



# BWM ve CoCoSo Yöntemleri Kullanılarak Kentlerin Raylı Sistem Performanslarının Karşılaştırmalı Analizi

\*

Ömer Faruk Görçün<sup>1</sup>

ORCID: 0000-0003-3850-6755

Hande Küçükönder<sup>2</sup>

ORCID: 0000-0002-0853-8185

## Öz

*Kentsel ulaşım sisteminin performansının ölçülmesi, mevcut kentsel ulaşım sistemlerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir. Mevcut makale, kentsel raylı ulaşım sistemlerini değerlendirmek için hibrit bir karar verme modeli önermektedir. Önerilen model, En İyi ve En Kötü Yöntem (BWM) ile Kombine Uzlaşma Çözümü (CoCoSo) tekniklerinin entegre edilmesine dayanmaktadır. BWM yaklaşımı yardımıyla karar vericilerin en iyi ve en kötü tercihleri göz önünde bulundurularak kriter ağırlıkları belirlenir ve CoCoSo tekniği performanslarına göre alternatiflerin sıralanmasına yardımcı olur. Önerilen model, teknik, çevresel ve ekonomik açılardan belirlenen on üç kriterle ilgili olarak, metro raylı sistemlere sahip 30 Avrupa şehrinin kentsel raylı sistem performanslarını değerlendirmek için uygulandı. Çalışmanın sonunda birinci sıradaki şehrin en yüksek performansa sahip olan Saint Petersburg olduğu belirlendi. Ayrıca duyarlılık analizi sonucunda önerilen modelin güvenilir ve tutarlı sonuçlar sağladığı ve bu tür değerlendirme süreçlerine uygun karar desteği sağlayabileceği gözlemlenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Ulaşım sistemleri, CoCoSo, performans analizi, BWM.

<sup>1</sup> Doç. Dr., Kadir Has Üniversitesi, E-mail: omer.gorcun@khas.edu.tr

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Bartın Üniversitesi, E-mail: hkucukonder@bartin.edu.tr



# Comparative Analysis of the Cities Rail Systems' Performance by using The BWM and CoCoSo Techniques

\*

Ömer Faruk Görçün<sup>3</sup>

ORCID: 0000-0003-3850-6755

Hande Küçükönder<sup>4</sup>

ORCID: 0000-0002-0853-8185

## Abstract

*Measuring the performance of the urban transport system is critical in improving and developing the current urban transport systems. The current paper proposes a hybrid decision-making model to evaluate the urban rail transport systems. The suggested model is based on integrating the Best and Worst Method (BWM) and the Combined Compromise Solution (CoCoSo) techniques. The criteria weights are identified by considering the best and worst preferences of the decision-makers with the help of the BWM approach, and the CoCoSo technique helps to rank the alternatives concerning their performances. The proposed model was implemented to evaluate urban rail systems performances of 30 European cities with metro rail systems concerning thirteen criteria identified from the technical, environmental, and economic perspectives. At the end of the study, it was determined that the first ranked city had the highest performance, Saint Petersburg. Besides, as a result of the sensitivity analysis, the proposed model provides reliable and consistent results, and it has been observed that it can provide proper decision support for these kinds of evaluation processes.*

**Keywords:** *Transport systems, CoCoSo, performance analysis, BWM.*

<sup>3</sup> Assoc. Prof. Dr., Kadir Has University, E-mail: omer.gorcun@khas.edu.tr

<sup>4</sup> Asst. Prof. Dr., Bartın University, E-mail: hkucukonder@bartin.edu.tr



## Giriş<sup>5</sup>

Raylı ulaşım sistemleri, bir kentin ulaşım performansının yanı sıra kentsel refahın artırılabilmesine de olanak sağlayan bir ulaşım sistemi olarak tanımlanabilir. Kentsel alanlarda otobüs, otomobil, vb. fosil tabanlı yakıtlara dayalı karayolu ulaşım sistemleri büyük ölçüde dışsallığa yol açabilmektedir. Bu nedenle kentsel ulaşımın mümkün olduğu ölçüde daha sürdürülebilir ulaşım modlarına kaydırılması gerekmektedir (Qureshi ve Lu, 2007). Bu noktada kentsel ulaşım süreçlerinde emisyon, trafik sıkışıklığı, enerji tüketimi vb. dışsal maliyetler konusunda en iyi performansa sahip ulaşım türü raylı sistemler olarak değerlendirilebilir. Özellikle büyük kentlerde ve metropolitan alanlarda kentsel ulaşımın genel performansı; doğrudan metro, tramvay, konvansiyonel banliyö trenleri gibi kent içi ulaşım modlarının performansına bağlıdır. Aynı zamanda bu tür ulaşım sistemlerinin kentsel alanlarda sosyal, ekonomik ve çevresel olarak da pozitif etkileri yüksektir (Amoroso, Salvo, ve Zito, 2011). Dolayısıyla raylı ulaşım sistemleri daha sürdürülebilir ve yeşil kentsel ulaşım sistemlerinin oluşturulmasına olanak sağlayabilir. Sürdürülebilirliğe ek olarak, Vitosoglu, Ozden, Yaliniz, ve Bilgiç (2014) raylı ulaşımın görece olarak diğer rakiplerine kıyasla daha yüksek yolculuk konforu sağladığını, bu nedenle bu sistemlere olan talebin giderek arttığını ileri sürmektedir.

Bu bağlamda, raylı ulaşım sistemlerinin performansının ölçülmesi; ulaşım sistemlerinin gelişimi açısından önem arz etmekle birlikte karar vericiler açısından da basit bir iş değildir. Bunun temel nedeni; değerlendirmeyi etkileyen son derece karmaşık ve çelişkili kriterlerin mevcut olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde kent içi raylı ulaşım sistemlerinin performans ölçümüne odaklanan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Diğer taraftan bu tür ulaşım sistemlerinin performanslarının değerlendirilmesi için genel kabul görmüş bir kriter seti de mevcut değildir. Dolayısıyla bu konuda uygulama süreçlerinin desteklenmesi için daha fazla sayıda araştırma ve çalışmaya ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada kentsel raylı ulaşım sistemlerinin performanslarını değerlendirmek üzere hibrit bir karar verme modeli önerilmektedir. Önerilen model, uzman görüşüne dayalı olarak tanımlanan kriterlerin önceliklendirilmesi

---

<sup>5</sup> Bu çalışma 16-17-18 Aralık 2021 tarihlerinde düzenlenen VI. Kent Araştırmaları Kongresi 'nde özet hali sözlü bildiri olarak sunulan ve bildiri özet kitabında "Kentlerin Ulaşım Performanslarının Karşılaştırmalı Analizi için Matematiksel Bir Model Önerisi" başlıklı özet olarak yayınlanan çalışmanın yeniden gözden geçirilerek genişletilmiş halidir.

ve önem seviyelerinin belirlenmesi için Best and Worst Method (BWM) tekniğini, karar alternatiflerinin değerlendirilmesi ve sıralanması içinde combined compromise solution (CoCoSo) tekniğinden faydalanmaktadır. Çalışmada, hibrit modelin uygulamasının gösterilebilmesi için Avrupa'da metro hatlarına sahip 30 kentin raylı ulaşım performansları analiz edilmektedir. Model geçerliliği ise üç aşamalı olarak gerçekleştirilen duyarlılık analizi ile test edilmektedir.

Bu perspektifte, mevcut çalışma literatürdeki iki temel boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Bunlardan ilki, raylı sistemlerin performanslarını değerlendirmek üzere karar vericilere uygulamalarda rehberlik edebilecek bir kriter setinin tanımlanması, ikincisi bu sistemlerin performanslarının etkin bir şekilde analiz edilebilmesi için bir karar modelinin önerilmesidir. Çalışma kentsel ulaşım sistemleri olarak kullanılan metro, hafif raylı sistemler, tramvaylar gibi kentsel raylı sistemlere odaklanmaktadır. Bu yönüyle kentsel ulaşım sistemleri dışında kalan ve uzun mesafe yolcu taşımacılığında kullanılan Yüksek Hızlı Trenler (YHT), konvansiyonel trenler ve ana hat trenleri çalışmanın kapsamı dışında kalmaktadır. Bu makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2'de, kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve literatürde yer alan çalışmalar sınıflandırılmıştır. Bölüm 3'te, önerilen hibrit model ve temel algoritması tanıtılmış, Bölüm 4'te, önerilen modelin uygulaması gösterilmiş, Bölüm 5'te elde edilen sonuçlar tartışılarak değerlendirilmiştir. Bölüm 6'da çalışma sonuçlandırılarak, çalışmanın sınırlılıkları ve gelecek çalışmalar için öneriler belirtilmiştir.

## Literatür Taraması

Literatür taramasının sonuçları, kentsel ulaşım sistemleri ile ilgili çok sayıda çalışmanın olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalar, genel olarak kentsel ulaşım ile ilgili olsa da odak noktaları bakımından bazı farklılıklara sahiptirler. Bu nedenle, çalışmanın bu kısmında ilgili literatürler; i) altyapı yatırımları, ii) çevre dostu ulaşım sistemlerinin seçimi, iii) politikaların belirlenmesi, iv) performans analizi şeklinde dört kategoriye ayrılmış ve her bir kategori altında incelenen çalışmalara ilişkin detaylar sırasıyla tablo 1-4 arasında özetlenmiştir.

**Tablo1.** Alt yapı yatırımları üzerine literatür incelemesi

Yazar	Araştırma konusu	Metodoloji	Araştırma bulgusu	Araştırma boşluğu
Ahern ve Anandarajah, 2007	Demiryolu projelerinin önceliklendirilmesi	Hedef programlama	Finansal yeterlilik projenin uygunluğu açısından önemli faktördür	Demiryolu projelerine odaklanmış ve kentsel ulaşım ile ilişkili bir çözüm sunmamıştır.
Ambrasaitė, Barfod, ve Salling, 2011	Ulaştırma altyapı değerlendirme	Monte Carlo simülasyonu	Projelerin ekonomik uygunluğu açısından önemli kriterdir.	Coğrafi sınırlılıklara sahiptir.
Basbas, Latinopoulou, Zacharaki, 2009	Pitsiava-ve yatırımlarının çevresel etkisi	Kalitatif analiz	Yeni altyapısı etmeninin herhangi bir soruna güvenilir bir çözüm getirmesi olası değildir.	Çalışma herhangi bir matematiksel model önerisinde bulunmamıştır.
Beukes,Vanderschuren, Zuidgeest, Brussel, ve van Maarseveen, 2013	Karayolu planlama	CBS	Yol planlaması, bir yerin bağlamına duyarlı olmalıdır.	Kentsel ulaşım ile doğrudan ilişkili değildir
Beukes,Vanderschuren, ve Zuidgeest, 2011	Karayolu tasarımı	CBS tabanlı Mekansal Kriterli Analiz (SMCA)	Yol tasarımı arazi kullanımı, sosyoekonomik, çevresel ve ulaşım gibi faktörlerden etkilendiği bildirilmektedir.	Kentsel ulaşım ile doğrudan ilişkili değildir.
Caliskan, 2006	Ulaşım yatırımı	Bilişsel Haritalama	3. Boğaz geçişi için en uygun yatırım seçeneğidir.	Kentsel ulaşım ile doğrudan ilişkili değildir.
Chang, Wey, ve Tseng, 2009	Demiryolu projelerinin önceliklendirilmesi	ANP	Demiryolu projelerinde maliyet en önemli kriterdir.	Demiryolu projelerine odaklanmış ve kentsel ulaşım ile ilişkili bir çözüm sunmamıştır.
Fioravanti, Amncio, ve Galves, 2007	Karayolu sisteminin iyileştirilmesi	AHP	Konfor beklentisi ulaşım talebinde öncelikli faktördür.	Coğrafi sınırlılıklara sahiptir.
Iniestra ve Gutiérrez, 2009	Karayolu altyapı projeleri	0-1 knapsack problem	Karayolu altyapı projeleri bütçe kısıtlamalarından büyük ölçüde etkilenir.	Kentsel ulaşım ile doğrudan ilişkili değildir

