Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 39:2 (2024) 1255-1270

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

Evaluating geometric similarities between indoor navigation paths and navigation patterns of pedestrians through Geographic Information System and Multi-Criteria Decision Analysis

Atakan Bilgili*, Alper Şen, Melih Başaraner
Department of Geomatic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Yıldız Technical University, 34220, Istanbul, Türkiye

Highlights:

- A GIS-based approach for collecting navigation patterns of pedestrians
- A multi-step calculation of geometric similarity measures for navigation networks and navigation patterns
- An integrated approach based on GIS and MCDA to compare the geometric similarity between navigation networks and navigation patterns

Keywords:

- Indoor Navigation
- Navigation Network
- Navigation Patterns
- Geometric Similarity
- MCDA

Article Info:

Research Article
Received: 24.11.2022
Accepted: 25.06.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1209668

Acknowledgement:

The authors sincerely thank the Yildiz Technical University Directorate of Construction and Technical Affairs for providing the floor plans of the study area.

Correspondence:

Author: Atakan Bilgili
e-mail: atakanb@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 5345

Graphical/Tabular Abstract

The indoor paths conveyed to the end-users of navigation systems must align with their spatial reasoning to support their wayfinding process. To achieve this, the geometric properties of indoor paths followed by pedestrians should be similar to their navigation patterns. In this study, an integrated approach based on GIS and MCDA was proposed to assess geometric similarities between navigation networks and the navigation patterns of pedestrians (Figure A).

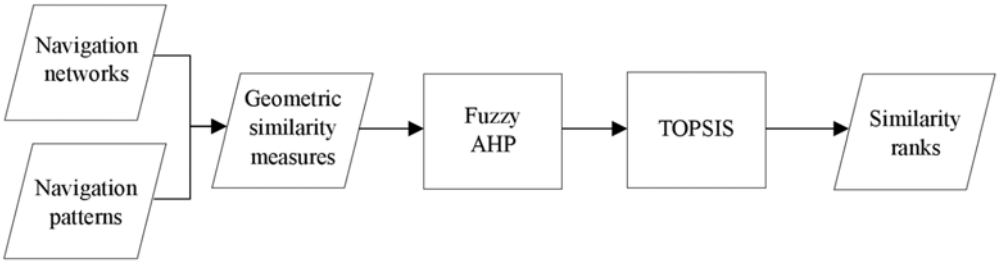


Figure A. Flowchart of the proposed methodology

Purpose:

The main purpose of the study is to establish an integrated approach for determining geometric similarities between indoor navigation networks and the navigation patterns of pedestrians, supporting the wayfinding process in indoor navigation.

Theory and Methods:

In the proposed integrated approach, first, four commonly used navigation networks (MAT, Grid, MPRSSE, UCN) were generated using the indoor map of the study area. Next, an experiment was conducted to collect the navigation patterns of pedestrians. Third, various geometric similarity measures were computed for indoor paths and navigation patterns. Subsequently, the importance of each measure was determined using the Fuzzy AHP method. Utilizing the criteria weights, the TOPSIS method was employed to rank navigation networks based on their geometric similarity to the navigation patterns of pedestrians.

Results:

The results of the experimental study showed that the MPRSSE navigation network was the closest to the navigation patterns of pedestrians in terms of geometric similarity. The UCN navigation network was found to be the least similar, despite previous studies suggesting its suitability for length and turn minimization.

Conclusion:

In this study, an approach based on GIS and MCDA was proposed to assess the geometric similarity between navigation networks and the navigation patterns of pedestrians. Our experimental study suggests that medial axis extraction-based MPRSSE and MAT navigation networks are closer to navigation patterns in terms of geometric similarity. For future studies, additional criteria and combinations of navigation networks can be explored to achieve more comprehensive coverage and select a suitable navigation network for use in navigation systems.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 39:2 (2024) 1255-1270

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

İç mekân navigasyon rotaları ve yayaların yürüme örüntüleri arasındaki geometrik benzerliklerin Coğrafi Bilgi Sistemi ve Çok Kriterli Karar Analizi aracılığıyla değerlendirilmesi

Atakan Bilgili*, Alper Şen, Melih Başaraner
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Yayaların yürüme örüntülerin elde edilmesi için Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı bir yaklaşım
- Navigasyon ağları ve yürüme örüntüleri için geometrik benzerlik ölçütlerinin hesaplaması
- CBS ve Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA) tabanlı bütünleşik bir yaklaşım

Makale Bilgileri
Araştırma Makalesi
Geliş: 24.11.2022
Kabul: 25.06.2023

DOI:
10.17341/gazimmfd.1209668

Anahtar Kelimeler:
İç mekân navigasyonu, navigasyon ağı, yürüme örüntüleri, geometrik benzerlik, çok kriterli karar analizi

ÖZ

Yayalara sunulan iç mekân rotaları, başarılı bir yol bulma deneyimi için onların mekânsal bilişleri ile uyumlu olmalıdır. Bu açıdan, yayalara sunulan iç mekân rotaları ve onların yürüme örüntüleri geometrik açıdan benzer olmalıdır. Bu çalışmada, literatürde sıklıkla kullanılan dört navigasyon ağı çalışma alanı için oluşturulmuştur. Daha sonra, iç mekân rotaları ve yayaların yürüme örüntüleri için çeşitli geometrik benzerlik ölçüleri hesaplanmıştır. Geometrik benzerlik ölçüleri Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (BAHS) yöntemi ile ağırlıklandırılmış ve iç mekân rotaları ve yayaların yürüme örüntüleri geometrik benzerlik açısından İdeal Çözüme Benzerliğine Göre Tercih Sıralaması Tekniği (TOPSIS) yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen bulgulara göre, Orta Nokta İlişki Yapısı Segment Girişi (ONİYSG) navigasyon ağı, çalışma alanı için geometrik benzerlik açısından yayaların yürüme örüntülerine en benzer navigasyon ağı olarak bulunmuştur. ONİYSG navigasyon ağını, sırasıyla Orta Eksen Dönüşümü (OED) tabanlı navigasyon ağı ve Grid tabanlı navigasyon ağı izlemiştir. Literatürde rota uzunluğu ve dönüş sayısı kriteri için en uygun bulunan görünürlük bölümlendirmesi tabanlı Evrensel Dolaşım Ağı (EDA) navigasyon ağı ise geometrik benzerlik açısından en geride kalmıştır.

Evaluating geometric similarities between indoor navigation paths and navigation patterns of pedestrians through Geographic Information System and Multi-Criteria Decision Analysis

HIGHLIGHTS

- A GIS-based approach for collecting navigation patterns of pedestrians
- A multi-step calculation of geometric similarity measures for navigation networks and navigation patterns
- An integrated approach based on GIS and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)

Article Info
Research Article
Received: 24.11.2022
Accepted: 25.06.2023

DOI:
10.17341/gazimmfd.1209668

Keywords:
Indoor navigation, navigation network, navigation patterns, geometric similarity, multi-criteria decision analysis

ABSTRACT

Indoor paths conveyed to pedestrians should align with their spatial cognition for a successful wayfinding experience. In this respect, indoor paths and navigation patterns of pedestrians should be geometrically similar. In this study, four navigation networks frequently used in the literature were created for the study area. Then, various geometric similarity measures were calculated for the indoor paths and navigation patterns of the pedestrians. The geometric similarity measures were weighted with the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) method, and the indoor paths and the navigation patterns of pedestrians were compared with the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method in terms of geometric similarity. According to the findings of the experimental study, the Middle Point Relation Structure Segment Entrance (MPRSSE) navigation network was found to be the most similar to navigation patterns of pedestrians for the study area. The MPRSSE navigation network was followed by the Medial Axis Transform (MAT) based navigation network and the Grid based navigation network, respectively. The visibility partitioning-based Universal Circulation Network (UCN) navigation network, which was found to be the most suitable for path length and number of turns criteria in the literature, fell behind in terms of geometric similarity.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *atakanb@yildiz.edu.tr, alpersen@yildiz.edu.tr, mbasaran@yildiz.edu.tr / Tel: +90 212 383 5345

1.Giriş (Introduction)

