

## Kent İçi Toplu Taşıma Hatlarının Etkinliğinin Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi

Ümit KUVVETLİ<sup>1</sup>, Ramazan EKİNCİ<sup>2</sup>

### Özet

Kent yaşamının önemli unsurlarından biri olan kent içi toplu taşıma, kentlerin gelişmişlik düzeyini belirleyen temel göstergelerinden bir tanesidir. Özellikle büyükşehirlerde yaşanan trafik yoğunluğu, hava kirliliği, gürültü, fazla enerji tüketimi vb. birçok sorunun çözümünde ortak nokta olan kent içi toplu taşıma sektöründe, kaynakların en iyi şekilde kullanılması ve hizmet kalitesinin artırılması zorunluluk haline gelmektedir. Bununla birlikte, hemen hemen tüm kentlerde kent içi toplu taşıma sistemlerinin bel kemiğini oluşturan otobüs hatlarının etkin şekilde kullanılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada İzmir kentinde hizmet veren 323 otobüs hattında 2019 Ekim-Aralık dönemi, hafta içi günlerine ait veriler ile Veri Zarflama Analizi (VZA) kullanılarak etkinlik analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, otobüs hatlarının güzergah uzunluğu arttıkça etkinliğinin azaldığını ve kent merkezinde hizmet veren hatların etkinliğinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Çalışma sonuçları, hizmetlerin iyileştirmesi, yeni yolcular kazanılması ve kaynakların daha iyi kullanılması açısından işletmelere yardımcı olacaktır.

**Anahtar kelimeler:** Kent içi toplu taşıma, veri zarflama analizi, etkinlik

**Jel Kodu:** C14, C67, L91, R41

## Evaluation of the Efficiency of Urban Public Transport Routes with Data Envelopment Analysis

### Abstract

Urban public transport, which is one of the important elements of urban life, is one of the main indicators that determine the level of development of cities. Especially in metropolitan cities, it becomes a necessity to make the best use of resources and increase the quality of service in the urban public transport sector, which is the common point in solving many problems such as traffic density, air pollution, noise, excessive energy consumption, etc. However, it is very important that bus routes, which constitute the backbone of urban public transport systems in almost all cities, are used effectively. In this study, efficiency analysis was carried out using Data Envelopment Analysis (DEA) on 323 bus routes serving in the city of İzmir with data for weekdays in the October-December 2019 period. The results show that the efficiency of bus routes decreases as the route length increases and the efficiency of the routes serving in the city center is higher. The results of the study will help businesses in terms of improving services, gaining new passengers, and making better use of resources.

**Keywords:** Public transportation, data envelopment analysis, efficiency

**Jel Codes:** C14, C67, L91, R41

**ATIF ÖNERİSİ (APA):** Kuvvetli Ü. & Ekinci R. (2025). Kent içi toplu taşıma hatlarının etkinliğinin veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi. *İzmir İktisat Dergisi*. 40(1). 173-192. Doi: 10.24988/ije.1524007

<sup>1</sup> Dr. Öğretim Üyesi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, İİBF, İşletme Bölümü, Menemen / İzmir, Türkiye

**EMAIL:** umit.kuvvetli@bakircay.edu.tr **ORCID:** 0000-0002-9567-3675

<sup>2</sup> Doçent Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, İİBF, İktisat Bölümü, Menemen / İzmir, Türkiye

**EMAIL:** ramazan.ekinci@bakircay.edu.tr **ORCID:** 0000-0001-7420-9841

## 1. GİRİŞ

Sanayii Devrimi'nden sonra yaşanan yoğun nüfus artışı ile birlikte kentler, hızlı bir şekilde büyümeye başlamıştır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde plansız kentleşmenin de etkisi ile birlikte kent içi ulaşım en büyük sorunlardan biri haline gelmiştir. Özel araç sahipliğinin de artış göstermesinin etkisi ile başta trafik yoğunluğu, hava ve çevre kirliliği, enerji ve zaman kaybı gibi birçok olumsuzluğa sebep olan ulaşım sorunlarına karşı en iyi çözüm entegre ve iyi planlanmış kent içi toplu taşıma sistemlerinin oluşturulmasıdır.

Kent yaşamının önemli unsurlarından biri olan kent içi toplu taşıma, kentlerin gelişmişlik düzeyini gösteren temel göstergelerinden bir tanesidir. Buna karşın, sürekli artan yolculuk talebini mevcut sınırlı kaynaklar ile adil ve verimli bir şekilde karşılamak oldukça zor bir problemdir. Ayrıca, toplu taşıma hizmeti veren kurum/kuruluşların maliyetlerinin çok küçük bir kısmı yolcular tarafından karşılanırken, maliyetin büyük kısmı kamu yönetimi (hükümet ve/veya belediyeler) tarafından sübvansede edilmektedir. Kamu kaynaklarının kullanımı, ulaşımın yaygın sosyo-ekonomik ve çevresel etkisi düşünüldüğünde, hem kentin tüm noktalarına eşit şekilde hizmet verilmesini hem de sunulan hizmetin etkin şekilde yürütülmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, kent içi toplu taşıma hizmetini verimli bir şekilde sürdürmek, geliştirilebilecek alanları belirlemek için mevcut durumun değerlendirilmesi gereklidir. Kullanılan kaynaklar (girdi) ile gerçekleşenler (çıktı) arasındaki ilişkinin analiz edilmesi, kent içi toplu taşımada kaynakların dağıtılması, eksikliklerin giderilmesi ve hizmetin sağlıklı bir şekilde sürdürülebilmesi açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, İzmir'de kent içi toplu taşıma hizmeti verilen otobüs hatlarının etkinliği Veri Zarflama Analizi (VZA) ile değerlendirilmektedir. VZA, birden fazla girdiyi birden fazla çıktıya dönüştürebilen, bir grup birimin görece etkinliğini ölçmek için kullanılan ve aynı zamanda ölçeğe göre farklı getiri teknolojilerinin uygulanabilmesine imkân veren parametrik olmayan bir yaklaşımdır (Zhu, 2014; Zizka, 2017). Birden fazla girdi ve çıktının birlikte değerlendirilebildiği modelde, tam etkin olan birimlerin etkinlik skoru 1 olurken, etkin olmayan birimlerin etkinlik skoru 0 ile 1 puan arasında değişen değerler almaktadır (Güner vd, 2017). VZA uygulandığında, veri seti içerisindeki etkin ve etkin olmayan birimler (otobüs hatları) karşılaştırmalı olarak belirlenebilir ve etkinlik düzeyi düşük olan birimlerin tam etkin olan diğer birimlerle aynı etkinlik düzeyine ulaşmak için ihtiyaç duydukları potansiyel iyileştirmeler hakkında bilgi elde edilebilir.

VZA yöntemi geniş bir uygulama alanına sahip olmasına rağmen, istatistiksel açıdan ciddi eksiklikler içermektedir. VZA yöntemi deterministiktir, bu nedenle buradan elde edilen etkinlik skorları rassal hatalara izin vermemektedir (Simar ve Wilson, 1998). Bu durum, etkinlik skorlarının olması gerekenden düşük tahmin edilmesine, dolayısıyla da etkinlik skorlarının sapmalı olmasına neden olmaktadır. Ayrıca, VZA yönteminde tahmin edilen etkinlik skorlarına ait bir güven aralığı hesaplanmamaktadır. Çalışmada klasik VZA'nın bu eksikliğini gidermek ve sapmalı etkinlik skorlarını düzeltmek için klasik yaklaşımın yanı sıra bootstrap VZA yaklaşımı kullanılmıştır. Yöntem, sapma ve güven aralıkları dahil olmak üzere etkinlik tahminlerinin istatistiksel özelliklerini ortaya koymaktadır. Son yıllarda, bootstrap yöntemini içeren istatistiksel yaklaşımlar VZA etkinlik tahminlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

VZA ile etkinlik analizine başlamadan önce, söz konusu sektör için ölçek getirisine ilişkin hangi varsayımın en makul olduğuna karar verilmesi gerekmektedir. Üretim teknolojisi ölçeğe göre sabit getiri (CRS), ölçeğe göre değişken getiri (VRS), ölçeğe göre artmayan getiri (NIRS) veya ölçeğe göre azalmayan getiri (NDRS) özelliği gösterebilir. VZA'nın en önemli aşaması uygun ölçeğe göre getirinin belirlenmesidir. Yanlış ölçeğe göre getiri varsayımı ile etkinlik analizinin yapılması halinde, tahmin edilen etkinlik skorları tutarsız olacaktır. Literatürde yapılan VZA ile etkinlik analizlerinin büyük çoğunluğunda uygun ölçeğe göre getiri, ilgili sektörün yapısı dikkate alınarak ve uzman bilgisine dayalı olarak subjektif bir yaklaşımla belirlenmektedir. Ancak sektör hakkında ölçek bilgisi kesin

değilse, ölçek ekonomileri parametrik yaklaşımlarda (SFA) ekonometrik bir model kullanılarak test edilebilir veya parametrik olmayan etkinlik analizlerinde (VZA) Simar ve Wilson (2002) tarafından geliştirilen ve ölçek etkinliği ölçütleri ve bootstrap yaklaşımı kullanılarak istatistiksel bir yaklaşımla test edilebilir. Bu çalışmada kullanılan bir diğer analiz yöntemi, VZA analizi ile etkinlik tahminlerine geçmeden önce uygun ölçeğe göre getirinin istatistiksel olarak sınanmasıdır. Bunun için Simar ve Wilson (2002) tarafından geliştirilen bootstrap temelli ölçeğe göre getiri testi ile VZA analizi için gerekli olan ölçeğe göre getiri varsayımı istatistiksel bir yaklaşımla test edilmektedir.

Çalışmanın devam eden bölümleri şu şekilde planlanmıştır. İkinci kısımda konu ile ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, kullanılan yöntem ve veri kaynağı ile ilgili bilgiler paylaşılmış, dördüncü bölümde ise uygulama sonuçlarına yer verilmiştir. Makalenin son kısmında ise elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirilmiştir.