<b>Ivanović, Grujičić, Macura, Jović, ve Bojović, 2013</b>	Karayolu altyapı ANP projeleri			Geleneksel yöntem, alternatif sıralamayı tanımlamak için yeterli değildir.	Kentsel ulaşım nihai doğrudan ilişkili değildir
<b>Labbouz, Roy, Diab, ve Christen, 2008</b>	Kentsel ulaşım hattı seçimi	ELECTREE-III		Teknik yeterlilikler beklentiler arasında korelasyon mevcuttur.	Coğrafi ile sınırlılıklara sahiptir.
<b>Thomopoulos ve Grant-Muller, 2013</b>	Ulaştırma altyapı değerlendirme	SUMUNI		Nüfus yoğunluğu ulaşırma altyapı projelerinin etkinliği ile doğrudan ilişkilidir	Matematiksel bir model önermemiştir.
<b>Tudela, Akiki, ve Cisternas, 2006</b>	Kentsel ulaşım projeleri değerlendirme	AHP		Analizde geniş ekonomik olmayan yelpazesi kullanmak daha makul sonuçlar verir.	daha AHP yöntemi bir birçok kısıt ve sınırlılıklara sahiptir.
<b>Wey ve Wu, 2007</b>	Ulaştırma altyapı değerlendirme	ANP		Proje seçiminde projeler arasındaki karşılıklı bağımlılık ilişkisini dikkate almak çok önemlidir.	Kentsel ulaşım veya doğrudan ilişkili değildir
<b>Görçün, 2021</b>	Kentsel raylı sistem araçlarının seçimi	CRITIC EDAS	&	Raylı sistem araçlarının çevresel etkisi en önemli faktör olarak belirlenmiştir.	Kentsellerin ulaşım sistemlerini incelememiş, sadece raylı sistem araçlarının seçimine odaklanmıştır

**Tablo 2.** Çevre dostu ulaşım sistemlerinin seçimine ilişkin literatür incelemesi

Yazar	Araştırma konusu	Metodoloji	Araştırma bulgusu	Araştırma boşluğu
Awasthi, Chauhan, ve Omrani, 2011	Sürdürülebilir ulaşım sistemleri	Bulanık TOPSIS	Sürdürülebilir ulaşım sistemi seçimi önemli bir problemdir.	Kriterlerin nasıl belirlendiği açık değildir.
Brey, Contreras, Carazo, Brey, Hernández-Díaz, ve Castro, 2007	Çevreci araç seçimi	VZA	Satış fiyatı ve maliyetler en önemli kriterlerdir	VZA tekniğinin birçok kısıt ve sınırlılıkları mevcuttur.
Kavran, Štefančić, ve Presečki, 2007	Kentsel ulaşım yönetimi	Anket	Kentsel ulaşımın etkinliği doğru ve uygun kriterlerin seçimine bağlıdır.	Matematiksel bir model önermez.
Pressl, Mader, ve Wieser, 2010	Ulaşım güzergahlarının belirlenmesi	Bilgisayar destekli model	Doğru güzergâh planlama kentsel ulaşımın verimliliğini ve etkinliğini etkiler.	Güzergahları incelemiş, kentsel ulaşımın etki eden diğer dinamikleri göz ardı etmiştir.
Scarpellini,, Valero, Llera, ve Aranda, 2013	Yenilikçi enerji kullanımı	Kantitatif analiz	Eko-inovasyon göz önünde bulundurularak daha eko-verimli süreçlere öncelik verilebilir.	Kentsel ulaşım sistemleri bazında kentlerin performansına ilişkin bir model önerisi mevcut değildir.
Tzeng, Lin, ve Opricovic, 2005	Alternatif yakıtlı araçlar	TOPSIS & VIKOR	Elektrikli otobüsün seyir mesafesi kabul edilebilir bir aralığa kadar uzamıyorsa, e-otobüs en iyi alternatiftir.	Kentsel ulaşım sistemleri bazında kentlerin performansına ilişkin bir model önerisi mevcut değildir.
Vahdani, Zandieh,ve Tavakkoli-Moghaddam, 2011	Alternatif yakıtlı araçlar	PSI	Konvansiyonel dizel motor ilk sırada ve alternatifler arasında yer alıyor.	PSI tekniğinin birçok kısıt ve sınırlılıkları mevcuttur.
Görçün, 2019	Hafif raylı sistem hatları	Entropi Eatwios	Prag en verimli tramvay sistemlerine sahiptir.	Diğer kentsel ulaşım sistemlerinin etkisini göz ardı etmiştir.
Görçün, 2014	Kargo tramların çevresel etkisi	Kantitatif analiz	Kargo tram vagonlar kentsel ulaşımında emisyonları ciddi düzeyde azaltır.	Coğrafi sınırlılıklara sahiptir.



**Tablo 3.** Kentsel ulaşım sistemleri için politikaların belirlenmesine ilişkin literatür incelemesi

Yazar	Araştırma konusu	Metodoloji	Araştırma bulgusu	Araştırma boşluğu
Awasthi ve Chauhan, 2011	Sürdürülebilir ulaşım sistemleri	AHP & Dempster–Shafer	Araç paylaşımı sürdürülebilir bir ulaşım sistemini olanaklı kılar.	AHP tekniğinin birçok kısıt ve sınırlılıkları mevcuttur.
da Silva, da Silva Costa, ve Macedo, 2008	Sürdürülebilir ulaşım sistemleri	Anket	Ekonomik etkili faktörlerdir.	Belirleyiciler Bir matematiksel model önermez.
Emberger, Pfaffenbichler, Jaensirisak, ve Timms, 2008	Ulaşım planlama	Kalitatif analiz	Planlamada gelenekler ile ilgili hedeflerde ağırlıklar en önemli kriterlerdir	farklı ulaşım ile farklı bir matematiksel model önermez.
He ve Hung, 2012	Emisyon kontrolü	Delphi	Ülkeler arasındaki ekonomik ve siyasi farklılıklar, büyük fikir ayrılıklarına neden olmaktadır.	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.
Hickman, Saxena, Banister, ve Ashiru, 2012	Emisyon kontrolü	MCA	Entegre bir sürdürülebilir mobilite senaryosu, daha geniş MCA'ya karşı daha fazlasını başarır.	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.
Macharis, de Witte, ve Turcksin, 2010	Haraketlilik ve Lojistik	MAMCA	Erişilebilir hareketlilik, trafik güvenliğinde büyük bir artış ve ulaşımın çevresel etkisinde azalma sağlar.	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.
Turcksin, Bernardini, ve Macharis, 2011	Temiz bir araç filosunu teşvik etmek	PROMETHEE	Daha yeşil araçların teşvikli emisyonları azaltır.	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.
Turcksin vd., 2011	Farklı Biyoyakıt seçenekleri	MAMCA	MAMCA, farklı paydaşlar için alternatiflerin güçlü ve zayıf yönlerini gösterir.	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.
Uleğin ve Topcu, 2000	Ulaşım Planlama Sistemleri	Karar Sistemi	Destek Bilgiye dayalı ulaşım problemlerinin için yardımcı olabilir.	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.

**Tablo 4.** Kentsel ulaşım sistemlerinin performanslarının analizine ilişkin literatür incelemesi

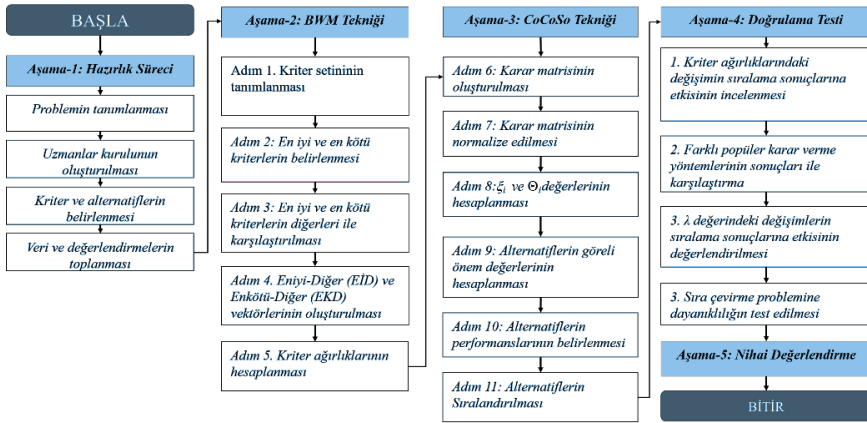
Yazar	Araştırma konusu	Metodoloji	Araştırma bulgusu	Araştırma boşluğu
Awasthi, Chauhan, ve Omrani, 2011	Sürdürülebilir ulaşım sistemleri	Bulanık TOPSIS	Sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin seçimi önemli bir problemidir.	Kriterlerin nasıl belirlendiği açık değildir.
Celik, Bilisik, Erdogan, Gumus, ve Baraclı, 2013	Kullanıcı tatmini	T2IVIF-GRA-TOPSIS	Metrobüs, müşteri yüksek alternatiftir	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.
Cyrial, Mulangi, ve George, 2019	Kentsel ulaşım Performansı	AHP	Otobüs başına personel sayısının azaltılmasının işletme maliyetini daha da azaltacağını önerdi.	AHP tekniğinin birçok kısıt ve sınırlılıkları mevcuttur.
Hassan, Hawas, ve Ahmed, 2013	Toplu taşıma hizmeti performansı	TOPSIS	Farklı rota performansı genel sistem performansı üzerinde farklı sonuçlara yol açar.	TOPSIS tekniğinin birçok kısıtı mevcuttur.
Ekbatani ve Cats, 2015	Çok modlu toplu sistemleri	kentsel taşıma TOPSIS	Düzenli sistemleri yüksek düzeyde sağlar	otobüs yüksek tekniğinin birçok kısıtı mevcuttur.
Khasnabis, Alsaïdi, Liu, ve Ellis, 2002	Toplu taşıma hizmeti performansı	taşıma AHP ve GAT	AHP esnek bir değerlendirme olanağı verir	AHP tekniğinin birçok kısıtı mevcuttur.
Kuo ve Liang, 2012	Toplu taşıma hizmeti performansı	taşıma IVF-VIKOR	Önerilen mevcut belirsizlikleri yakalar ve işler.	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.
Nassereddine ve Eskandari, 2017	Ulaşım sistemlerinin değerlendirilmesi	GAHP PROMETHEE	Kentsel ulaşım en önemli kriter güvenlidir	Coğrafi sınırlılıklara sahiptir.
Nathanail, 2008	Yolcu hizmet kalitesi	hizmet Kalitatif analiz	Demiryolu taşımacılığı hizmet üretimine son derece duyarlıdır.	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.
Yeh, Deng, ve Chang, 2000	Otobüs firmalarının performansı	Bulanık AHP	Önerilen otobüs firmalarının performansının artmasına yardımcı olabilir.	Kentsel ulaşım sistemlerinin performansına ilişkin bir model önermiyor.