Küresel Konumlama Sistemlerinin (GNSS) yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte, konum temelli servisler (KTS) popülerlik kazanmaya başlamıştır. Mobil cihazlar ve telekomünikasyon alanındaki gelişmeler ise bu sistemlere olan talebi artırmıştır [1]. Bu gelişmelerin paralelinde KTS, başta navigasyon sistemleri olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılır hale gelmiştir [1-3]. Dış mekân navigasyon sistemlerinin kullanımı, GNSS'nin sağladığı konumlama doğruluğu ile son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. İç mekânlarda ise GNSS'nin kullanılamaması sebebiyle konumlama için geliştirilen yöntemler, dış mekân sistemlerine kıyasla doğruluk, hassasiyet, yüksek maliyet ve kullanılabilirlik sorunları yaratmaktadır. Bu nedenle, iç mekân navigasyon sistemleri henüz yaygın değildir [4]. Ayrıca, dış mekânların sokak ağları ile çevrili yapısı, navigasyon sisteminin kullanımı açısından bir navigasyon ağı kurmayı kolaylaştırıcı yapıdadır [5]. Sokak ağları veya kaldırımlar gibi önceden belirlenmiş yürüme rotalarının bulunmaması, kolon ve duvar gibi görünürlüğü kısıtlayan yapısal unsurlar içermesi, mimarı tasarımlarına bağlı farklılaşan yapıları ve çok katlı oluşları, iç mekânları genellikle dış mekânlara kıyasla daha karmaşık hale getirir [6, 7]. Bu nedenle, iç mekanlarda kapsayıcı bir navigasyon ağı kurmak daha zordur. Ayrıca iç mekân navigasyonunun temel aşamalarından olan yön bulma süreci bilişsel bir eylemdir [8]. Navigasyon sistemlerinin son kullanıcıları olan yayalar ise navigasyon sistemleri tarafından sunulan rotaları takip ederek navigasyon süreci boyunca iç mekâna ait bilişsel haritalarını oluşturmakta ve iç mekân içerisindeki hareketleri boyunca düzenli olarak bilişsel haritalarını güncelleyerek yön bulma eylemini gerçekleştirmektedirler [9]; ancak iç mekânın karmaşık ve düzensiz yapısı sebebiyle yayaların bilişsel yükü artabilmekte ve bu durum yön bulma eyleminde başarısızlıklara sebep olabilmektedir [10]. Bu bakımdan, navigasyon sistemleri tarafından yön bulma sürecini desteklemek amacıyla yayalara sunulan rotalar, yayaların iç mekâna ait bilişsel haritalarına benzer ve uygun olmalıdır. Bununla birlikte, iç mekânlardaki yukarıda belirtilen kısıtlayıcı unsurlar sebebiyle, iç mekân navigasyonu için uygulanan işlemler, dış mekân navigasyonu için uygulanan işlemlerden daha farklıdır (ör. veri kaynağı, konumlama sistemleri, navigasyon ağları, rota hesaplamaları, yön bulma süreci, rota tarifleri vb.). Bu sebeple, dış mekânlarda rotaların değerlendirilmesi için yapılan işlemler, doğrudan iç mekân navigasyonu için kullanılamamaktadır [11-13].

İç mekânların karmaşık yapısının özetlenmesi açısından çizge tabanlı temsiller sıkça kullanılmaktadır [14, 15]. Bu bakımdan, iç mekân navigasyon ağları, iç mekân unsurlarının birbirleriyle olan ilişkilerinin kenarlar ve düğüm noktaları aracılığıyla topolojik olarak ifade edilmesine olanak tanıdığından önemli bir role sahiptir [16]. Bu sayede, tesis yönetimi, bina tahliyesi, robot navigasyonu ve çeşitli KTS uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir [17]. Ayrıca navigasyon ağları temel alınarak rota planlama algoritmaları (en kısa rota, en basit rota, en az riskli rota vb.) ile iç mekân rotaları üretilerek navigasyon sistemleri ile yön bulma süreci desteklenebilmektedir. Bu ağlar, navigasyon sistemlerinin son kullanıcıları olan yayaların yürüme örüntülerinin belirli bir dereceye kadar modellenmesine de olanak tanırlar. Literatürde, iç mekân navigasyonunu desteklemek amacıyla navigasyon ağı oluşturmaya yönelik önemli miktarda çalışma olmasına rağmen, iç mekânların değişken yapısı nedeniyle henüz kapsayıcı bir navigasyon ağı ortaya konamamıştır [13]. Mevcut çalışmalarda navigasyon ağları değerlendirilirken, yalnızca rota uzunluğu ve rota üzerinde yapılan dönüş sayısı kriterleri dikkate alınmaktadır [4, 13, 18].

Literatürde yer alan çalışmalarda, navigasyon ağları çeşitli biçimlerde sınıflandırılmaktadır. Bunlardan son yıllarda kabul gören sınıflandırmaya [9] göre navigasyon ağları: (1) Koridor Türetme (2) Hücre Ayrıştırma ve (3) Görünürlük Bölümlendirmesi olarak sınıflandırılmıştır. İlk kategori, iç mekânda gerçekleşen hareketin büyük bir bölümüne ev sahipliği yapan koridorlara odaklanmaktadır. Bu kategoride yer alan navigasyon ağları genellikle Orta Eksen Dönüşümü (OED) [19] veya Delaunay üçgenlemesi yoluyla koridor orta ekseninin çıkarımına odaklanmaktadır. Lee [20], Düz Orta Eksen Dönüşümü (D-OED) adını verdiği yöntemi kullanarak Columbus, Ohio bölgesinde yer alan bir test alanı için Geometrik Ağ Modeli (GAM) adını verdiği navigasyon ağını oluşturmuştur. Lee [21], iç mekânlarda acil durum tahliye yanıtı için geliştirdiği GAM'yi seçilen bir üniversite binasında hazırlanan acil durum simülasyonu için test etmiştir. Becker vd. [22], OED tabanlı yöntemleri esas alarak hem iç mekânların yapısını hem de sensör tabanlı ağların yapısını destekleyen çok katmanlı bir navigasyon ağı oluşturmuşlardır. Park vd. [13], OED tabanlı bir navigasyon ağı oluşturarak literatürde sıklıkla kullanılan diğer navigasyon ağlarını rota uzunluğu ve dönüş sayısı kriterleri için karşılaştırmışlardır. OED tabanlı yöntemler, iç mekânların yapısına bağlı olarak gereksiz sayıda köşe noktası oluşturabildiği için koridor orta eksenini türetmek amacıyla Delaunay üçgenlemesi tabanlı yöntemleri baz alan çeşitli navigasyon ağları oluşturulmuştur [13, 23-25].

Hücre Ayrıştırma kategorisinde, iç mekân seçilen büyüklükte veya yapıda hücrelere ayrılmaktadır ve bu hücrelerin, komşu hücreler ile olan çeşitli ilişkileri baz alınarak birleştirilmesiyle navigasyon ağları oluşturulmaktadır. Bu kategori içinde yer alan grid tabanlı yöntemlerde, iç mekânın sınırları boyunca seçilen hücre boyutuna göre bir grid ağı oluşturulmaktadır. Li vd. [26], grid tabanlı bir yöntem ile iç mekân içerisindeki kolon ve duvar gibi yapısal unsurları dikkate alarak farklı ayrıntı düzeylerinde grid tabanlı bir navigasyon ağı üretmişlerdir. Wang vd. [27], sanal gerçeklik ortamında test alanı için bir Yapı Bilgi Modeli (YBM) oluşturmuş ve ürettikleri grid tabanlı navigasyon ağını bir bina tahliye simülasyonunda kullanmışlardır. Xu vd. [28], iç mekân içeresindeki engelleri dikkate alarak çeşitli çözünürlük seviyelerinde grid tabanlı bir navigasyon ağı oluşturmuş ve farklı çözünürlük seviyelerindeki navigasyon ağları için iç mekân rotalarını hesaplayarak karşılaştırmışlardır. Xu vd. [29], grid tabanlı navigasyon ağını kullanarak iç mekân içerisinde yayaların takip edilmesine olanak veren bir algoritma geliştirmişlerdir. Park vd. [13], grid tabanlı bir navigasyon ağını literatürde sıklıkla kullanılan diğer navigasyon ağları ile rota uzunluğu ve dönüş sayısı kriterleri açısından karşılaştırmışlardır. Lewandowicz vd. [30], düzenli grid hücreleri yerine Voronoi çokgenleri kullanarak iç mekânı hücrelere ayırmış ve geliştirdikleri yönteme Orta Nokta İlişki Yapısı Segment Girişi (ONİYSG) adını vermişlerdir. Bu yöntemde Delaunay üçgenlemesi tabanlı navigasyon ağlarına göre daha fazla sayıda rota seçeneği bulunduğundan üçgenleme tabanlı yöntemlerde oluşabilen istenmeyen girintiler giderilebilmektedir [13].

Görünürlük bölümlendirmesi kategorisinin temeli, Turner vd. [31] tarafından ortaya konan görünürlük çizgesine dayanmaktadır. Bu kategorideki navigasyon ağları, iç mekân unsurlarını ifade eden düğüm noktalarının birbirlerini görme durumları dikkate alınarak çizgiler ile birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır [32, 33]. Noktaların birbirlerini doğrudan görememeleri durumunda ise ara düğüm noktaları ile navigasyon ağı oluşturulmaktadır [32]. Stoffel vd. [34], görünürlük çizgesinin oluşturulması için içbükey köşe noktalarını, ara düğüm noktaları olarak kullanarak görünürlük çizgesi tabanlı navigasyon ağı oluşturmuşlardır. Lee vd. [35], iç mekân içerisindeki yapısal unsurları kullanarak tampon bölgeler aracılığıyla görünürlük bölümlendirmesi tabanlı navigasyon ağını oluşturmuş ve oluşturdukları navigasyon ağına Evrensel Dolaşım Ağı (EDA) ismini vererek geliştirdikleri navigasyon ağı ile yayaların iç mekân içerisindeki yürüme mesafelerini hesaplamışlardır. Liu ve Zlatanova [36], duvarların içbükey köşe noktalarını ara düğüm noktaları olarak

kullanarak görünürlük bölümlendirmesi tabanlı navigasyon ağını oluşturmuşlardır. Kneidl vd. [37], yaptıkları çalışmada, yayaların bir simülasyon içindeki yürüme örüntülerini baz alarak görünürlük çizgesi oluşturmak için kullanılan düğüm noktası sayısını azaltmış ve seyrek görünürlük çizgesi adını verdikleri navigasyon ağını üretmişlerdir. Park vd. [13], EDA tabanlı navigasyon ağını kullanarak bu ağı literatürde sıklıkla kullanılan diğer navigasyon ağları ile rota uzunluğu ve dönüş sayısı kriteri bakımından karşılaştırmışlardır. Zhou vd. [15], mobil navigasyon sistemlerinde farklı ayrıntı düzeylerinde rota tariflerinin üretilebilmesi için hiyerarşik iç mekân görünürlük çizgesi adını verdikleri navigasyon ağını üretmiş ve ağın kullanılabilirliğini rota tarifleri üreterek test etmişlerdir.

