Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:1 (2025) 189-201

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Location-Based housing valuation index proposal: Izmir example

Resmiye Nasiboglu[1], Kadriye Filiz Balbal[1]*, Mohd Saifullah Rusiman[2], Efendi Nasibov[1,3]

[1]Dokuz Eylül University, Dept. of Computer Science, Izmir,, Türkiye
[2]University Tun Hussien Onn Malaysia, UTHM Pagoh, Johor, Malaysia
[3]Institute of Control Systems, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

Highlights:

- The location valuation index of the house is proposed.
- LVI calculation algorithm is designed.
- LVI heatmap of Izmir city is created.

Keywords:

- Housing market
- Public transportation network
- PTN distance
- Multi-criteria decision making

Article Info:

Research Article
Received: 21.09.2023
Accepted: 23.02.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1363942

Correspondence:

Author: Kadriye Filiz Balbal
e-mail: kadriyefiliz.balbal@deu.edu.tr
phone: +90 232 301 9506

Graphical/Tabular Abstract

In this study, valuating the location of a house or real estate object in the city is considered as a multi-criteria decision-making problem. It considers the ease of transportation from this location to other points of the city via public transport, as well as to reach important points such as subway stations, hospitals, shopping centers, green park areas, etc. In this context, a public transport network (PTN) distance concept is introduced and an index called Location Valuation Index (LVI) is proposed. The importance of this index in estimating the market value according to the location of the residence was emphasized. The proposed model was run on the data of the public transportation network of the Izmir city, the third largest metropolitan city of Turkey, and the LVI heatmap of the city shown in Figure A was created.

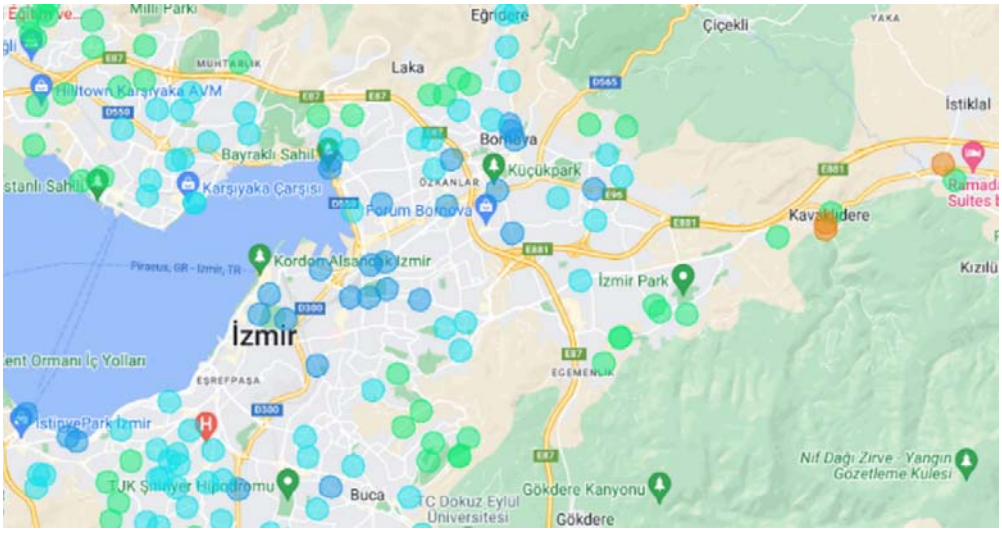


Figure A. Heatmap of Izmir city according to LVI values

Purpose:
In this study, the location valuation index (LVI) based on the public transport network (PTN) distance and its calculation methodology is proposed.

Theory and Methods:
Calculating the LVI value is handled as a multicriteria problem. The best-worst method is used to calculate the weights of the criteria. Modified Dijkstra algorithm was used to calculate the PTN distances, which are the basis for calculating LVI values. The LVI values was validated using the TOPSIS method.

Results:
This study was simulated using the PTN data of Izmir, the 3rd largest metropolitan city of Turkey, and a heatmap of the city was created according to LVI values.

Conclusion:
Location valuation index proposed in this study can contribute to the creation of prices based on objective criteria by reducing the arbitrariness in determining the housing and rental prices in big cities.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:1 (2025) 189-201

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Konuma dayalı konut değerleme endeksi önerisi: İzmir örneği

Resmiye Nasiboglu[1], Kadriye Filiz Balbal[1]*, Mohd Saifullah Rusiman[2], Efendi Nasibov[1,3]
[1]Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Fakültesi, Bilgisayar Bilimleri Bölümü, İzmir, Türkiye
[2]University Tun Hussien Onn Malaysia, UTHM Pagoh, Johor, Malaysia
[3]Institute of Control Systems, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

ÖNEÇIKANLAR

- Konutun konumunu değerleme endeksi (KDE) önerilmiştir
- KDE hesaplama algoritması verilmiştir
- İzmir şehrinin KDE ısı haritası oluşturulmuştur

Makale Bilgileri
Araştırma Makalesi
Geliş: 21.09.2023
Kabul: 23.02.2024

DOI:
10.17341/gazimmfd.1363942

Anahtar Kelimeler:
Konut piyasası,
toplu taşıma ağı,
TTA mesafesi,
çok kriterli karar verme,
konum değerleme endeksi

ÖZ

Konut ve kiralama piyasası ülke ekonomilerinde önemli bir yere sahiptir. Konut fiyatları genel olarak bu konutun alanı, oda sayısı, bulunduğu kat gibi özelliklere göre belirlenmektedir. Ancak konutun bu özelliklerinin yanı sıra konumu da evin pazarlama değerlendirmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu bakımdan subjektif fiyat spekülasyonlarının önüne geçebilmek için, konutun konumunu objektif kriterlere göre değerlendirebilmek oldukça önemlidir. Bu çalışmada bir gayrimenkulün konumunun değerlendirilmesi, çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemi olarak ele alınmıştır. Bu konumdan toplu taşıma araçlarıyla şehrin diğer noktalarına ulaşım kolaylığının yanı sıra metro istasyonları, hastaneler, alışveriş merkezleri, açık yeşil alanlar gibi önemli noktalara ulaşımın kolaylığını da göz önünde bulundurulmaktadır. Bu bağlamda, bir toplu taşıma ağı (TTA) mesafe kavramı tanıtılmış ve Konum Değerleme Endeksi (KDE) adı verilen bir yöntem önerilmiştir. Önerilen KDE yönteminin diğer ÇKKV yöntemlerinden avantajı, diğer ÇKKV yöntemlerinde tercih sıralaması oluştura bilmek için tüm alternatiflerin bilgilerine gereksinim duyulmaktadır. KDE yönteminde ise, diğer alternatiflerden bağımsız olarak, direkt hesaplanabilen bir endeks önerilmiştir. Yeni önerilen yöntem, literatürde yaygın olarak kullanılan TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sırası Tekniği) yöntemi ile karşılaştırılarak, tutarlı sonuçlar verdiği görüldü. Önerilen model, Türkiye'nin üçüncü büyük metropol şehri olan İzmir şehrinin toplu ulaşım ağı verileri üzerinde çalıştırılmış ve şehrin KDE ısı haritası oluşturulmuştur.

Location-Based housing valuation index proposal: Izmir example

HIGHLIGHTS

- The location valuation index (LVI) of the house is proposed
- LVI calculation algorithm is designed
- LVI heatmap of Izmir city is created

Article Info
Research Article
Received: 21.09.2023
Accepted: 23.02.2024

DOI:
10.17341/gazimmfd.1363942

Keywords:
Housing market,
public transportation network,
PTN distance,
multi-criteria decision making,
location valuation index

ABSTRACT

Housing and rental market has an important economic place in the economy of countries. Housing prices are generally determined by the characteristics such as area of the house, the number of rooms, the floor it is located on, etc. However, in addition to these characteristics of the house itself, the location of the house also has a significant impact on the marketing evaluation of the house. In this respect, it is important to be able to evaluate the housing location according to objective criteria in order to prevent subjective price speculations. In this study, evaluation of the location of a real estate is considered as a multi-criteria decision making (MCDM) problem. From this location, the ease of transportation to other points of the city by public transportation, as well as the ease of transportation to important points such as metro stations, hospitals, shopping malls and urban green areas, is taken into consideration. In this context, the concept of a public transport network (PTN) distance has been introduced and an index called the Location Valuation Index (LVI) has been proposed. The advantage of the proposed LVI method over other MCDM methods is that information about all alternatives is needed to create a preference ranking in other MCDM methods. In the LVI method, an index that can be calculated directly, independently of other alternatives, is proposed. The newly proposed method has been shown to give consistent results by comparing it with the TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) method, which is widely used in the literature. The proposed model was run on the public transportation network data of the city of Izmir, the third largest metropolitan city of Turkey, and the LVI heatmap of the city was created.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : resmiye.nasiboglu@deu.edu.tr, *kadriyefiliz.balbal@deu.edu.tr, saifulah@uthm.edu.my, efendi.nasibov@deu.edu.tr / Tel: +90 232 301 9506

1. Giriş (Introduction)

Konut ve kira piyasaları ülke ekonomisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [1, 2]. Konut fiyatları enflasyon, deprem vb. etkenlerden etkilenmekte ve etkilere göre çok hızlı değişmektedir. Bu hızlı değişimler nedeniyle konut fiyatlarının sabitlenmesi ve objektif olarak değerlendirilmesi zorlaşmaktadır. Konutların değerlendirilmesinde, bu konutun özelliklerinin yanı sıra bu evin konumu da önemli bir etkiye sahiptir. İster iş ister kişisel kullanım amaçlı olsun, konumun gayrimenkul satın alma kararları üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bunun en önemli nedeni ise erişim kolaylığıdır [3]. Örneğin alışveriş merkezi, açık yeşil alan, metro istasyonu, hastane vb. kentsel sosyal ve ulaşım altyapı alanlarına yakın olmasının yanında bu konumdan toplu taşıma ile şehrin diğer bölgelerine ne kadar kolay ulaşılabileceği de önemlidir. Bu faktörlerden bazıları nüfusun geneli için geçerliyken (örneğin hastane, alışveriş merkezi, otogar, açık yeşil alan vb.), bazıları ise bireysel olarak değerlendirilebilir (örneğin kişinin işyerine yakınlığı). Dolayısıyla, bu faktörlerin farklı ağırlıklarla dikkate alınması gerekir. Bu nedenle, belirli bir konumun değerlendirilmesi çok kriterli karar verme problemi olarak düşünülebilir.