Tablo 1-4 arasında sunulan çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde literatürde fark edilen boşluklar şu şekildedir:

- Kentsel ulaşım ile doğrudan ilişkili olan çalışma sayısının oldukça az olduğu söylenebilir.
- Performans analizi kapsamında, karar modeli önerisinin sunulduğu sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca bu çalışmalarda ağırlıklı olarak geleneksel karar verme yöntemlerinin (AHP, TOPSIS, VIKOR ve ANP) kullanıldığı dikkat çekmektedir.
- Yazarların bilgisine göre, raylı ulaşım sistemlerinin performans ölçümünde kullanılabilecek teknik, ekonomik ve çevresel bazlı ana ve alt kriter setinin tanımlandığı bir çalışmaya şu ana kadar henüz rastlanılmamıştır.

## Yöntem

Bu bölümde önerilen hibrit karar verme modeli ve modelin temel algoritması tanıtılmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, önerilen model 5 aşamadan oluşmakta, modelin ikinci, üçüncü ve dördüncü aşamaları matematiksel uygulama ve hesaplamaları içermektedir.



Şekil 1. Önerilen karar verme modeli ve temel algoritması  
(Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

Önerilen karar verme modelinde kriter ağırlıklarını belirlemek ve alternatiflerin performans skorlarını hesaplamak için takip edilen uygulama adımları aşağıda gösterilmektedir:

**Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması:** Kriter ağırlıklarının belirlenmesi için çalışmada literatüre Rezaei (2015) tarafından tanıtılan ve subjektif bir

ağırlıklandırma yöntemi olan Best and Worst tekniği (BWM) kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulama adımları aşağıda gösterilmektedir (Rezaei, 2015).

**Adım 1. Kriter setinin tanımlanması:** Bu aşamada karar vericiler ile birlikte değerlendirme sürecinde kullanılacak kriter seti tanımlanmaktadır. Kriter seti  $n$  sayıda seçim kriterinden oluşmaktadır.

**Adım 2: En iyi ve en kötü kriterlerin belirlenmesi:** Uzmanlar kurulunda yer alan her bir karar verici en iyi ve en kötü kriter tercihlerini belirlemektedir.

**Adım 3: En iyi ve en kötü kriterlerin diğerleri ile karşılaştırılması:** Karar vericiler belirledikleri en iyi kriter ile diğerlerini, ardından diğer kriterler ile en kötü kriteri ikili olarak karşılaştırmaktadırlar. Bunun için 1-9 skalasından (Demir ve Bircan, 2020) yararlanmaktadırlar.

**Adım 4. En iyi-Diğer (EİD) ve En kötü-Diğer (EKD) vektörlerinin oluşturulması:** Karşılaştırma sonrasında EİD ( $\Omega_B$ ) ve EKD ( $\Omega_W$ ) vektörleri aşağıda eşitlik 1 ve 2 'de gösterildiği üzere oluşturulmaktadır.

$$\Omega_B = (\omega_{B1}, \omega_{B2}, \dots, \omega_{Bn}) \quad (1)$$

$$\Omega_W = (\omega_{1W}, \omega_{2W}, \dots, \omega_{nW}) \quad (2)$$

Eşitlikte yer alan  $\omega_{Bj}$  ve  $\omega_{jW}$  sembolleri sırasıyla EİD ve EKD vektör elemanlarını ifade etmekte olup uzmanlar tarafından 1-9 arası skalası kullanılarak tanımlanmaktadır (Demir ve Bircan, 2020) .

**Adım 5. Kriter ağırlıklarının hesaplanması:** Kriter ağırlıklarının belirlenebilmesi için aşağıda eşitlik 3'de verilen model oluşturulmaktadır (Bilgiç, Torgul, ve Paksoy, 2021).

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{\omega_B}{\omega_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{\omega_j}{\omega_w} - a_{jW} \right| \right\}$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1; \quad \omega_j \geq 0 \quad \forall j \quad (3)$$

Eşitlik 3'de verilen modelin eşitlik 4'de gösterilen forma dönüştürülerek çözümlenmesi sonucunda değerlendirme kriterleri için optimal ağırlıklar ve  $\xi$  değeri elde edilmektedir (Çakır ve Can, 2019).

min  $\xi$

s.t.

$$\left| \frac{\omega_B}{\omega_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j; \quad \left| \frac{\omega_j}{\omega_w} - a_{jw} \right| \leq \xi, \forall j;$$

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1; \quad \omega_j \geq 0 \quad \forall j$$

(4)

Tekniğin, son uygulama aşamasında ise  $\xi$  değerinin Tutarlılık indeksine oranlamasıyla (CR=  $\xi$  /Tutarlılık indeksi) tutarlılık oranı (CR) hesaplanmaktadır. Eğer  $CR \leq 0,10$  ise sonuçlar tutarlı olarak kabul edilmektedir (Demir ve Bircan, 2020).

**Alternatiflerin performanslarının belirlenmesi:** Önerilen modelin bir sonraki uygulama aşamasında alternatiflerin sıralanması için Yazdani, Zarate, Kazimieras Zavadskas, ve Turskis, (2019) tarafından literatüre tanıtılan CoCoSo tekniği tercih edilmiştir. Yöntemin temel algoritması ve uygulama adımları aşağıda verilmektedir (Çiftçi ve Yıldırım, 2020; Deveci, Pamucar, ve Gokasar 2021; Ecer ve Pamucar, 2020; Ozdağoğlu, Ulutaş, ve Keleş,2020; Topal, 2021; Ulutaş, Karakuş, ve Topal,2020; Yazdani, vd.,2019).

**Adım 6:** Karar matrisinin oluşturulması: Bu aşamada  $n \times m$  boyutlu bir karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi eşitlik 5 de gösterilmektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

(5)

**Adım 7:** Karar matrisinin normalize edilmesi: Uzlaşık normalizasyon yaklaşımı uygulanarak kriterlerin yönlerine göre karar matrisinin elemanları normalize edilmektedir. Bunun için eşitlik 6 kullanılmaktadır (Çiftçi ve Yıldırım, 2020).

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} & \text{if } j \in B \\ \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} & \text{if } j \in C \end{cases}$$

(6)

Burada, B fayda kriterlerini gösterirken, C ise maliyet yönlü kriterleri ifade etmektedir.

**Adım 8:**  $\xi_i$  ve  $\Theta_i$  değerlerinin hesaplanması: Bu adımda eşitlik 7 kullanılarak, toplam ağırlıklı karşılaştırılabilirlik ( $\Theta_i$ ) ve eşitlik 8 kullanılarak toplam güç ağırlıklı karşılaştırılabilirlik ( $\xi_i$ ) dizileri oluşturulmaktadır.

$$\Theta_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij} w_j) \quad (7)$$

$$\xi_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (8)$$

**Adım 9:** Alternatiflerin göreceli önem değerlerinin hesaplanması: Alternatiflerin göreceli önem değerlerinin belirlenebilmesi için sırasıyla eşitlik 9, 10 ve 11 kullanılarak, ağırlıklı toplam metodunun (weighted sum method) toplamının aritmetik ortalaması, en iyi karar alternatifine kıyasla ağırlıklı çarpım ve ağırlıklı toplam skorlarının toplamı, nihai olarak da ağırlıklı çarpım metodu ile ağırlıklı toplam metodunun dengelenmiş skor değeri hesaplanmaktadır.

$$M_{ia} = \frac{\Theta_i + \xi_i}{\sum_{i=1}^m (\Theta_i + \xi_i)} \quad (9)$$

$$M_{ib} = \frac{\Theta_i}{\min \Theta_i} + \frac{\xi_i}{\min \xi_i} \quad (10)$$

$$M_{ic} = \frac{\lambda(\Theta) + (1-\lambda)(\xi_i)}{\lambda \max \Theta_i + (1-\lambda)(\max \xi_i)}; 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (11)$$

Eşitlik 11 de yer alan  $\lambda$  parametresi 0 ila 1 arasında değer almaktadır. Uygulamada genel olarak her duruma eşit şans verebilmek için 0,5 olarak alınmaktadır (Çiftçi ve Yıldırım, 2020).

**Adım 10:** Alternatiflerin performanslarının belirlenmesi: Bir önceki adımda elde edilen değerler dikkate alınarak her bir alternatif için göreceli önem skoru eşitlik 12 yardımıyla belirlenmektedir.

$$M_i = (M_{ia} \times M_{ib} \times M_{ic})^{\frac{1}{3}} + (M_{ia} + M_{ib} + M_{ic}) \frac{1}{3} \quad (12)$$

**Adım 11: Alternatiflerin Sıralandırılması:** Eşitlik 12 kullanılarak elde edilen göreceli önem skorları dikkate alınarak alternatifler en yüksek değere sahip alternatiften başlanarak sıralanmaktadır.

### **Önerilen hibrit modelin uygulanması**

Önerilen hibrit model kentsel raylı sistemlerin performanslarının değerlendirilmesi için uygulanmıştır. İlk aşamadan başlanarak beş aşama takip edilerek model sonuçlandırılmış ve elde edilen sonuçların geçerli olup olmadığı test edilmiştir.

**Aşama 1. Hazırlık Aşaması:** Bu aşamada öncelikli olarak araştırmacılar temel problemi belirlemek üzere uzmanlarla ve sahadaki uygulayıcılarla ön görüşmeler yapmışlardır. Ardından kentsel ulaşım ve raylı sistemler ile ilgili çeşitli notlar alarak bu görüşme tutanakları doğrultusunda temel problem belirlenmiştir. Buna göre; kentsel ulaşım alanında karar vericiler genellikle uygulama alanında kendi performanslarını değerlendirmek üzere aylık ya da yıllık raporlar yayınlamakla yetinmekte ancak bu raporlar istatistiksel veri sağlama dışında kentlerin en önemli ulaşım sistemleri olan raylı ulaşım sistemlerinin performansı ve etkinliği konusunda çok sınırlı bilgi vermektedir. Aynı zamanda bu raporlar kentsel ulaşım sistemlerinin performansını geliştirebilmek için son derece sınırlı yönetimsel çıkarımlar sağlamaktadır. Diğer bir boşluk ise uygulamada karar vericiler çoğunlukla kendi kişisel yargı ve tecrübelerini dikkate almakta, kentsel raylı sistemlerin performanslarını analiz etmek için yeterince sağlam ve güçlü matematiksel bir modelin bulunmamasıdır. Daha önceki çalışmalarda önerilen modellerin genel kabul gördüğüne ilişkin kentsel ulaşım endüstrisinde yeterli kanıtlar mevcut değildir. Ek olarak, uygulayıcılar ve literatürdeki çalışmalar kentsel ulaşım sistemlerinin performanslarını analiz etmek üzere üzerinde uzlaşmış bir kriter seti mevcut değildir. Bu durum gerçekleştirilen performans analizlerinin güvenilirliği konusunda da şüphe yaratmaktadır. Bu boşlukları dikkate alarak söz konusu çalışma söz konusu boşlukları gidermek amacıyla kentsel raylı ulaşım sistemlerinin performanslarının karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi için sağlam, güçlü ve uygulanabilir bir modelin önerilmesi, ek olarak karar vericilere gerçek hayat problemlerine uygun kriter setinin sunulması bu çalışmanın temel problemi olarak belirlenmiştir. Bu probleme ilişkin araştırma soruları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır: i) kentsel raylı ulaşım sistemlerinin performanslarını analiz etmek için uygulamada kullanılan bir karar modeli mevcut mu? ii) kentsel ulaşım ile ilgili karar vericiler ve uygulayıcılar raylı sistemlerin performansını değerlendiriyor mu? Değerlendirme nasıl yapıyor ve elde edilen

sonuçlar karar alma süreçlerinde ne ölçüde dikkate alınıyor? iii) karşılaştırmalı bir analiz için kentsel ulaşım sistemleri benchmarking olarak değerlendirilebilir mi? iv) kentsel raylı sistemlerin performansını ölçmek için belirlenmiş bir kriter seti var mı? Karar vericiler hangi kriterin ne kadar önemli olduğuna nasıl karar veriyor?