Mekânsal bilimlerde gerçek dünya nesneleri, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ortamında coğrafi nesneler (detaylar) olarak çeşitli geometriler (nokta, çizgi, çokgen) ile temsil edilirler. Bu nesnelerin arasındaki benzerlik, nesnelerin geometrisi ve nesne ayrıntıları ile yakından ilişkilidir [38]. CBS ortamında temsil edilen varlıklara ait geometrik benzerlik ise nesnelerin geometrisine ait çeşitli ölçüler ve şekil göstergeleri ile ortaya konabilir. Şekil göstergeleri, bir nesnenin geometrisinin ve bu geometriye dayalı olarak türetilen yardımcı geometrilerin metrik büyüklükleri aracılığıyla o nesnenin şekilsel yapısının sayısal olarak ifade edilmesini ve böylelikle karakteristik özelliklerinin veya diğer nesnelere benzerliklerinin yorumlanmasına olanak sağlayan ölçülerdir [39-41]. Geometrik özellikleri benzer olan şekillerin, diğerlerine kıyasla aynı sınıfa ait olma olasılıkları daha fazladır [41]; bu bakımdan, şekil göstergeleri nesnelerin geometrileri yoluyla nesne benzerliklerinin ölçülmesine imkân verebilmektedir [41, 42]. Şekil göstergeleri, kartografik genelleştirme, navigasyon amaçlı referans nesnelerin saptanması, uzaktan algılama ile nesne çıkarımı, farklı çözünürlükteki mekânsal veri tabanlarındaki nesnelerin eşleştirilmesi gibi uygulamalarda kendisine yer edinmiştir [39, 41]. Şekil göstergeleri genelleştirme alanında, benzer geometrik niteliklere sahip nesnelerin gruplandırılması ve ardından bağlamsal genelleştirilmesi için kullanılmaktadır [43, 44]. Elias [45], dış mekân navigasyonu amaçlı referans nesnelerin mekânsal veri tabanlarından otomatik çıkarımında veri madenciliği tekniklerini kullanmıştır. Grabler vd. [46], turistik harita üretimi için mekânsal veri tabanlarından yer işaretlerini otomatik olarak belirlemek için çeşitli şekil göstergelerini kullanmışlardır. Ehrlich [47], yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinde piksel değerlerinin kötü sonuç vermesi sebebiyle nesne tabanlı sınıflandırma adımlarından segmentasyon işlemi için şekil göstergelerini kullanmıştır.

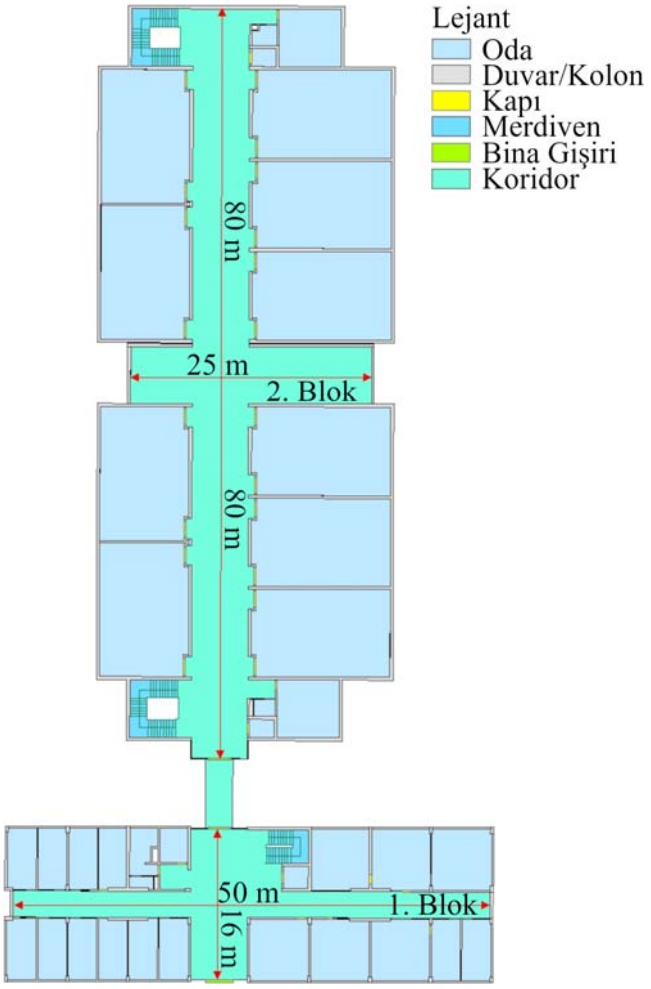
İç mekânlarda konum belirleme konusunda yeterince yol alınmasıyla birlikte, çalışmalar yayaların iç mekân içerisinde mekânsal bilişlerine uygun olarak sesli veya görsel olarak rota tarifleri ile yönlendirilmesine odaklanmıştır [16]. Rota tariflerinin oluşturulması için navigasyon ağları önemli bir altlık olarak görev üstlenmektedir. Bu bakımdan yön bulma sürecinde yayaların bilişsel yükünün azaltılması ve navigasyon sürecinin desteklenmesi için yayalara sunulan iç mekân rotaları ve onların yürüme örüntüleri geometrik açıdan benzer olmalıdır. Bu nedenle, navigasyon ağlarından üretilen iç mekân rotaları değerlendirilirken yayaların yürüme örüntüleri ile olan geometrik benzerlikleri de dikkate alınmalıdır; ancak bu durum literatürdeki herhangi bir çalışma tarafından şu ana kadar değerlendirilmemiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda, navigasyon ağlarının seçiminde dikkate alınan kriterler genellikle rota hesaplama algoritmalarıyla üretilen iç mekân rotalarının uzunluğu ve bu rotada yapılan dönüş sayısı (rota tariflerinde yer verilen dönüş komutları) kriterleridir ya da çalışmada sunulan navigasyon ağının simülasyon çalışmaları ile kullanılabilirlikleri ölçülmektedir. Ayrıca navigasyon ağları için yapılan kıyaslamalarda her kriter için ayrı birer sıralama yapılmakta [13] ve kriterlerin ağırlıkları göz ardı edilerek navigasyon ağlarının kullanılabilirlikleri yorumlanmaktadır. Bu belirsizliğin giderilmesi, kriterlerin kapsayıcı şekilde yorumlanabilmesi ve navigasyon amaçlı navigasyon ağı seçimi açısından Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA) problemlerinde sıklıkla kullanılan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi kullanılabilir. AHS yöntemi, karar verme probleminin kritik unsurlarının hiyerarşik olarak ifade edilmesine olanak tanıdığından karar verme süreci için kullanışlı bir yöntemdir [48]. AHS yöntemi, ilk olarak Saaty [49] tarafından geliştirilmiştir. Yöntemin temeli bir veya bir grup karar verici tarafından karşılaştırmalı yargı ilkesine göre karar verme problemine etki eden kriterlerin ikili karşılaştırmalar ile önem derecelerinin belirlenerek ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulmasına dayanmaktadır. AHS yöntemi, karar verme probleminin genelden özele doğru hiyerarşik olarak modellenmesine olanak tanıdığından karar verme süreçlerini desteklemektedir [48]. Geleneksel AHS yönteminde kriterler arasında yapılan ikili karşılaştırmalarda tam sayılar kullanıldığından karar vericinin bilişsel sürecini tam olarak yansıtamamaktadır. Bu problemin çözümü olarak kriterlerin ağırlıklandırılması sürecindeki belirsizlikle baş edilebilmesi için bulanık kümeler teorisi ÇKKA sürecine entegre edilmektedir [50]. Bu yöntem, Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (BAHS) olarak adlandırılmaktadır. Yöntemde tam sayı olan önem ölçekleri seçilen bulanık üyelik fonksiyonlarına göre bulanık sayılar ile ifade edilerek kriterler önem derecesine göre ağırlıklandırılmaktadır. Ayrıca İdeal Çözüme Benzerliğine Göre Tercihlerin Sıralaması Tekniği (TOPSIS) yöntemi, ÇKKA problemlerinde alternatiflerin ideal çözüme olan yakınlıklarına göre sıralanması için sıkça başvurulan diğer bir ÇKKA yöntemidir. TOPSIS yöntemi ile karar verme problemine göre en iyi alternatif belirlenmekte ve alternatifler sıralanabilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle TOPSIS yöntemi, AHS veya BAHS ile bütünleşik olarak kullanılmaktadır. AHS veya BAHS ile kriterlerin önem dereceleri belirlenmekte ve TOPSIS yöntemi ile alternatifler ÇKKA probleminin çözümü için sıralanmaktadır.