Literatürdeki çalışmalara göre şehirlerde konum analizine dayalı çalışmalar çoğunlukla belirli tesislerin optimal konumlarının hesaplanması ile ilgilidir. Örneğin, Jiang vd. [4] çalışmasında potansiyel yangın riski taşıyan alanların belirlenmesi ve uygun itfaiye teşkilatlarının seçilmesi için bir yöntem önermektedir. Potansiyel yangın riski bölgelerini değerlendirmek için analitik hiyerarşi süreci (Analytical Hierarchy Process - AHP) kullanılmaktadır. Herath [5] çalışmasında, yerel fırsatlara yönelik ekonomik tahminler üretmek için kavramsal bir çerçeve ve regresyon modeli önermiş ve yerel yöneticilerin mekânsal konfor eşitliğine daha fazla önem vermesiyle kentlerde daha fazla fırsat eşitliğinin sağlanabileceğini ileri sürmüştür. Aydin vd. [6] çalışmasında İstanbul'un Asya yakasında yeni bir hareketlilik merkezi konumu için en iyi konumu seçmeyi amaçlamışlardır. Çözüm için Aralıklı tip-2 bulanık AHP ve aralıklı tip-2 bulanık WASPAS'tan oluşan entegre çok kriterli karar verme (ÇKKV) metodolojisi önerilmiştir. Shafii vd. [7] çalışmasında, konutun değerlendirilmesini çok alternatifli bir karar problemi olarak ele almış ve çözümü için TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sırası Tekniği) yöntemini kullanmıştır. Çalışmada, karar vericinin (KV) kullandığı bilgilerin hatalı ve bulanık olduğu dikkate alınmıştır. Zhang vd. [8] çalışmasında, İran'ın Yezd Şehrindeki hastaneler için en uygun konumun belirlenmesi ÇKKV olarak ele almıştır. Her bir kriterin ağırlığı analitik hiyerarşi süreci yöntemi ile belirlenerek coğrafi bilgi sistemi (CBS) yazılım ortamındaki haritalara uygulanmıştır.

Konum değerleme çalışmaları genel olarak çok kriterli karar verme problemi olarak ele alınmakta ve bu problemde kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [9, 10]. TOPSIS [11-13], ANP (Analitik Ağ Süreci) [14], AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) [15], VIKOR (Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşma Çözümü) [16, 17], ELECTRE (Elimination and Choice Translating Reality) [18], PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) [19-21] gibi ÇKKV yaklaşımları birçok çalışmada kullanılmıştır. Daha sonra sürekli aralık ölçeği kullanan öznel ağırlıklandırma yöntemi [22], üstünlük ve baskınlık sıralaması (SIR) yöntemi [23], Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi (SWARA) [24], kesin olmayan ağırlık tahminleri [25] yöntemleri de geliştirilmiştir. Wallenius vd. [26] çalışmasında farklı ÇKKV yöntemlerini incelmiş ve karşılaştırmıştır.

Konutların çeşitli yönleriyle değerlendirilmesi için farklı indekslerin önerilmesine yönelik çalışmalar literatürde yer almaktadır. Özellikle subjektif kriterlere dayalı karar problemlerinde, çeşitli sayısal endeksler kullanılarak karar verme sürecinin kolaylaştırılması sağlanabilir. Örneğin, Karadağ ve Gültekin [27] tarafından, Türkiye'de konut seçiminde etkili olan faktörlerin belirlenmesine yönelik bir ölçek geliştirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, Rekreasyonel Ulaşılabilirlik ve Yeşil Alanlar (RUYA), Konut Alanının Çevre Kalitesi (KAÇK), Konutun Ekonomik Değeri (KED) ve Konutun Yapısal Özellikleri (KYO) gibi faktörlerin konut seçimini etkileyen faktörler olduğu belirlenmiştir. Malezya'da, hava koşulları, çevresel sorunlar ve kültürel ve sosyal ihtiyaçlar nedeniyle 2009 yılında Malezya Mimarlar Enstitüsü ve Malezya Müşavir Mühendisler Birliği tarafından Yeşil Bina Endeksi (GBI - Green Building Index) geliştirilmiştir. GBI'nin amacı, yapılı çevrede sürdürülebilirliği teşvik etmek ve paydaşlar arasında çevre sorunlarına ilişkin farkındalığı artırmak; dolayısıyla gelecek nesiller için sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunmaktır [28]. Goh vd. [29] çalışmasında, yeşil konut özelliklerinin konutların değerine katkısını araştırmıştır. Dikkate alınan 14 yeşil özelliğin, konut değerini %2,0 ila %6,5 arasında artırdığı görülmüştür.

Adamec vd. [30] çalışmasında, konut sürdürülebilirliğini değerlendirmek ve sürdürülebilir konut politikaları ve pratik önlemler tasarlamak için HSAT (housing sustainability assessment tool) adında bir araç önermiştir. Önerilen bu araç, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Konut Cenevre Başlığı'nı (United Nations Geneva Charter on Sustainable Housing) temel almıştır ve sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal, ekonomik ve kurumsal boyutlarını dengelemeyi amaçlayan bütünsel bir yaklaşıma dayanmaktadır. Morancho [31] makalesinde, metodolojik bir yaklaşım olarak hedonik tekniği kullanarak konut fiyatları ile kentsel yeşil alan kazanımları arasındaki bağlantıyı analiz etmiştir. Çalışma, Castellón (İspanya) şehrinden toplanan 810 gözlem kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda, konutun satış fiyatı ile yeşil kentsel alana uzaklığı arasında ters bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Hosseini vd. [32] çalışmasında, afetlerden sonra geçici barınma için en uygun yerlerin seçilmesine yönelik çok kriterli bir karar verme yaklaşımı önermiştir. Ağırlıklar, Shannon entropi yöntemiyle birlikte uzmanlarla yapılan seminerler ve AHP'nin kullanılmasını içeren hibrit bir yaklaşımla hesaplanmıştır ve Tehran örneğinde uygulanmıştır. Nebati vd. [33] çalışmasında alışveriş merkezlerinin performans değerlendirmesi amacıyla bir performans indeks ölçüm modeli geliştirmiştir. Performansların karşılaştırılması aşamasında, AHP ve PROMETHEE yöntemleri kullanılmıştır.

Konut fiyatlarının belirlenmesinde konum etkisini inceleyen makaleler de bulunmaktadır. Örneğin, Heyman vd. [34] çalışmasında, konum gibi konut özelliklerinin örtülü değerini tahmin etmeye yönelik bir yöntem olan hedonik fiyat modellerinde (hedonic price models - HPM) kullanılan erişilebilirlik özelliğinin önemini vurgulamış ve sistematik olarak incelemiştir. Bizim bu çalışmamızda da konum değerlemesinde kullanım amaçlı bir endeks önerilmiştir. Bu endeks, toplu taşıma ulaşım ağı bazında erişim kolaylığını temel almaktadır. Toplu taşıma ulaşım ağı için güzergâh tavsiyeci sistemler, kaynak ve hedef duraklar arasındaki en uygun rotayı belirlemek için genellikle Dijkstra tabanlı algoritmaları kullanır [35]. Literatürde güzergâh maliyeti hesaplanırken başlangıç ve varış durakları arasında geçilecek durak sayısı, güzergahın toplam uzunluğu, aktarma sayısı, yürüme mesafeleri gibi çeşitli kriterler dikkate alınmaktadır. Örneğin Bozyigit vd. [36, 37] çalışmalarında Dijkstra algoritması temel alınarak, transfer edilen hat sayısını ve transfer yürüme mesafesini ceza olarak ekleyen modifikasyonlar önermiştir. Nasibov vd. [38] çalışmasında, güzergahın değerlendirilmesi için durak-durak ve durak-hat arasındaki bulanık erişilebilirlik derecelerine dayalı bir yaklaşım önermektedir. Nasiboglu [39] çalışmasında, hattın erişilebilirlik derecesini hesaplamak için bulanık hat yoğunluk

derecesi kullanmıştır. Nasiboglu [40] çalışmasında, güzergâh üzerindeki duraklar arasındaki yoğunluk seviyelerinden yola çıkarak genel erişim derecesini hesaplamak için OWA (Sıralı Ağırlıklı Ortalama) operatörü kullanmıştır.

Bu çalışmada, Bozyiğit vd. [36] çalışmasında olduğu gibi, transfer ve yürüme cezalarını dikkate alan Modifiye Dijkstra algoritması kullanılmaktadır. Şehirdeki herhangi verilen konumu değerlendirmek için Konum Değerleme Endeksi (KDE) adı verilen yeni bir endeks önerilmektedir. Bu endeks, toplu taşıma araçlarıyla şehrin diğer referans noktalarına erişim kolaylığını dikkate almaktadır. Açık yeşil alanlar, metro istasyonları, hastaneler vb. gibi çeşitli kentsel sosyal ve ulaşım altyapı alanları gruplanarak, referans erişim noktaları oluşturulmaktadır. Grupların öncelikleri ÇKKV yöntemleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Duraklar arasındaki ulaşım kolaylığı, bu duraklar arasında toplu taşıma araçları kullanılarak hesaplanan maliyet değeriyle ters orantılı olarak hesaplanmaktadır. Önerilen bu KDE yönteminin avantajı, diğer ÇKKV yöntemlerinde olduğu gibi, tüm alternatiflerin bilgilerine gereksinim duyulmadan, belli bir alternatifin değer endeksini direkt olarak hesaplaya bilmesidir. Önerilen model, Türkiye'nin üçüncü büyük şehri olan İzmir şehrinin verileri üzerinde çalıştırılarak şehrin KDE ısı haritası oluşturulmuştur. Makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde önerilen toplu taşıma ağı (TTA) mesafesi kavramı ve yeni konum değerleme endeksi açıklanmış ve hesaplama algoritması verilmiştir. Bölüm 4'te uygulama çalışması sonuçları anlatılmış ve analiz edilmiştir. Tartışma bölümünde ise çalışmanın tamamına ilişkin değerlendirmeye yer verilmiş, yeni önerilen KDE yönteminin sonuçları TOPSIS yönteminin sonuçları ile karşılaştırılarak, yeni yöntemin tutarlı sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu bölümde ayrıca, gelecek çalışmalarla ilgili önerilere değinilmiştir. Çalışmanın genel akış şeması Şekil 1'de açıklanmıştır.