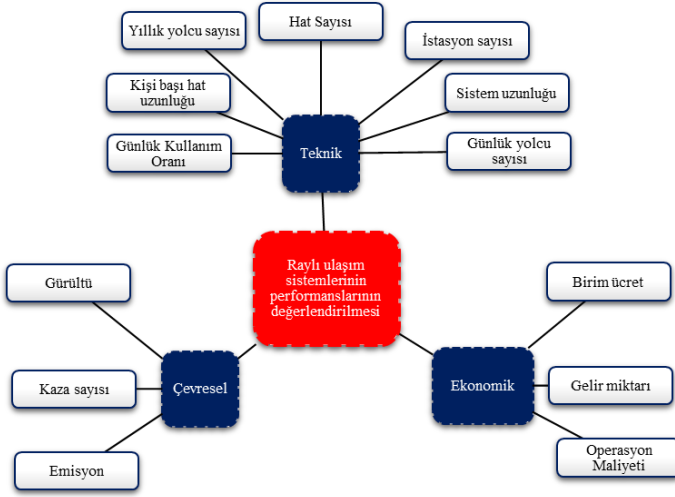
Araştırma sorularının belirlenmesinden sonra bir sonraki sürece geçilmiştir. Bu süreçte, daha gerçekçi ve makul sonuçlar elde etmek amacıyla son derece deneyimli ve kentsel ulaşım alanında derin bilgi sahibi beş profesyonelden oluşan bir uzmanlar kurulu oluşturulmuştur. Tablo 5 uzmanlar kurulu üyelerinin detaylarını göstermektedir. Uzmanlardan bir tanesi makine mühendisliği uçak makineleri alanında doktora sahibiyken, sonraki iki tanesi makine ve elektrik mühendisliği alanında yüksek lisans, son iki uzman ise makine mühendisliği alanında lisans ve raylı sistem mühendisliği alanında yüksek lisans mezunudur. Tecrübe mesleki anlamda yıl olarak deneyimleri göstermektedir.

**Tablo 5.** Karar Vericiler ve Detayları

No	Mezuniyet	Derece	Görev	Tecrübe	Kurum
KV-1	Makine Müh.	Doktora	Eski Gn. Md.	35	I.E.T.T
KV-2	Makine Müh.	Y. Lisans	Gn. Md.	32	TUVASAŞ
KV-3	Elektrik Müh.	Y. Lisans	Ar-Ge Müdürü	27	TULOMSAŞ
KV-4	Raylı Sistem Müh.	Y. Lisans	Operasyon Yön.	24	TCDD
KV-5	Raylı Sistem Müh.	Y. Lisans	Sistem Tasarım Yön.	21	TCDD

Uzmanlar ile raylı ulaşım sistemlerinin performanslarını değerlendirmek üzere kullanılacak bir kriter setinin tanımlanması için yapılan görüşmelerde daha önce Görçün ve Küçükönder (2021) tarafından performans değerlendirmesi için dikkate alınan dokuz farklı ölçüt yeniden incelenmiştir. Uzmanların ortak görüşü sonucunda yazarların sunmuş olduğu kriter setine (Görçün ve Küçükönder, 2021) emisyon, kaza sayısı, gürültü ve operasyon maliyeti olmak üzere bazı çevresel ve ekonomik bazlı kriterlerinde eklenerek genişletilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Buna göre belirlenen ana ve alt kriterlerin şematik gösterimi Şekil 2' de verilmiştir.





Şekil 2. Raylı ulaşım sistemlerinin performansına etki eden ana ve alt kriterler  
(Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

Şekil 2’de sunulan bu kriterlerin uygulamada kullanılan kod açılımları ile optimum yönlerine ilişkin bilgiler Tablo 6’da sunulmuştur.

Tablo 6. Ana ve alt kriterlerin kod açılımları ve optimum yönleri

Kod	Ana kriterler	Kod	Alt Kriterler	Optimum yön
C1	Teknik	C11	Günlük Kullanım Oranı	Maks.
		C12	Kişi başı hat uzunluğu	Maks.
		C13	Hat Sayısı	Maks.
		C14	Yıllık Yolcu Sayısı	Maks.
		C15	İstasyon Sayısı	Maks.
		C16	Sistem uzunluğu	Maks.
C2	Çevresel	C17	Günlük Yolcu sayısı	Maks.
		C21	Emisyon	Min
		C22	Kaza Sayısı	Min
C3	Ekonomik	C23	Gürültü	Min
		C31	Birim ücret	Min
		C32	Gelir miktarı	Maks.
		C33	Operasyon Maliyeti	Min

Değerlendirme kriterlerinin tanımlanmasının ardından performans analizi için alternatif kentler belirlenmiştir. Homojen bir analiz için metro (subway) hatları bulunan kentler seçilmiş ve bu kapsamda Avrupa’da bulunan 30 kent analiz için karar alternatifi olarak belirlenmiştir. Tablo 7 çalışmada belirlenen karar alternatiflerini göstermektedir.

**Tablo 7.** Raylı ulaşım sistemlerine sahip Avrupa kentleri

Kod	Alternatif	Kod	Alternatif	Kod	Alternatif
A1	Barselona	A11	Harkov	A21	Nijni Novgorod
A2	St.Petersburg	A12	Sofya	A22	Sevilla
A3	İstanbul	A13	Minsk	A23	Kazan
A4	Rotterdam	A14	Helsinki	A24	Lozan
A5	Bükreş	A15	Budapeşte	A25	Brescia
A6	Kiev	A16	Amsterdam	A26	Malaga
A7	Prag	A17	Valensiya	A27	Samara
A8	Atina	A18	Varşova	A28	Palma de Mallorca
A9	Bilbao	A19	Oporto	A29	Dinyeper
A10	Lizbon	A20	Kopenhag	A30	Volgograd

Hazırlık aşamasının son adımında belirlenen kriterler çerçevesinde kentlerin raylı sistemlerine ilişkin datalar The International Association of Public Transport (UITP) (2021), Worldbank (2021), OECD (2021), UNECE (2021) gibi uluslararası kuruluşların veri tabanlarından toplanırken, bu süreçte uzmanlar kurulu üyeleri kriterler için BWM yöntemi çerçevesinde değerlendirmeler yapmışlardır. Veriler ve uzman değerlendirmeleri elde edildikten sonra önerilen modelin uygulama adımlarına geçilmiştir.

**Aşama 2. Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi:** Bunun için BWM yönteminin temel algoritması izlenmiştir. Beş uzman ilk olarak ana kriterler için en iyi ve en kötü tercihlerini belirlemişlerdir. Ardından en iyi kriterden diğerlerine doğru ikili karşılaştırma temelinde 1 - 9 arasında bir derecelendirme yapmışlardır. En kötü kriter tercihleri için de bu karşılaştırmayı diğer kriterlerden en kötü kritere doğru yapmışlardır. Sonuç olarak uzmanların ana ve alt kriterler için yapmış oldukları değerlendirmeler Tablo 8 de gösterilmektedir.

**Tablo 8.** Uzman değerlendirmeleri ve vektörler

Ana Kriterler										
En İyi kriter: C3					En Kötü kriter: C1				En İyi kriter: C2	En Kötü kriter: C1
Kod	KV1	KV2	KV3	KV5	KV1	KV2	KV3	KV5	KV4	KV4
C1	6	8	5	8	1	1	1	1	5	1
C2	3	3	3	3	2	3	3	4	1	6
C3	1	1	1	1	5	7	6	8	3	3

Alt Kriterler										
Teknik	En İyi kriter: C14					En Kötü kriter: C12				
Kod	KV1	KV2	KV3	KV4	KV5	KV1	KV2	KV3	KV4	KV5
C11	2	3	3	3	4	8	7	8	8	6
C12	9	9	9	9	9	1	1	1	1	1
C13	6	6	6	7	7	3	4	4	3	3
C14	1	1	1	1	1	9	9	9	9	9
C15	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4

<b>C16</b>	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
<b>C17</b>	2	2	2	3	4	8	8	9	8	6
<b>Çevresel</b>	<b>En İyi kriter: C22</b>					<b>En Kötü kriter: C23</b>				
<b>Kod</b>	<b>KV1</b>	<b>KV2</b>	<b>KV3</b>	<b>KV4</b>	<b>KV5</b>	<b>KV1</b>	<b>KV2</b>	<b>KV3</b>	<b>KV4</b>	<b>KV5</b>
<b>C21</b>	3	4	4	3	2	3	2	2	2	2
<b>C22</b>	1	1	1	1	1	8	6	8	8	8
<b>C23</b>	8	7	9	6	6	1	1	1	1	1
<b>Ekonomik</b>	<b>En İyi kriter: C32</b>					<b>En Kötü kriter: C33</b>				
<b>Kod</b>	<b>KV1</b>	<b>KV2</b>	<b>KV3</b>	<b>KV4</b>	<b>KV5</b>	<b>KV1</b>	<b>KV2</b>	<b>KV3</b>	<b>KV4</b>	<b>KV5</b>
<b>C31</b>	2	3	2	3	4	2	3	3	3	3
<b>C32</b>	1	1	1	1	1	7	6	6	6	8
<b>C33</b>	6	5	8	8	7	1	1	1	1	1

Tablo 8 'de verilen değerler dikkate alınarak ana ve alt kriterlerin her biri için uygulamada ilk olarak EİD ve EKD vektörleri oluşturulmuştur. Ardından bu vektörlere dayalı olarak eşitlik 4'de gösterilen model kurulmuştur. Örneğin Tablo 8'de gösterilen ilk karar vericinin (uzman) ana kriterler için yapmış olduğu değerlendirmeler çerçevesinde oluşturulan doğrusal programlama modeli aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

s.t.

$$\begin{cases} \left| \frac{\omega_3}{\omega_1} - 6 \right| \leq \xi; & \left| \frac{\omega_3}{\omega_2} - 3 \right| \leq \xi; \\ \left| \frac{\omega_2}{\omega_1} - 2 \right| \leq \xi; & \left| \frac{\omega_3}{\omega_1} - 5 \right| \leq \xi \\ \omega_j \geq 0, \quad \forall j = 1, 2, 3; & \sum_{j=1}^3 \omega_j = 1 \end{cases}$$

Beş karar vericinin yapmış olduğu değerlendirmeler içinde bu işlemler aynı şekilde tekrarlanmış ve oluşturulan modeller MS Excel çözücü eklentisi aracılığıyla çözümlenerek ana kriterlere ilişkin nihai ağırlıklar Tablo 9'daki gibi elde edilmiştir.