Bu çalışmada, bahsedilen literatür boşlukları ((1) İç mekân rotalarının yalnızca uzunluk ve dönüş sayısı kriterlerine göre değerlendirilmesi, (2) Navigasyon ağları kıyaslanırken her bir kriter için ayrı sıralamalar yapılması ve dolayısıyla navigasyon ağı seçim sürecinde kararsızlık oluşması, (3) Navigasyon ağı seçim sürecinde kriter ağırlıklarının göz ardı edilmesi, (4) Yayaların yürüme örüntülerinin, hesaplanan iç mekân rotalarına olan benzerliklerin ihmal edilmesi) dikkate alınarak yayaların yürüme örüntüleri ve iç mekan rotaları arasındaki geometrik benzerliklerin değerlendirilmesi için CBS ve ÇKKA tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin ortaya konması için farklı çalışmalarda iyi sonuçlar verdiği gözlemlenen dört adet navigasyon ağı çalışma alanı için oluşturulmuş ve bir deney ile yayalara ait gerçek yürüme örüntüleri çalışma alanı için toplanmıştır. Daha sonra geometrik benzerliklerin ortaya konması amacıyla iç mekân rotaları ve yürüme örüntüleri için çeşitli geometrik benzerlik ölçüleri hesaplanmıştır. Navigasyon ağı seçim sürecindeki kriter ağırlıklarının göz ardı edilmesi problemi dikkate alınarak bu ölçüler, bir ÇKKA yöntemi olan BAHS ile ağırlıklandırılmıştır. Sonraki aşamada, hesaplanan kriter ağırlıkları göz önüne alınarak TOPSIS yöntemi ile navigasyon ağları, yürüme örüntülerine olan geometrik benzerlik açısından sıralanmıştır. Çalışmada ortaya konan bütünleşik yaklaşımın gelecekte yapılacak çalışmalar için navigasyon ağı seçiminde navigasyon sistemlerinin son kullanıcıları olan yayaların yürüme örüntülerine olan geometrik benzerliklerin de dikkate alınması ve karar vericilerin navigasyon ağı seçim sürecinin kapsayıcı şekilde desteklenmesi amacıyla ÇKKA kullanımı için bilimsel bir altlık olması hedeflenmektedir.

2. Çalışma Alanı ve Veri Kaynağı (Study Area and Data Source)

Çalışma bölgesine ait iç mekân haritasının CBS ortamında oluşturulabilmesi için bir mekânsal veri kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde, mimari kat planları ilkel iç mekân haritaları olarak anılmaktadır [51] ve navigasyon ağlarının

oluşturulması için gerekli bilgileri içermektedir [33]. Bu çalışmada, bir üniversite binasının zemin katı, navigasyon ağlarının oluşturulması ve deneyin yürütülmesi için çalışma alanı olarak seçilmiştir. İlgili bölgeye ait kat planları iç mekân haritasının elde edilmesi için kullanılmıştır. Ham kat planları, yapısal unsurları (duvarlar, kolonlar, döşeme, merdiven ve asansör) içeren katmanlar dışında tefrişlerin ve çeşitli ölçülerin de olduğu 30 adet katman içermektedir. Bu katmanlardan navigasyon ağları için esas teşkil etmeyen katmanlar semantik dönüşüm işlemlerinden semantik seçme ve semantik gruplandırma yaklaşımları ile elenmiştir. Genelleştirilmiş kat planları kullanılarak CBS ortamında çeşitli geometrik araçlar yardımıyla çalışma bölgesine ait iç mekân haritası elde edilmiştir (Şekil 1). Çalışma alanı iki bloktan oluşmaktadır. İlk blokta bulunan çapraz yapılı holün sol ve sağ taraflarında 2 adet uzun ve dar koridor bulunmaktadır (Uzunluk: 21 m (1. koridor) ve 29 m (2. koridor), Genişlik: 2,7 m). Holün üst kısmı kısa ve geniş yapıdadır; tuvalet, merdiven ve asansörlere giden alt koridorlar içermektedir. İkinci blok da birinci blok gibi çapraz yapılı bir hol içermekte ve blok temel olarak uzun ve dar bir koridordan oluşmaktadır (Uzunluk: 80 m Genişlik: 5,8 m). Bloklar içerisinde üst ve alt katlara gidebilen 2 adet asansör ve merdiven bulunmaktadır. Blok içerisindeki iç mekânların (odaların) yapısı genel olarak düzenli formdadır ve değişken düzeydeki kapı eşik aralıkları ile koridorlara bağlanmaktadır. Çalışma alanında bulunan düzensiz yapıdaki alt koridorlar ve kolonlar, navigasyon ağlarının doğrusal tarzda ağlar oluşturmasını engelleyici niteliktedir.



Şekil 1. Çalışma alanına ait iç mekân haritası
(Indoor map of the study area)

3. Yöntem ve Deneysel Çalışma
(Methodology and Experimental Study)

Bu çalışmada, yayaların yürüme örüntüleri ve iç mekân rotaları arasındaki geometrik benzerliğin ortaya konması için CBS ve ÇKKA tabanlı bütünleşik bir yaklaşım sunulmuştur. Bu bağlamda, iç mekân içerisinde yayaların yön bulma eylemleri sırasında navigasyon sistemleri tarafından onlara sunulacak iç mekân rotalarının hesaplanabilmesi amacıyla çalışma alanına ait navigasyon ağlarının üretilmesi gerekmektedir. Navigasyon ağlarının oluşumu için çeşitli algoritmalar kullanılsa da temelde düğüm noktaları ve çizgilerden oluşan birer çizgedirler. Dolayısıyla, vektör verinin işlenebilmesi için güçlü bir araç olan CBS, navigasyon ağlarının üretimi için kullanılmıştır. Daha sonra çalışma bölgesinde yayaların iç mekân içerisindeki gerçek yürüme örüntülerinin elde edilmesi için bir deney gerçekleştirilmiş ve katılımcılara çeşitli görevler atanarak bu görevleri yerine getirirken yürüme örüntüleri toplanmıştır. Bu adımdan sonra hesaplanan iç mekân rotaları ve toplanan yürüme örüntüleri için çeşitli geometrik benzerlik ölçüleri hesaplanmış; bu ölçülerin önem dereceleri (ağırlıkları) uzman görüşleri sonucunda BAHS yöntemi ile belirlenmiştir. Bir başka ÇKKA yöntemi olan TOPSIS ile tüm kriterlerin önem dereceleri dikkate alınarak üretilen navigasyon ağları, yayaların gerçek yürüme örüntülerine olan geometrik benzerlik açısından sıralanmıştır. Çalışmaya ait iş akışı Şekil 2'de verilmiştir. İlerleyen bölümlerde önerilen yöntemin detayları açıklanmıştır.

3.1. İç Mekân Navigasyon Ağlarının Oluşturulması
(Generation of the Indoor Navigation Networks)

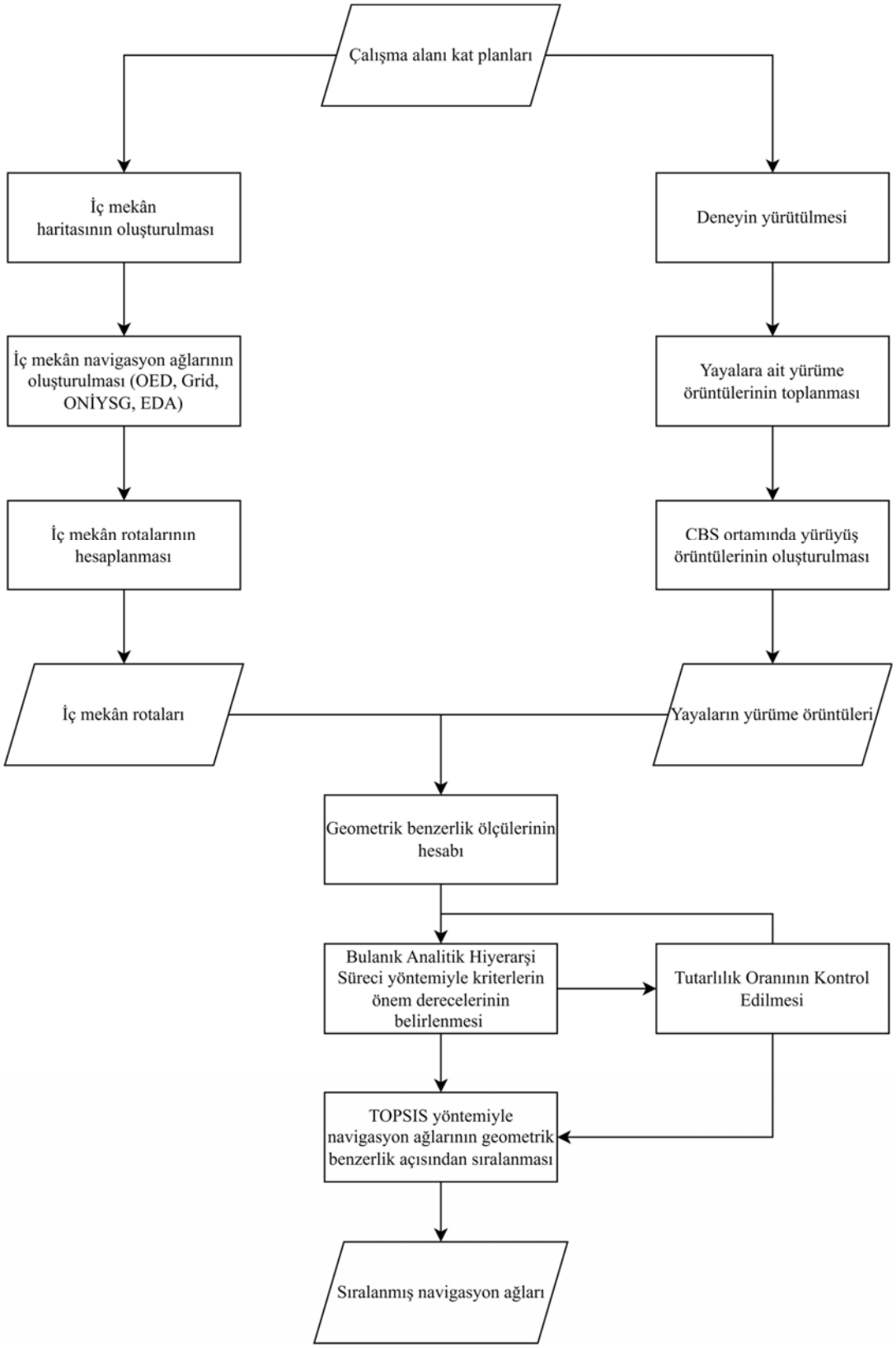
İç mekân navigasyon ağları, iç mekân unsurlarının topolojik yapısını özetleyen çizgelerdir [16]. Bu ağlar, navigasyon sistemlerinde rota hesaplanması ve rota rehberliği aşamaları için kritik bir önem arz etmektedir [52]. İç mekân rotaları ise, navigasyon ağları aracılığıyla hesaplandığı için, navigasyon ağlarının oluşturulması iç mekân navigasyonu için önemli bir rol oynamaktadır [32, 37].