## 2. LİTERATÜR

Kent içi toplu taşıma sektörü ile ilgili taktiksel, operasyonel ve stratejik seviyede gerçekleştirilmiş ulusal ve uluslararası literatürde birçok çalışma bulunmaktadır (Pelletier vd, 2011; Munizaga vd, 2010, Hemedoğlu, 2012; Firuzan vd, 2012; Bağdatlı, 2020; Tekin vd., 2022; Cingöz ve Aytemiz, 2023, Kuvvetli, 2024). Bu çalışmaların yanı sıra, kent içi toplu taşımanın etkinliğinin analiz edilmesine yönelik gerçekleştirilen birçok çalışma da literatürde yer almaktadır. Bu amaçla kullanılan çeşitli teknikler olmakla birlikte, VZA (Charnes vd, 1978) en yaygın kullanılan tekniklerden bir tanesidir. Çalışmanın bu bölümünde, ulusal ve uluslararası alanda yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Nolan (1996) ABD’de 29 otobüs firmasının teknik etkinliğini VZA aracılığıyla hesaplamıştır. Çalışmada girdi olarak otobüs sayısı, toplam personel sayısı ve tüketilen yakıt miktarı kullanılırken mil başına araç sayısı çıktı değişkeni olarak kullanılmıştır.

Viton (1997) ABD’de kamu ve özel şirketlerden oluşan 217 toplu taşıma firmasının etkinliğini incelemiştir. Çalışmada, araç/mil ve biniş sayısı çıktı değişkenleri, ortalama hız, filo ortalama yaşı, yapılan km, kullanılan yakıt, çalışan kişi sayısı, idari personel sayısı ve sermaye değişkenleri girdi değişkenleri olarak kullanılmıştır. Benzer şekilde Karlaftis (2004) ABD’de 256 ulaşım firmasına 3 farklı model tanımlayarak bir VZA uygulaması gerçekleştirilmiştir. Mil başına araç, mil başına yolcu ve taşınan yolcu sayılarının çıktılar, toplam çalışan sayısı, harcanan yakıt ve araç sayısının girdiler olarak kullanıldığı çalışmada, verimliliğin etkinlikle pozitif ilişkili olduğu ve ölçek ekonomisinin seçilen çıktıya bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Pina ve Torres (2001) İspanya’da kamu ve özel ulaşım hizmetlerinin etkinliğini analiz etmek için VZA’dan yararlanmışlardır. Çalışmada km. maliyeti, yakıt tüketimi, yolcunun sübvans oranı, yolcu maliyeti girdi değişkenleri, yapılan km, kaza sayısı, servis sıklığı değişkenleri ise çıktı değişkenleri olarak kullanılmıştır. Sanchez (2009) ise İspanyol ulaşım sistemlerinin otobüs hizmet performansını değerlendirmek için araç kilometresi, oturma kapasitesi, hizmet saatleri, yolcu sayısı ve filo ortalama yaşı gibi birçok çıktı değişkenini kullanmıştır. Lao ve Liu (2009), hem operasyonel verimliliği hem de mekansal etkinliği ölçmek için toplam yolcu sayısını çıktı performans göstergesi olarak almıştır.

Georgiadis vd. (2014) 2009–2011 dönemi için Yunanistan’ın Selanik kentindeki 60 güzergahta VZA modellerini kullanarak kentsel ulaşım performansını ölçmüşlerdir. Araştırma sonuçları, teknik etkinlik ve operasyonel etkililik (operational effectiveness) arasında belirsiz bir ilişki olduğunu göstermiştir. Teknik etkinliğin, ulaşım koşullarından ve garajlar ile durakların konumundan etkilendiği, operasyonel etkililiğin ise nüfus yoğunluğuna bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Güner vd. (2017) Sakarya’da kent içi toplu taşıma hizmeti veren kamu ve özel işletmelerin etkinliğini VZA ile analiz etmişlerdir. Hizmet süresi, rotasyon süresi ve sefer sayısının girdi, günlük yolculuk sayısının ise çıktı olarak kabul edildiği çalışmada, özel işletmelerin kamu işletmelerinden daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Noor vd. (2018) Pakistan, Lahor'da, girdi değişkenleri olarak otobüs sayısı, servis sıklığı, durak sayısı, harcanan yakıt miktarını, çıktı değişkenleri olarak ise araç km. ve binış sayılarını kabul ederek 15 otobüs hattının etkinliğini hesaplamışlardır.

Masoumi vd. (2018) ise Türkiye'de kent içi raylı sistemlerin performanslarının değerlendirilmesinde VZA kullanmışlardır. 11 kentin kent içi raylı sistemlerinin değerlendirildiği çalışmada hat uzunluğu, istasyon sayısı, sefer sıklığı, ticari hız değişkenleri, kent nüfusu girdi değişkenleri, yıllık binış sayısı ise çıktı değişkeni olarak kullanılmıştır. İstanbul, Eskişehir ve İzmir'in en etkin kent içi raylı sistemlere sahip olduğunun belirlendiği çalışmada diğer kentlerin etkinliğinin artırılması için bazı önerilere yer verilmiştir.

Gadepali ve Rayaprolu (2020) Hindistan'daki 8 kentteki otobüs işletmeleri için 2009-2016 yılları arasındaki performansın ölçülmesinde VZA'dan yararlanmışlardır. Çalışma sonuçları, etkinliği artırmak için kaynak tüketimini azaltmak gerektiğini göstermekle birlikte, yüksek popülasyona sahip kentlerde dahi etkinliğin düşük olduğu, kent içi toplu taşımada talep odaklı hizmete ihtiyaç bulunduğunu göstermektedir.

Izadikhah vd. (2021), İran'ın büyük kentlerinden üç tanesi olan Tahran, Meşhed ve Tebriz'de hizmet veren 21 otobüs işletmesinin etkinliğini hesaplamak için bulanık mantık temelli iki aşamalı VZA'dan yararlanmışlardır. Çalışmada, koltuk sayısı, personel eğitim maliyeti, işletim ve personel maliyeti, önleyici bakım maliyeti, ortalama arıza sayısı ve çevresel maliyet girdi değişkenleri ve kar, ortalama gecikme süresi, şikayet sayısı ve CO2 emisyon miktarı çıktı değişkenleri olarak kullanılmıştır. Çalışma sonuçları tüm işletmelerin yeterli performans göstermediğini ortaya koymuştur.

Liu vd. (2021) Çin'in bir kentinde 37 hatta toplu taşıma hizmeti veren bir işletmede otobüs sayısı, sefer sayısı girdilerine karşılık toplam binış sayısı ve gelir çıktılarını kullanarak VZA uygulamasına ilaveten Shannon entropisinden yararlanmışlar ve çalışma bulgularının işletmenin operasyonlarını iyileştirmesi açısından faydalı olduğunu vurgulamışlardır.

Forouzandeh vd. (2022) İran'ın Isfahan kentindeki 12 otobüs hattı için otobüs, durak sayıları ile yolculuk süresi değişkenlerini girdi, binış sayısı ve ortalama memnuniyet düzeyini çıktı kabul ederek, VZA ile bir simülasyon programı aracılığıyla hatların performanslarını analiz etmişler ve hatlarda yapılacak olası değişikliklerin hatların etkinliğine olan etkisini ölçmüşlerdir.

Georgiadis vd. (2024) ise 22 Avrupa kentinde toplu taşımaya kolay erişimi olan nüfus oranını ölçen uluslararası bir göstergeyi kentlerin ne kadar etkin şekilde karşıladığını değerlendirmek için VZA kullanmışlardır. Çalışma bulguları güney Avrupa kentlerindeki durak ağlarının, kuzeydekilere kıyasla daha etkin şekilde kullanıldığını göstermektedir. Ayrıca nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu kentlerde toplu taşımaya erişimin daha etkin olduğu, buna karşın otomobil merkezli tasarlanan kentlerde toplu taşımaya erişimin daha az etkin olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Literatürde kent içi toplu taşıma sistemlerinin etkinliği ile ilgili yapılan çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, çalışmaların birçoğunun farklı kentlerin toplu taşıma etkinliğini belirli değişkenler üzerinden ölçmeye çalıştığı görülmektedir. Herhangi bir kentteki otobüs hatlarının etkinliği ile ilgili yapılan çalışmalarında çok az sayıda güzergâh için gerçekleştirildiği ve bir kentin tamamında hizmet veren otobüs hatları ile yapılan etkinlik çalışmasının bulunmadığı görülmektedir. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak için, çalışmada bir kentin tamamında hizmet veren otobüs hatlarının etkinliğinin ölçülmesi hedeflenmiştir.

### 3. YÖNTEM ve VERİ KAYNAĞI

#### 3.1 Veri Seti ve Girdi-Çıktı Değişkenleri

İzmir, 4.479.525 (TÜİK, 2023) nüfusu ile Türkiye'nin en kalabalık 3. kentidir. Kentte, kent içi toplu taşıma hizmetleri, otobüs, metro, hafif raylı sistem, tramvay ve denizyolu modlarında sağlanmaktadır. Günlük ortalama 2 milyona yakın binişin yapıldığı kentte, yolcuların %62'si otobüsler, %35'i raylı sistemler ve %3'ü ise denizyolu ile taşınmakta (ESHOT, 2023) ve kent içi toplu taşımanın temelini diğer kentlerimizde olduğu gibi otobüs hatları oluşturmaktadır.

Kent içi toplu taşıma sektöründe yolcu yoğunluğu, yılın farklı dönemlerinde değişkenlik göstermektedir. Özellikle okulların kapalı olduğu yaz aylarında biniş sayısı azalmakta, okulların açık olduğu kış aylarında ise artmaktadır. Bununla birlikte, hafta içi günlerde yolcu yoğunluğu hafta sonlarına göre anlamlı bir farklılık göstermektedir. Çalışma kapsamında, toplam 323 otobüs hattının hizmet verdiği kentte, tüm hatlara ilişkin 2019 Ekim-Aralık dönemine ait hafta içi verileri (toplam 66 gün) kullanılmıştır. Hem pandeminin etkisinden arındırmak hem de yolcu yoğunluğunun daha fazla olduğu kış aylarının seçimi, analiz sonuçlarının daha sağlıklı şekilde elde edilmesini sağlayacağından söz konusu dönem tercih edilmiştir.

Literatürde, yolcu taşımacılığında hizmet etkinliğinin ölçülmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda birçok farklı girdi ve çıktı değişkeni kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise, analiz için üç girdi değişkeni ve bir çıktı değişkeni belirlenmiştir. Çalışmada girdi değişkenleri olarak hizmet süresi, toplam kapasite ve toplam akaryakıt değişkenleri, çıktı değişkeni olarak ise toplam biniş sayısı kullanılmıştır.