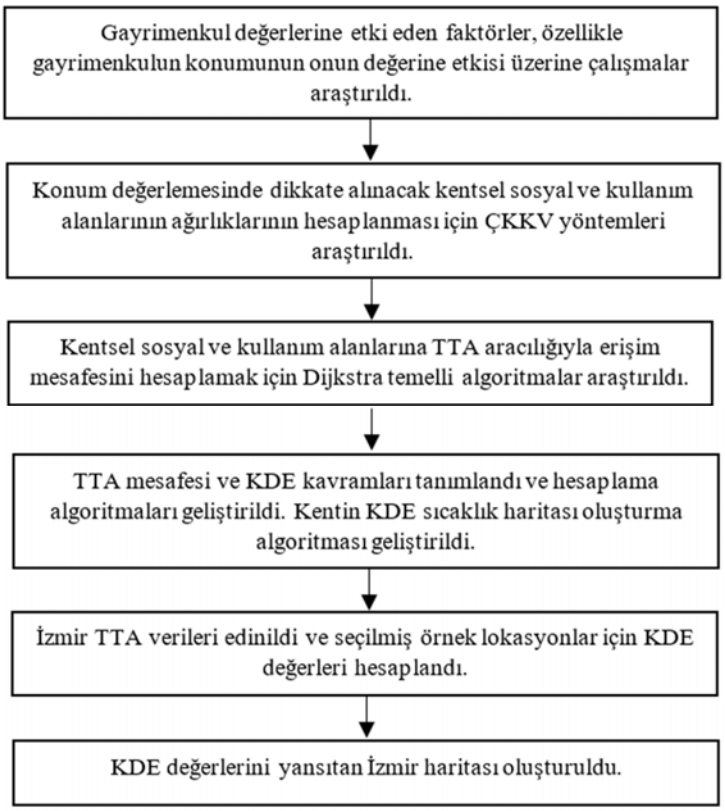
2. Ön Hazırlıklar (Preliminaries)

Şehir içerisinde herhangi bir konumun KDE değerini belirlemek için birçok kriter dikkate alınabilir. Ancak bu kriterlerin KDE değerine etkisi, yani ağırlığı farklı olabilir. Bu ağırlıklar kullanıcı tercihlerine göre değişiklik gösterebilir. Bir sonraki alt bölümde bu ağırlıkların hesaplanmasına yönelik yöntemler ele alınmaktadır.

2.1. Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi (Determination of Criteria Weights)

Bir önceki bölümde de belirtildiği gibi, önem üstünlüğüne dayalı kriterlerin seçimi ile ilgili literatürde pek çok yöntem bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntemlere örnek olarak AHP, BWM, ELECTRE, VIKOR ve TOPSIS yöntemleri verilebilir. Bu yöntemlerden ELECTRE, VIKOR ve TOPSIS yöntemleri, alternatifleri en iyiden en kötüye doğru sıralayan bir üstünlük ilişkisi oluşturmak için alternatifler arasında ikili karşılaştırmalar kullanır. Bu yöntemler daha az tercih edilen alternatifleri eleme yeteneğine sahiptir ve çok sayıda alternatifin olduğu ve kriter sayısının az olduğu karar problemleri için daha uygun olmasına karşın kriter ağırlıklarının hesaplanmasına pek uygun değildir. Bununla beraber kriter ağırlıklarının hesaplanması için AHP ve BWM gibi yöntemler daha uygun görülmektedir.

AHP yöntemi karar kriterlerinin ağırlıklarını ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. AHP özellikle grup karar vermede uygulanmakta ve sanayi, sağlık, eğitim, işletme ve yönetim gibi alanlarda çok çeşitli karar durumlarında kullanılmaktadır [41, 42]. Uzmanlardan kriterlerin göreceli önemlerini ikili karşılaştırmalar yoluyla tahmin etmeleri istenir. Yani karar vericilerin her biri, özel olarak tasarlanmış bir anket kullanarak her bir öğe çiftinin göreceli önemini karşılaştırır [43]. Karar vericiler karşılaştırma yaparken,



Şekil 1. Çalışmanın akış şeması (Flowchart of the study)

unsurlara ilişkin somut verilerin yanı sıra unsurların göreceli anlam ve önemine ilişkin yargılarını da kullanabilirler. AHP'nin temel özelliği değerlendirmelerin gerçekleştirilmesinde sadece temel bilgilerin değil insan yargılarının da kullanılabilmesidir. Bu değerlendirmeler problemin tamamı boyunca işlenebilecek ve karşılaştırılabilecek sayısal değerlere dönüştürülür. Karşılaştırılan bir öğe için sayısal bir ağırlık veya öncelik hesaplanır. Sonuç olarak çeşitli unsurların rasyonel ve tutarlı bir şekilde birbirleriyle karşılaştırılmasına olanak tanır. Sürecin son adımında her karar alternatifi için sayısal öncelikler (ağırlıklar) hesaplanır. Bu ağırlıklar, alternatiflerin karar hedefine ulaşma konusundaki göreceli yeteneğini temsil eder ve böylece çeşitli eylem biçimlerinin doğrudan değerlendirilmesine olanak tanır.

Kriter ağırlıklarının hesaplanmasında kullanılabilecek diğer bir yöntem ise Eniyi-Enkötü yöntemidir (best-worst method - BWM). BWM, Rezaei [44-46] tarafından önerilen çok kriterli bir karar verme yöntemidir. BWM yöntemi son zamanlarda AHP'ye göre daha az karşılaştırma gerektirmesi ve daha verimli bir yöntem olması nedeniyle ön plana çıkmıştır. BWM yöntemi hakkında daha detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.

Diyelim ki n tane kriterimiz var ve bu kriterleri 1/9'dan 9'a kadar bir ölçek kullanarak ikili olarak karşılaştırıyoruz. Ortaya çıkan matris Eş. 1 şeklinde olacaktır.

$$A = a_{ij} \tag{1}$$

Burada a_{ij}, i kriterinin j kriterine göre göreceli tercihini temsil eder. $a_{ij} = 1$, i ve j'nin eşit öneme sahip olduğunu, $a_{ij} > 1$ ise i kriterinin j'den daha önemli olduğunu gösterir.

BWM yönteminde ikili karşılaştırmaları iki ana kategoriye ayırmak mümkündür: referans karşılaştırmaları ve ikincil karşılaştırmalar. a_{ij} karşılaştırması, i'nin en iyi öğe olması ve/veya j'nin en kötü öğe olması durumunda referans karşılaştırması olarak tanımlanır. i ve j'nin ikisi de en iyi veya en kötü öğeler değilse, a_{ij} karşılaştırması ikincil karşılaştırma olarak tanımlanır. Yöntemin işe yaraması için yalnızca referans karşılaştırmalarını içeren matrisin doldurulması yeterlidir (Şekil 2).

Karşılaştırma matrisinin tamamını ele alırsak, n eleman için mümkün olan tüm karşılaştırma sayısının n^2 olduğunu görürüz. Buradan n karşılaştırmanın $a_{ij} = 1$ olduğu, geri kalan $n(n-1)$ karşılaştırmanın yarısının $a_{ij} > 1$, diğer yarısının ise tam tersi olduğu görülmektedir. $n(n-1)/2$ karşılaştırmanın $2n-3$'ü referans karşılaştırma, geri kalanı ise ikincil karşılaştırmadır. Başka bir deyişle, matrisin ters özelliğini dikkate alarak tam bir A matrisi elde etmek için $n(n-1)/2$ ikili karşılaştırma yapılması gerekir.

A matrisinin karşılıklı olması için, tüm i ve j için $a_{ii} = 1$ ve $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ sağlanmalıdır. Eş. 2'deki koşulun sağlanması, ikili karşılaştırma matrisi A'nın tamamen tutarlı olduğunu gösterir.

Her i, j ve k için, $a_{ik}a_{kj} = a_{ij}$. (2)

Karşılaştırma matrisi doldurulduktan sonra, Eş. 3 - Eş. 7 optimizasyon probleminin çözümü olan $(\xi^*, w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ vektöründeki kriter ağırlıkları $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ olarak hesaplanır.

$$\min \xi, \tag{3}$$

s.t.

$$\text{Her } j \text{ için } \left|\frac{w_B}{w_j} - a_{Bj}\right| \le \xi, \tag{4}$$

$$\text{Her } j \text{ için } \left|\frac{w_j}{w_W} - a_{jW}\right| \le \xi, \tag{5}$$

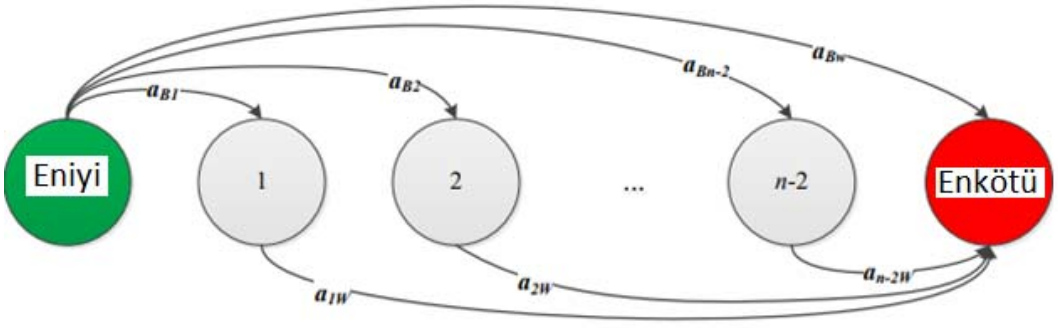
$$\sum_j w_j = 1, \tag{6}$$

$$\text{Her } j \text{ için } w_j \ge 0. \tag{7}$$

Eş. 3 – Eş. 7 probleminin optimal çözümündeki ξ^* değeri, karşılaştırma matrisinin ne kadar tutarlı olduğunu gösterir. Tamamen tutarlı bir karşılaştırma matrisi durumunda, $\xi^* = 0$ sağlanır. Genellikle, tamamen tutarlı bir karşılaştırma matrisi oluşturmak pek mümkün olmayabilir. Bu durumlarda Eş. 8'deki şekilde hesaplanan tutarlılık oranı (consistency ratio - CR) kavramı kullanılır [45]:

$$CR = \frac{\xi^*}{Cosistency\ index}. \tag{8}$$

[0,1] aralığındaki CR değeri ne kadar küçük olursa, karşılaştırma matrisinin daha tutarlı olduğu ve dolayısıyla karar verme sonucunun daha güvenli olduğu anlamına gelir. Tutarlılık indeksi için kullanılan değerler Tablo 1'de verilmiştir. a_{BW} referans değeri (Best-Worst karşılaştırması) ve kriter sayısına göre karar sonucunun kabul edilebilir olması için CR değerinin belirli bir eşiğin altında olması gerekir. Bu eşik değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tabloya göre,



Şekil 2. En iyi ve en kötü alternatiflerle referans karşılaştırmaları (Reference comparisons with the best and the worst alternatives)

Tablo 1. BWM yönteminde kullanılan tutarlılık indeksi değerleri (Consistency index values used in the BWM method)

a_{BW}	2	3	4	5	6	7	8	9
Tutarlılık indeksi	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

Tablo 2. Kabul edilebilir CR eşikleri (Acceptable CR thresholds)

a_{BW} \ Kriter	3	4	5	6	7	8	9
3	0,2087	0,2087	0,2087	0,2087	0,2087	0,2087	0,2087
4	0,1581	0,2352	0,2738	0,2928	0,3102	0,3154	0,3273
5	0,2111	0,2848	0,3019	0,3309	0,3479	0,3611	0,3741
6	0,2164	0,2922	0,3565	0,3924	0,4061	0,4168	0,4225
7	0,2090	0,3313	0,3734	0,3931	0,4035	0,4108	0,4298
8	0,2267	0,3409	0,4029	0,4230	0,4379	0,4543	0,4599
9	0,2122	0,3653	0,4045	0,4225	0,4445	0,4587	0,4747

örneğin 6 kriter varsa ve $a_{BW} = 7$ ise, CR için eşik değeri 0,3931'dir, yani $CR \leq 0{,}3931$ değerlerine sahip olan karşılaştırma matrisleri kabul edilebilirdir.