Literatürde yapılan çalışmalarda iç mekân navigasyonu için farklı algoritmalar ile otomatik olarak üretilen çeşitli navigasyon ağları sunulmuştur. Bu çalışmada, kapsayıcı bir geometrik benzerlik değerlendirmesi yapmak adına Vanclooster vd. [9] tarafından tanımlanan navigasyon ağı kategorilerinden, literatürde sıklıkla kullanılan 4 adet navigasyon ağı seçilmiştir (Tablo 1).

Navigasyon ağlarının üretimi için CBS ortamında çizgi ve çokgen detay sınıflarıyla vektör veri formatında ifade edilen iç mekân haritası, algoritmalar için girdi olarak kullanılmıştır. Navigasyon ağlarının üretimi için ArcGIS Python eklentisi olan ArcPy, çeşitli CBS araçları ve "centerline" açık kaynaklı Python kütüphanesi (https://github.com/fitodic/centerline) kullanılmıştır. Navigasyon ağlarının üretim aşamaları Şekil 3'te özetlenmiştir. Her bir navigasyon ağının oluşturulmasına ilişkin ayrıntılar ise alt bölümlerde verilmiştir.

3.1.1. OED tabanlı navigasyon ağının oluşturulması
(Generation of the MAT based navigation network)

OED algoritması ilk olarak Lee [19] tarafından ortaya konmuştur. Algoritma, bir çokgen geometrisinin sınırlarından eşit mesafeye sahip merkez çizgilerin çizilerek çokgen orta ekseninin çıkarılması temeline dayanmaktadır. Bu çalışmada, navigasyon ağlarının oluşturulması için ilk aşamada, kapı (oda, asansör) ve merdiven çokgenleri ağırlık merkezleri ile ifade edilerek nokta detay sınıfında özetlenmiştir. Daha sonra, algoritmalarda girdi olarak kullanılmak üzere çalışma bölgesine ait koridor çokgeninin köşe noktaları ve kenarları elde edilmiştir. Bu geometrilere dayalı olarak OED algoritması ile koridor çokgeninin orta ekseni üretilmiştir. OED ile elde edilen orta eksendeki

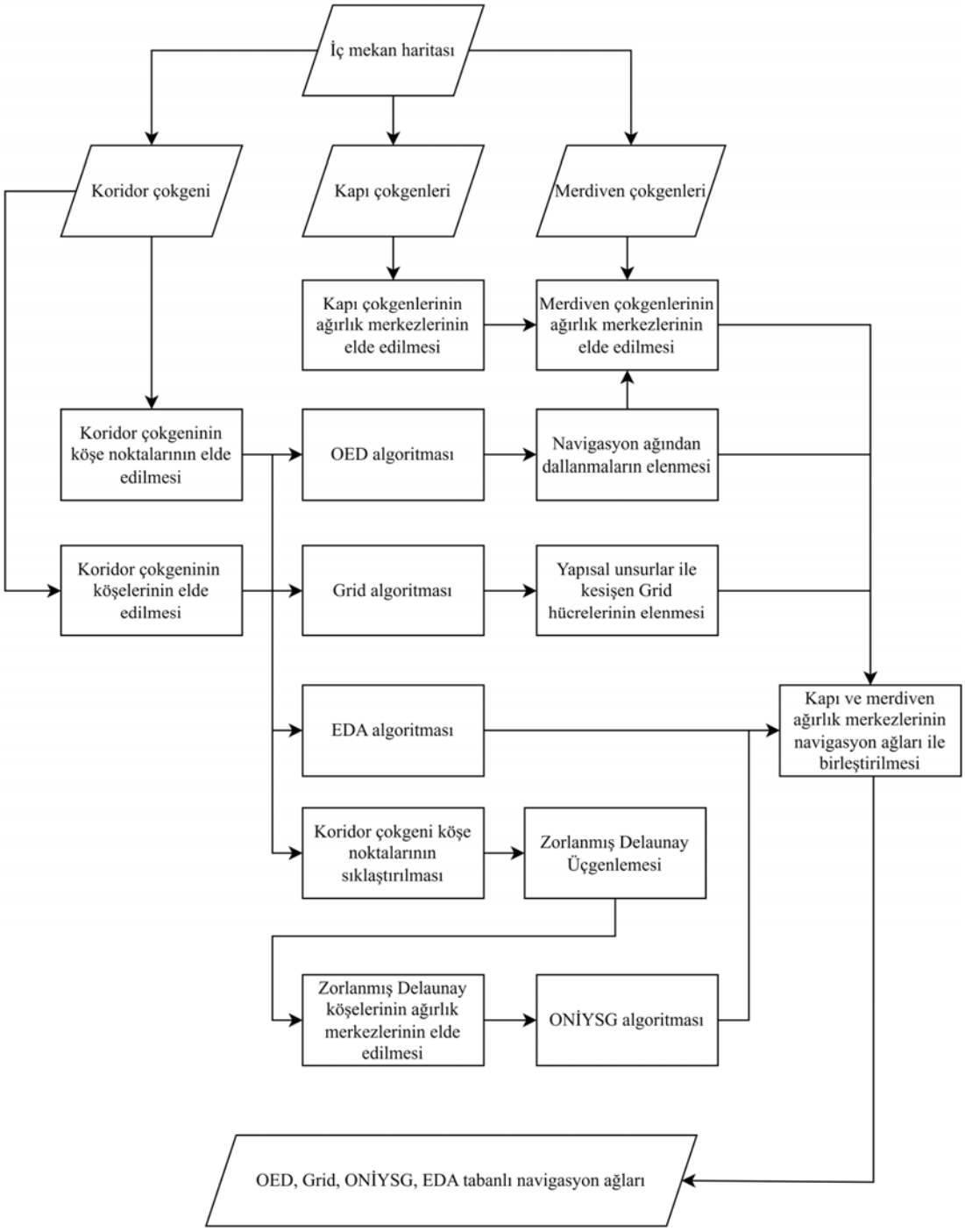


Şekil 2. Önerilen yönteme ait iş akışı (Workflow of the proposed methodology)

çıkmaz rotalar, Voronoi diyagramı segmentlerinden koridor çokgeni köşeleri ile kesişmeyen rotaların elenmesi kuralı baz alınarak elenmiş ve ana OED tabanlı navigasyon ağı oluşturulmuştur. Son aşamada ise kapı ve merdiven ağırlık merkezleri ana navigasyon ağı ile birleştirilerek OED tabanlı navigasyon ağının son hali elde edilmiştir (Şekil 4a).

Tablo 1. Çalışmada kullanılan navigasyon ağları (The navigation networks used in the study)

Navigasyon ağı	Navigasyon ağı kategorisi	Kaynak
Orta Eksen Dönüşümü (OED)	Koridor Türetme	Lee [19]; Lee [20]
Grid	Hücre Ayrıştırma	Li vd. [26]
Orta Nokta İlişki Yapısı Segment Girişi (ONİYSG)	Hücre Ayrıştırma	Lewandowicz vd. [30]
Evrensel Dolaşım Ağı (EDA)	Görünürlük Bölümlendirmesi	Lee vd. [35]



Şekil 3. Navigasyon ağlarının oluşturulması için iş akışı (Workflow for the generation of the navigation networks)

3.1.2. Grid tabanlı navigasyon ağının oluşturulması
(Generation of the Grid based navigation network)

Grid tabanlı navigasyon ağı oluşturma algoritması Li vd. [26] tarafından ortaya konmuştur. Algoritma, iç mekânın sınırı boyunca düzenli hücrelere ayrılması ve yönlerin dikkate alınarak navigasyon rotalarının oluşturulması temeline dayanmaktadır. Bu çalışmada, grid tabanlı navigasyon ağının oluşturulması için ilk aşamada koridor çokgeni köşe noktaları ve kenarları kullanılarak kare şeklinde düzenli grid hücreler oluşturulmuştur. İkinci aşamada, her bir grid hücresinin ağırlık merkezinden 4 ana ve 4 ara yön esas alınarak yönlenme rotaları oluşturulmuştur. Daha sonra, duvar sınırları ile kesişen grid hücreleri navigasyon ağından elenerek ana Grid tabanlı navigasyon ağı oluşturulmuştur. Son aşamada ise kapı ve merdiven ağırlık merkezleri ana navigasyon ağı ile birleştirilerek Grid tabanlı navigasyon ağının son hali elde edilmiştir (Şekil 4b).