Çalışma süresi değişkeni, analiz yapılan dönem boyunca her hatta sunulan toplam hizmet süresini ifade etmekte olup herhangi bir otobüs hattında çalışan tüm otobüslerin toplam çalışma süresidir. Toplam kapasite değişkeni, her otobüs hattında çalışan tüm otobüslerin fiziksel yolcu kapasiteleri dikkate alınarak elde edilen değerdir. Körüklü, solo ve minibüs otobüslerin farklı yolcu kapasiteleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Toplam akaryakıt değişkeni ise, yine farklı otobüs tiplerinin farklı akaryakıt tüketimleri dikkate alınarak hesaplanmış, her otobüs hattında çalışan otobüslerin harcadıkları toplam akaryakıt miktarını göstermektedir. Çalışmada çıktı değişkeni olarak ise analizi yapılan dönem içinde her otobüs hattında gerçekleşen biniş sayıları kullanılmıştır. Tablo 1'de girdi ve çıktı değişkenleri ile tanımları yer almaktadır.

**Tablo 1:** Girdi ve Çıktı Değişkenlerinin Tanımı

Değişkenler	Tanımlar
<u>Çıktı Değişkenleri</u>	
Toplam Biniş	İlgili otobüs hattındaki toplam biniş sayısı
<u>Girdi Değişkenleri</u>	
Çalışma Süresi (saat)	İlgili hatta çalışan tüm otobüslerin toplam çalışma süresi
Toplam Kapasite	İlgili hatta çalışan tüm otobüslerin fiziksel yolcu kapasiteleri toplamı
Toplam Akaryakıt (lt)	İlgili hatta çalışan otobüslerin harcadıkları toplam akaryakıt miktarı

Tablo 2'de etkinlik analizinde kullanılan girdi ve çıktı değişkenlerine ait tanımlayıcı istatistik değerleri yer almaktadır.

**Tablo 2:** Girdi ve Çıktı Değişkenlerine Ait Tanımlayıcı İstatistikler

Değişkenler	Ortalama	Std. Sapma	Maksimum	Minimum
<u>Çıktı Değişkenleri</u>				
y Toplam Biniş	208.049	237.023	1.088.499	2.697
<u>Girdi Değişkenleri</u>				
$x_1$ Çalışma Süresi (saat)	4.172	3.350	14.680	298
$x_2$ Toplam Kapasite	423.697	402.028	2.224.920	7.920

$x_3$ Toplam Akaryakıt (lt)	32.980	34.091	257.409	1.009
-----------------------------	--------	--------	---------	-------

### 3.2 Ekonometrik Yöntem

#### 3.2.1 VZA Etkinlik Skorları

Veri Zarflama Analizi (VZA), Karar Verme Birimlerinin (KVB) etkinliğini ve ölçek performansını en etkin sınırı oluşturarak tahmin etmek için kullanılır ve temel model yalnızca girdi ve çıktılara ilişkin bilgilere ihtiyaç duyar. Bu çalışmada, her bir otobüs hattı bir KVB olarak kabul edilmektedir. Çalışmada, otobüs hatlarının etkinliği analizi için parametrik olmayan bu yaklaşımın tercih edilme nedenlerinden birisi ulaşım etkinliği alanındaki yaygın kullanımıdır. VZA, girdi ve çıktı verilerini kullanarak kıyaslanabilir KVB'ler içerisinde en iyi olanların temsil ettiği etkin bir sınırı tanımlamayı amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu sınırdaki yer almayan KVB'ler etkinsiz olarak kabul edilir.

VZA, Farrell (1957)'in orijinal çalışmasını genişleterek temel CCR (Charnes, Cooper ve Rhodes) modelini ortaya atan Charnes, Cooper ve Rhodes (1978) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Charnes vd. (1978) tarafından geliştirilen VZA modelinde, üretim sürecinde kullanılan girdilerin aynı oranda çıktıları da artacağı varsayılmıştır. Ölçeğe sabit getiri (constant returns to scale, CRS) olarak adlandırılan bu varsayım, karar birimlerinin hem teknik etkinliğini hem de ölçek etkinliğini bir arada değerlendirmektedir. Buna karşın, birçok uygulamada ölçeğe getirinin değişken olması sebebiyle Banker vd. (1984) tarafından ölçeğe değişken getiri (variable returns to scale, VRS) geliştirilmiştir. VRS, karar değişkenlerinin ölçek büyüklüğünün genel etkinliği etkileyebileceğini varsayarak ölçek etkisini değerlendirme dışında tutmakta ve karar birimlerinin yalnızca teknik etkinliğini değerlendirmektedir (Güner, 2017).

CRS modelleri, mevcut çıktıyı elde edebilmek için girdi kaynaklarının verimli kullanılıp kullanılmadığını ölçmeyi amaçlar iken, VRS modelleri, mevcut girdiler ile maksimum çıktının alınıp alınmadığını ölçmektedir. CRS modelleri, mevcut çıktı miktarının sabit tutularak kaynakların ne kadar azaltılabileceğine odaklanır iken VRS modelleri, mevcut girdi miktarının sabit tutulması halinde çıktı miktarının ne kadar arttırılabileceğine odaklanır. Bu çalışmada etkinlik skorlarının elde edilmesinde radyal etkinlik ölçme yaklaşımlarından yararlanılmaktadır. Aşağıda sırayla çalışmanın analiz kısmında kullanılan yaklaşımlar ele alınmaktadır.

#### 3.2.2 Radyal Etkinlik Analizi

Üretim veri noktalarına yönelik teknik etkinlik ölçümlerinde kullanılan yaklaşımlardan birisi, geleneksel radyal Debreu-Farrell etkinlik kaybı ölçme yöntemidir (Debreu, 1951; Farrell, 1957).

Her  $k(k = 1, \dots, K)$  veri noktası için,  $x_k = (x_{k1}, \dots, x_{kN}) \in \mathfrak{R}^N$  vektörü  $N$  sayıda girdiyi ve  $y_k = (y_{k1}, \dots, y_{kM}) \in \mathfrak{R}^M$  vektörü  $M$  sayıda çıktıyı belirtmektedir.

$$T = \{(x, y): y \text{ } x \text{ tarafından üretilebilir} \} \quad (1)$$

Teknoloji, eşitlik 2'de olduğu gibi ya tamamen üretim olanakları seti ile, ya da eşitlik 3'te görüldüğü gibi girdi gereksinimi seti ile tanımlanmaktadır;

$$P(x) \equiv \{y: (x, y) \in T\} \quad (2)$$

$$P(y) \equiv \{x: (x, y) \in T\} \quad (3)$$

Eşitlik 2 ve 3'te belirtilen koşullar, mevcut girdi ve çıktıların uygulanabilir olduğunu ifade etmektedir. Üretim olanakları kümesinin üst sınırı ve girdi gereksinimleri kümesinin alt sınırı üretim sınırını (frontier) tanımlar. Belirli bir veri noktasının sınırdan uzaklığı onun etkinliğini temsil eder. Diğer bir ifadeyle, etkinsizlik; girdi ve çıktı seti ile temsil edilen belirli bir veri noktasının sınırdan uzaklığı ile ölçülmektedir. Çıktıya dayalı radyal etkinlik ölçümünde, bir veri noktasını üretim imkanları seti

$P(x)$ 'nin sınırına taşımak için gerekli olan çıktıların oransal genişleme miktarı, teknik etkinliğin bir (çıkıtı eksenli) ölçümünde kullanılır. Öte yandan, girdi eksenli radyal etkinlik ölçümünde, bir veri noktasını girdi gereksinim seti  $L(y)$ 'nin sınırına taşımak için girdilerin gerekli oransal azaltılma miktarı kullanılmaktadır. Oransal azaltılma miktarı etkinliğin ölçüsü olarak kullanılmaktadır.

$K$  veri noktaları,  $M$  çıktılar ve  $N$  girdiler olmak üzere, her bir  $k(k = 1, \dots, K)$  veri noktası için doğrusal bir programlama problemi çözülerek radyal Debreu-Farrell çıktıya dayalı teknik etkinlik ölçümü tahmini hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \hat{F}_k^o(y_k, x_k, y, x|CRS) &= \max_{\theta, z} \theta & (4) \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^K z_k y_{km} &\geq y_{km} \theta_m, \quad m = 1, \dots, M \\ \sum_{k=1}^K z_k x_{kn} &\leq y_{km} \theta_m, \quad n = 1, \dots, N \\ z_k &\geq 0 \end{aligned}$$

$y$ , çıktılardaki mevcut verilerin  $K \times M$  boyutlu matrisi;  $x$  ise girdilerdeki mevcut verilerin  $K \times N$  boyutlu matrisidir.  $P(x)$ 'in tahmini, gözlemlenen verileri saran en küçük dışbükey serbest atılabilir zarf şeklindedir; bunun üst sınırı,  $P(X)$ 'in gerçek en iyi uygulama sınırının parçalı doğrusal tahminidir.

Eşitlik 4, ölçeğe göre sabit getiri spesifikasyonunu vermektedir. Diğer ölçeğe göre getiriler, süreç işletim seviyelerinin ayarlanmasıyla modellenir  $z_k$ : ölçeğe göre değişken getiriler (VRS) için, bir dışbükeylik kısıtlaması  $\sum_{k=1}^K z_k = 1$  eklenir, ölçeğe göre artmayan getiriler için ise (NIRS), eşitlik (4)'teki doğrusal programlama problemindeki kısıtlamalar kümesine  $\sum_{k=1}^K z_k \leq 1$  eşitsizliği eklenir.

### 3.2.3 Ölçeğe Göre Getirinin Testi

VZA'da küresel teknolojiye ilişkin varsayım çok önemlidir. Küresel teknoloji varsayımına göre, eşitlik (4) ve sonuçta ortaya çıkan teknik etkinlik ölçümleri değişecektir. Ölçeğe göre getirilerle ilgili varsayım, belirli endüstriler hakkındaki ön bilgiler kullanılarak yapılabilir. Eğer bu bilgi yeterli değilse veya kesin değilse ölçeğe göre getiri varsayımı ekonometrik olarak test edilebilir. Dahası, eğer teknoloji küresel olarak CRS değilse, CRS varsayımı altında yapılan teknik etkinlik ölçümleri tutarsız sonuçlara yol açacaktır (Simar ve Wilson 2002).