**Tablo 9.** Ana Kriter ağırlıkları

<b>Karar vericiler</b>	<b>Teknik (C1)</b>	<b>Çevresel (C2)</b>	<b>Ekonomik (C3)</b>	<b>ξ</b>
KV1	0,1176	0,2353	0,6471	0,0588
KV2	0,0896	0,2388	0,6716	0,0448
KV3	0,1111	0,2444	0,6444	0,0889
KV4	0,1111	0,6444	0,2444	0,0889
KV5	0,0769	0,2462	0,6769	0,0615
<b>Ana kriterlerin nihai ağırlıkları</b>	<b>0,1013</b>	<b>0,3218</b>	<b>0,5769</b>	<b>0,0686</b>

Tablo 9'da verilen sonuçlara bakıldığında zaman ana kriterler arasında C3 ekonomik kriterinin ( $W_3=0.5769$ ) diğerlerine göre en önemli kriter olduğu

bunu ikinci sırada çevresel ( $W_2=0.3218$ ), üçüncü sırada teknik ( $W_1=0.1013$ ) kriterlerinin izlediği görülmektedir. Karar vericilerin değerlendirmelerine ilişkin olarak hesaplanan genel tutarlılık oranının ( $CR=0.0686/1.00=0.0686$ ) 0.10 'nun altında ( $CR=0.0686 < 0.10$ ) olmasından dolayı tutarlı olduğu (Demir ve Bircan, 2020) söylenebilir. Alt kriterler için oluşturulan modellerinde aynı şekilde çözülmesi sonucunda elde edilen yerel ağırlıklar bağlı olduğu ana kriter ağırlığı ile çarpılmış ve nihai ağırlık değerleri belirlenmiştir. Hesaplamalara ilişkin tüm sonuçlar Tablo 10'da gösterilmiştir.

**Tablo 10.** Ana ve alt kriterlerin nihai ağırlıkları

Kod	Ana kriterler ve ağırlık değerleri	Kod	Alt Kriterler	Yerel ağırlıklar	Genel(nihai) Ağırlıklar	Sıralama
C1	Teknik (0,1013)	C11	Günlük Kullanım Oranı	0,1529	0,0155	9
		C12	Kişi başı hat uzunluğu	0,0316	0,0032	13
		C13	Hat Sayısı	0,0695	0,0070	12
		C14	Yıllık Yolcu Sayısı	0,3645	0,0369	6
		C15	İstasyon Sayısı	0,0889	0,0090	11
		C16	Sistem uzunluğu	0,1112	0,0113	10
		C17	Günlük Yolcu sayısı	0,1815	0,0184	8
C2	Çevresel (0,3218)	C21	Emisyon	0,2273	0,0732	4
		C22	Kaza Sayısı	0,6804	0,2190	2
		C23	Gürültü	0,0922	0,0297	7
C3	Ekonomik (0,5769)	C31	Birim ücret	0,2599	0,1500	3
		C32	Gelir miktarı	0,6442	0,3717	1
		C33	Operasyon Maliyeti	0,0958	0,0553	5

BWM tekniğine göre elde edilen kriter ağırlıklarının, alternatiflerin sıralanmasında kullanılan CoCoSo tekniğinin uygulama aşamasına aktarılmasıyla önerilen modelin bir sonraki aşamasına geçilmiştir.

**Aşama 3. Alternatiflerin Performans Skorlarının Hesaplanması:** Bu aşamada 30 Avrupa kentinin raylı ulaşım performansı analiz edilmiştir. Bunun için CoCoSo yönteminin uygulama adımları takip edilmiş ve ilk adımda Ek-1 de gösterilen karar matrisi oluşturulmuştur. Ardından eşitlik 6 yardımıyla karar matrisi Tablo 11'de gösterildiği gibi normalize edilmiştir. Eşitlik 7 ve 8 kullanılarak sırasıyla her bir alternatife ait  $\Theta_i$  ve  $\xi_i$  değerleri hesaplanmış ve bu değerlere dayalı olarak sırasıyla eşitlik 9, 10, 11 ve 12 kullanılarak, alternatiflerin göreceli performans değerleri hesaplanmıştır. Tüm sonuçlar Tablo 12'de sunulmuştur.

**Tablo 11.** Normalize matris

	C11	C12	C31	C13	C14	C15	C16	C17	C32	C21	C22	C23	C33
A1	0,159	0,302	0,909	1,000	0,490	1,000	1,000	0,492	0,244	0,613	0,666	0,000	0,977
A2	0,369	0,255	0,713	0,400	1,000	0,355	0,805	1,000	1,000	0,538	0,993	0,939	0,465
A3	0,002	0,058	0,575	0,500	0,090	0,442	0,747	0,090	0,129	0,837	0,550	0,585	0,326
A4	0,177	1,000	0,858	0,400	0,101	0,326	0,547	0,101	0,064	0,755	0,625	0,025	0,837

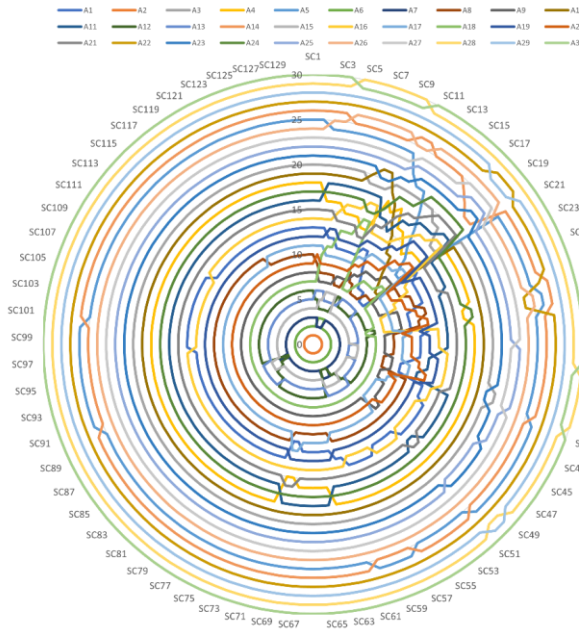
A5	0,180	0,418	0,858	0,300	0,209	0,273	0,487	0,209	0,132	0,889	0,000	0,879	1,000
A6	0,409	0,255	0,783	0,200	0,657	0,267	0,459	0,657	0,539	0,560	0,892	0,515	0,605
A7	1,000	0,682	0,949	0,200	0,671	0,320	0,440	0,671	0,265	0,439	0,994	0,761	0,419
A8	0,219	0,169	1,000	0,200	0,429	0,343	0,403	0,430	0,112	0,673	0,616	0,934	0,930
A9	0,049	0,130	0,850	0,200	0,105	0,244	0,333	0,105	0,069	0,835	0,937	0,877	0,953
A10	0,128	0,131	0,713	0,300	0,225	0,291	0,283	0,225	0,228	0,726	0,249	0,956	0,581
A11	0,179	0,103	0,815	0,200	0,311	0,140	0,239	0,311	0,231	0,000	0,999	0,985	0,302
A12	0,039	0,350	0,791	0,100	0,027	0,169	0,232	0,363	0,291	0,853	0,988	0,974	0,837
A13	0,331	0,198	0,748	0,100	0,351	0,134	0,229	0,351	0,322	0,764	0,996	0,994	0,419
A14	0,107	0,343	0,906	0,000	0,069	0,110	0,213	0,069	0,034	0,975	0,908	0,982	0,000
A15	0,383	0,183	0,760	0,200	0,378	0,209	0,198	0,378	0,334	0,875	0,990	0,484	0,442
A16	0,167	0,348	0,280	0,300	0,099	0,157	0,195	0,099	0,223	0,711	0,994	0,944	0,395
A17	0,179	0,453	0,732	0,200	0,109	0,186	0,189	0,109	0,107	0,840	0,991	0,961	0,465
A18	0,166	0,145	0,283	0,100	0,169	0,128	0,165	0,170	0,369	0,823	0,982	0,929	0,581
A19	0,049	0,088	0,846	0,100	0,056	0,058	0,112	0,056	0,038	0,872	1,000	0,999	0,535
A20	0,094	0,180	0,921	0,100	0,059	0,093	0,107	0,059	0,026	1,000	0,999	0,923	0,721
A21	0,032	0,154	0,780	0,100	0,024	0,052	0,091	0,024	0,022	0,959	0,994	0,992	0,302
A22	0,049	0,142	0,000	0,000	0,040	0,087	0,084	0,040	0,136	0,634	0,991	0,996	0,140
A23	0,037	0,108	0,823	0,000	0,024	0,023	0,068	0,024	0,019	0,648	0,999	0,989	0,419
A24	0,049	0,082	0,819	0,100	0,030	0,134	0,052	0,030	0,023	0,745	0,994	0,373	0,442
A25	0,032	0,075	0,807	0,000	0,016	0,064	0,048	0,016	0,014	0,898	0,999	0,869	0,209
A26	0,032	0,061	0,772	0,100	0,015	0,064	0,039	0,015	0,016	0,579	0,985	0,980	0,000
A27	0,015	0,054	0,858	0,000	0,010	0,023	0,036	0,010	0,007	0,518	0,996	1,000	0,535
A28	0,000	0,015	0,874	0,000	0,000	0,017	0,011	0,000	0,000	0,713	1,000	0,998	0,070
A29	0,000	0,000	0,874	0,000	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,878	1,000	0,992	0,860
A30	0,000	0,009	0,783	0,000	0,005	0,000	0,000	0,005	0,006	0,425	0,997	1,000	0,419

Tablo 12. CoCoSo tekniği ile alternatiflerin göreceli önem skorları ve sıralanmaları

Alternatifler	$\Theta_i$	$\xi_{s_i}$	$M_{ia}$	$M_{ib}$	$M_{ic}$	$M_i$	Sıra
A1	0,530	11,385	0,034	3,010	0,870	1,750	13
A2	0,866	12,823	0,039	4,161	1,000	2,277	1
A3	0,372	11,928	0,035	2,632	0,899	1,623	20
A4	0,415	11,933	0,035	2,755	0,902	1,673	18
A5	0,350	11,294	0,033	2,485	0,851	1,534	25
A6	0,655	12,573	0,037	3,526	0,966	2,013	2
A7	0,600	12,434	0,037	3,351	0,952	1,936	3
A8	0,492	12,202	0,036	3,009	0,927	1,788	11
A9	0,513	12,103	0,036	3,056	0,922	1,802	8
A10	0,383	12,060	0,035	2,679	0,909	1,648	19
A11	0,498	11,343	0,033	2,916	0,865	1,710	16
A12	0,595	12,329	0,036	3,322	0,944	1,920	6
A13	0,588	12,416	0,037	3,313	0,950	1,920	5
A14	0,458	10,031	0,030	2,627	0,766	1,532	26
A15	0,591	12,431	0,037	3,323	0,951	1,925	4
A16	0,459	12,123	0,036	2,906	0,919	1,743	14
A17	0,498	12,141	0,036	3,019	0,923	1,789	10
A18	0,531	12,285	0,036	3,133	0,936	1,842	7
A19	0,489	11,955	0,035	2,971	0,909	1,761	12
A20	0,515	11,972	0,035	3,047	0,912	1,792	9
A21	0,464	11,817	0,035	2,879	0,897	1,718	15
A22	0,356	10,068	0,029	2,342	0,761	1,419	27
A23	0,452	10,805	0,032	2,713	0,822	1,603	21
A24	0,444	11,816	0,035	2,823	0,896	1,695	17
A25	0,451	10,742	0,032	2,700	0,818	1,595	22
A26	0,412	10,777	0,032	2,594	0,817	1,554	24
A27	0,448	10,670	0,031	2,683	0,812	1,584	23

<b>A28</b>	0,436	7,720	0,023	2,261	0,596	1,274	29
<b>A29</b>	0,492	7,606	0,023	2,405	0,592	1,326	28
<b>A30</b>	0,422	7,716	0,023	2,222	0,595	1,258	30

**Aşama 4. Doğrulama Testi:** Bu aşamada önerilen modelin geçerliliğini test etmek üzere üç aşamadan oluşan bir duyarlılık analizi yapılmış, elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. İlk olarak, kriter ağırlıkları değiştirilmiş ve her bir değişikliğin sıralama sonuçlarına etkisi gözlemlenmiştir. Bunun için en yüksek önem derecesine sahip kriterden başlanarak kriter ağırlıkları her bir senaryoda %10 azaltılmış, kriterin ağırlığı sıfır olana kadar azaltım tekrarlanmıştır. Aynı zamanda oluşan fark diğer kriterlere eşit olarak dağıtılarak kriter ağırlığının 1 e eşit olma koşulu sağlanmıştır. Buna göre Şekil 3'de ağırlık değişimlerinin genel sıralama sonuçlarına yansımaları şematik olarak verilmektedir.