3.1.3. ONİYSG tabanlı navigasyon ağının oluşturulması
(Generation of the MPRSSE based navigation network)

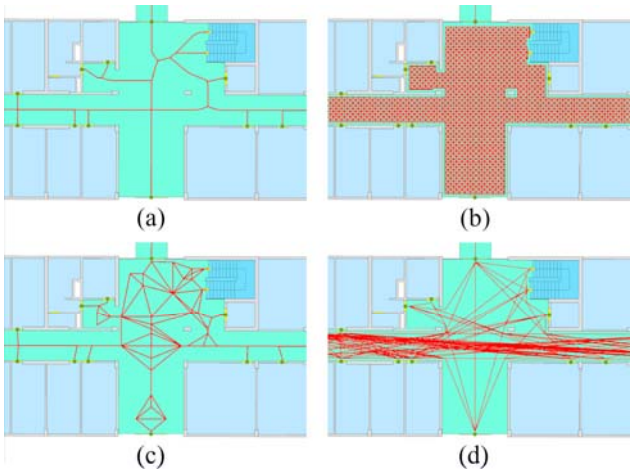
ONİYSG algoritması ilk olarak Lewandowicz vd. [30] tarafından ortaya konmuştur. Algoritma, iç mekân çokgeninin Zorlanmış Delaunay Üçgenlemesi ile bezenmesi sonucu elde edilen kenar orta noktalarının, iç mekân boyunca Voronoi çokgenlerinin oluşturulması için kullanılması temeline dayanmaktadır. Bu çalışmada, ONİYSG tabanlı navigasyon ağının üretimi için ilk aşamada koridor çokgeni köşe noktaları, koridor kenarları ve iç mekân içerisindeki yapısal unsurlar olan kolonların köşe noktaları ve kenarları esas alınarak zorlanmış Delaunay üçgenleri elde edilmiştir. Zorlanmış Delaunay üçgen kenarlarının orta noktaları aracılığıyla Voronoi çokgenleri oluşturulmuştur. Daha sonra, Voronoi çokgenlerinin komşuluk ilişkileri gözetilerek ana ONİYSG tabanlı navigasyon ağı oluşturulmuştur. Son aşamada ise kapı ve merdiven ağırlık merkezleri ana navigasyon ağı ile birleştirilerek ONİYSG tabanlı navigasyon ağının son hali elde edilmiştir (Şekil 4c).

3.1.4. EDA tabanlı navigasyon ağının oluşturulması
(Generation of the UCN based navigation network)

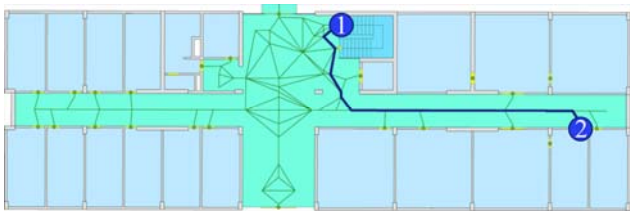
EDA algoritması ilk olarak Lee vd. [35] tarafından ortaya konmuştur. Algoritma, birbirlerini gören düğüm noktalarının doğrudan birleştirilmesi ile navigasyon ağı kenarlarının oluşturulması, düğüm noktalarının birbirlerini görememesi durumunda ise iç mekân çokgeninin içbükey köşe noktalarının kullanımı ile navigasyon ağı kenarlarının oluşturulması temeline dayanmaktadır. Bu çalışmada, EDA tabanlı navigasyon ağının oluşturulması için ilk aşamada birbirlerini doğrudan görebilen kapı ve merdiven ağırlık merkezleri birbirleriyle birleştirilerek navigasyon ağı kenarları oluşturulmuştur. Daha sonra, bu noktaların birbirlerini görememeleri durumunda, koridor çokgeninin içbükey köşe noktaları aracılığıyla ana EDA tabanlı navigasyon ağı oluşturulmuştur. Son aşamada ise kapı ve merdiven ağırlık merkezleri ana navigasyon ağı ile birleştirilerek EDA tabanlı navigasyon ağının son hali elde edilmiştir (Şekil 4d).

3.1.5. İç mekân rotalarının hesaplanması
(Computation of the indoor paths)

İç mekân rotaları, navigasyon sistemleri tarafında yayalara izlemeleri için sunulan rotalardır. Bu rotalar, yapısı ve sunum şekline bağlı olarak yayaların yön bulma sürecini desteklemektedir. İç mekân navigasyon ağlarının oluşturulmasının ardından, iç mekân rotalarının elde edilmesi için seçilen başlangıç ve bitiş düğüm noktaları arasındaki en kısa rotayı hesaplamak için sıklıkla kullanılan Dijkstra [53] algoritması, iç mekân rotalarının hesaplanması için kullanılmıştır. Hesaplanan iç mekân rotalarına ait bir örnek Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Çalışma bölgesine ait navigasyon ağları ((a): OED, (b): Grid, (c): ONİYSG, (d): EDA) (Navigation networks for the study area ((a): MAT, (b): Grid, (c): MPRSSE, (d): UCN))



Şekil 5. ONİYSG navigasyon ağı ile hesaplanan iç mekân rotalarına ait bir örnek
(Example of an indoor path computed by the MPRSSE navigation network)

3.2. Yayaların Yürüme Örüntülerinin Elde Edilmesi
(Collection of the Navigation Patterns of Pedestrians)

Bu aşamada, çalışma alanında yayalara ait yürüme örüntülerinin elde edilmesi için bir deney tasarlanmıştır. Yaşları 19 ve 31 (Ort: 22,63, SS: 2,47) arasında değişen toplamda 30 katılımcı (E: 17, K: 13) deneyde yer almıştır. Katılımcılara çalışma alanının girişine kadar eşlik edilmiş ve çalışma bölgesine ait iç mekân haritası katılımcılara gösterilerek deney süreci açıklanmıştır. Deneyde katılımcılardan çalışma alanı içerisinde yer alan ve çalışma alanını yaklaşık olarak kapsayan 6 adet iç mekân işaretlenmiş ve katılımcılardan bu iç mekânlara gitmeleri istenmiştir (Tablo 2). Katılımcılar, her bir iç mekâna yürüdükten sonra diğer görev, sırasıyla kendilerine iletilmiştir. Katılımcılar ilgili görevleri yerine getirirken iç mekân içerisindeki yürüme örüntüleri toplanmış [54] ve CBS ortamında yeniden oluşturulmuştur [55] (Şekil 6).

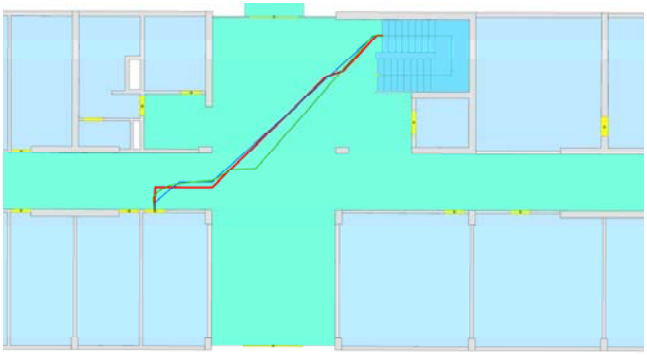
Tablo 2. Katılımcılara verilen görevler (The tasks assigned to the participants)

Görev numarası	Kaynak	Hedef
1	Bina girişi	Öğr. Üyesi odası
2	Öğr. Üyesi odası	Merdiven
3	Merdiven	Mutfak
4	Mutfak	Derslik 1
5	Derslik 1	Derslik 2
6	Derslik 2	W.C.

3.3. Geometrik Benzerlik Ölçülerinin Hesaplanması
(Computation of the Geometric Similarity Measures)

Mekânsal bilgi teorisine göre gerçek dünya nesneleri, CBS ortamında amaca uygun bir ayrıntı düzeyinde nokta, çizgi veya çokgen detaylar

biçiminde temsil edilirler. Çoklu çizgiler ise, çizgi segmentlerinin birleştirilmesi ile oluşan birer dizidir ve tek bir detay olarak CBS ortamında tutulurlar. Yayaların yürüme örüntüleri, ilgili çalışmalarda genellikle çoklu çizgiler ile temsil edilmektedir [54-56]. Öte yandan, navigasyon sistemlerinde iç mekân rotalarının çoklu çizgiler ile sunulması navigasyonu kolaylaştırmakla birlikte, yayaların iç mekân içerisindeki genişliğini (ör. omuz genişliği) göz ardı etmektedir. Bu nedenle, geometrik benzerliklerin hesaplanması süreci; (1) navigasyon sistemlerindeki temel temsil (gösterim) dikkate alınarak çizgi tabanlı geometrik benzerlik değerlendirmesi ve (2) yayaların ortalama omuz genişliği kullanılarak çokgen tabanlı geometrik benzerlik değerlendirmesi olarak iki türde yürütülmüş ve çeşitli geometrik benzerlik ölçüleri (Tablo 3) hesaplanmıştır.



Şekil 6. 2 numaralı görev için katılımcılara ait örnek yürüme örüntüleri (Examples of the navigation patterns of pedestrians for the task 2)

Tablo 3. Çalışmada kullanılan geometrik benzerlik ölçüleri (The geometric similarity measures used in the study)

Değerlendirme türü	Kullanılan ölçüler
Çizgi Tabanlı	Uzunluk
	Hausdorff Mesafesi
	Kıvrımlılık
	Ortalama Dönüklük Açısı
Çokgen Tabanlı	Çevre
	Alan
	Ağırlık Merkezleri Arası Mesafe
	Alan Kesişme Oranı
	Dışbükeylik
	Dikdörtgensellik
	Eşdeğer Dikdörtgen Göstergesi
	Dönüklük Açısı

3.3.1. Çizgi tabanlı geometrik benzerlik ölçülerinin hesaplanması
(Computation of the polyline based geometric similarity measures)

CBS ortamında çoklu çizgiler ile temsil edilen gerçek dünya nesnelerinin benzerliği, çeşitli geometrik ölçüler yardımıyla ortaya konabilir [38]. Bu çalışmada, bir deney ile toplanan yayaların iç mekân içerisindeki yürüme örüntüleri ve navigasyon ağları aracılığıyla hesaplanan iç mekân rotaları arasındaki geometrik benzerliğin çizgi tabanlı olarak ortaya konması için 4 adet geometrik benzerlik ölçüsü (Tablo 3) hesaplanmıştır.