Eşitlik (4)'teki doğrusal programlama problemi kullanılarak CRS, NIRS ve VRS varsayımı altında yapılan radyal teknik etkinlik ölçümleri, orijinal olarak Fare ve Grosskopf (1985) tarafından önerilen ölçek etkinliğini hesaplamak için kullanılabilir;

$$S_k^o(y_k, x_k) = \frac{\hat{F}_k^o(y_k, x_k, y, x|CRS)}{\hat{F}_k^o(y_k, x_k, y, x|VRS)} \quad (5)$$

$$S_k^{o*}(y_k, x_k) = \frac{\hat{F}_k^o(y_k, x_k, y, x|NIRS)}{\hat{F}_k^o(y_k, x_k, y, x|VRS)} \quad (6)$$

Yukarıda yer alan denklemler sırasıyla çıkıtı eksenli olarak hesaplanan ölçek etkinliği değerlerini göstermektedir.

$$S_k^i(y_k, x_k) = \frac{\hat{F}_k^i(y_k, x_k, y, x|CRS)}{\hat{F}_k^i(y_k, x_k, y, x|VRS)} \quad (7)$$

$$S_k^{i*}(y_k, x_k) = \frac{\hat{F}_k^i(y_k, x_k, y, x|NIRS)}{\hat{F}_k^i(y_k, x_k, y, x|VRS)} \quad (8)$$

Yukarıda yer alan iki denklem ise sırasıyla girdi eksenli olarak hesaplanan ölçek etkinliği değerlerini göstermektedir.

Ölçek etkinliği  $S_k^0$ , veri noktasının  $(y_k, x_k)$  maksimum üretken ölçek büyüklüğü olarak da bilinen potansiyel olarak optimum ölçeğe ne kadar yakın olduğunu ölçer.

Şayet  $S_k^0(y_k, x_k) = 1$  ya da  $S_k^1(y_k, x_k) = 1$  (girdi eksenli etkinlik ölçümü için) ise, bu durumda veri noktası  $(y_k, x_k)$  ölçek etkindir. Şayet  $S_k^0(y_k, x_k) > 1$  ya da  $S_k^1(y_k, x_k) < 1$  (girdi eksenli etkinlik ölçümü için) ise, bu durumda veri noktası  $(y_k, x_k)$  ölçek etkisizdir. Ölçek etkisizliğinin nedeni, teknolojinin azalan getiriler kısmında faaliyette bulunulmasıdır ve bu durumda  $S_k^{0*}(y_k, x_k) = 1$  ( $S_k^{1*}(y_k, x_k) = 1$  girdi eksenli etkinlik ölçümü için) geçerli olmaktadır. Ölçek etkisizliğinin diğer nedeni, teknolojinin artan getiriler kısmında faaliyette bulunulmasıdır ve bu durumda  $S_k^{0*}(y_k, x_k) > 1$  ( $S_k^{1*}(y_k, x_k) < 1$  girdi eksenli etkinlik ölçümü için) geçerli olmaktadır.

Öte yandan, eşitlik (1)'deki küresel teknoloji T, CRS'yi temsil ediyorsa VRS tahmincisi, CRS'den daha az etkindir. Şayet eşitlik (1)'deki küresel teknoloji T, CRS özelliği göstermiyorsa, o zaman CRS tahmincisi tutarsızdır. Uygun tahmincinin seçimi için Simar ve Wilson (2002) aşağıdaki ekonometrik testleri önermektedir:

Test # 1:  $H_0: T$  küresel olarak CRS'dir  
 $H_1: T$  VRS'dir.

Şayet  $H_0$  boş hipotezi reddedilirse (yani teknoloji her yerde CRS değilse), o zaman daha az kısıtlayıcı bir sıfır hipotezine dayalı olan aşağıdaki test yapılabilir:

Test # 2:  $H'_0: T$  küresel olarak NIRS'dir.  
 $H_1: T$  VRS'dir.

Tüm K veri noktaları için ölçek etkinliği ölçümleri kullanılarak, test #1 ve test #2 için istatistikler şu şekilde tanımlanır:

$$\hat{S}_{2n}^o = \frac{\sum_{k=1}^K \hat{F}_k^o(y_k, x_k, y, x | \text{CRS})}{\sum_{k=1}^K \hat{F}_k^o(y_k, x_k, y, x | \text{VRS})}$$

ve

$$\hat{S}_{2n}^{o'} = \frac{\sum_{k=1}^K \hat{F}_k^o(y_k, x_k, y, x | \text{NIRS})}{\sum_{k=1}^K \hat{F}_k^o(y_k, x_k, y, x | \text{VRS})}$$

Teknolojinin küresel olarak CRS olduğu boş hipotezini, teknolojinin küresel olarak VRS olduğu alternatif hipotezine karşı test etme fikri, test #1, test istatistiğinin bootstrap değerinden ne kadar uzakta olduğunu test etmeye yönelik bir varsayımına dayanmaktadır. Test istatistiği, VRS ve CRS teknolojileri varsayımı altında ortalama teknik etkinlik ölçümlerinin oranına eşittir. Sıfır hipotezi geçerliyse, VRS ve CRS sınırları arasındaki ortalama mesafe küçüktür. Şayet alternatif hipotez doğruysa VRS ve CRS sınırları arasındaki ortalama mesafe büyüktür- şayet  $\hat{S}_{2n}^o$  istatistik değeri 1'den anlamlı ölçüde büyükse,  $H_0$  boş hipotezi reddedilir (girdi eksenli etkinlik ölçümü için  $\hat{S}_{2n}^i$  istatistik değeri 1'den anlamlı ölçüde küçükse). Şayet test #1 için boş hipotez reddedilirse, teknolojinin küresel olarak NIRS olduğu yönündeki  $H'_0$  boş hipotezini, teknolojinin küresel olarak VRS olduğu alternatif hipotezine karşı test etmek için test #2 gerçekleştirilebilir. Test #1'e benzer şekilde, şayet  $H'_0$  boş hipotezi geçerliyse, VRS ve NIRS sınırları arasındaki ortalama mesafe küçüktür. Şayet alternatif hipotez geçerliyse, VRS ve NIRS sınırları arasındaki ortalama mesafe büyüktür- şayet  $\hat{S}_{2n}^{o'}$  istatistik değeri 1'den anlamlı düzeyde büyükse,  $H'_0$  boş hipotezi reddedilir (girdi eksenli etkinlik ölçümü için  $\hat{S}_{2n}^{i'}$  istatistik değeri 1'den anlamlı ölçüde küçükse).

Etkinlik skorlarının doğru tahmini için VZA modelini uygulamadan önce uygun tahmincinin belirlenmesi önemlidir. Uygun VZA tahmincisini belirlemek için öncelikle ölçeğe göre getiri



varsayımının test edilmesi gerekmektedir. Ayrıca yukarıda bahsedilen test prosedürü, her veri noktası için ölçek analizini gerçekleştirmek amacıyla kullanılabilir. CRS varsayımı yalnızca tüm veri noktalarının optimal ölçekte çalışması durumunda, yani ölçek etkinliğinin bir olması durumunda geçerlidir. Ancak birçok nedenden ötürü (örneğin, eksik rekabet veya finansal kısıtlar), VRS varsayımını benimsemek daha uygundur (Coelli vd., 2005). Gerçekte VRS varsayımı uygun iken, CRS varsayımının dikkate alınması, teknik etkinlik tahminlerinin ölçek etkinliğine göre aşırı tahminlenmesine neden olur. Bu nedenle ölçeğe göre bireysel getiri testinin yapılması ölçek etkinliği analizi açısından oldukça önemlidir.

### 3.2.4. VZA Etkinlik Skorlarının Duyarlılık Analizi

Son otuz yıldır, çeşitli endüstrilerde sınır üretim fonksiyonunun tahmininde parametrik ve parametrik olmayan yaklaşımlar yaygın olarak uygulanmaktadır. Özellikle, deterministik ve parametrik olmayan tahminler VZA ile yapılmakta olup (Charnes vd., 1978; Banker vd., 1984), etkinlik uygulamalarının çoğunluğu bu yaklaşıma dayanmaktadır (Emrouznejad vd., 2008). Deterministik ve parametrik olmayan yapısından dolayı VZA, üretim fonksiyonunun tahmininde herhangi bir fonksiyonel forma ihtiyaç duymamaktadır. VZA bu özelliği sayesinde, önceden belirlenmiş belirli bir fonksiyonel formun tahminini gerektiren parametrik yaklaşımlara göre önemli bir üstünlük sağlamaktadır. Bununla birlikte, gözlemlenemeyen üretim kümesine ilişkin klasik varsayımlardan bazıları, VZA etkinlik tahminlerinde, Kneip vd. (1998) ile Simar ve Wilson (1998, 2000) tarafından öne sürülen istatistiksel tutarlılık, sapmasızlık (VZA tahmincileri yapısı itibariyle sapmalıdır) ve çıkarım süreciyle ilgili olarak bozulmaya yol açmaktadır.

Klasik VZA'nın bu eksikliğine karşı Simar ve Wilson (1998) tarafından bootstrap VZA yaklaşımı önerilmektedir. Simar ve Wilson (1998), geleneksel VZA ile tahmin edilen etkinlik skorlarının istatistiksel özelliklerini (sapma, düzeltilmiş teknik etkinlik, güven aralıkları vb.) incelemek için kullanılabilen bootstrap algoritmasını geliştirmiştir. Simar ve Wilson (1998) tarafından geliştirilen bootstrap VZA, belirli bir güven düzeyinde güven aralıklarıyla birlikte sapması düzeltilmiş etkinlik skorları tahmini yapmaktadır. Sonuç olarak, bootstrap VZA yaklaşımı, VZA ve FDH gibi parametrik olmayan etkinlik analiz yöntemlerinin ortaya koyduğu sapmalı etkinlik skorlarını düzelterek hem daha güvenilir etkinlik skorlarının tahmin edilmesini sağlamak hem de elde edilen etkinlik skorlarının güvenilirliğine yönelik istatistiksel sonuçlar ortaya koymaktadır. Aşağıda bootstrap VZA'nın tahmin süreci açıklanmaktadır:

VZA etkinlik skorları, yapısı itibariyle yukarı yönlü sapmalıdır (Banker, 1993). Simar ve Wilson (1998) bu sapmayı düzeltmek için bir bootstrap prosedürü önermektedir.