Kriter ağırlıklarının hesaplanmasında AHP ve BWM gibi yöntemlerin yanı sıra daha basit, doğrudan değerlendirme yaklaşımı da kullanılabilir. Bu amaçla, ölçeğe göre değerlendirme ("Çok önemli", "Önemli", "Önemli değil", "Önemsiz"), doğrudan sayısal değer atama veya görsel kaydırma çubukları aracılığıyla değer atama kullanılabilir. Özellikle mobil uygulamalarda son iki yöntem, yani ölçeğe göre değer atama ve görsel kaydırma yöntemi daha kolay ve çekici olabilir.

Kriter önem seviyelerinin kullanıcı tarafından belirli bir aralıktaki (örneğin 1 ile 10 arası) değerler olarak belirlendiğini varsayalım. Her bir i kriterinin önem ağırlığı (ham ağırlık) w_i olsun. Bu durumda kriterlerin normalleştirilmiş ağırlıkları Eş. 9 şeklinde hesaplanabilir:

$$\text{her } i \text{ için } w_i = \frac{w_i}{\sum_i w_i}. \tag{9}$$

Açıkçtır ki, bu durumda kriterlerin normalleştirilmiş ağırlıkları Eş. 10'daki normalleştirme koşulunu karşılayacaktır:

$$\text{her } i \text{ için } \sum_i w_i = 1, \text{ ve } w_i \geq 0. \tag{10}$$

Bu bölümde ele aldığımız yöntemlerden her biri KDE değerinin hesaplanmasında dikkate alınan faktörlerin ağırlıklarının hesaplanması için kullanılabilir.

2.2. Modifiye Dijkstra Algoritması (The Modified Dijkstra Algorithm)

Modifiye Dijkstra algoritmasında, duraklar arasında hesaplanan optimal rota, geçilecek durak sayısının yanısıra, bunun üzerine transfer ve yürüme cezaları eklenerek, belirli kaynak ve hedef durakları arasındaki güzergahın maliyet değeri hesaplanmaktadır. Optimal yolun belirlenmesi için literatürde çeşitli graf (çizge) topolojileri kullanılmaktadır. P-uzay, L-uzay, B-uzay, C-uzay gibi topolojiler ve bunların multigraf versiyonları olan P', L', B' ve C'-uzay topolojileri genellikle toplu taşıma ağlarının modellenmesinde kullanılan topolojilerdir [39,47-50]. P'-uzay topolojisine dayanan [36] çalışmasındaki önerilen optimal yol modeli, sadece yolun uzunluğu değil aynı zamanda hatlar arası aktarma sayısını ve toplam yürüme mesafesini de dikkate almaktadır, dolayısıyla daha uygun bir yaklaşım gibi görünmektedir. Bu nedenle bu çalışmamızda, [36] çalışmasında önerilen Modifiye Dijkstra algoritmasına dayalı optimal güzergah belirleme yaklaşımını kullanacağız. Modifiye Dijkstra algoritmasının detayları aşağıda verilmiştir.

Durakların $i = 1,2, \dots, n$ olarak işaretlendiğini varsayalım. $W: n \times n$ matrisi, (i, j) durak çifti arasındaki geçilmesi gereken durak sayısını (yani hattın uzunluğunu) belirtir. Bazı durak çiftleri arasında doğrudan bir gidiş yok ise, ilgili $w_{i,j}$ değeri $INFINITY$ olacaktır (Eş. 11):

$$W = \begin{bmatrix} 0 & w_{1,2} & w_{1,3} & \dots & w_{1,n} \\ w_{2,1} & 0 & w_{2,3} & \dots & w_{2,n} \\ & & \dots \dots \dots & & \\ w_{n,1} & w_{n,2} & \dots & w_{n,n-1} & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

Her durak çifti (i, j) için rotanın maliyet değeri, klasik Dijkstra algoritmasında sadece $W: n \times n$'in matrisi aracılığıyla hesaplanır. Belirli bir başlangıç durağı s_O'dan varış durağı s_D'ye kadar olan güzergahı π_{S_O,S_D} ile işaretleyelim. Bu güzergahta kullanılan otobüs hatları $h_i, i = 1, \dots, m$, olsun. Böylece başlangıç noktasından varış noktasına kadar olan güzergahın toplam uzunluğu Eş. 12'de verildiği gibi olacaktır:

$$w(\pi_{S_O,S_D}) = \sum_{t=1}^{m} w(h_i), \tag{12}$$

Burada $w(h_i)$, ilgili h_i hattı tarafından kat edilen güzergah bölümünün uzunluğunu belirtir. Bu uzunlukların hesaplanmasında W matrisi kullanılır. Klasik Dijkstra algoritmasında başlangıç ve varış durakları arasındaki en kısa rota Eş. 13'deki kriter dikkate alınarak hesaplanır:

$$w(\pi_{S_O,S_D}) \longrightarrow min \tag{13}$$

Modifiye Dijkstra algoritmasında kullanılan optimizasyon kriteri ise Eş. 14 şekilde ifade edilebilir:

$$c(\pi_{S_O,S_D}) = w(\pi_{S_O,S_D}) + w_Penalty + t_Penalty \longrightarrow min, \tag{14}$$

Burada $c(\pi_{S_O,S_D})$, rotanın maliyet değeridir, $w_Penalty \geq 0$ değeri ise hatlar arasındaki transfer sayısını en aza indirmek için kullanılan transfer başına cezadır. Duraklar arasında kesintisiz tekrarlanan yaya yürüyüşlerini en aza indirmek için kullanılan $t_Penalty \geq 0$ ise tekrar yürüyüş başına cezadır.

Modifiye Dijkstra algoritmasında, W matrisinin yanı sıra kullanılan diğer girdi matrisi $L: n \times n$ Eş. 15'teki gibidir:

$$L = \begin{bmatrix} \emptyset & l_{1,2} & l_{1,3} & \dots & l_{1,n} \\ l_{2,1} & \emptyset & l_{2,3} & \dots & l_{2,n} \\ & & \dots \dots \dots & & \\ l_{n,1} & l_{n,2} & \dots & l_{n,n-1} & \emptyset \end{bmatrix}, \tag{15}$$

Burada $l_{i,j}$, i durağından j durağına kadar hizmet veren tüm hatların listesidir. Bu gösterimler doğrultusunda, Modifiye Dijkstra algoritmasının kabakodu Şekil 3'te verilmiştir.

Burada, amaç fonksiyonuna eklenen ceza değerlerini hesaplayan Şekil 4'teki fonksiyon, hatlar arasındaki transfer sayısını ve tekrarlanan yürüme durumlarını azaltmak için kullanılmaktadır. Fonksiyonun parametreleri *currentLines* ve *adjLines*, sırasıyla başlangıç noktasından mevcut durağa kadar olan hatların listesi ve mevcut durak ile bir sonraki deneme durağı arasındaki hatların listesidir. Diğer

parametreler olan $t_Penalty$, duraklar arasındaki kesintisiz tekrarlı yaya yürüyüşlerini en aza indirmek için uygulanan cezadır ve $w_Penalty$ ise hatlar arasındaki aktarma sayısını en aza indirmek için kullanılan cezadır.

```
function Dijkstra(W,L,s):
    create an empty list unvisited;
    create empty arrays l[],c[],p[];
    for each vertex v in Graph:
        c[v] = infinity;
        p[v] = undefined;
        add v to the list unvisited;
    c[s] = 0;
    while unvisited is not empty:
        u = vertex with min cost in the unvisited list;
        remove u from the list unvisited;
        for each neighbor v of u:
                create lines' list commonLines;
                penalty, commonLines = Penalty(l[u],L[u,v]);
            alt = c[u] + W[u,v] + penalty;
            if alt < c[v]:
                c[v] = alt;
                p[v] = p[v] + u;
    return c[], p[]
```

Şekil 3. Modifiye Dijkstra algoritmasının kabakodu.
(Pseudocode of the Modified Dijkstra algorithm)

```
function Penalty(currentLines,adjLines,w_Penalty,t_Penalty):
    create list commonLines;
    penalty = 0;
    if currentLines is null:
        if adjLines is null:
            penalty = w_Penalty;
        else:
            penalty = t_Penalty;
            commonLines = adjLines;
    else:
        if adjLines is null:
            penalty = w_Penalty;
        else:
            for each line in currentLines:
                if adjLines contains line:
                    add line to commonLines;
            if commonLines is null:
                penalty = t_Penalty;
                commonLines = adjLines;
    return penalty, commonLines
```

Şekil 4. Modifiye Dijkstra algoritmasında ceza değerlerinin hesaplanması.
(Calculation of penalty values in Modified Dijkstra algorithm)

3. Yöntem (Method)

3.1. Toplu Taşıma Ağı Mesafesi (The Public Transport Network Distance)

Bu çalışmada, Modifiye Dijkstra algoritması kullanılarak belirli kaynak ve hedef duraklar arasındaki güzergahın maliyet değeri, aynı zamanda bu duraklar arasındaki TTA mesafesi olarak önerilmektedir.

Tanım 1: Herhangi belirli s_O ve s_D durakları için, Eş. 16 eşitliği ile belirlenen TTA_dist değerine, bu duraklar arasındaki TTA mesafesi denilecektir:

$$TTA_dist(s_O, s_D) \stackrel{\text{def}}{=} Cost(s_O, s_D) = D(s_O, s_D) + c_T T(s_O, s_D) + c_W W(s_O, s_D). \quad (16)$$

Burada $D(s_O, s_D)$, s_O durağından s_D durağına giden güzergah üzerindeki toplam durak sayısını, $T(s_O, s_D)$ güzergah üzerinde yapılacak hat aktarma sayısını, $W(s_O, s_D)$ ise bu güzergah üzerinde aktarmalar sırasında gerekli olan toplam yürüme mesafesini göstermektedir. $c_T \geq 0$ ve $c_W \geq 0$, sırasıyla transfer ve yürüme için kullanılan ceza katsayılarıdır.