Uzunluk (L_P) ölçüsü ilgili rotanın uzunluğunu ifade etmektedir. Uzunluk ölçüsü, çoklu çizgilerin köşe noktası sayısı (n) ve köşe nokta koordinatları (x_i ve y_i) baz alınarak Eş. 1 ile hesaplanmıştır.

$$L_P = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1)$$

Hausdorff Mesafesi (D_H), iki çoklu çizgi arasındaki geometrik benzerliğin ortaya konması ve farklı mekânsal veri tabanlarındaki çizgisel detayların eşleştirilmesi için sıklıkla kullanılan bir ölçüdür. Hausdorff Mesafesi, bir çoklu çizginin her bir köşe noktasından diğer çoklu çizginin en yakın köşe noktasına olan mesafelerin maksimumu olarak ifade edilmektedir (Eş. 2).

$$D_H = \text{maks}\left(\min\left(D_{A,B}, D_{B,A}\right)\right) \quad (2)$$

Kıvrımlılık (S), bir çoklu çizginin dolambaçlı olma derecesini ifade eder. Kıvrımlılık, bir çoklu çizginin uzunluğunun (L_P), başlangıç ve bitiş noktalarını birleştiren düz çizginin uzunluğuna (L_{min}) oranı ile hesaplanır (Eş. 3).

$$S = \frac{L_P}{L_{min}} \quad (3)$$

Ortalama Dönüklük Açısı (θ°_M), bir çoklu çizginin her bir segmentinin açıklık (x ekseninden itibaren saat ibresinin tersi yönündeki) açılarının aritmetik ortalamasıdır (Eş. 4 ve Eş. 5). Eş. 4'te $\Delta X_{i,\,i+1}$ ve $\Delta Y_{i,\,i+1}$ ilgili çoklu çizginin ardışık segmentlerinin başlangıç ve bitiş noktalarının x ve y koordinatları farkını ($\Delta X_{i,\,i+1} = x_{i+1} - x_i$, $\Delta Y_{i,\,i+1} = y_{i+1} - y_i$), n ise köşe nokta sayısını ifade etmektedir.

$$\theta^{\circ}_{i,\,i+1} = \arctan\frac{\Delta Y_{i,\,i+1}}{\Delta X_{i,\,i+1}} \quad (0 < i < n) \quad (4)$$

$\Delta Y_{i,\,i+1} < 0$ ve $\Delta X_{i,\,i+1} > 0$ ise $\theta^{\circ}_{i,\,i+1} = \theta^{\circ}_{i,\,i+1} + 180°$
$\Delta Y_{i,\,i+1} < 0$ ve $\Delta X_{i,\,i+1} < 0$ ise $\theta^{\circ}_{i,\,i+1} = \theta^{\circ}_{i,\,i+1} + 180°$
$\Delta Y_{i,\,i+1} > 0$ ve $\Delta X_{i,\,i+1} < 0$ ise $\theta^{\circ}_{i,\,i+1} = \theta^{\circ}_{i,\,i+1} + 360°$

$$\theta^{\circ}_M = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \theta^{\circ}_{i,\,i+1}}{n-1} \quad (5)$$

3.3.2. Çokgen tabanlı geometrik benzerlik ölçülerinin hesaplanması
(Computation of the polygon based geometric similarity measures)

Çoklu çizgi tabanlı temsiller, yürüme örüntülerinin CBS ortamında oluşturulması için bellek ve hız gibi avantajlar sağlasa da bu tip temsiller, yayaların iç mekân içerisindeki genişliğini (ör. omuz genişliği) ihmal etmektedir. Bu çalışmada, daha gerçekçi bir geometrik benzerlik değerlendirmesi yapabilmek için çokgen tabanlı bir geometrik benzerlik yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde, deneyde yer alan katılımcıların omuz genişlikleri ölçülmüş ve bu değerlerin ortalaması iç mekân rotaları ve yayaların yürüme örüntülerine ait tampon bölge çokgenlerinin oluşturulması için kullanılmıştır. Daha sonra çokgenlere ait çeşitli ölçüler, (Tablo 3) oluşturulan tampon bölge çokgenleri aracılığıyla hesaplanmıştır.

Çevre (P_{CG}) ve Alan (A_{CG}) tampon bölge çokgeninin sırasıyla çevre uzunluğunu ve alanını ifade etmektedir. Çevre ve Alan değerleri Eş. 6 ve Eş. 7 ile hesaplanmıştır. Eşitliklerde x_i ve y_i çokgenlerin köşe nokta koordinatlarını ifade etmektedir.

$$P_{CG} = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (6)$$

$$A_{CG} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \left(x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1}\right) \quad (7)$$

Ağırlık merkezi, çokgenlerin X ye Y koordinat ikilileri ile tanımlanmaktadır. Ağırlık merkezleri arasındaki mesafe ne kadar az ise çokgenlerin birbirlerine benzer olmaları o kadar olasıdır. Ağırlık merkezi Eş. 8 ve 9 ile hesaplanmıştır. Eşitliklerde x_i ve y_i çokgenlerin köşe nokta koordinatlarını, A ise ilgili çokgenin alanını ifade etmektedir. Yürüme örüntülerini ve iç mekân rotalarını ifade eden

çokgenlerin ağırlık merkezleri arası mesafe (ΔS_G) Eş. 10 ile hesaplanmıştır. Eşitlikte ΔX ve ΔY yürüme örüntüleri ve iç mekân rotalarını temsil eden çokgenlerin ağırlık merkezleri arası koordinat farklarını ifade etmektedir.

$$X = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (8)$$

$$Y = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (9)$$

$$\Delta S_G = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (10)$$

Alan Kesişme Oranı (A_{KO}), yayaların yürüme örüntüleri ifade eden çokgenlerin ve iç mekân rotalarını ifade eden çokgenlerin kesişen alan miktarının (A_K), ikisi arasındaki ($A_{Örüntü}$, A_{Rota}) daha küçük alana oranı olarak ifade edilir (Eş. 11). Kesişme oranı fazla olan çokgenlerin birbirlerine benzer olma olasılıkları daha yüksektir.

$$A_{KO} = \frac{A_K}{\min(A_{Örüntü}, A_{Rota})} \quad (11)$$

Dışbükeylik (DB), bir çokgenin alanının (A_{CG}), kendisini sınırlayan minimum dışbükey çokgeninin alanına (A_{MDC}) oranı olarak ifade edilir (Eş. 12). Bir çokgenin içe veya dışa olan kıvrımlılık derecesini ifade eder [41, 57].

$$DB = \frac{A_{CG}}{A_{MDC}} \quad (12)$$

Dikdörtgensellik (DD), bir çokgenin alanının (A_{CG}), kendisini sınırlayan Minimum Alan Sınırlayıcı Dikdörtgeninin alanına (A_{MASD}) oranı olarak ifade edilir (Eş. 13). Bu ölçü, ilgili çokgenin dikdörtgene olan benzerliğini ortaya koyar [40, 57].

$$DD = \frac{A_{CG}}{A_{MASD}} \quad (13)$$

Eşdeğer Dikdörtgen Göstergesi (EDG), bir çokgenin MASD'sinin çevresi ve kendi çevresi arasındaki oranın, çokgen alanına göre ölçeklenen MASD alanı ile çarpılması elde edilir (Eş. 14). EDG, DD ölçüsünün çokgenlerdeki uzun ve ince çıkıntılara olan hassasiyetini azaltmaktadır [40, 57].

$$EDG = \sqrt{\frac{A_{CG}}{A_{MASD}}} \times \frac{P_{MASD}}{P_{CG}} \quad (14)$$

Dönüklük Açısı (θ°_{MASD}), çokgene ait MASD'nin yatay ekseni ve uzun kenarı arasında kalan açıdır (Eş. 15) [57].

$$\theta^{\circ}_{MASD} = \arctan\frac{\Delta Y_{MASD}}{\Delta X_{MASD}} \ (0° \le \theta_{MASD} \le 180°) \quad (15)$$

Tüm ölçülerin hesaplanmasının ardından, benzerliklerin ortaya konması için yayaların yürüme örüntüleri ve iç mekân rotalarına ait ölçüler (A_{KO} ve ΔS_G hariç) arasındaki farklar Eş. 16 ile hesaplanmıştır.

$$\Delta_{Ölçü} = |Ölçü_{Örüntü} - Ölçü_{Rota}| \quad (16)$$

3.4. Kriterlerin Bağımsızlıklarının İncelenmesi (Examination of the Independence of Criteria)

Çalışmada 4'ü çizgi tabanlı ve 8'i çokgen tabanlı olmak üzere 12 adet geometrik benzerlik ölçüsü hesaplanmıştır. Bu ölçülerin BAHS yöntemi ile ağırlıkları belirlenmeden önce, ilgili ölçülerin bağımsızlıkları kontrol edilmelidir. Bu amaçla çizgi ve çokgen tabanlı geometrik benzerlik ölçülerine ilk olarak çoklu doğrusal bağlantı testi uygulanmıştır. Tipik olarak, Varyans Enflasyon Faktörü (VEF) değerinin 10'un üzerinde olması veya Tolerans (TOL) değerinin 0,1'den düşük olması çoklu doğrusal bağlantı sorununa işaret etmektedir. Çalışmada, ilgili ölçülerde çoklu doğrusal bağlantı sorunun tespiti halinde, bağımlı kriterlerin tespit edilmesi için Spearman'ın sıralama korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Spearman sıralama korelasyon katsayısının 0,7'den büyük veya –0,7'den küçük olması durumunda iki ölçü bağımlı olarak kabul edilmiştir. Ölçülerin ilişkili olduğunun tespit edilmesi durumunda, ölçüler Temel Bileşenler Analizi ile ölçü gruplarının doğrusal kombinasyonları olarak tek birer ölçüye indirgenmiştir. İndirgenen ölçüler (temel bileşenler) BAHS sürecinde karar vericilerin görüşleri doğrultusunda ağırlıklandırılmış ve temel bileşenlere ait faktör skorları da TOPSIS yönteminde ölçü değerleri olarak işleme alınmıştır.