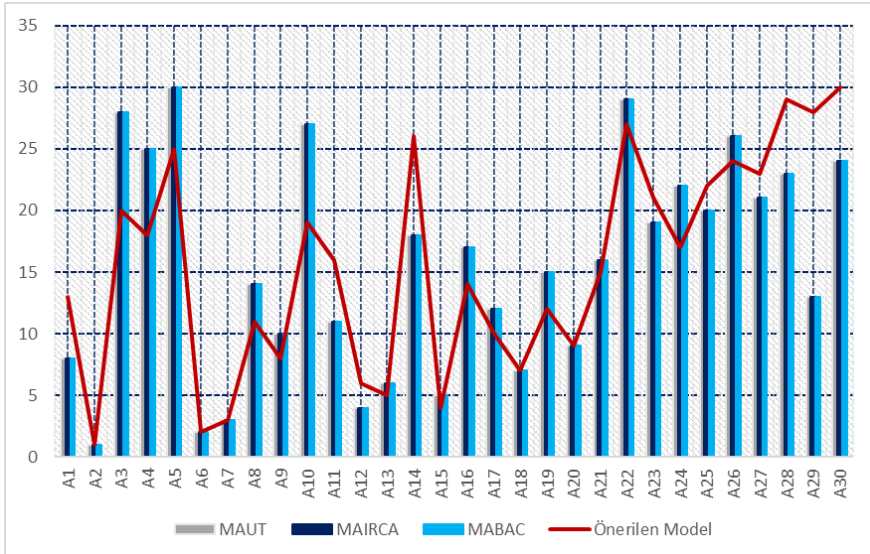


**Şekil 3.** Değişen kriter ağırlıklarına göre yeni sıralama sonuçları  
(Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

Bu aşamada elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, kriter ağırlıkları değiştirildiği zaman genel sonuçları değiştirecek büyüklükte bir farklılık kaydedilmemiştir. Ortalama olarak alternatifler %78,25 oranında aynı sırada kalmıştır. Buna ek olarak en iyi alternatif olan A2 nin

sıralama sonucu bütün senaryolar için aynı kalmış, en iyi ikinci olan A6 alternatifi ise %94,42 oranında aynı sıralama kalmıştır. Bazı alternatiflerin sıralama sonuçlarında sapma kaydedilse bile bunların genel sonucu değiştirecek düzeyde olmadığı gözlemlenmiştir.

Duyarlılık analizinin ikinci aşamasında önerilen modelin sıralama sonuçları çeşitli çok kriterli karar verme (ÇKVV) yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4'te uygulanan MAUT (Alp, Öztel, ve Köse, 2015), MAIRCA (Ecer, 2020) ve MABAC (Pamuçar ve Ćirović, 2015) yaklaşımlarının uygulanması sonucunda elde edilen sıralama sonuçları arasındaki benzerlikler ve farklılıklar gösterilmektedir.

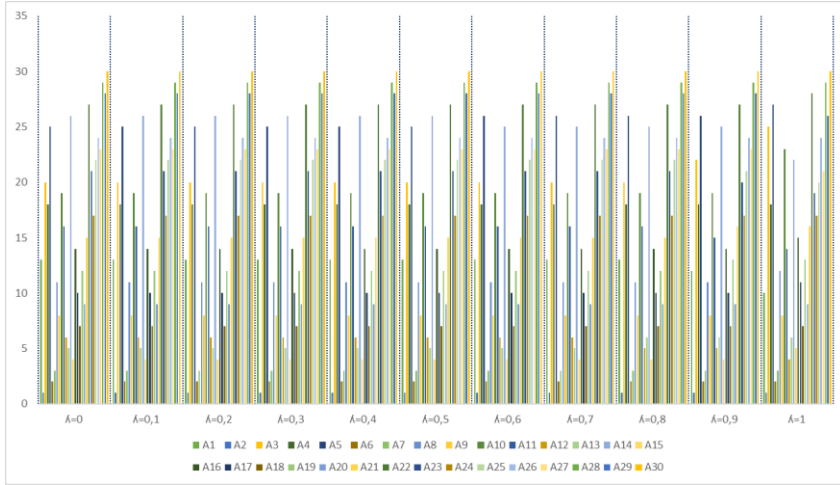


Şekil 4. Sıralama sonuçlarının karşılaştırılması (Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

Şekil 4 incelendiğinde, ilk üç sırada yer alan alternatiflerin (A2, A6,A7) sıralama sonuçlarında herhangi bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Buna ilaveten, A18 ve A19 alternatiflerinin de sıralamasını koruduğu geri kalan alternatiflerin sıralamalarında ise bazı farklılıklar olduğu gözlemlenmektedir. Uygulanan bu farklı ÇKVV teknikleri ile önerilen hibrit modelin sıralama sonuçları arasındaki ilişki Spearman korelasyon analizine(Raju ve Kumar, 1999) göre değerlendirilmiş ve  $r=0.844$  olarak yüksek sayılabilecek bir ilişki(Raju ve Kumar, 1999) olduğu tespit edilmiştir.

Üçüncü aşamada CoCoSo yaklaşımının  $\lambda$  parametresinin çalışmada 0,5 olarak alınan değeri, 0 ila 1 arasında 0,1 birimlik artan şekilde değiştirilmiş ve karar alternatiflerinin sıralamaları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Model

parametresindeki bu değişime göre alternatiflerin sıralama sonuçları Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.  $\lambda$  Parametresinin farklı değerlerine göre sıralama sonuçlarındaki değişimler (Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

Şekil 5’e göre model parametresinin  $0 \leq \lambda \leq 0,5$  arasındaki değerleri için alternatiflerin sıralamalarında herhangi bir değişme görülmezken  $0,6 \leq \lambda \leq 1$  arasındaki değerleri için bazı alternatiflerin sıralamalarında ufak farklılıklar olduğu görülmüştür.

Duyarlılık analizinin tüm aşamalarından elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, önerilen hibrit modelin uygulanabilir ve güvenilir bir yaklaşım olduğu söylenebilir. Bu yönüyle BWM ve CoCoSo entegrasyonundan oluşan model karmaşık karar verme ve değerlendirme problemlerinin çözümü için uygulanabileceği gibi, kentsel raylı ulaşım sistemlerinin performanslarını karşılaştırmalı olarak ölçmek için de uygulanabilir.

## Bulgular ve Tartışma

Kentsel ulaşım sistemlerinin ayrılmaz parçası olan ve kentsel ulaşımın sürdürülebilirliğine en yüksek düzeyde katkı sağlayan raylı ulaşım sistemlerinin performansının ölçülmesi ve değerlendirilmesi karar vericiler ve uygulayıcılar için hayati düzeyde önem arz etmektedir. Bunun için karar vericilerin karşılaştırmalı olarak performans analizi yapabilmesi için etkili ve uygulanabilir, buna ek olarak sonuçları



açısından güvenilir bir karar modeline ihtiyaçları vardır. Bu çalışma bu gereksinimleri gözeterek BWM ve CoCoSo yöntemlerinin entegrasyonundan oluşan hibrit bir modelin uygulanmasını önermiştir.

Model uygulaması sonucunda, elde edilen bulgular dikkate alındığında en yüksek performansa sahip kent A2 Saint Petersburg, ikinci en iyi kent ise A6 Kiev olarak belirlenmiştir. İstanbul 30 kent içerisinde 20. sırada yer almıştır. Bununla birlikte, ana kriter ağırlıklarına göre ekonomik kriterlerin, çevre ve teknik kriterlere göre daha öncelikli olduğu ve ilk sırada C32 gelir miktarı kriterinin yer aldığı görülmüştür. Bunu ikinci sırada C22 kaza sayısı kriteri, üçüncü sırada ise C31 birim ücret kriteri izlemiştir. Geri kalan değerlendirme kriterleri önem ağırlıklarına göre C21 Emisyon>C33 Operasyon Maliyeti>C14 Yıllık Yolcu Sayısı>C23 Gürültü>C17 Günlük Yolcu sayısı>C11 Günlük Kullanım Oranı>C16 Sistem uzunluğu>C15 İstasyon Sayısı>C13 Hat Sayısı>C12 Kişi başı hat uzunluğu olarak sıralanmışlardır.

Bu açıdan değerlendirildiğinde İstanbul ilk iki kriter açısından ilk iki alternatifin oldukça gerisinde bulunmaktadır. Buna karşılık, ücretlendirme açısından da birçok rakibine göre düşük performansa sahiptir. Buna paralel olarak taşınan yolcu kapasitesi birçok rakibinin gerisinde kalmasına rağmen, elde edilen gelir düzeyi açısından ilk iki içerisinde yer almaktadır. Bu durum ulaşım hizmetlerinin daha rasyonel bir hizmet bedeli ile arz edilebileceği anlamına gelmektedir.

Bu durum gelecek açısından ümit verici olsa da sürdürülebilirliği artırmak üzere karar vericilerin bazı faktörleri dikkate alarak projeler üretmeleri gerekmektedir. Örnek olarak, İstanbul kentinde raylı ulaşım sistemi kullanım yüzdesi birçok rakibine göre yüksektir. Duyarlılık analizinin ilk aşamasında da hesaplandığı gibi, %20 lik artış, İstanbul'u dokuzunculuğa, %30 üzerinde bir artış ise performans olarak sekizinciliğe taşımaktadır. Bunun dışında birim ücretin azaltılarak, farklı yöntem ve uygulamalarla raylı ulaşım sistemi kullanım yüzdesinin artırılması İstanbul kentinin performansını önemli ölçüde artırabilir.

## Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada kentsel raylı ulaşım sistemlerinin performans ve etkinliklerini karşılaştırmalı olarak analiz etmek üzere metodolojik bir çerçeve olarak önerilmektedir. Bu kapsamda mevcut çalışmada saha çalışması sonucunda uzman görüşü esas alınarak belirlenen bir kriter seti sunulmaktadır. Çalışmada belirlenen teknik, ekonomik ve çevresel ana kriterler çerçevesinde homojen bir analiz sunmak üzere metro sistemlerine sahip 30 kentin raylı ulaşım sis-

temleri karşılaştırılmıştır. Önerilen model kentlerin performanslarını artırmak için bazı çıkarımlar sunmaktadır. Bu yönüyle model raylı ulaşım sistemlerinin optimizasyonun sağlanmasına da katkıda bulunabilir. Bu çalışma kapsamında elde edilen çıkarımlar ve bulgular aşağıda özetlenmektedir.

- Raylı sistemlerin performansı açısından en önemli kriter gelir miktarı olarak belirlenmiştir. Bu kriterin önemli olması kentsel ulaşım otoriteleri kentsel ulaşımı yaygınlaştırmak ve bütün bireylere eşit koşullarla sunabilmesi için bu sistemlerin altyapı ve üstyapı unsurlarına yatırım yapması gerekmektedir. Dolayısıyla gelir düzeyinin yüksek olması bu yatırımları olanaklı hale getirmektedir. Buna paralel olarak ulaşım hizmetinin birim maliyetinin azaltılmasına ilişkin kriterle çelişiyor gibi görünse de kentsel ulaşım operatörleri birim ücretleri düşük seviyede tutarken beraberinde kullanıcı sayısını artırarak geliri artırma yoluna gidebilir.