Açıktır ki, Modifiye Dijkstra algoritmasıyla hesaplanan TTA mesafesi, uzaklık ölçüsünün aşağıdaki özelliklerini sağlamaktadır:

i. Herhangi belirli s_O ve s_D durakları için, $TTA_dist(s_O, s_D) \geq 0$;
ii. Toplu taşıma ağındaki her bir durağın, kendisine özgü ve diğer duraklardan farklı enlem-boylam koordinatlarına sahip olduğu durumda: $TTA_dist(s_O, s_D) = 0$, ancak ve ancak $s_O = s_D$ olduğunda;
iii. Herhangi belirli s_O, s_A ve s_D durakları için, $TTA_dist(s_O, s_D) \leq TTA_dist(s_O, s_A) + TTA_dist(s_A, s_D)$;
iv. TTA, iki yönlü simetrik graf (çizge) şeklinde modellendiği durumlarda: $TTA_dist(s_O, s_D) = TTA_dist(s_D, s_O)$.

Fakat, belirtmek gerekiyor ki, kent TTA modellerinde genellikle yönlü ve simetrik olmayan çizge modeli kullandığından dolayı, iv) özelliği sağlanmaya bilir.

3.2. Konum Değerleme Endeksi (The Location Valuation Index)

Belirli bir konum için, konum değerleme endeksi (KDE) değerinin belirlenmesinde dikkate alınması gereken kriterleri iki açıdan değerlendirebiliriz. İlk olarak, ilgili konumdan şehrin diğer bölgelerine genel ortalama ulaşım kolaylığı dikkate alınabilir. Öte yandan, her ilgi grubundaki (the point of interest - POI) en yakın nesneye erişim kolaylığı da dikkate alınabilir (örneğin en yakın hastaneye erişim kolaylığı, en yakın metro istasyonuna erişim kolaylığı vb.).

Şehrin diğer bölgelerine genel ortalama ulaşım kolaylığı değerlendirildiğinde, bu konuma en yakın duraktan şehrin diğer tüm duraklarına gitmenin ortalama kolaylığı dikkate alınabilir. Bu durumda şehirdeki her durak bir POI nesnesi olarak değerlendirilecek ve erişim kolaylığı ortalama olarak hesaplanacaktır. Dolayısıyla, belirli bir s durağından belli bir g grubunun POI nesnelerine genel ortalama ulaşım kolaylığı Eş. 17'de verilen şekilde hesaplanabilir:

$$TTA_dist(s, g) = \frac{\sum_{POI \in g} TTA_dist(s, POI)}{n}, \quad (17)$$

Burada n, g grubundaki POI'ler olarak değerlendirilen durakların sayısıdır.

Diğer gruplarında, POI nesnelerine ortalama mesafeyi değil en yakın mesafeyi hesaplamak daha mantıklı olabilir. Örneğin hastane, metro, açık yeşil alan gibi gruplarda en yakın nesneye erişimin yeterli olduğu düşünülebilir. Bu durumda TTA mesafesi, Eş. 17 yerine, Eş. 18 gibi hesaplanabilir:

$$TTA_dist(s, g) = \min_{POI \in g} TTA_dist(s, POI). \quad (18)$$

Eş. 17 ve Eş. 18 formüllerindeki $TTA_dist(s, POI)$ değeri, Modifiye Dijkstra algoritması kullanılarak s durağı ile POI nesnesi arasındaki TTA mesafesidir.

Tanım 2: Eş. 19 şeklinde belirlenen değere, Konum Değerleme Endeksi (KDE) denilecektir:

$$KDE(s) = \frac{1}{\sum_{g \in G} w_g \cdot TTA_dist(s, g)}, \quad (19)$$

Burada w_g, $g \in G$ grubunun normalleştirilmiş ağırlığıdır.

w_g ağırlıklarının belirlenmesi için 2.1 bölümümde incelenmiş yöntemlerden herhangi birisi kullanılabilir. Karşılıklı kıyaslama sayısının daha az olmasından dolayı, BWM yönteminin kullanılması daha uygun olabilir. Ayrıca, kullanıcının tercihine bağlı olarak KDE değerini hesaplamak için çeşitli kriterler (POI grupları) kullanılabilir. Bu kriterlere örnek olarak şunlar verilebilir:

- Toplu taşıma olanaklarına erişebilirlik,
- Sağlık tesis alanlarına erişebilirlik,
- Eğitim tesis alanlarına erişebilirlik,
- Alışveriş merkezlerine erişebilirlik,
- İş yerine erişebilirlik,
- Yeme içme mekânlarına erişebilirlik.

Hesaplamaları azaltmak için her kriterden belirli sayıda önemli POI nesnesi dikkate alınabilir. Ayrıca her gruptaki tüm POI nesnelerine ortalama erişim kolaylığı veya gruptaki en yakın POI nesnesine erişim kolaylığı gibi tercihler de olabilir. Bu tercihler dikkate alınarak ilgili konuma ait KDE değeri hesaplanabilmektedir.

Dolayısıyla, KDE değerinin hesaplanması için bu çalışmada önerilen metodoloji, genel olarak aşağıdaki adımlarla özetlenebilir:

Algoritma 1 (KDE değerinin belirlenmesi):

Adım 1. KDE hesaplanmasında dikkate alınan kriterler seçilmelidir;
Adım 2. Kriter ağırlıkları hesaplanmalıdır;
Adım 3. Her bir kritere göre:

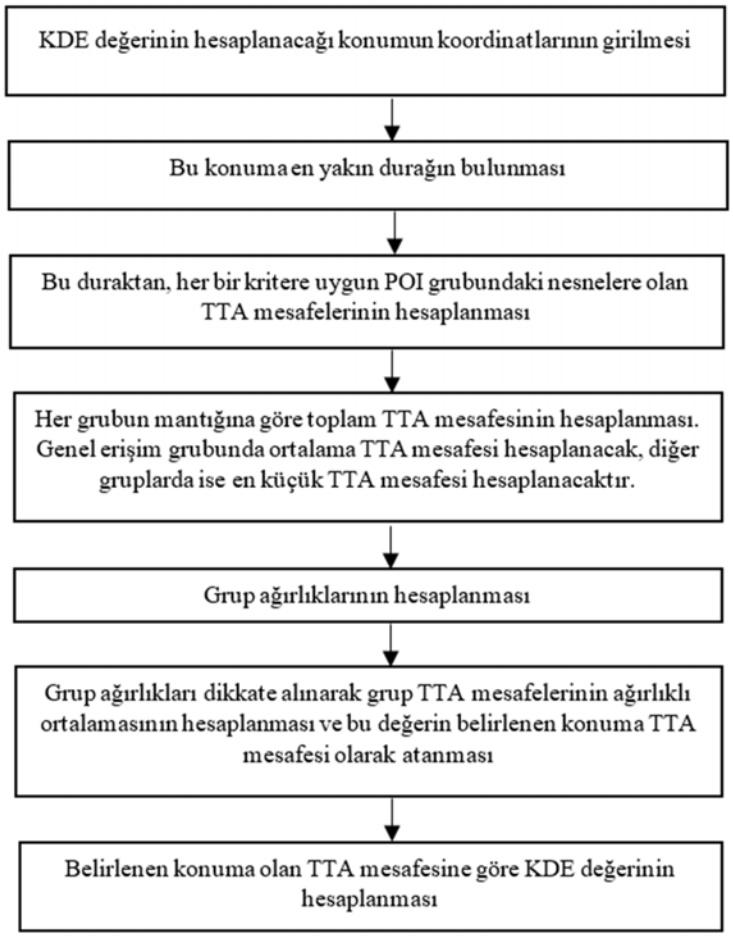
a) Belirli sayıda önemli POI nesnesi seçilmelidir;
b) TTA mesafesi, ilgili konumdan Adım 3.a'da seçilen tüm POI nesnelerine kadar hesaplanmalıdır;

Adım 4. Her bir kriter için TTA mesafeleri ve kriter ağırlığı dikkate alınarak ilgili konumun KDE değeri, genel ağırlıklı ortalama kullanılarak hesaplanmalıdır.

Daha detaylı anlatacak olursak, kriter ağırlıkları belirlendikten sonra belirli bir konumun KDE değerinin hesaplanması için Şekil 5'te verilen adımların uygulanması gerekmektedir.

3.3. Kentin KDE Isı Haritasının Oluşturulması Algoritması (Algorithm to Create a LVI Heatmap of the City)

Etkileşimli olarak girilen herhangi konumun KDE değerinin hesaplanması için bir önceki bölümde verilmiş olan Algoritma 1 kullanılabilir. Fakat, bazı durumlarda, genel değerlendirme açısından, kentin KDE değerlerini yansıtan bir haritanın olması daha uygun olabilir. Bu durumda, tek bir konumun KDE değerinin hesaplanması yerine, bir defaya tüm kentin KDE ısı haritasının hesaplanması sözkonusu olabilir. Şehrin KDE ısı haritasını oluşturmak için daha fazla POI nesnesi içeren çeşitli gruplar (kriterler) oluşturulabilir (örn. hastane, metro, alışveriş merkezi, üniversite vb.). Her gruptan nesnelere erişim kolaylığı açısından TTA mesafelerinin ortalaması veya minimumu dikkate alınabilir. Kentin ısı haritasını hesaplama algoritmasını aşağıdaki şekilde yazabiliriz:



Şekil 5. Belirlenen bir konumun KDE değerini hesaplama şeması (Calculation scheme of LVI value of a given location).

Algoritma 2 (Kentin KDE ısı haritasının oluşturulması):
Adım 1. KDE hesaplamasında kullanılacak kriterler (POI grupları) belirlenmelidir;
Adım 2. Kriterlerin (grupların) ağırlıkları hesaplanmalıdır;
Adım 3. Genel erişilebilirlik kriteri için bir dizi rasgele örnek referans duraklar seçilmelidir;
Adım 4. Her bir diğer kriter için uygun POI nesneleri belirlenmelidir;
Adım 5. Isı haritasını oluşturmak için şehir genelinde rastgele seçilen örneklem duraklar kümesindeki her bir durak için:

a) Bu duraktan ilgi grubundaki tüm duraklara olan TTA mesafeleri hesaplanmalı ve bu mesafelerin ortalaması bu durağa atanmalıdır;
b) Diğer POI gruplarından her $g \in \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ grubu için:

Bu duraktan, g grubunun en yakın nesnesine olan TTA mesafesi hesaplanmalı ve uygun grup etiketi ile bu durağa atanmalıdır;

c) Kriter ağırlıkları dikkate alınarak, genel erişim grubuna ve diğer POI gruplarına olan TTA mesafelerinin ağırlıklı ortalaması hesaplanmalıdır;
d) Bu durağın KDE değeri hesaplanmalı ve durak etiketiyle birlikte kaydedilmelidir;

Adım 6. Renk derecelerini belirlemek için tüm durakların KDE değerleri k-*ortalamalar* kümeleme algoritması ile kümelenmelidir;
Adım 7. Adım 6'daki her bir komşu küme merkezi arasındaki orta *eşik* değeri belirlenmeli ve eşik değerlerine göre renk ayarlamaları yapılmalıdır;
Adım 8. Tüm duraklar KDE değerlerine ve Adım *7'deki* renk ayarlarına göre renklendirilmelidir;
Adım 9. Kent haritası üzerinde her durağın bulunduğu yere uygun renkte daireler çizilmelidir.

