	Çıktılar	Verimlilik	Sıra
K <sub>1</sub>	1,167484844	0,56220510	0,48155237	3
K <sub>2</sub>	1,036183090	0,36639260	0,35359832	9
K <sub>3</sub>	1,020588715	0,32473337	0,31818241	11
K <sub>4</sub>	1,398580922	0,71829334	0,51358726	2
K <sub>5</sub>	1,156832628	0,38590812	0,33359028	10
K <sub>6</sub>	1,450156502	0,45147191	0,31132634	13
K <sub>7</sub>	1,353294855	0,90116104	0,66590148	1
K <sub>8</sub>	1,072613475	0,47504935	0,44288960	5
K <sub>9</sub>	1,098314879	0,40806007	0,37153286	7
K <sub>10</sub>	1,163509276	0,53294846	0,45805261	4
K <sub>11</sub>	1,239530255	0,50234939	0,40527400	6
K <sub>12</sub>	1,062874699	0,37911526	0,35668858	8
K <sub>13</sub>	1,043007065	0,32837216	0,31483215	12

#### 4. Bulgular

Elde edilen verimlilik değerleri gözden geçirildiğinde en yüksek verimlilik değerine 0,6659 ile Prag'da bulunan tramvay sistemlerinin sahip olduğu görülebilmektedir. Kullanılan araç sayısının ve envanter olarak değerlendirilebilecek anlık koltuk kapasitesinin diğer alternatiflere göre son derece yüksek olmasına rağmen, taşınan yolcu sayısı ve günlük taşıma kapasitesi rakiplerin kıyaslanamayacak kadar üzerinde olması neticesinde en yüksek performans değerine sahip hafif raylı ulaşım sistemi olarak tanımlanabilmektedir.

Viyana hafif raylı ulaşım sistemleri ise aldığı 0,5135 ile ikinci en verimli tramvay sistemi olarak tanımlanabilir. Viyana günlük taşıma kapasitesi açısından Prag'dan daha yüksek kapasiteye sahipken, yıllık taşınan yolcu sayısı açısından rakibinin ancak dörtte biri kadar yolcu taşıyabilmiştir.

Buna karşılık Viyana'nın elde ettiği gelir Prag'a göre yaklaşık üç katı olarak gerçekleşmiştir. Diğer alternatifler sırasıyla; K1: Roma> K10: Zagreb> K8: Lizbon> K11: Berlin >K9: Belgrad> K12: Frankfurt> K2: İstanbul> K5: Amsterdam> K3: Atina> K13: Manchester> K6: Brüksel olarak sıralandırılmıştır.

Görüldüğü gibi İstanbul kentinde bulunan hafif raylı sistemler seçilen on üç kent içerisinde verimlilik ve performans açısından 9. Sırada yer almaktadır. Kullanılan hat sayısı ve istihdam edilen personel sayısı açısından rakiplerinden oldukça geride olmasına karşılık, araç sayısı sistem uzunluğu ve mevcut koltuk kapasitesi açısından rakiplerinden çokta kötü durumda olmadığı görülebilmektedir. İstanbul kentinde girdilerin rakiplere göre büyük oranda düşük tutulmasına karşılık çıktı düzeyi değerlendirildiğinde bir iki rakibi dışında neredeyse diğer tüm kentlerin altında kalan bir çıktı düzeyine sahip olduğu tespit edilmiştir. Çıktılar açısından günlük taşıma kapasitesi kabul edilebilir bir düzeyde iken, yıllık taşınan yolcu sayısı rakiplere kıyasla oldukça düşüktür.

Faaliyetler sonucu elde edilen gelirler dikkate alındığında Atina, Amsterdam, Lizbon ve Manchester kentleri dışında en düşük gelir düzeyi İstanbul kentinde gerçekleşmektedir. Diğer kentlerin sosyo-ekonomik yapısı ve kent nüfusunun gelir düzeyleri dikkate alındığında İstanbul'da bilet fiyatlarının diğer kentlere göre Euro cinsinden daha düşük kalması bu durumu açıklayabilmektedir.

#### Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada Avrupa'da bulunan tramvay ve hafif raylı sistemlerin verimlilik ve performans düzeyleri analiz edilmiştir. Girdi faktörleri olarak personel, araç, hat vb. faktörler ele alınırken, çıktı faktörleri olarak taşınan yolcu sayıları, yıllık gelir ve kapasite gibi faktörler değerlendirme kapsamına alınmıştır. Verimlilik analizi için entropi ve EATWOS yöntemlerinden oluşan entegre bir model belirlenmiş ve uygulanmıştır. Uygulama sonucunda seçilen kentsel alanlarda yer alan hafif raylı sistemlerin verimlilik değerleri hesaplanarak, bütün karar alternatifleri aldıkları puanlara göre sıralandırılmıştır. Değerlendirmede en yüksek verime sahip kentsel hafif raylı ulaşım sistemi Prag kentinde yer alan tramvay sistemi olarak belirlenirken, İstanbul kentinde bulunan hafif raylı sistemler dokuzuncu sırada yer alabilmektedir.

Önerilen bu hibrid model basitliğinin yanı sıra, kullanımı için bir yazılım ya da programa gereksinim duymaması açısından kullanıcılar ve karar vericiler açısından son derece ergonomik bir model olarak kullanılabilir potansiyeline sahiptir.

Dolayısıyla verimlilik analizinin yapılacağı birçok alana uygulanabilme olanağına sahiptir. Kolay uygulanabilirliğine ek olarak, elde edilen sonuçların açık, net ve anlaşılabilir olması söz konusu modelin kullanılabilirlik düzeyini artırmaktadır.

Bu araştırmanın sonuçlarından kentsel ulaşım sistemi organize eden kamu otoriteleri ve ulaşım operatörleri dışında ulaşım yatırımlarını finanse eden finans kuruluşları, yatırımcılar vb. aktörlerin de faydalanması mümkün olabilir. Özellikle yatırımlarını daha rasyonel temelde gerçekleştirmek isteyen yatırımcılar kentsel alanlarda kullanılan ulaşım sistemlerinin verimliliklerini analiz etmek istediklerinde seçilen bu modeli sistematik ve yapısal bir çözüm yolu olarak kullanabilirler.

Bunun yanı sıra, bu çalışma kentsel alanlarda kullanılan hafif raylı sistemlere ilişkin literatüre katkı sağlamak amacıyla yapılmıştır. Özellikle verimlilik çerçevesinde gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir bölümü kullanıcı tatminine odaklanan kalitatif nitelikte çalışmalardır. Bu çalışma verimlilik analizine ilişkin değerlendirmeleri sayısal bir ölçekte değerlendirme ve analiz etmeye yönelik bir çerçeve önermektedir.

Araştırmanın kısıtları dikkate alındığında analiz için seçilen raylı sistemlerin tümü Avrupa ülkelerine ait ulaşım sistemleridir. Bununla birlikte özellikle ABD, Rusya vb. diğer coğrafyalarda yer alan raylı ulaşım sistemleri yapısal, operasyonel ve teknik farklılıkları nedeni ile çalışmaya dahil edilememiştir. Özellikle kullanılan altyapı ve üstyapı sistemlerinin Avrupa'da ve Türkiye'de kullanılan sistemlerden son derece farklı olması çalışmanın en temel kısıtı olarak değerlendirilebilir. Bu kısıtı aşabilme açısından sonraki çalışmalarda sistemler arasında kıyaslamaya olanak sağlayacak parametrelerin birbirine dönüştürülebilmesine olanak sağlayacak yöntemler geliştirilebilir.