- Raylı sistemlerin performansı ile kaza sayısı arasında yüksek düzeyde bir bağlantı vardır. Bu durum kentsel ulaşımında risk faktörlerin diğer kriterlere göre son derece önemli olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla kentsel ulaşım operatörleri öncelikli olarak raylı ulaşım sistemlerinin riskleri azaltmak ve daha güvenli ulaşım sistemleri oluşturabilmek için önlemler geliştirmek ve bu sayede kentsel ulaşım sistemlerini daha sürdürülebilir hale getirmek için çözümler üretmelidir.

- Kentsel raylı sistemlerin sürdürülebilirliği ve birim ücret arasında negatif korelasyon bulunmaktadır. Kentsel ulaşım sistemleri ile ilgili karar alıcılar kullanıcılara daha düşük maliyetlerle ulaşım hizmeti sunmaları kentsel ulaşım sistemlerinin performansını büyük ölçüde artırabilmektedir. Bu nedenle karar vericiler daha çevreci ve sürdürülebilir ulaşım türü olan raylı ulaşım sistemlerinin kullanımını yaygınlaştırmak için birtakım teşvikler uygulayabilir ve elde ettikleri gelirlerin bir kısmından bu amaç için feragat edebilirler.

- Raylı ulaşım sistemleri açısından hat sayısı son derece önemli ve kritik bir kriterdir. Kullanıcılara ulaşım alternatifi sunmanın yanı sıra en az aktarma ile varış noktasına ulaşma olanağı sunmaktadır. Aynı zamanda raylı ulaşım sistemlerinin kullanımını teşvik eden bir kriter olarak da değerlendirilebilir.

- Gürültü kentsel alanlarda yaşayan bireyleri önemli ölçüde etkileyen dışsal maliyet türlerinden birisidir. Özellikle bireylerde psikolojik ve fiziksel birçok problemin nedenleri arasında gösterilmektedir. Aynı zamanda gürültü kentsel ulaşım sistemlerinin konfor düzeyini önemli ölçüde etkiler.

çüde etkilemektedir. Bu açıdan karar vericiler ile raylı sistem üretici ve tasarımcıları için gürültü azaltıcı demiryolu araçlarının tasarımı ve üretimi kentsel ulaşım sistemlerinin konfor ve performansını artırmaya yardımcı olabilir.

Bu çıkarımlar kentsel raylı ulaşım sistemlerini modellerken karar vericiler tarafından dikkate alınabilir ve bu perspektifte öncelikler tanımlanabilir. Bunun yanı sıra önerilen model önemli avantajlara sahip olsa da bir takım kısıtlara da sahiptir. Öncelikle kriterler daha geniş bir perspektifte belirlenebilir ve daha fazla sayıda karar verici ile bu kriterlerin geçerliliği gözden geçirebilir. Ayrıca, değerlendirme sürecinde performans analizine etki eden bir takım belirsizliklerle karşılaşılabilir. Bu çerçevede belirsizliklerle başa çıkabilmek için model bulanık küme teorisine dayalı olarak genişletilebilir. Bu kapsamda gelecek çalışmalar da bulanık yöntemlerin yanı sıra, gelecekte ortaya çıkabilecek gereksinimler dikkate alınarak kriterler güncellenerek daha kapsamlı analiz ve incelemeler yapılabilir.

### **Teşekkür**

Kentsel ulaşım endüstrisinde yer alan uzmanlara en içten şekilde teşekkür ediyoruz. Ayrıca, editör ve hakemlere yapıcı ve kıymetli önerileri için teşekkür ediyoruz.



## Extended Abstract

# Comparative Analysis of the Cities Rail Systems' Performance by using The BWM and CoCoSo Techniques

\*

Ömer Faruk Görçün

ORCID: 0000-0003-3850-6755

Hande Küçükönder

ORCID: 0000-0002-0853-8185

Measuring the urban transport systems is critical in improving and developing these systems. However, making performance analysis for urban transport systems is not easy for decision-makers, as there are many complicated situations and conflicting criteria. In addition, there are two severe and significant problems and dilemmas in the current literature. First, there are no sufficiently robust, practical, and powerful decision support system or mathematical model in the literature. Secondly, there are no criteria set identified and commonly accepted. The current paper proposes a novel hybrid model that can be applied as a methodological frame to solve these decision-making problems by considering these requirements. While the proposed approach uses the Best and Worst Method (BWM) to identify the criteria weights, it applies the combined compromise solution (CoCoSo) technique to evaluate and rank the alternatives.

The BWM approach used for determining the criteria weights enables logical results with fewer computations than other weighting techniques. Besides, the CoCoSo technique implemented for calculating the preference ratings of the alternatives is a ranking method that can provide largely reliable and stable results. This technique can provide a flexible decision-making environment for the decision-makers. Having these advantages and efficient algorithms is a determinative factor for preferring the combination of these approaches by the researchers.

From this perspective, the hybrid model proposed in the current paper has been applied to evaluate the performances of the urban rail systems of the 30 cities having metro lines in Europe concerning technical, environmental, and

economic criteria. According to the results, the most influential criterion is C32 "income level", and C22 "the number of accidents" is the second influential criterion. Also, C31 "unit price" has been identified as the third influential criterion. the remainders have been ranked as C21 Emission>C33 Operational costs>C14 The number of the annual riders>C23 Noise>C17 The number of daily riders>C11 Daily usage rate>C16 System length>C15 The number of stations>C13 The number of lines>C12 Line length per person. By considering these criteria, the city having the highest urban transport performance is Saint Petersburg, the second-best city is Kyiv, and the third-best city is Prague. Besides, while A3 Istanbul has been ranked in 20th rank, the worst alternative has been determined as Volgograd city.

In the current study, a comprehensive sensitivity analysis consisting of three stages was performed to test the validity of the model. The overall results of the analysis prove that the proposed model is a maximally stable and consistent approach providing reliable and consistent results.

As a result, practitioners can apply the proposed model and can analyse their cities' performances comparatively. In addition, decision-makers can consider the findings of the current paper as a roadmap in a process carried out to improve the performance of urban transportation systems.

In future works, emerging new criteria depending on the industry's requirements can be included in the scope of the research process. Also, different approaches and models can be integrated into the proposed approach.

### **Kaynakça/References**

- Ahem, A., ve Anandarajah, G. (2007). Railway projects prioritisation for investment: Application of goal programming. *Transport Policy*, 14(1), 70-80.
- Alp, I., Öztel, A., ve Köse, M. (2015). Entropi tabanlı Maut yöntemi ile kurumsal sürdürülebilirlik performansı ölçümü: Bir vaka çalışması. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 11(2), 65-81.
- Ambrasaite, I., Barfod, M. B., ve Salling, K. B. (2011). MCDA and risk analysis in transport infrastructure appraisals: The Rail Baltica case. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 944-953.
- Amoroso, S., Salvo, G., ve Zito, P. (2011, November 23). Sustainable urban public transport. A comparison between European and north African cities. *Managing Sustainability? Proceedings of the 12th Management International Conference*.
- Awasthi, A., Chauhan, S. S., ve Omrani, H. (2011). Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12270-12280.

- Awasthi, A., ve Chauhan, S. S. (2011). Using AHP and Dempster-Shafer theory for evaluating sustainable transport solutions. *Environmental Modelling and Software*, 26(6), 787-796.
- Basbas, S., Pitsiava-Latinopoulou, M., ve Zacharaki, E. (2009). Motorized road transport: Economic and environmental costs- A policy assessment framework. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 4(4), 309-321.
- Beukes, E. A., Vanderschuren, M. J. W. A., ve Zuidgeest, M. H. P. (2011). Context sensitive multimodal road planning: A case study in Cape Town, South Africa. *Journal of Transport Geography*, 19(3), 452-460.
- Beukes, E., Vanderschuren, M., Zuidgeest, M., Brussel, M., ve van Maarseveen, M. (2013). Quantifying the contextual influences on road design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(5), 344-358.
- Bilgiç, S., Torgul, B., ve Paksoy, T. (2021). Sürdürülebilir enerji yönetimi için Sürdürülebilir enerji yönetimi için BWM yöntemi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi. *Verimlilik Dergisi*, 2, 95-110.
- Brey, J. J., Contreras, I., Carazo, A. F., Brey, R., Hernández-Díaz, A. G., ve Castro, A. (2007). Evaluation of automobiles with alternative fuels utilizing multicriteria techniques. *Journal of Power Sources*, 169(1), 213-219.
- Caliskan, N. (2006). A decision support approach for the evaluation of transport investment alternatives. *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1696-1704.
- Celik, E., Bilisik, O. N., Erdogan, M., Gumus, A. T., ve Baraclı, H. (2013). 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*, 58, 28-51.
- Chang, Y. H., Wey, W. M., ve Tseng, H. Y. (2009). Using ANP priorities with goal programming for revitalization strategies in historic transport: A case study of the Alishan Forest Railway. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8682-8690.
- Cyril, A., Mulangi, R. H., ve George, V. (2019). Performance optimization of public transport using integrated AHP-GP methodology. *Urban Rail Transit*, 5(2), 133-144.
- Çakır, E., ve Can, M. (2019). Best-Worst yöntemine dayalı ARAS yöntemi ile dış kaynak kullanım tercihinin belirlenmesi: turizm sektöründe bir uygulama. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 1273-1300.
- Çiftçi, H. N., ve Yıldırım, B. F. (2020). BIST enerji sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin finansal performanslarının Entropi tabanlı Gri İlişkisel Analiz yöntemi kullanılarak değerlendirilmesi: gri sayılara dayalı zaman kesiti örneği. *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 22(3), 384-404.
- da Silva, A. N. R., da Silva Costa, M., ve Macedo, M. H. (2008). Multiple views of sustainable urban mobility: The case of Brazil. *Transport Policy*, 15(6), 350-360
- Demir, G., ve Bircan, H. (2020). Kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden BWM ve FUCOM yöntemlerinin karşılaştırılması ve bir uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 21(2), 170-185.