Orijinal VZA tahmincisinden  $\hat{\theta}_{VZA}(x, y)$  hareketle, bootstrap sapma tahmin değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$SAPMA_B(\hat{\theta}_{VZA}(x, y)) = B^{-1} \sum_{b=1}^B \hat{\theta}^*_{VZA,b}(x, y) - \hat{\theta}_{VZA}(x, y) \quad (9)$$

Eşitlikte  $\hat{\theta}^*_{VZA,b}(x, y)$  bootstrap değerini, B ise bootstrap tekrar sayısını göstermektedir. Tahminlerimizde bu değer 2000 olarak belirlenmiştir. Buradan hareketle sapması-düzeltilmiş tahminci  $\hat{\theta}(x, y)$ , aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\hat{\hat{\theta}}_{VZA}(x, y) = \hat{\theta}_{VZA}(x, y) - SAPMA_B(\hat{\theta}_{VZA}(x, y)) = 2\hat{\theta}_{VZA}(x, y) - B^{-1} \sum_{b=1}^B \hat{\theta}^*_{VZA,b}(x, y) \quad (10)$$

Simar ve Wilson (2008)'a göre uygulanan bu sapma düzeltme işlemi ilave bir hataya neden olabilmektedir. Bu nedenle tahmin edilen bootstrap değerlerine  $\hat{\theta}^*_{VZA,b}(x, y)$  ait örneklem varyansının aşağıdaki şekilde hesaplanması gerekmektedir:

$$\hat{\sigma}^2 = B^{-1} \sum_{b=1}^B [\hat{\theta}^*_{VZA,b}(x, y) - B^{-1} \sum_{b=1}^B \hat{\theta}^*_{VZA,b}(x, y)]^2 \quad (11)$$

#### 4. BULGULAR

VZA ile etkinliğin analizine geçmeden önce ilk olarak ölçeğe göre getiri (CRS veya VRS) varsayımlarının test edilmesi ve uygun modele karar verilmesi gerekmektedir. Bunun için çalışmada sistematik bir yaklaşım izlenerek öncelikle Simar ve Wilson (2002) tarafından önerilen ölçeğe göre getiri testi uygulanmıştır. Şayet üretim imkanları seti, küresel olarak CRS özelliğine sahipse hem CRS hem de VRS tutarlı tahminçilerdir; ancak VRS tahminçisi CRS tahminçisinden daha az etkindir. Öte yandan, üretim imkanları seti, bazı yerlerde VRS özelliği gösteriyorsa, CRS tutarsız, ancak VRS hala tutarlıdır (Simar ve Wilson, 2002). Söz konusu varsayımın testi için iki aşamalı bir test süreci izlenmektedir. Birinci aşamada ölçeğe göre sabit getiri (CRS) varsayımı ölçeğe göre değişen getiri (VRS) varsayımına karşı test edilmektedir (Test # 1). Şayet birinci aşamada, CRS boş hipotezi reddedilir ve uygun teknolojinin VRS olduğuna karar verirse, ikinci aşamaya geçilmektedir. İkinci aşamada ölçeğe göre artmayan getiri (NIRS) boş hipotezi VRS'ye karşı test edilmektedir (Test # 2). Bu test sonucunda ölçek etkinsizliği ve ölçek etkinsizliğinin nedeni ortaya konulmaktadır.

**Tablo 3:** Ölçeğe göre getiri testi (Test # 1)

Hipotez Testleri	H <sub>0</sub> : CRS varsayımı geçerlidir H <sub>1</sub> : VRS varsayımı geçerlidir	Sonuç
Panel (A)	$\text{mean}(F_i^{\text{CRS}})/\text{mean}(F_i^{\text{VRS}}) = 1$ $\text{mean}(F_i^{\text{CRS}})/\text{mean}(F_i^{\text{VRS}}) \neq 1$	p-olasılık (%5 önem düzeyi) <0,001 Kritik değer Ho RED VRS
Panel (B)	$\text{mean}(\hat{F}_i^{\text{CRS}})/\text{mean}(\hat{F}_i^{\text{VRS}}) = 1.103$	(%5 önem düzeyi) 1,000 Ho RED VRS

Tablo 3'te ölçeğe göre getiri testi eden ve Panel (A) ve Panel (B)'de yer alan 2 farklı test sonucu yer almaktadır. Her iki testte, CRS ve VRS teknolojileri varsayımı altında elde edilen ortalama teknik etkinlik değerlerini birbirine oranları kullanılmaktadır. Birincisinde, CRS ve VRS ortalama teknik etkinlik skorları oranlarının 1'e eşit olduğu (boş hipotez) ve 1'den farklı olduğu (alternatif hipotez) hipotezleri sınanmaktadır. Tabloda olasılık değeri %5 önem düzeyine göre anlamlıdır. Buna göre, CRS varsayımının geçerli olduğunu belirten boş hipotez reddedilerek VRS'nin geçerli olduğunu öne süren alternatif hipotez kabul edilmektedir. İkinci testte, söz konusu hipotezler için elde edilen test istatistiği kritik değer (1,000) ile karşılaştırılmaktadır. Şayet test istatistiği değeri %5 önem düzeyinde kritik değerden anlamlı düzeyde büyükse, boş hipotez reddedilerek alternatif hipotez kabul edilmektedir. Buna göre, tahmin edilen test istatistiği değeri (1,093), %5 önem düzeyinde kritik değerden (1,000) büyük olduğu için boş hipotez reddedilmekte ve VRS varsayımının uygunluğuna karar verilmektedir. Bu istatistik, VRS ve CRS teknolojileri varsayımı altında ortalama teknik verimlilik ölçümlerinin oranını temsil etmektedir.

**Tablo 4:** Ölçeğe göre getiri testi (Test # 2)

Hipotez Testleri	H <sub>0</sub> : NIRS varsayımı geçerlidir	p-olasılık (%5 önem düzeyi) <0,001	Sonuç
	H <sub>1</sub> : VRS varsayımı geçerlidir		
Panel (A)	mean(F <sub>i</sub> <sup>NIRS</sup> )/mean(F <sub>i</sub> <sup>VRS</sup> ) = 1 mean(F <sub>i</sub> <sup>NIRS</sup> )/mean(F <sub>i</sub> <sup>VRS</sup> ) ≠ 1	Kritik değer (%5 önem düzeyi) 1,000	Ho RED VRS
Panel (B)	mean(hat{F <sub>i</sub> <sup>NIRS</sup> })/mean(hat{F <sub>i</sub> <sup>VRS</sup> }) = 1,093		Ho RED VRS

Tablo 4'te birinci testin (Test # 1) devamı niteliğinde olan ikinci teste (Test # 2) ait sonuçlar yer almaktadır. Test # 1 için yapılan analiz sonucunda, boş hipotez reddedilip uygun teknolojinin VRS olduğuna karar verilmiştir. Bu durumda, boş hipotezi (NIRS) daha az kısıtlayıcı olan ikinci test (Test # 2) sonuçlarına geçilmektedir. İkinci testte (Test # 2) ise, global teknolojinin NIRS olduğu boş hipotezine karşı teknolojinin VRS olduğu alternatif hipotez sınanmaktadır. Şayet, boş hipotez geçerliyse, VRS ve NIRS sınırları arasındaki ortalama mesafe küçüktür. Ancak, alternatif hipotez geçerliyse, VRS ve NIRS sınırları arasındaki ortalama mesafe büyüktür. Tabloda olasılık değeri %5 önem düzeyinde anlamlı olduğu için, NIRS ve VRS etkinlik ortalamaları oranının 1'e eşit olduğunu öne süren boş hipotez reddedilerek, etkinlik ortalamaları oranının 1'den farklı olduğunu belirten alternatif hipotez kabul edilmektedir. İkinci olarak tahmin edilen test istatistiği değeri (1,093) kritik değerden (1,000) anlamlı düzeyde (%5 önem düzeyi) büyüktür. Dolayısıyla, her iki test (Test # 1 ve Test # 2) sonucunda uygun teknolojinin VRS olduğunu belirten alternatif hipotezler kabul edilmektedir. Tahmin için uygun modelin ölçeğe göre değişen getirili (VRS) VZA modeli olduğuna karar verilmesinin ardından, etkinlik tahminlerine geçilmektedir. Gerçekleştirilen etkinlik ölçümü sonucunda en etkin KVB'ler belirlenir ve bunların etkinlik skoru 1 değerini alır. Etkin olmayan KVB'lerin ise etkinlik değerleri birden küçük olacaktır.

**Tablo 5:** Etkinlik Skorlarının Tanımlayıcı İstatistik Değerleri

Değişkenler	Ortalama	Std. Sapma	Minimum	Maksimum
Teknik Etkinlik Değerleri (VRS_TE)	0,563	0,239	0,042	1,000
Sapması-Düzeltilmiş Teknik Etkinlik (BC_VRS_TE)	0,508	0,206	0,036	0,926
Ölçek Etkinliği (SE)	0,933	0,109	0,098	1,000

Not: Çalışmada bootstrap tekrar sayısı 2000 olarak alınmıştır.

Tablo 5'te ölçeğe göre değişen getiri (VRS) varsayımı altında hesaplanmış teknik etkinlik skorları (VRS\_TE) ile sapması düzeltilmiş teknik etkinlik skorları (BC\_VRS\_TE) yer almaktadır. Ayrıca, ölçek etkinliği skorları elde edilerek optimal ölçekte faaliyet gösteren ve optimal ölçekten sapan hatlar belirlenmeye çalışılmaktadır. Eşitlik (4)'ten elde edilen ortalama teknik etkinlik değeri (sapması düzeltilmeyen) 0,563'tür. Bu sonuç, tüm DMU'ların ortalama olarak yolcu sayısını %43,71 oranında arttırabileceği anlamına gelmektedir. Ancak, VZA etkinlik skorları yukarı doğru sapmalı olduğundan, 0,5081 olarak hesaplanan sapması düzeltilmiş ortalama etkinlik skoru, tüm DMU'ların ortalama

olarak yolcu sayısını %43,71 yerine %49,19 oranında artırabileceği anlamına gelmektedir. Öte yandan, eşitlik (5)'ten elde edilen ortalama ölçek etkinliği sonuçları incelendiğinde, 1'in altındaki ortalama ölçek etkinliği skoru, ölçek etkinsizliğinin olduğunu; diğer bir ifadeyle, tüm DMU'lar arasında optimal ölçekten sapan ulaşım hatlarının olduğunu göstermektedir.