Öte yandan bu çalışmada karar noktalarının performansları değerlendirilirken ağırlıklı olarak teknik faktörler üzerinde durulmuştur. Bunun temel nedeni kullanıcıların (yolcu) yaklaşımlarını ölçecek metodların araştırmanın kapsamı dışında tutulmasıdır. Buna bağlı olarak sonraki çalışmalarda seçilen ulaşım sistemlerine ilişkin kullanıcı görüşleri ve yaklaşımları da çalışmaya dahil edilebilir.

## Kaynakça

- Alfy, Z., Elhadary, R., & Elashry, A., (2010). Integrating GIS and MCDM to deal with landfill site selection. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, Cilt:10 Sayı: 06, 33-40.
- Aydin, N., Celik, E., & Gumus A.T., (2015). A hierarchical customer satisfaction framework for evaluating rail transit systems of Istanbul. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Cilt:7, 61-81. doi.org/10.1016/j.tra.2015.03.029
- Bansal, A., Singh, R.K., Issar, S. & Varkey, J., (2014). Evaluation of vendors ranking by EATWOS approach. *Journal of Advances in Management Research*, Cilt: 11, Sayı: 3, 290-311. doi.org/10.1108/JAMR-02-2014-0009
- Celik, E., Bilisik, O.N., Erdogan, M., Gumus A.T., & Baraclı, H., (2015). An integrated novel interval type-2 fuzzy MCDM method to improve customer satisfaction in public transportation for Istanbul. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Cilt: 58, 28-51. doi.org/10.1016/j.tre.2013.06.006
- Farkas, A., (2009). Route/site selection of urban transportation facilities: an integrated GIS/MCDM approach. MEB 2009 – 7th International Conference on Management, Enterprise and Benchmarking, June 5-6, 2009, Budapest, Hungary.
- Fierek, S., & Zak, J., (2012). Planning of an integrated urban transportation system based on macro-simulation and MCDM/A methods. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Cilt: 54, Sayı: 4, 567-579. doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.774
- Gerçek, H., Karpak, B., & Kılınçaslan, T., (2004). A multiple criteria approach for the evaluation of the rail transit networks in Istanbul. *Transportation*, Cilt: 31, Sayı: 2, 203-228. doi.org/10.1023/B:PORT.0000016572.41816.d2
- Haijun, Z., (2005). Methodology to sequence the logistics centers based on entropy weighting and TOPSIS. *Journal of Southeast University*, Cilt: 35 Sayı: 6, 967-971. doi:10.1016/j.mcm.2010.07.023
- Hamurcu, M., Alağaç, H.M., & Eren, T., (2017). Selection of rail system projects with analytic hierarchy process and goal programming. *Sigma J Eng & Nat Sci*, Cilt: 8, Sayı: 4, 291-302.
- Kumar, N., Singh, A., Verma, A., & Sonal, T., (2016). Measuring efficiency of IPL players using EATWOS. *International Journal of Advanced Production and Industrial Engineering*, Cilt: 1, Sayı: 2, 13-16.
- Li, Y., Zhao, L., & Suo, J., (2014). Comprehensive assessment on sustainable development of highway transportation capacity based on entropy weight and TOPSIS. *Sustainability*, 6(7):4685-4693. doi: 10.3390/su6074685
- Nassereddine, M., & Eskandari, H., (2017). An integrated MCDM approach to evaluate public transportation systems in Tehran. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Cilt: 106, 427-439. doi: 10.1016/j.tra.2017.10.013
- Özbek, A., (2015a). Analysis of private pension companies in Turkey by EATWOS. *European Journal of Business and Management*, Cilt: 7, Sayı: 26, 31-43. ISSN 2222-1905