Daha detaylı incelemelerde Algoritma 2'de Adım 5'teki rasgele örneklem yerine şehrin tüm durakları dikkate alınabilir. Ayrıca şehrin diğer tüm durakları da genel erişilebilirlik grubunda POI nesneleri olarak değerlendirilebilir. Ancak büyük metropollerde durak sayısının fazla olması durumunda bu süreç oldukça zaman almaktadır. Durak sayısı n olduğunda, yaklaşık $\frac{n(n-1)}{2}$ değerinde çeşitli rota hesaplamaları gerekir. Örneğin 5000 duraklı bir şehirde yaklaşık 12,5 milyon farklı güzergahın hesaplanması gerekiyor. Sıradan bilgisayarlarda bu, günlerce süren işlem süresi gerektirebilir. Bu bakımdan şehrin tüm bölgelerini temsil edecek şekilde belirli sayıda rastgele durağı örneklemek ve yalnızca bu duraklara olan TTA mesafelerinin ortalamasını dikkate almak en doğrusudur. Ayrıca ısı haritası noktalarının hesaplanmasında rastgele seçilen örnek durakların kullanılması daha rasyonel olacaktır.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

4.1. Veri Toplama (Data Collection)

Önerilen KDE yöntemi, İzmir'in toplu taşıma ağı verileri kullanılarak uygulanmıştır. İzmir şehri yaklaşık 4,5 milyonluk nüfusuyla Türkiye'nin üçüncü büyük metropol şehridir. İzmir'in otobüs toplu taşıma ağında 6475 durak ve 668 hat bulunmaktadır. İstasyon ve hat bilgilerine GitHub reposundan ulaşılabilir [50]. Durak bilgileri durağın numarasını, adını, enlem ve boylam koordinatlarını içerir. Bu çalışmada oluşturulan Python 3 uygulamasında kullanılmak üzere entegre bir veri dosyası hazırlanmıştır. Bu dosyada durakların enlem ve boylam bilgilerinin yanı sıra diğer duraklara olan güzergah uzunluklarının ortalaması (km), güzergahların aktarma durakları arasındaki toplam yürüme mesafelerinin ortalaması (m), aktarma sayılarının ortalaması ve güzergahların TTA mesafelerinin ortalaması her durak için kaydedilmiştir.

Bu çalışmada, kriterleri karşılayan POI nesneleri oluşturmak için toplam 43 metro istasyonu, 5 hastane ve 5 büyük açık yeşil alan kullanılmıştır. Değerlendirme esnasında dikkate alınan kriterler şunlardır: 1. Genel erişim, 2. Metro, 3. Sağlık tesis alanı ve 4. Açık yeşil alan. Kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için BWM yöntemi kullanılmıştır. En önemli kriter, "1. Genel erişim" ve en önemsiz kriter ise "3. Sağlık tesis alanı"dır. En önemli kriter ile referans karşılaştırma değerleri şunlardır:

$a_{B1} = 1$ (eşit derecede önemli), $a_{B2} = 3$ (önemli), $a_{B3} = 7$ (çok yüksek derecede önemli), $a_{B4} = 5$, (yüksek derecede önemli),
ve en önemsiz kriter ile karşılaştırma değerleri şunlardır:

$a_{1W} = 7$ (çok yüksek derecede önemli), $a_{2W} = 5$ (yüksek derecede önemli), $a_{3W} = 1$ (eşit derecede önemli), $a_{4W} = 3$ (önemli),

Burada $a_{BW} = a_{B3} = a_{1W} = 7$ olduğu görülmektedir. Bu değerler kullanılarak (3)-(7) probleminin çözümü Python'un doğrusal olmayan optimizasyon kütüphanesi "gekko" kullanılarak hesaplanmıştır. Problemin optimal çözümü Eş. 20'de olduğu gibidir:

$$\xi^* = 1{,}0;\ w_1 = 0{,}53;\ w_2 = 0{,}27;\ w_3 = 0{,}07;\ w_4 = 0{,}13. \quad (20)$$

$a_{BW} = 7$ olduğundan, Tablo 1'deki 3,73 tutarlılık endeksi değeri kullanılacaktır. Bu durumda, CR değeri Eş. 21'de olduğu gibi hesaplanacaktır.

$$\text{CR} = \frac{\xi^*}{3.73} = 0{,}27. \quad (21)$$

Kriter sayısının 4 ve $a_{BW} = 7$ olduğu düşünüldüğünde, Tablo 2'deki CR eşik değeri olan 0,3313 kullanılmalıdır. Sonuç olarak, $\text{CR} = 0{,}27 \leq 0{,}3313$ olduğundan dolayı, hesaplanan kriter ağırlıkları geçerlidir, dolayısıyla kullanılabilir.

POI grupları (kriterler), kriter ağırlıkları, her gruptaki POI sayısı ve aynı gruptaki toplu değerleri hesaplama yöntemi Tablo 3'te verilmiştir.

4.2. Uygulama sonuçları ve tartışma (Application results and discussion)

KDE değerlerinin ve şehrin KDE ısı haritasının hesaplanması için önerilen algoritma Python 3'te kodlanmıştır. Algoritmalarda maksimum yürüme mesafesi 300 metre olarak ayarlanmıştır. Her rotanın maliyet puanı, başlangıç ve hedef duraklar arasında geçen durak sayısına göre belirlenir. Güzergahtaki her hat aktarımı için 3 ceza puanı, duraklar arasında tekrarlanan her yürüyüş için ekstra 3 ceza puanı güzergahın maliyet puanına eklenir. Her durağın KDE değerinin hesaplanmasında formül Eş. 19 kullanılır. Algoritmanın parametreleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

Tablo 3. İzmir örneğinde kullanılan POI nesneleri (POI objects used in the Izmir example)

Grup numarası	Grup adı	Kriterlerin ağırlıkları	POI sayısı	Toplama yöntemi
1	Genel erişim	0,53	10	Ortalama
2	Metro	0,27	43	Minimum
3	Sağlık tesis alanı	0,07	5	Minimum
4	Açık yeşil alan	0,13	5	Minimum

stops = 6475 *# toplam durak sayısı*
routes= 668 *# toplam hat sayısı*
randomTargets = 10 *# rastgele seçilen hedef durak sayısı*
maxWalking = 300 *# duraklar arasında bir seferde izin verilen maksimum yürüme mesafesi (m)*
$c_T = 3$ *# her bir transfer için ceza puanı*
$c_W = 3$ *# her bir yürüme için ceza puanı*

Uygulamada, enlem ve boylam koordinatları ile verilen herhangi $X = (\phi_1, \lambda_1)$ ve $Y = (\phi_2, \lambda_2)$ coğrafi noktaları arasındaki mesafe Eş. 22 formülü kullanılarak hesaplanır [52, 53]:

$$d(X,Y) = 2R\ sin^{-1}\left(\left[sin^2\left(\frac{\phi_1-\phi_2}{2}\right) + cos\phi_1 cos\phi_2 sin^2\left(\frac{\lambda_1-\lambda_2}{2}\right)\right]^{0.5}\right). \quad (22)$$

Burada R Dünya'nın yarıçapıdır ($R = 6367450$ m).

Yazılım kullanılarak, ilgi duyulan konumun KDE değerinin yanı sıra, en yakın durak, otobüs güzergah mesafesi, hat aktarmalarında yürüme mesafesi, hat aktarma sayısı, güzergah maliyet değeri her bir kriter grubu için hesaplanır ve "[stop]_cost_POI.txt" dosyasına kaydedilir. Hesaplanan bilgiler POI gruplarına (kriterlere) göre farklılık gösterir. Örnek olarak, Tablo 4'te 112 numaralı başlangıç durağı için genel erişim kriterlerine göre elde edilen sonuçlar verilmektedir. Bu gruptaki bilgiler şehrin seçilen referans duraklarına giden güzergahların ortalamalarını yansıtmaktadır. Tablo 5'te ise, 112 numaralı duraktan diğer gruplardaki objeler için, uygun POI grubunun en yakın durağına kadar olan güzergahın bilgisi de ek olarak verilmektedir.

Genel ulaşım kriteri, şehrin diğer noktalarına genel ulaşım kolaylığını yansıtmaktadır. Şehir genelindeki 6475 durağın her birine ulaşımın hesaplanması uzun zaman aldığından, şehrin çeşitli bölgelerini kapsayan 10 durak rasgele şekilde seçilmiştir. Toparlama (agregasyon) yöntemi olarak bu gruptaki maliyet değerlerinin ortalama yöntemi kullanılmıştır. Diğer gruplarda, her gruptan 5 ila 43 arasında önemli POI nesnesi seçilmiştir. Bu gruplarda toparlama yöntemi olarak minimum yöntemi kullanılmıştır.

Tüm kentin KDE ısı haritasını oluşturmak için şehrin çeşitli yerlerinden rastgele 300 konum seçilmiştir. Her konumun KDE değeri, her konumun en yakın durağı ve Tablo 3'te verilen kriter ağırlıkları kullanılarak, Eş. 19'a göre hesaplanmıştır. Konumların KDE değerleri [0,7227; 4,0390] aralığındadır. Bu değerler k-means algoritması ile 5 kümeye ayrılmaktadır. Komşu küme merkezlerinin ortalama değerleri ayrılarak KDE seviyeleri belirlenmiş ve her seviye için renk ayarlamaları yapılmıştır. Renkler kırmızıdan (en düşük KDE değeri) maviye (en yüksek KDE değeri) ayarlanmıştır. Küme merkezlerine ve KDE değerlerine göre renk ayarları Tablo 6'da yer almaktadır.