Tablo 6'da ölçek etkinsizliğine yol açan ulaşım hatları ve ölçek etkinsizliğinin nedenleri yer almaktadır. Ölçeğe göre sabit getiri (CRS) ve ölçeğe göre değişen getiri (VRS) arasındaki fark yeteri kadar büyük ve istatistiksel olarak anlamlı ise, ölçek etkinsizliği ( $SE < 1$ ) sorunu ortaya çıkmaktadır. Buna göre analiz kapsamında ele alınan toplam 323 ulaşım hattı içerisinde 7 tanesi ölçek etkinsizliğiyle birlikte genel bir etkinsizlik sorunu yaşamaktadır. Söz konusu ulaşım hatlarından 2 tanesi (Hat 1 ve Hat 4) ölçeğe göre artan getiriden (IRS) kaynaklı ölçek etkinsizliği sorunu yaşarken, geri kalan 5 tanesi ölçeğe göre azalan getiriden (DRS) kaynaklı ölçek etkinsizliği sorunu ile karşılaşmaktadır. Söz konusu hatların tamamı, kent merkezi dışındaki ilçeler ile o ilçelerdeki köyler arasında çalışan ve yolcu sayısının düşüklüğü sebebiyle sadece günün belirli saatleri arasında hizmet veren otobüs hatlarıdır.

**Tablo 6:** Ölçek etkinsizliği ve nedenleri

KVB	CRS <sup>a</sup>	VRS <sup>b</sup>	SE <sup>c</sup>	Etkinlik Sonucu	Etkinsizlik Nedeni <sup>d</sup>
Hat 1	0,275	0,397	0,692	Ölçek Etkinsiz	IRS
Hat 2	0,464	0,680	0,682	Ölçek Etkinsiz	DRS
Hat 3	0,327	0,450	0,726	Ölçek Etkinsiz	DRS
Hat 4	0,195	0,268	0,728	Ölçek Etkinsiz	IRS
Hat 5	0,418	0,597	0,700	Ölçek Etkinsiz	DRS
Hat 6	0,234	0,315	0,743	Ölçek Etkinsiz	DRS
Hat 7	0,138	0,181	0,758	Ölçek Etkinsiz	DRS

Not: <sup>a</sup> CRS varsayımı altında teknik etkinlik ölçüsü; <sup>b</sup> VRS varsayımı altında teknik etkinlik ölçüsü; <sup>c</sup> SE ölçek etkinliği; <sup>d</sup> Ölçek etkinliğinin nedeni; KVB karar verme birimi.

Tablo 7'de ölçeğe göre değişen getiri (VRS\_TE) ve sapması-düzeltilmiş ölçeğe göre değişen getiri (BC\_VRS\_TE) varsayımı altında hesaplanan etkinlik değerlerine göre hat sayısı ve oranları yer almaktadır. VRS\_TE varsayımı altında tam etkin ulaşım hattı sayısı 17 ve tüm ulaşım hatlarının %5,26'sını oluşturmaktadır. Klasik teknik etkinlik değerleri yukarı yönlü sapmalı olduğu için, sapması-düzeltilmiş teknik etkinlik değerleri (BC\_VRS\_TE) hesaplandığında tam etkin hat bulunmamaktadır. Her iki teknik etkinlik (VRS\_TE ve BC\_VRS\_TE) sonucuna göre, hatların büyük bölümü %40 ile %60 etkinlik sınırları arasında yer almaktadır. Etkinlik skoru %40 ve altında olan hat sayısı VRS modeline göre 85 iken, BC\_VRS modeline göre 101'dir. Bu grupta yer alan hat sayısının toplam hat sayısına oranı sırasıyla %26,3 ve %31,3'tür.

**Tablo 7:** Etkinlik düzeylerine göre hat sayıları ve oranları

Etkinlik Aralığı	VRS_TE	BC_VRS_TE
Tam Etkin (%100)	17 (%5,26)	Yok
0,85-0,99 arası	31 (%9,59)	10 (%3,1)
0,70-0,85 arası	45 (%13,9)	56 (%17,3)
0,60-0,70 arası	52 (%16,09)	51 (%15,8)
0,40-0,60 arası	93 (%28,7)	105 (%32,5)
0,40 ve altı	85 (%26,3)	101 (%31,3)

Tablo 8'de ise farklı güzergâh uzunlukları için hesaplanan etkinlik skorları ve hat sayıları yer almaktadır. Kruskal-Wallis testi sonuçlarına göre gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı ( $p < 0,001$ ) farklılık bulunmaktadır. Toplam 323 otobüs hattı içinde 10 km ve altında mesafede hizmet veren otobüs hattı sayısı 21 olup, bunların standart teknik etkinlik (VRS\_TE) ortalaması 0,557 ve

sapması düzeltilmiş teknik etkinlik (BC\_VRS\_TE) ortalaması 0,467'dir. En çok hizmet verilen hat sayısı 10,01 ve 20 km. arasında (99 adet) olup, etkinlik ortalaması sırayla standart ve sapması düzeltilmiş model için 0,657 ve 0,595'tir. Öte yandan, 50,01 km. ve üzerindeki mesafelerde hizmet veren hat sayısı 50 olup, bu hatların etkinlik ortalaması 0,401 ve sapması düzeltilmiş etkinlik ortalaması 0,360'tır. Tablodan anlaşılacağı üzere, özellikle uzak mesafeli (50,01 km. ve üstü) otobüs hatlarının etkinlik ortalaması, daha kısa mesafeli (50,0 km. ve altı) otobüs hatlarının etkinlik ortalamasına göre daha düşüktür. Bu değerler, otobüs hatlarının güzergâh uzunluğu arttıkça etkinlik düzeylerinin azaldığını, kısa mesafeli hatların daha etkin olduğunu göstermektedir. Güzergâh uzunluğu arttıkça ihtiyaç duyulan otobüs sayısının artması, buna karşın biniş sayısının aynı oranda artış göstermemesi bu durumun temel sebebi olarak göstermek mümkündür.

**Tablo 8:** Güzergah uzunluğuna göre hat sayısı ve etkinlik skorları

Güzergah Uzunluğu	Hat Sayısı	VRS_TE	BC_VRS_TE
10 km. ve altı	21	0,557	0,467
10,01 – 20 km. arası	99	0,657	0,595
20,01 - 30 km. arası	92	0,593	0,538
30,01- 50 km. arası	61	0,500	0,459
50,01 km. ve üstü	50	0,401	0,360

Çalışmanın gerçekleştirildiği İzmir ili, Türkiye'de 1984 yılında büyükşehir olan ilk kentlerden bir tanesidir. 1984 yılında 9 olan kentteki ilçe sayısı, 2004 yılında 5216 no'lu yasa ile 19'a ve 2012 yılında 6360 no'lu yasa ile 30'a yükselmiştir. Büyükşehir belediyelerinin sorumluluk alanlarını genişleten bu yasalar sonrasında, kamu tarafından sağlanan kent içi toplu taşıma hizmeti çevre ilçelerde de verilmeye başlanmıştır. İzmir illinde gerçekleştirilen bu çalışmada, analizi yapılan dönem içerisinde 247 otobüs hattı kent merkezinde, 57 hat çevre ilçelerde ve 19 hat farklı çevre ilçeler arasında hizmet vermektedir. Bu hatlara ilişkin etkinlik düzeyleri Tablo 9'da özetlenmiştir. Buna göre, ölçeğe göre değişen getiri (VRS\_TE) varsayımı altında hesaplanan teknik etkinlik değerleri karşılaştırıldığında, kent merkezinde yer alan 247 hattın ortalama etkinlik düzeyi 0,632 iken, çevre ilçelerin merkezinde yer alan 57 hattın ortalama etkinlik düzeyi 0,307 ve çevre ilçeler arasında bulunan 19 hattın ortalama etkinlik düzeyi 0,431 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, bootstrap yöntemi kullanılarak yapılan sapması düzeltilmiş etkinlik sonuçları incelendiğinde, etkinlik ortalamaları klasik yaklaşıma göre (VRS\_TE) daha düşük olmakla birlikte, genel olarak hatların etkinlik ortalamalarında kent merkezlerinden uzaklaştıkça azalma görülmektedir. Kent merkezinde hizmet veren hatların ortalama düzeltilmiş teknik etkinlik değerleri (BC\_VRS\_TE) 0,570 iken, bu değer çevre ilçelerde daha düşük olduğu görülmektedir (çevre ilçe merkezlerde ve çevre ilçeler arasında sırasıyla 0,279 ve 0,390 olarak hesaplanmıştır). Hizmet verilen bölgelere göre etkinlik değerleri Kruskal-Wallis testi kullanılarak karşılaştırıldığında, bölgelere arasında istatistiksel olarak anlamlı ( $p=0,008$ ) farklılık bulunduğu belirlenmiştir.

**Tablo 9:** Hizmet verilen bölgelere göre hat sayısı ve etkinlik skorları

Bölge	Hat Sayısı	VRS_TE	BC_VRS_TE
Kent merkezi	247	0,632	0,570
Çevre ilçe merkezi	57	0,307	0,279
Çevre ilçeler arası	19	0,431	0,390

## 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Kent içi toplu taşıma, kentlilerin yaşam kalitesini etkileyen, toplumun her kesimi tarafından kullanılan, yerel yönetimlerin başarılarının değerlendirilmesinde yüksek ağırlığa sahip bir hizmet alanıdır. Çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan sürdürülebilir kentler oluşturulmasında kritik role sahip olan bu sektörde mevcut kaynakların verimli kullanılması, söz konusu hizmeti sağlayan işletmeler açısından müşteri memnuniyeti sağlamak ve mali açıdan önemli iken, kullanıcılar için

hizmet kalitesi açısından oldukça değerlidir. Bu çalışmada, İzmir’de kent içi toplu taşıma hizmeti veren otobüs hatlarının etkinlik değerleri araştırılmıştır. Bu kapsamda, her otobüs hattında kullanılan çalışma süresi, toplam kapasite ve toplam akaryakıt girdileri ile her hatta gerçekleşen toplam biniş sayısı çıktısı arasındaki ilişki, çok kriterli bir doğrusal programlama yöntemi olan VZA ile analiz edilmiştir.

Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde, VRS modeline göre ortalama etkinlik skoru 0,563 iken, sapması düzeltilmiş etkinlik skoru 0,508 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, kullanılan kaynakların iyileştirilmesine ve yolcu sayısının artırılmasına yönelik VRS modeline göre yaklaşık %43; sapması düzeltilmiş modele göre yaklaşık %50’lik potansiyel bir iyileşmenin yapılabileceği anlamına gelmektedir. Her ne kadar tahmin edilen bu etkinlik skorları, büyük iyileştirme potansiyeli olduğunu göstermekte ise de kent içi toplu taşıma sektörünün yapısı, söz konusu hizmetin sosyal bir kamu hizmeti olması, yolcu sayısının yetersiz olduğu yerlere dahi toplu taşıma hizmetinin sunulması gerektiği, sunulan hizmetin kalite odaklı olması gibi faktörler, bu değerlerin yüksek olmasındaki başlıca sebepler olduğu söylenebilir.

Genel ortalamaların yanı sıra, otobüs hattı özelinde etkinlik değerleri incelendiğinde VRS modeline göre toplam hat sayısının %5,26’sı ve buna karşılık gelen 17 adet hat tam etkindir (EFF=1). Sapması düzeltilmiş modele göre tam etkin otobüs hattı bulunmamaktadır. Öte yandan, etkinlik ortalaması %60 ve üzerinde olan otobüs hattı sayısı VRS modeline göre 145 (%44,9) ve sapması düzeltilmiş modele göre 117 (%36,2)’dir. Bu hatlarda etkinlik skoru 1’e yaklaştıkça daha etkin olmakla birlikte, mevcut sayıda yolcu taşımak için harcanan kaynakların etkin şekilde kullanıldığı söylenebilir. Bununla birlikte, etkinlik ortalaması %40’ın altında olan otobüs hatlarının sayısı sırasıyla VRS modeline göre 85 (%26,3), sapması düzeltilmiş modele göre 101 (%31,3)’dir. Bu hatlarda yolcu taşımak için harcanan kaynakların etkin şekilde kullanılmadığı görülmektedir. Lao & Lio (2009), Amerika’nın Kalifornia eyaleti Monterey kentindeki otobüs hatlarının etkinliklerini değerlendirdikleri çalışmalarında, etkinlik değerlerinin 0,6 ile 1 arasında olması durumunda hatların oldukça etkin, 0,6’dan altında olması durumunu ise etkin olmadıkları şeklinde değerlendirmişlerdir. Güner vd. (2017) ise Sakarya’da 57 otobüs hattı için yaptıkları çalışmada, kamu tarafından işletilen hatların ortalama etkinlik değerini 0,460, özel kişiler tarafından işletilen hatların ortalama etkinlik değerini ise 0,675 olarak elde etmişlerdir. Çalışmamızda, İzmir’de hizmet verilen tüm otobüs hatlarının ortalama etkinlik değeri 0,562, sadece kent merkezinde hizmet veren hatların ortalama etkinlik değeri ise 0,632 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, literatürde sapmalı kabul edilen klasik VZA etkinlik skorları bootstrap yaklaşımı kullanılarak düzeltildikten sonra ortalama etkinlik skorlarında bir düşüş görülmüş, düzeltilen etkinlik skorları sonucuna göre tüm otobüs hatlarının ortalama etkinlik değeri 0,508 iken, sadece kent merkezinde hizmet veren hatların ortalama etkinlik değeri 0,570 olarak hesaplanmıştır. Ülkeler arasındaki farklılıklar, kentin yapısı, coğrafi alanın büyüklüğü gibi çeşitli faktörler düşünüldüğünde ve literatürde çalışmalar referans alındığında, çalışma sonuçları İzmir’deki otobüs hatlarının etkin düzeye yakın olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, özellikle düşük etkinlik değerleri (%40 ve altındaki), bu hatlarda mevcut harcanan kaynaklara göre taşınan yolcu sayısının etkin olmadığı, söz konusu hatlarda yolcu sayısının artırılması gerektiğine yönelik bilgi vermektedir.

Son olarak çalışmada gelecekteki çalışmalarda ele alınabilecek iki önemli kısıt bulunmaktadır. Birinci kısıt verilerle ilgilidir. Çalışmada okulların açık olduğu, yolcu yoğunluğunun fazla olduğu kış dönemine ilişkin veriler kullanılmıştır. Hatların büyük çoğunluğu açısından daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayan bu dönem, Çeşme, Urla, Seferihisar, Foça gibi daha çok yaz döneminde yolcu yoğunluğu yaşanan bölgelerde hizmet veren hatların etkinlik değerinin yorumlanması açısından yanıltıcı olabilir. Bu sebeple, hatların yaz ve kış dönemi etkinlik değerlerinin ayrı olarak hesaplanması ve karşılaştırılması gelecek çalışmalar açısından faydalı olacaktır. Benzer şekilde, hafta sonu verileri kullanılarak hatların hafta içi ve hafta sonu etkinlik değerlerini karşılaştırmak olasıdır.

Bununla birlikte bu çalışma, bir kentteki tüm toplu taşıma hatlarının bütün olarak analiz edildiği ulusal literatürdeki ilk çalışmadır. Güner vd. (2017) Sakarya için benzer bir çalışmayı gerçekleştirmiştir. Ülkemizin diğer kentlerinde de yapılacak benzer çalışmalar, kent içi toplu taşıma sektöründe kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlamanın yanı sıra kentler arasında karşılaştırma yapma imkanı da sağlayacaktır.

İkinci kısıt kullanılan yöntemle ilgilidir. Çalışmada VZA ve türevleri (bootstrap VZA) kullanılarak teknik etkinlik ve ölçek etkinlik skorları elde edilmekte ve elde edilen etkinlik skorları kullanılarak farklı kriterlere göre ulaşım hatların performans analizi yapılmaktadır. Bu çalışmanın kapsamı dışında olmakla birlikte, daha sonra yapılacak çalışmalarda ulaşım hatlarının etkinliğini tahmin edildikten sonra etkinliği etkileyen çevresel faktörler analiz edilebilir. Bunun için iki farklı yaklaşımdan yararlanmak olasıdır. İlk olarak, iki aşamalı bir yaklaşım izlenerek, birinci aşamada VZA ile etkinlik skorları elde edildikten sonra ikinci aşamada Tobit modeli kullanılarak etkinliğin belirleyenleri analiz edilebilir. İkinci olarak ise Simar ve Wilson (2007) tarafından geliştirilen kesikli bootstrap regresyon modeli kullanılarak etkinliğin belirleyenleri analiz edilebilir. Bu yaklaşımda, ilk aşamada bootstrap VZA kullanılarak elde edilen etkinlik skorları, ikinci aşamada etkinliği etkileyen çevresel değişkenlere karşı regrese edilmektedir. Son olarak ulaşım sektörüne yönelik gelecekte yapılacak etkinlik analizlerinde VZA kadar yaygın uygulama alanına sahip bir başka etkinlik ölçme yaklaşımı olan Stokastik Sınır Analizi (SFA) kullanılabilir.

## **TEŞEKKÜR**

Çalışma kapsamında veri desteği sağlayan İzmir Büyükşehir Belediyesi ESHOT Genel Müdürlüğü Ulaşım Planlama Daire Başkanlığı İstatistik Şube Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

---

## KAYNAKÇA

---

- Banker R., Charnes A. ve Cooper W.W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092.
- Banker, R. D. (1993). Maximum likelihood, consistency and data envelopment analysis: A statistical foundation. *Management Science*, 39, 1265-1273.
- Bağdatlı, M. E. C. (2020). Niğde ili toplu taşıma sistemlerinin yolcu talepleri açısından incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 405-413.
- Charnes, A., Cooper, W.W. ve Rhodes, E. (1978). Measuring efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444.
- Cingöz, K., & Aytemiz, T. (2023). Toplu taşıma araçları sefer sıklığı belirleme ve çizelgeleme problemi. *Kent Akademisi*, 16(2), 1310-1333.
- Coelli, T.J., Prasada-Rao, D.S., O'Donnell, C.J. ve Battese, G.E. (2005). *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. 2nd Edition, Springer, Berlin.
- Debreu, G. (1951). The coefficient of resource utilization. *Econometrica*, 19, 273-292.
- Emrouznejad, A., Parker, B.R. ve Tavares, G. (2008). Evaluation of research in efficiency and productivity: A survey and analysis of the first 30 years of scholarly literature in DEA. *Socio Economic Planning Sciences*, 42(3), 151-157.
- ESHOT (2023). ESHOT Genel Müdürlüğü 2023 Faaliyet Raporu.
- Fare, R. ve Grosskopf, S. (1985). A nonparametric cost approach to scale efficiency. *Journal of Economics*, 87 (4), 594-604.
- Farrell, M.J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120, 253-290.
- Forouzandeh, F., Arman, H., Hadi-Vencheh, A. ve Rahimi, A.M. (2022). A combination of DEA and AIMSUN to manage big data when evaluating the performance of bus lines. *Information Sciences*, 618, 72-86.
- Firuzan, A.R., Alpaykut S. ve Kuvvetli Ü. (2012). Bulanık servqual yaklaşımıyla toplu taşımada kalitenin ölçülmesi. *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 29,78-93.
- Gadepalli, R. ve Rayaprolu, S. (2020). Factors affecting performance of urban bus transport systems in India: A Data envelopment analysis (DEA) based approach. *Transportation Research Procedia*, 48, 1789-1804.
- Georgiadis, G., Politis, I. ve Papaioannou, P. (2014). Measuring and improving the efficiency and effectiveness of bus public transport systems. *Research in Transportation Economics*, 48, 84-91.
- Georgiadis, G., Kopsacheilis, A., Andreadis, I.M. ve Politis, I. (2024). Analyzing efficiency and built environment factors for achieving convenient access to public transport: A Europe-wide DEA application. *Environmental Science & Policy*, 158, 103792.
- Güner, S. (2017). Toplu Ulaşım Sistemlerinde Operasyonel Etkinlik ve Hizmet Kalitesi Analizi. *Journal of Transportation and Logistics*, 2(2), 34-47.
- Güner, S., Taşkın, K. ve Gürler, G. (2017). Şehir içi toplu taşıma hatlarının hizmet etkinliğinin veri zarflama analizi ile ölçülmesi: özel ve kamu işletmelerinin karşılaştırılması. *İşletme Bilimi Dergisi*, 5(3) 127-145.