- Özbek, A., (2015b). Efficiency analysis of the Turkish red crescent between 2012 and 2014. *International Journal of Economics and Finance*, Cilt: 7, Sayı:9, 322-334.
- Özbek, A., (2015c). Efficiency analysis of non-governmental organizations based in Turkey. *International Business Research*, Cilt: 8, Sayı: 9, 95-104.
- Özbek, A., (2016). Efficiency analysis of gold mining companies through financial statements. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, Cilt: 6, Sayı: 10, 273-290.
- Özbek, A., (2017a). Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleriyle Hayırsever Kuruluşlarında Verimlilik Analizi Efficiency Analysis in Charity Organizations by Multiple Criteria Decision. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, Cilt: 18 - Sayı: 2, 99-114.
- Özbek, A., (2017b). İlkokul öğretmenleri sağlık ve sosyal yardım sandığı'nin finansal performans analizi. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İİBF Dergisi*, Cilt: 7, Sayı: 1, 1-31.
- Pérez C. J., Carrillo, M.H., & Montoya-Torres, J.R. (2015). Multi-criteria approaches for urban passenger transport systems: a literature review. *Annals of Operations Research*, Cilt: 226, 69-87. doi:/10.1007/s10479-014-1681-8
- Peters, M.L., Zelewski, S., & Bruns, A.S., (2012). Extended version of EATWOS concerning satisficing levels for input quantities. *Pioneering supply chain*, (Ed. Ringle C.M.), EUL Verlag, Hamburg.
- Purahmad, A., Omranzadeh, B., & Mahdi, A., (2015). Evaluation and prioritization of rapid public transit systems in Tehran metropolis with TOPSIS and shannon entropy technique. *Journal of Geography and Regional Development*, Cilt: 12, Sayı: 23, 63 To 86.
- Ranjan, R., Chatterjee, P., & Chakraborty, S., (2016) Performance evaluation of Indian Railway zones using DEMATEL and VIKOR methods. *Benchmarking Int. J.* Cilt: 23, Sayı: 1, 78–95. <https://doi.org/10.1007/s40034-018-0113-8>
- Sari, I.U., Behret, H., & Kahraman C., (2012). Risk governance of urban rail systems using fuzzy AHP: the case of Istanbul ... and Knowledge-Based Systems, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, Cilt: 20, Sayı: supp01, 67-79. doi:/10.1142/S0218488512400053
- Sivilevičius, H., & Maskeliūnaite, L., (2010). The criteria for identifying the quality of passengers' transportation by railway and their ranking using AHP method, *Transport*, Cilt:25 Sayı: 4, 368-381. doi:/10.3846/transport.2010.46
- Soni, V., Singh, S., & Banwet, D., (2016). Precise decisions in Indian energy sector by imprecise evaluation. *International Journal of Energy Sector Management*, Cilt: 10, Sayı:1, 111-118.
- Wang, Y., Zhang, Z., & Sun H., (2018). Assessing customer satisfaction of urban rail transit network in Tianjin based on intuitionistic fuzzy group decision model. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Cilt: 2018, 1-11. doi: 10.1155/2018/4205136
- Wang, Y., Zhang, Z., & Sun, H., (2018). Assessing customer satisfaction of urban rail transit network in Tianjin based on intuitionistic fuzzy group decision model. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Cilt:2018, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2018/4205136>
- Yongneng, X., (2009). Performance evaluation for the maintenance systems TPM & RCM applied in Nanjing Metro. *Urban Rapid Rail Transit*, Cilt: 12, Sayı: 2, 81-89.
- Zak, J., (2009). Multiple criteria evaluation and optimization of transportation systems. *Journal of advanced transportation*, Cilt:43 Sayı: 2, 91-94. <https://doi.org/10.1002/atr.5670430202>
- Zhang, C., & Xu, L., (2009). Application of TOPSIS in Evaluating Transfer Efficiency at Urban Railway Passenger Station. *International Conference on Transportation Engineering*, 1866-1871.
- Xiang-yun, C., & Zhi-gao, C., (2006). A fuzzy-based location selection method for reverse logistics reprocessing center. *International Conference on Management Science and Engineering*, 561-565.
- Akyene, T., (2012), Cell phone evaluation base on Entropy and TOPSIS. *Interdisciplinary Journal of Research in Business*, Cilt: 1, Sayı: 12, 9-15.