Şekil 6'da Python "gmplot" kütüphanesi kullanılarak durakların enlem ve boylam koordinatlarına göre KDE değerlerinin ısı haritasından bir fragman, İzmir haritası üzerine çizilmiştir. Şekilde turuncu daireler daha düşük KDE değerlerine sahip konumlar, mavi daireler daha yüksek KDE değerlerine sahip konumlardır. Yeşil renkli yerler ise orta KDE değerlerine sahip yerlerdir.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussion)

Gayrimenkullerin değerlendirilmesinde hedonic fiyatlama modeli sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda, bu modelde kullanılan diğer özelliklerin yanısıra, gayrimenkulün erişim özelliğinin, dolayısıyla konum özelliğinin etkisinin çok önemli olduğu belirtilmektedir. Örneğin, Heyman vd. [34] çalışmasında, gayrimenkulün özelliklerinin örtülü değerlerini tahmin etmeye yönelik bir yöntem olan hedonik fiyat modellerinde kullanılan erişilebilirlik özelliğinin önemini vurgulayarak, hesaplanmasında kullanılan çeşitli yaklaşımları incelemiştir. Fakat, uygun konut seçimi, genellikle altevnatiflerin karşılaştırmalı değerlendirilmesi şeklinde yapılmaktadır, konutun bağımsız değerini yansıtabilen bir indeks bulunmamaktadır. Konutun toplu taşıma ağı açısından erişilebilirlik değerini diğer alternatiflerden bağımsız olarak ölçebilen bir endeks ilk olarak bizim çalışmamızda ele alınmakta ve çözümlenmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada toplu taşıma ağı (TTA) mesafesine dayalı konum değerleme endeksi (KDE) ve hesaplama metodolojisi ilk kez önerilmektedir.

KDE, toplu taşıma ile kentin çeşitli bölgelerine erişim kolaylığının yanı sıra, ikamet yerinden şehrin önemli sosyal ve kentsel kullanım alanlarına erişim kolaylığını da dikkate alır. Ulaşım kolaylığı belirlenirken, toplu taşıma olanaklarına, sağlık tesis alanlarına, eğitim tesis alanlarına, alışveriş merkezlerine, iş yerine, yeme içme mekânlarına erişim kolaylığı gibi çok sayıda kriter dikkate

Tablo 4. 112 nolu durak örneğinde genel erişim grubu için hesaplanan bilgiler (Information calculated for the overall access group).

Başlangıç durağı	Kriter	Otobüsle ortalama mesafe (km)	Ortalama yürüme mesafesi (m)	Ortalama transfer sayısı	Grup için ortalama TTA mesafesi
112	Genel erişim	37,39	343,33	2,0	62,4

Tablo 5. 112 nolu durak örneğinde diğer gruplar için hesaplanan bilgiler (Information calculated for the other groups).

Başlangıç durağı	Kriter	Grubun en yakın durağı	Güzergahın otobüsle toplam mesafesi (km)	Hat transferleri için toplam yürüme mesafesi (m)	Güzergahın aktarma sayısı	İlgili grup için TTA mesafesi
112	Metro	77	0,85	251,18	0	8
	Sağlık tesis alanı	5674	4,36	0	0	14
	Açık yeşil alan	179	6,37	368,98	1	18

Tablo 6. KDE değerlerine dayalı kümeler ve renk ayarları (Clusters and color settings based on LVI values).

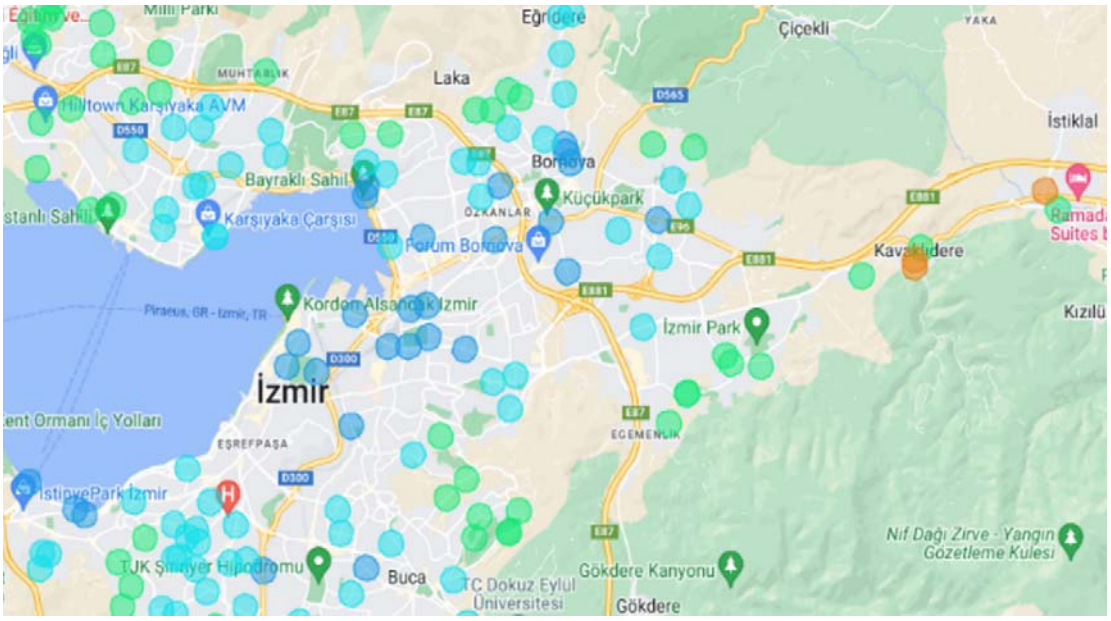
Küme merkezleri	Küme eşikleri	KDE aralıkları	Renkler
1,049	1,351	KDE < 1,351	"#FF3333" (kırmızı)
1,653	1,9605	KDE <1,9605	"#BD1694" (turuncu)
2,268	2,525	KDE<2,525	"#11EC78" (yeşil)
2,782	3,107	KDE<3,107	"#11E2EC" (turkuaz)
3,432	-	aksi takdirde	"#159BE7" (mavi)

alınmaktadır. Bu nedenle, KDE değerinin hesaplanması, çalışmada çok kriterli bir problem olarak ele alındı. Kriterlerin ağırlıklarının hesaplanmasında eniyi – enkötü (BWM) yöntemi kullanıldı. KDE değerlerinin belirlenmesi için temel olan TTA mesafelerinin hesaplanmasında Modifiye Dijkstra algoritması kullanıldı. Bu çalışma, Türkiye'nin 3. büyük metropol şehri olan İzmir'in TTA verileri kullanılarak simüle edildi ve KDE değerlerine göre şehrin ısı haritası oluşturuldu. Oluşturulan haritada, kentin işlek caddelerine yakın yerlerde KDE değerlerinin daha yüksek olduğu, uçkar yerlerde ise KDE değerlerinin daha düşük olduğu görüldü. Böylece, önerilen KDE değerlerinin mantığa uygun sonuçlar verdiği görüldü.

Yeni önerilen KDE yönteminin, verdiği tercih sıralaması sonuçlarının geçerliliğini test etmek için kentin çeşitli yerlerinden rasgele olarak on konum seçildi. Bu rasgele seçilen konumlar için, literatürde yaygın olarak kullanılan TOPSIS yöntemi ile de tercih sıralaması yapıldı [11-13]. Lokasyonların TTA mesafe değerleri ve KDE değerleri Tablo 7'te verilmiştir.

TOPSIS yöntemi ile tercih sıralamasının oluşturulması için "Genel Erişim", "Metro", "Sağlık tesis alanı" ve "Açık Yeşil Alan" kriterleri dikkate alındı. Kriter ağırlıkları, diğer hesaplamalarımızda kullanılan ağırlıklara eşdeğer olarak, Tablo 3'te olduğu gibi kabul edildi. Bu bilgiler doğrultusunda, TOPSIS yönteminin çalıştırıla bilmesi için Tablo 8'de olduğu gibi kriterler bazında karar matrisi oluşturuldu. Kriterlerin her biri uzaklıkları yansıttığına göre, bu değerleri daha düşük olan alternatifler dasha tercih edilir durumdadır. Bu doğrultuda, Tablo 8'de yer alan alternatifler bazında normalizasyon dönüşümlerini de uyguladıktan sonar, "pozitif" ve "negatif" ideal çözümler, uygun olarak A*=(0.1414, 0.0213, 0.0081, 0.0151) ve A-=(0.2178, 0.2010, 0.0415, 0.0933) şeklinde olacaktır. Nihayetinde, TOPSIS yöntemine göre hesaplanan tercih sonuçları Tablo 9'da yansıtılmıştır.

Tablo 9'den görüldüğü üzere, 1.,2.,5.,8.,9. ve 10. tercih sıraları her iki yöntemle de aynı olarak hesaplanmıştır. Sadece 3 ile 4 sıralaması ve 6 ile 7 sıralamasının değiştiği görülmüştür. Diğer değişle, 10 tercih arasında sadece 3 ve 4 ile 6 ve 7 nolu tercihler birer basamak yer değiştirmiştir ki, bu da yeni önerilen KDE yönteminin sonuçlarının TOPSIS yöntemiyle çok yüksek uyum sağladığını göstermektedir. Öte yandan, TOPSIS yönteminin çalışabilmesi için, tüm diğer ÇKKV yöntemlerinde olduğu gibi, tüm alternatiflerin kriterler bazında değerlendirmelerini içeren karar matrisinin biliniyor olması gerekmektedir. Lakin, KDE yöntemi, diğer alternatiflerin bilgilerine gerek duymaksızın, sadece ilgili alternatif için daha basit ve direct değerlendirme sağlaya bilmektedir.



Şekil 6. KDE değerlerine göre İzmir kentinin ısı haritasından bir fragman.
(A fragment of the heatmap of Izmir city according to LVI values)

Tablo 7. Rasgele seçilen 10 konum için ortalama TTA mesafeleri ve KDE değerleri
(Average PTN distances and LVI values for 10 randomly selected locations).

Örnek konumlar	En yakın durak	Genel erişim mesafesi	Metroya olan mesafe	Sağlık tesis alanına olan mesafe	Açık yeşil alana olan mesafe	KDE değeri
1	90	66.8	18	20	17	0.02279
2	275	69.9	20	19	29	0.02103
3	1205	69.4	7	10	15	0.02420
4	1725	64.4	11	21	25	0.02391
5	2481	70.3	13	18	13	0.02287
6	3067	99.2	29	51	19	0.01505
7	4525	70.3	14	13	12	0.02298
8	5703	74.6	31	18	42	0.01831
9	5813	69.5	21	13	27	0.02131
10	6191	99.0	66	50	74	0.01199

Tablo 8. Alternatif konumlar için kriterler bazında puanlar (Scores based on criteria for alternative locations).

Alternatifler	Genel erişim mesafesi	Metroya olan mesafe	Sağlık tesis alanına olan mesafe	Açık yeşil alana olan mesafe
1	66.8	18	20	17
2	69.9	20	19	29
3	69.4	7	10	15
4	64.4	11	21	25
5	70.3	13	18	13
6	99.2	29	51	19
7	70.3	14	13	12
8	74.6	31	18	42
9	69.5	21	13	27
10	99.0	66	50	74

Tablo 9. Rasgele seçilen 10 konum için TOPSIS değerlendirme sonuçları (TOPSIS evaluation results for 10 randomly selected locations).