- Deveci, M., Pamucar, D., ve Gokasar, I. (2021). Fuzzy Power Heronian function based CoCoSo method for the advantage prioritization of autonomous vehicles in real-time traffic management. *Sustainable Cities and Society*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102846>
- Ecer, F. (2020). Çok Kriterli Karar Verme Geçmişten Günümüze Kapsamlı Bir Yaklaşım. Seçkin Yayınları, Ankara.
- Ecer, F., ve Pamucar, D. (2020). Sustainable supplier selection: A novel integrated fuzzy best worst method (F-BWM) and fuzzy CoCoSo with Bonferroni (CoCoSo'B) multi-criteria model. *Journal of Cleaner Production*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121981>
- Ekbatani, K. M., ve Cats, O. (2015). Multi-criteria appraisal of multi-modal urban public transport systems. *Transportation Research Procedia*, 10, 2015; 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015, 14-16 July 2015, Delft, The Netherlands.
- Emberger, G., Pfaffenbichler, P., Jaensirisak, S., ve Timms, P. (2008). "Ideal" decision-making processes for transport planning: A comparison between Europe and South East Asia. *Transport Policy*, 15(6), 341-349.
- Fioravanti, R. D., Amncio, M. A., ve Galves, M. L. (2007). Alternatives to reduce congestion and improve the road system using a multicriteria decision analysis: A case study in the city of Campinas, Brazil. *WIT Transactions on the Built Environment*, 96, 63-73.
- Görçün, Ö. F. (2014). Efficiency analysis of cargo tram for city logistics compared to road freight transportation a case study of Istanbul city. Presented at the 14th International Congress of Business Logistics, Osijek.
- Görçün, Ö. F. (2019). Kentsel lojistikte kullanılan hafif raylı sistem hatlarının entegre Entropi ve EATWOS yöntemleri kullanılarak analizi. *Gümüşhane Sosyal Bilimler Elektronik Dergisi*, 10(1), 254-267.
- Görçün, Ö.F. (2021). Evaluation of the selection of proper metro and tram vehicle for urban transportation by using a novel integrated MCDM approach. *Science Progress*. 104, 1-18.
- Görçün, Ö.F. ve Küçükönder, H. (2021). Kentlerin ulaşım performanslarının karşılaştırmalı analizi için matematiksel bir model önerisi, VI. Kent Araştırmaları Kongresi, Bildiri Özet Kitabı, 352-361, 16-17-18 Aralık 2021, Ankara.
- Hassan, M. N., Hawas, Y. E., ve Ahmed, K. (2013). A multi-dimensional framework for evaluating the transit service performance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 50, 47-61.
- He, J., ve Hung, W. T. (2012). Perception of policy-makers on policy-making criteria: The case of vehicle emissions control. *Science of the Total Environment*, 417-418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.045>
- Hickman, R., Saxena, S., Banister, D., ve Ashiru, O. (2012). Examining transport futures with scenario analysis and MCA. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(3), 560-575.

- Iniestra, J. G., ve Gutiérrez, J. G. (2009). Multicriteria decisions on interdependent infrastructure transportation projects using an evolutionary-based framework. *Applied Soft Computing*, 9(2), 512-526.
- Ivanović, I., Grujičić, D., Macura, D., Jović, J., ve Bojović, N. (2013). One approach for road transport project selection. *Transport Policy*, 25, 22-29.
- Kavran, Z., Štefančič, G., ve Presečki, A. (2007). Multicriteria analysis and public transport management. *WIT Transactions on the Built Environment*, 96, 85-90.
- Khasnabis, S., Alsaidi, E., Liu, L., ve Ellis, R. D. (2002). Comparative study of two techniques of transit performance assessment: AHP and GAT. *Journal of Transportation Engineering*, 128(6).
- Kuo, M. S., ve Liang, G. S. (2012). A soft computing method of performance evaluation with MCDM based on interval-valued fuzzy numbers. *Applied Soft Computing*, 12(1), 476-485.
- Labbouz, S., Roy, B., Diab, Y., ve Christen, M. (2008). Implementing a public transport line: multi-criteria decision-making methods that facilitate concertation. *Operational Research*, 8(1), 5-31.
- Macharis, C., de Witte, A., ve Turcksin, L. (2010). The Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA) application in the Flemish long-term decision making process on mobility and logistics. *Transport Policy*, 17(5), 303-311.
- Nassereddine, M., ve Eskandari, H. (2017). An integrated MCDM approach to evaluate public transportation systems in Tehran. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 106, 427-439.
- Nathanail, E. (2008). Measuring the quality of service for passengers on the hellenic railways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(1), 48-66.
- OECD. (2021). Passenger transport.11 Mayıs 2021 tarihinde <https://www.oecd.org> adresinden erişildi.
- Ozdağoğlu, A., Ulutaş, A., ve Keleş, M. K. (2020). The ranking of Turkish Universities with CoCoSo and MARCOS. *Economics Business and Organization Research*, 374-392.
- Pamučar, D. ve Ćirović, G. (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC), *Expert Systems with Applications*, 42, (6) 3016-3028.
- Pressl, B., Mader, C., ve Wieser, M. (2010). User-specific web-based route planning. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6179 LNCS(PART 1).
- Raju, K. S., ve Kumar, D. N. (1999). Multicriterion decision making in irrigation planning. *Agricultural Systems*, 62(2), 117-129
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega (United Kingdom)*, 53, 49-57.
- Scarpellini, S., Valero, A., Llera, E., ve Aranda, A. (2013). Multicriteria analysis for the assessment of energy innovations in the transport sector. *Energy*, 57, 160-168



- Thomopoulos, N., ve Grant-Muller, S. (2013). Incorporating equity as part of the wider impacts in transport infrastructure assessment: An application of the SUMINI approach. *Transportation*, 40(2), 315-345.
- Topal, A. (2021). Çok kriterli karar verme analizi ile elektrik üretim şirketlerinin finansal performans analizi: Entropi tabanlı Cocoso yöntemi. *Business & Management Studies: An International Journal*, 9(2), 532-546.
- Tudela, A., Akiki, N., ve Cisternas, R. (2006). Comparing the output of cost benefit and multi-criteria analysis: An application to urban transport investment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(5), 414-423.
- Turcksin I. A., ve Lu, H. (2007). Urban transport and sustainable transport strategies: a case study of Karachi, Pakistan. *Tsinghua Science and Technology*, 12(3), 309-317.
- Turcksin, L., Bernardini, A., ve Macharis, C. (2011). A combined AHP-PROMETHEE approach for selecting the most appropriate policy scenario to stimulate a clean vehicle fleet. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 954-965.
- Turcksin, L., Macharis, C., Lebeau, K., Boureima, F., van Mierlo, J., Bram, S., de Ruyck, J., Mertens, L., Jossart, J. M., Gorissen, L., ve Pelkmans, L. (2011). A multi-actor multi-criteria framework to assess the stakeholder support for different biofuel options: The case of Belgium. *Energy Policy*, 39(1), 200-214.
- Tzeng, G. H., Lin, C. W., ve Opricovic, S. (2005). Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. *Energy Policy*, 33(11), 1373-1383.
- The International Association of Public Transport (UITP). (2021). Public transport & urban mobility data. 18 Nisan 2021 tarihinde <https://www.uitp.org> adresinden erişildi.
- Uluengin, F., ve Topçu, I. Y. (2000). Knowledge-based decision support systems techniques and their application in transportation planning systems. *Knowledge-Based Systems*, 4, 1403-1429.
- Ulutaş, A., Karakuş, C. B., ve Topal, A. (2020). Location selection for logistics center with fuzzy SWARA and CoCoSo methods. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(4), 4693-4709.
- UNECE. (2021). Transport Statistics. 11 Mayıs 2021 tarihinde <https://unece.org> adresinden erişildi.
- Vahdani, B., Zandieh, M., ve Tavakkoli-Moghaddam, R. (2011). Two novel FMCDM methods for alternative-fuel buses selection. *Applied Mathematical Modelling*, 35(3), 1396-1412.
- Vitosoglu, Y., Ozden, R., Yaliniz, P., ve Bilgic, S. (2014). Comparison of light rail systems in Turkey with the method of comparative standard determination. *Transportation Research Procedia*, 3, 670-679.
- Wey, W. M., ve Wu, K. Y. (2007). Using ANP priorities with goal programming in resource allocation in transportation. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7-8), 985-1000.
- Worldbank. (2021). Infrastructure. 11 Mayıs 2021 tarihinde <https://www.worldbank.org> adresinden erişildi.

Yazdani, M., Zarate, P., Kazimieras Zavadskas, E., ve Turskis, Z. (2019). A combined compromise solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision*, 57(9), 2501-2519.

Yeh, C. H., Deng, H., ve Chang, Y. H. (2000). Fuzzy multicriteria analysis for performance evaluation of bus companies. *European Journal of Operational Research*, 126(3), 459-473.

**EK 1. Karar matrisi**

	C11	C12	C31	C13	C14	C15	C16	C17	C32	C21	C22	C23	C33
A1	10,80%	28,30	0,500	11	389.000.000	178	39,4	1070000	95.275.000	53,82	1953	833000	0,06
A2	23,70%	24,90	1,000	5	786.000.000	67	13,5	2150000	84.750.000	59,92	368	52300	0,28
A3	1,10%	10,50	1,350	6	78.000.000	82	05,9	214000	05.448.500	35,46	6051	346983	0,34
A4	11,90%	79,30	0,630	5	87.000.000	62	79,3	238000	54.728.100	42,15	3395	812400	0,12
A5	12,10%	36,80	0,630	4	171.000.000	53	71,4	468000	07.616.600	31,20	15527	102600	0,05
A6	26,20%	24,90	0,820	3	519.000.000	52	67,6	1420000	125.006.000	58,13	3924	404800	0,22
A7	62,60%	56,10	0,400	3	530.000.000	61	65,1	1450000	11.700.000	68,00	336	200300	0,30
A8	14,50%	18,60	0,270	3	342.000.000	65	60,3	937000	12.341.350	48,89	3717	56529	0,08
A9	4,00%	15,73	0,650	3	90.000.000	48	51	247000	58.600.750	35,60	2344	103800	0,07
A10	8,90%	15,80	1,000	4	183.000.000	56	44,3	501000	82.865.000	44,55	16698	38300	0,23
A11	12,00%	13,73	0,740	3	250.000.000	30	38,5	685000	85.018.500	03,90	156	14625	0,35
A12	3,40%	31,80	0,800	2	29.000.000	35	37,5	795000	32.140.000	34,19	540	23700	0,12
A13	21,40%	20,70	0,910	2	281.000.000	29	37,2	770000	55.755.500	41,42	253	6587	0,30
A14	7,60%	31,30	0,510	1	62.000.000	25	35,1	170000	31.645.500	24,20	3378	16500	0,48
A15	24,60%	19,60	0,880	3	302.000.000	42	33	827000	165.632.400	32,40	466	431100	0,29
A16	11,30%	31,70	2,100	4	85.000.000	33	32,7	233000	78.594.500	45,75	334	48100	0,31
A17	12,00%	39,30	0,950	3	93.075.000	38	31,8	255000	88.421.250	35,24	433	34400	0,28
A18	11,20%	16,80	2,090	2	140.000.000	28	28,7	384000	92.934.400	36,58	735	60900	0,23
A19	4,00%	12,70	0,660	2	51.830.000	16	21,7	142000	34.207.800	32,65	122	2540	0,25
A20	6,80%	19,40	0,470	2	54.000.000	22	21	148000	25.389.400	22,15	134	65700	0,17
A21	3,00%	17,46	0,830	2	27.000.000	15	18,9	74000	22.418.300	25,48	337	8250	0,35
A22	4,00%	16,63	2,810	1	39.420.000	21	18	108000	10.770.200	52,04	422	5586	0,42
A23	3,30%	14,10	0,720	1	27.000.000	10	15,8	74000	19.447.200	50,94	128	11200	0,30
A24	4,00%	12,23	0,730	2	31.390.000	29	13,7	86000	22.914.700	42,99	338	523400	0,29
A25	3,00%	11,69	0,760	1	20.440.000	17	13,1	56000	15.534.400	30,51	148	110900	0,39
A26	3,00%	10,71	0,850	2	20.075.000	17	12	55000	17.063.750	56,60	636	18677	0,48
A27	1,90%	10,20	0,630	1	16.000.000	10	11,6	43800	10.071.810	61,59	254	1860	0,25
A28	1,00%	7,30	0,590	1	8.322.000	9	8,3	22800	4.909.980	45,60	116	3250	0,45
A29	1,00%	6,24	0,590	1	9.000.000	6	7,1	24700	5.319.145	32,10	110	8250	0,11
A30	1,00%	6,90	0,820	1	11.826.000	6	6,8	32400	9.697.320	69,16	210	1955	0,30