- Hemedoğlu, E. (2012). Metro hizmetlerinde hizmet kalitesini ölçme: Algılanan hizmet kalitesi ve beklenen hizmet kalitesi üzerine bir araştırma. *İşletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 72, 25-47.
- Izadikhah, M., Azadi, M., Toloo, M. ve Hussain, F.K. (2021). Sustainably resilient supply chains evaluation in public transport: A fuzzy chance-constrained two-stage DEA approach. *Applied Soft Computing*, 113, Part B, 107879.
- Karlaftis, M.G. (2004). A DEA approach for evaluating the efficiency and effectiveness of urban transit systems. *European Journal of Operational Research*, 152(2), 354-364.
- Kneip, A., Park, B.U. ve Simar, L. (1998). A note on the convergence of nonparametric DEA estimators for production efficiency scores. *Econometric Theory*, 14(6), 783-793.
- Kuvvetli, U. (2024). Hizmet sektöründe kontrol kartları kullanımı: kent içi toplu taşıma sektöründe bir uygulama. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 26(3), 1200-1221. <https://doi.org/10.16953/deusosbil.1420663>
- Lao, Y. ve Liu, L. (2009). Performance evaluation of bus lines with data envelopment analysis and geographic information systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33, 247-255.
- Liu, Z., Wu, N., Qiao, Y. ve Li, Z. (2021). Performance evaluation of public bus transportation by using DEA models and shannon's entropy: An example from a company in a large city of China. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(4), 779-795.
- Masoumi, M. ve Öcalır-Akunal, E.V. (2018). Türkiye'deki kent içi raylı ulaşım sistemlerinin performanslarının veri zarflama analizi ile karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 971-975.
- Munizaga, M., Palma, C. ve Mora, P. (2010). Public transport OD matrix estimation from smart card payment system data. *12th World Conference on Transport Research*, Lisbon, Paper No. 2988.
- Nolan, J.F. (1996). Determinants of productive efficiency in urban transit. *Logistics and Transportation Review*, 32 (3), 319-342.
- Noor, N., Mehmood B. ve Wasif, M. (2018). Efficiency Analysis of Public Transport in Lahore, Pakistan. *Pakistan Journal of Applied Economics*, Özel Sayı, 357-376.
- Pelletier, M.P., Trépanier, M. ve Morency, C. (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19 (4), 557-568.
- Pina, V. & Torres, L. (2001). Analysis of the efficiency of local government services delivery. An application to urban public transport. *Transportation Research Part A*, 35, 929-944.
- Sanchez, G. (2009). Technical and scale efficiency in spanish urban transport: Estimating with data envelopment analysis. *Advances in Operations Research*, 721279.
- Simar, L. ve Wilson, P.W. (1998). Sensitivity analysis of efficiency scores: How to bootstrap in nonparametric frontier models. *Management Science*, 44 (11), 49-61.
- Simar, L. ve Wilson, P.W. (2000). Statistical inference in nonparametric frontier models: The state of the art. *Journal of Productivity Analysis*, 13(1), 49-78.
- Simar, L. ve Wilson, P. W. (2002). Non-Parametric Tests of Returns to Scale. *European Journal of Operational Research*, 139(1), 115-132.
- Simar, L. ve Wilson, P. W. (2007). Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes. *Journal of Econometrics*, 136(1), 31-64.

- Simar, L. ve Wilson, PW. (2008). Statistical interference in nonparametric frontier models: Recent developments and perspectives. Fried H, Lovell CAK, Schmidt S (eds) İçinde *The Measurement of Productive Efficiency and Productivity Change*, Oxford University Press, New York.
- Tekin, S., Ceylan, H. ve Köfteci, S. (2022). Kentiçi toplu taşıma sistemlerinde performansa dayalı ödeme modelinin geliştirilmesi. *Teknik Dergi*, 33(6), 12913-12944.
- TUIK. (2023). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, www.tuik.gov.tr, erişim tarihi. 26.06.2024
- Viton, P.A. (1997). Technical efficiency in multi-mode bus transit: A production frontier analysis. *Transportation Research B*, 31, 23-39.
- Zizka, M. (2017). An Assessment of the efficiency and effectiveness of the services of urban transport operators in the Czech Republic. *Transformations in Business and Economics* 16(1):134-152.
- Zhu, J. (2014). *Quantitative Models for Performance Evaluation and Benchmarking: Data Envelopment Analysis with Spreadsheets*. Cham: Springer International Publishing Switzerland.



© Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license.  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

---

## EXTENDED ABSTRACT

---

### *Evaluation of the Efficiency of Urban Public Transport Routes with Data Envelopment Analysis*

#### **1. Introduction**

Urban public transport, which is one of the important elements of urban life, is one of the main indicators of the level of development of cities. However, it is a very difficult problem to meet the ever-increasing travel demand in a fair and efficient manner with the limited resources available. Moreover, while a very small part of the costs of public transport providers are paid by passengers, the majority of the costs are subsidized by the public administration (government and/or municipalities). Considering the widespread socio-economic and environmental impact of transport, the use of public resources necessitates that all parts of the city are served equally and that the service is carried out efficiently. Therefore, it is necessary to evaluate the current situation in order to maintain the urban public transport service efficiently and to identify areas that can be improved. Analyzing the relationship between the resources used (input) and what is achieved (output) is very important in terms of allocating resources in urban public transport, eliminating deficiencies and maintaining the service in a healthy way. In this study, the efficiency of bus routes providing urban public transport services in Izmir is evaluated by Data Envelopment Analysis (DEA).

#### **2. Data Set and Method**

Izmir is the 3rd most populous city in Türkiye with a population of 4,479,525 (TÜİK, 2023). Public transport services in the city are provided by bus, metro, light rail, tram and ferry modes. In the city where nearly 2 million boardings are made on average daily, 62% of the passengers are transported by buses, 35% by rail systems and 3% by ferries (ESHOT, 2023) and bus routes constitute the basis of urban public transport as in other cities.

Passenger density in the urban public transport sector varies in different periods of the year. The number of boardings decreases especially in summer months when schools are closed and increases in winter months when schools are open. However, passenger density on weekdays shows a significant difference compared to weekends. Within the scope of the study, weekday data (66 days in total) for the October-December 2019 period for all routes in the city, where a total of 323 bus routes serve. This period was preferred both to eliminate the effect of the pandemic and because the selection of the winter months, when the passenger density is higher, will ensure that the analysis results are obtained more accurately.

In the literature, many different input and output variables are used in studies conducted to measure service efficiency in passenger transport. In this study, three input variables and one output variable were determined for the analysis. In the study, service time, total capacity and total fuel oil variables were used as input variables and total number of boardings was used as output variable.

In this study, the efficiency of bus routes providing urban public transport services in Izmir is evaluated by Data Envelopment Analysis (DEA). DEA is a nonparametric approach that can transform multiple inputs into multiple outputs, is used to measure the relative efficiency of a group of units, and also allows the application of different returns to scale technologies. DEA is an approach used to identify efficient and inefficient units (bus routes) in the data set comparatively and to obtain information about the potential improvements that units with low efficiency level need to reach the same efficiency level as other units with full efficiency. In the literature, there are various studies in which the efficiency of bus routes is measured by DEA.

### 3. Empirical Findings

In the study, after deciding that the appropriate model for estimation is the DEA model with variable returns to scale (VRS), the efficiency values of the routes were estimated. For 323 bus routes, the average technical efficiency scores (VRS\_TE) were estimated as 0.563 and the average deviation corrected technical efficiency scores (BC\_VRS\_TE) were estimated as 0.508. According to both technical efficiency (VRS\_TE and BC\_VRS\_TE) results, most of the routes are between 40% and 60% efficiency limits.

In the study, the bus routes were grouped according to their route lengths and the efficiency scores of the groups were compared using Kruskal-Wallis test. According to the results of the analysis, there is a statistically significant ( $p < 0.001$ ) difference between the groups. For example, the standard technical efficiency average for bus routes with a route length of 10 km. or less was estimated as 0.557, for bus routes with a route length between 10-20 km. as 0.657, and for bus routes with a route length over 50 km. as 0.401. These values show that the efficiency level of bus routes decreases as the route length increases, and short-distance lines are more efficient. The main reason for this situation is that the number of buses required increases as the route length increases, while the number of boardings does not increase at the same rate.

Similarly, while the average efficiency level of 247 bus routes operating in the city centre is 0.632, the average efficiency level of 57 routes in the center of the surrounding districts is 0.307 and the average efficiency level of 19 routes between the surrounding districts is 0.431. When the efficiency values according to the regions served were compared using the Kruskal-Wallis test, it was determined that there was a statistically significant ( $p = 0.008$ ) difference between the regions.

### 4. Discussion and Conclusion

When the results of the study are evaluated, the average efficiency score according to the VRS model is 0.563, while the deviation corrected efficiency score is 0.508. This result means that a potential improvement of approximately 43% according to the VRS model and approximately 50% according to the bias corrected model can be made to improve the resources used and increase the number of passengers. Although these estimated efficiency scores show that there is a great potential for improvement, it can be said that factors such as the structure of the urban public transport sector, the fact that the service in question is a social public service, the need to provide public transport service even where the number of passengers is insufficient, and the quality-oriented nature of the service provided are the main reasons for these high values.

In the study, data for the winter period, when schools are open and passenger density is high, were used. This period, which provides more realistic results for the majority of the routes, may be misleading in terms of the interpretation of the efficiency value of the bus routes serving in areas such as Cesme, Urla, Seferihisar, Foca, which are more crowded in summer. For this reason, it may be useful for future studies to calculate and compare the summer and winter period efficiency values of the bus routes separately. Similarly, it is possible to compare the weekday and weekend efficiency values of the bus routes by using weekend data.