Örnek konumlar	En yakın durak	KDE değeri	Positif ideal çözümden uzaklıklar	Negatif ideal çözümden uzaklıklar	Ideal çözüme yakınlık derecesi	TOPSIS tercih sırası	KDE tercih sırası
1	90	0.02279	0.0412057	0.1645467	0.7997315	5	5
2	275	0.02103	0.0524311	0.1563671	0.7488911	6	7
3	1205	0.02420	0.0116151	0.1941449	0.9435502	1	1
4	1725	0.02391	0.0256531	0.1857471	0.8786514	2	2
5	2481	0.02287	0.0280490	0.1755293	0.8622203	3	4
6	3067	0.01505	0.1113893	0.1126963	0.5029163	9	9
7	4525	0.02298	0.0301566	0.1734124	0.8518606	4	3
8	5703	0.01831	0.0910112	0.1224982	0.5737370	8	8
9	5813	0.02131	0.0535689	0.1549155	0.7430557	7	6
10	6191	0.01199	0.2182042	0.0009253	0.0042224	10	10

Önerilen KDE yönteminin sağlıklı çalışması için bazı sınırlamaların da dikkate alınması gerekmektedir. KDE değerlerinin belirlenmesi toplu taşıma ağı kullanarak erişim kolaylığına dayandığından dolayı, önerilen bu endeksin geniş toplu taşıma ağına sahip olan büyük kentlerde daha sağlıklı çalışacağı açıktır. TTA ağı çok yaygın olmayan küçük şehirlerde bu yöntemin kullanılması sağlıklı sonuçlar vermeyebilir.

Sonuç olarak, bu çalışmada önerilen konum değerleme endeksinin, büyük şehirlerde konut ve kira fiyatlarının belirlenmesindeki keyfiliği azaltarak, objektif kriterlere dayalı fiyatların oluşturulmasına katkı sağlayabileceğini düşünüyoruz. Gelecek çalışmalarda, KDE değerlerinin daha sofistike yöntemler ve/veya bulanık mantık yaklaşımları kullanarak hesaplanması düşünülebilir.

Kaynaklar (References)

1. Smith S.J., Munro M., Christie H., Performing (Housing) Markets, Urban Studies, 43 (1), 81–98, 2006.
2. Ferrero A., House Price Booms, Current Account Deficits, and Low Interest Rates, Journal of Money A., Credit and Banking, 47 (no. S1), 261-293, 2015.
3. Nursoleh N., Location Analysis of Interest in Buying Housing in South Tangerang City. AKADEMIK: Jurnal Mahasiswa Ekonomi &Amp; Bisnis, 2 (1), 35–42, 2022.
4. Jiang Y., Lv A., Yan Z., Yang Z., A GIS-Based Multi-Criterion Decision-Making Method to Select City Fire Brigade: A Case Study of Wuhan, China. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 10, 777, 2021.
5. Herath S., Elevating the Value of Urban Location: A Consumer Preference-Based Approach to Valuing Local Amenity Provision. Land, 10, 1226, 2021.
6. Aydin N., Seker S., Özkan B., Planning Location of Mobility Hub for Sustainable Urban Mobility, Sustainable Cities and Society, 81, 103843, 2022.
7. Shafii M., Afrazandeh S.M., Charrahi Z., Al-Modaresi S.A., Askari R., The Optimized Location of Hospitals Using an Integrated Approach GIS and Analytic Hierarchy Process: A Case Study in Iran, Iran J Health Sci, 11 (3), 195-206, 2023.
8. Zhang H., Wei G., Wei C., TOPSIS Method for Spherical Fuzzy MAGDM Based on Cumulative Prospect Theory and Combined Weights and Its Application to Residential Location, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 42 (3), 1367 – 1380, 2022.
9. Hwang C.L., Yoon K., Multiple attribute decision making: methods and applications: a state-of-the-art survey, Springer-Verlag, New York, 1981.
10. Triantaphyllou E., Multi-criteria decision making methods: a comparative study, Springer, US, 2000.
11. Olson D., Comparison of weights in TOPSIS models, Mathematical and Computer Modelling, 40, 721–7, 2004.
12. Hwang C-L., Lai Y-J., Liu T-Y., A new approach for multiple objective decision making, Computers & Operations Research, 20, 889–99, 1993.
13. Lai Y-J., Liu T-Y., Hwang C-L., TOPSIS for MODM, European Journal of Operational Research, 76, 486–500, 1994.
14. Saaty T.L., Decision making with dependence and feedback: the analytic network process, RWS Publications, Pittsburgh, PA, 2001.
15. Saaty T.L., How to make a decision: the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 48, 9–26, 1990.
16. Opricovic S., Tzeng G-H., Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS, European Journal of Operational Research, 156, 445–55, 2004.
17. Opricovic S., Tzeng G-H., Extended VIKOR method in comparison with outranking methods, European Journal of Operational Research, 178, 514–29, 2007.
18. Roy B., The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, Theory and Decision, 31, 49–73, 1991.
19. Brans J.P., Mareschal B., Vincke P., PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis, In: Brans JP (Eds.), Operational research, IFORS 84, North Holland, Amsterdam, 477–90, 1984.
20. Brans J.P., Vincke P., Mareschal B., How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method, European Journal of Operational Research, 24, 228–38, 1986.
21. Brans J.P., Vincke P., Note—A preference ranking organization method (The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making), Management Science, 31, 647–56, 1985.
22. Toloie-Eshlaghy A., Homayonfar M., Aghaziarati M., Arbabiun P., A subjective weighting method based on group decision making for

ranking and measuring criteria values, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5 (12), 2034-2040, 2011.
23. Xu X., The SIR method: a superiority and inferiority ranking method for multiple criteria decision making, European Journal of Operational Research, 131, 587–602, 2001.
24. Kersuliene V., Turskis Z., Integrated fuzzy multiple criteria decision making model for architect selection, Technological and Economic Development of Economy, 17, 645–66, 2011.
25. Jessop A., IMP: a decision aid for multiattribute evaluation using imprecise weight estimates, Omega, 49, 18–29, 2014.
26. Wallenius J., Dyer J.S., Fishburn P.C., Steuer R.E., Zionts S., Deb K., Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: recent accomplishments and what lies ahead, Management Science, 54 (7), 1336–1349, 2008.
27. Karadağ A.A., Gültekin Y. S., Açık ve Yeşil Alanların Konut Seçimine Etkisinin Belirlenmesi Temelinde Bir Ölçek Geliştirme Çalışması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7 (1), 223-238, 2019
28. Shafiei M.W.M., Abadi H., Osman W.N., The indicators of green buildings for Malaysian property development industry, International Journal of Applied Engineering Research, 12 (10), 2182-2189, 2017.
29. Goh Z.T., Low S.T., Choong W.W., Wee S.C., Do green features increase housing value in Malaysia?, International Journal of Housing Markets and Analysis, 15 (5), 1296-1312, 2022.
30. Adamec J., Janoušková S., Hák T., How to Measure Sustainable Housing: A Proposal for an Indicator-Based Assessment Tool, Sustainability, 13, 1152, 2021.
31. Morancho A.B., A hedonic valuation of urban green areas, Landscape and Urban Planning, 66, 35–41, 2003.
32. Hosseini S.M.A., Ghalambordezfooly R., de la Fuente A., Sustainability Model to Select Optimal Site Location for Temporary Housing Units: Combining GIS and the MIVES–Knapsack Model, Sustainability, 14, 4453, 2022.
33. Nebati E.E., Ekmekçi İ., Başlıgil H., Proposal of index model in performance measurement: Shopping mall application, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (3), 1403-1415, 2023.
34. Heyman A.V., Law S., Pont M.B., How is Location Measured in Housing Valuation? A Systematic Review of Accessibility Specifications in Hedonic Price Models, Urban Science, 3 (1), 3, 2019.
35. Dijkstra E.W., A note on two problems in connexion with graphs, Numer. Math., 1, 269–271, 1959.
36. Bozyiğit A., Alankuş G., Nasiboğlu E., Public transport route planning: Modified Dijkstra's algorithm, In: International Conference on Computer Science and Engineering, (UBMK), Antalya, Turkey, 502–505, 2017.
37. Bozyigit A., Alankus G., Nasibov E., A public transport route recommender minimizing the number of transfers, Sigma J. Eng. Nat. Sci., 9 (4), 437–446, 2018.
38. Nasibov E.N., Diker A., Nasibov E., A multi criteria route planning model based on fuzzy preference degrees of stops, Appl. Soft Comput., 49, 13–26, 2016.
39. Nasiboglu R., Dijkstra solution algorithm considering fuzzy accessibility degree for path optimization problem, Applied Soft Computing, 130, Article 109674, 2022.
40. Nasiboğlu R., Şehir içi toplu taşımada otobüs içi yoğunluğun OWA toparlama operatörü aracılığıyla modellenmesi, In: Gürbüz F. (Eds.), Fen Bilimleri ve Matematik Alanında Güncel Araştırmalar, Duvar Yayınları, 21–38, 2020. ISBN: 978-625-7680-07-3.
41. Saaty T., Peniwati K., Group Decision Making: Drawing out and Reconciling Differences. Pittsburgh, RWS Publications, Pennsylvania, 2008. ISBN 978-1-888603-08-8.
42. Saracoglu B.O., Selecting industrial investment locations in master plans of countries, European Journal of Industrial Engineering, 7 (4), 416–441, 2013.
43. Forman E.H., Saul I.G., The analytical hierarchy process—an exposition, Operations Research, 49 (4), 469–487, 2001.
44. Rezaei J., A Concentration Ratio for Non-Linear Best Worst Method, International Journal of Information Technology & Decision Making, 19 (3), 891-907, 2020.
45. Rezaei J., Best-worst multi-criteria decision-making method, Omega, 53, 49-57, 2015.
46. Pamucar D., Ecer F., Cirovic G., Arlasheedi M.A., Application of Improved Best Worst Method (BWM) in Real-World Problems, Mathematics, 8, Article 1342, 2020.
47. Ceder A., Public transit planning and operation: theory, modelling and practice, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007.
48. Costa L.F., Rodrigues F.A., Travieso G., Villas Boas P.R., Characterization of complex networks: A survey of measurements, Advances in Physics, 56 (1), 167-242, 2007.
49. Ferber C., Holovatch T., Holovatch Y., Palchykov V., Network harness: metropolis public transport, Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 380 (1-2), 585–591, 2007.
50. Ferber C., Holovatch T., Holovatch Y., Palchykov V., Public transport networks: empirical analysis and modeling, The European Physical Journal B—Condensed Matter and Complex Systems, 68 (2), 261–275, 2009.
51. Izmir PTN data, https://github.com/resilla/FuzzyDijkstra/blob/main/IzmirPTNData.rar, 2022 (erişim 15 Kasım 2022).
52. Brummelen G.R., Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry, Princeton University Press, 2013.
53. Sinnott R.W., Virtues of the Haversine, Sky Telescope, 68 (2), 158, 1984.