3.5 Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci Yöntemi ile Kriterlerin Ağırlıklandırılması (Weighting of the Criteria with Fuzzy Analytical Hierarchy Process Method)

Yürüme örüntüleri ve iç mekân rotaları arasındaki geometrik benzerliğin ortaya konması açısından kriterlerin bağıl etkileri farklı olmaktadır. Bu çalışmada, kriterlerin önem derecelerinin belirlenerek ağırlıklandırılması için Buckley [58] tarafından geliştirilen bulanık geometrik ortalama tabanlı BAHS yöntemi kullanılmıştır. ÇKKA problemi, amaç, ana kriterler ve alt kriterler olmak üzere 3 hiyerarşik aşama olarak modellenmiştir. Daha sonra, uzaktan algılama, kartografya ve coğrafi bilgi biliminde uzman 7 adet karar vericinin görüşleri doğrultusunda kriterler, BAHS yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Her bir karar vericiden elde edilen ağırlıklar, aritmetik ortalama tabanlı bireysel önceliklerin birleştirilmesi yöntemi [59] ile tek birer değere indirgenmiştir. BAHS yöntemi ile kriterlerin ağırlıklandırılması aşağıdaki adımlar ile özetlenmiştir.

Adım 1. İlk olarak, ana ve alt kriterler için karar vericilerin görüşlerinden yararlanılarak elde edilen sözel değişkenler Buckley [58]'nin ölçeği kullanılarak üçgensel üyelik fonksiyonu ile bulanık üçgensel sayılara dönüştürülmüş (Tablo 4); ana ve alt kriterler için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur (Eş. 17). Eşitlikte $\tilde{a}_{ij}$ kriter önem derecelerini ifade eden bulanık sayıları temsil etmektedir.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & (1,1,1) & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Tablo 4. Kriterler için kullanılan ikili karşılaştırma ölçeği [58] (The pairwise comparison scale used for the criteria)

Sözel değişken	Önem ölçeği	Bulanık önem ölçeği
Eşit Derecede Önemli	1	(1, 1, 1)
Orta Derecede Daha Önemli	3	(2, 3, 4)
Oldukça Daha Önemli	5	(4, 5, 6)
Çok Daha Önemli	7	(6, 7, 8)
Aşırı Derecede Daha Önemli	9	(9, 9, 9)
Ara Değerler	2, 4, 6, 8	(1, 2, 3), (3, 4, 5), (5, 6, 7), (7, 8, 9)

Adım 2. Bulanık ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasının ardından, ikili karşılaştırma matrisleri için tutarlılık oranı (TO), rastgele indeks (RI) kullanılarak Eş. 18 ile kontrol edilmiştir [49]. Eşitlikte λ_{maks} karar matrisinin en büyük öz vektörünü, n ise kriter sayısını ifade etmektedir.

$$TO = \frac{\lambda_{maks} - n}{(n-1) \times RI} \tag{18}$$

Adım 3. Her bir kriter için bulanık geometrik ortalama ($\tilde{r}_i$) değeri Eş. 19 ile hesaplanmıştır.

$$\tilde{r}_i = \left(\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \cdots \otimes \tilde{a}_{in}\right)^{1/n} \tag{19}$$

Adım 4. Çalışmada kullanılan her ölçünün bulanık ağırlığı ($\tilde{w}_i$) Eş. 20 ile hesaplanmıştır.

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \cdots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \tag{20}$$

Adım 5. Son adımda, bulanık ağırlıklar "Centre of Area" durulaştırma yöntemi [58] kullanılarak hesaplanmıştır (Eş. 21). Eşitlikte l_i, m_i, u_i sırasıyla bir bulanık sayı için küçük, orta ve büyük değerleri ifade etmektedir.

$$\tilde{w}_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3} \tag{21}$$

3.6. TOPSIS Yöntemi ile Navigasyon Ağlarının Geometrik Benzerlik Açısından Sıralanması
(Ranking of the Navigation Networks by Geometric Similarity with TOPSIS Method)

BAHS yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak navigasyon ağlarının (üretilen iç mekân rotalarının), yayaların yürüme örüntülerine olan benzerlikleri açısından sıralanması için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. TOPSIS yöntemi ilk olarak Hwang ve Yoon [60] tarafından ortaya konmuştur. Yöntemin temeli, kriterler esas alınarak alternatiflerin ideal çözüme olan uzaklıklarının hesaplanmasına dayanır. Pozitif ideal çözüme en yakın alternatif ve negatif ideal çözüme en uzak alternatif, en iyi alternatif olarak seçilir, diğer alternatifler ise uzaklıkları esas alınarak sıralanır [48]. TOPSIS yönteminin uygulanması için aşağıdaki adımlar izlenmiştir [60].

Adım 1. İlk adımda, alternatifler (navigasyon ağları) ve kriterler kullanılarak (m × n) boyutunda karar matrisi (X) oluşturulmuştur (Eş. 22). Eşitlikte , m ve n sırasıyla, alternatifleri ve kriter sayılarını ifade etmektedir. x_{ij}, i = 1, 2, …, n, j = 1, 2, …, m olmak üzere i. alternatifin j. kriterine göre değerini göstermektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{22}$$

Adım 2. İkinci adımda, kriterlere ait ölçüler farklı aralıklarda bulunduğundan kriter ölçüleri arasında karşılaştırma yapabilmek adına karar matrisi Eş. 23 ile normalize edilerek normalize karar matrisi (R) oluşturulmuştur (Eş. 24). Eşitlikte r_{ij} alternatiflerin ilgili kriter açısından normalize edilmiş değerlerini ifade etmektedir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}},\ i = 1, 2, \ldots, m;\ j = 1, 2, \ldots, n \tag{23}$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \tag{24}$$

Adım 3. Önceki adımlarda BAHS yöntemi ile hesaplanan kriter ağırlıkları (w_i), normalize edilmiş karar matrisinin ağırlıklandırılması için kullanılmıştır (Eş. 25). Burada $w = (w_1, w_2, \ldots w_j, \ldots, w_n)$ kriterlerin ağırlık kümesini temsil etmekte ve $\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$'dir. Eşitlikte v_{ij} normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisi elemanlarını temsil etmektedir.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \tag{25}$$

Adım 4. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin oluşturulmasının ardından kriterlerin fayda veya zarar durumları dikkate alınarak pozitif ideal çözüm kümesi (A^+) ve negatif ideal çözüm kümesi (A^-) sırasıyla Eş. 26 ve Eş. 27 ile hesaplanmıştır.

$$A^+ = \left\{\left(\max_i v_{ij} \mid j \in J\right),\ \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J'\right)\right\} = \{v_1^+, v_2^+, \ldots, v_n^+\} \tag{26}$$

$$A^- = \left\{\left(\min_i v_{ij} \mid j \in J\right),\ \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J'\right)\right\} = \{v_1^-, v_2^-, \ldots, v_n^-\} \tag{27}$$

Eşitlikle J, fayda kriteri, J' ise zarar kriteri ile ilişkilendirilmiştir.

Adım 5. Bu adımda, önceki adımda hesaplanan pozitif ve negatif ideal çözüm kümeleri kullanılarak her bir kriter için pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıklar (S_i^+ ve S_i^-) öklid mesafesi kullanılarak hesaplanmıştır (Eş 28 ve Eş. 29).

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^+\right)^2} \tag{28}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \tag{29}$$

Adım 6. Önceki adımda hesaplanan ideal çözüme olan pozitif ve negatif mesafeler kullanılarak alternatifler için ideal çözüme göreceli yakınlık değerleri (C_i^*) Eş. 30 ile hesaplanmıştır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \tag{30}$$

Eşitlikte C_i^*, $0 \le C_i^* \le 1$ aralığında değerler almaktadır. İdeal pozitif durumda bir alternatifin göreceli yakınlık değeri $C_i^* = 1$'e yakınsamaktadır. İdeal negatif durumda ise bir alternatifin göreceli yakınlık değeri $C_i^* = 0$'a yakınsamaktadır.

Adım 7. Son adımda, TOPSIS yöntemi ile hesaplanan göreceli yakınlık değerleri esas alınarak navigasyon ağları, iç mekân rotalarına olan geometrik benzerlik durumlarına göre sıralanmıştır.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

4.1. Geometrik Benzerlik Ölçüleri Arasındaki Farklar
(Differences Between Geometric Similarity Measures)

Yayaların yürüme örüntüleri ve navigasyon ağları için geometrik benzerlik ölçüleri arasındaki farklar Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda Alan Kesişme Oranı hariç diğer ölçülere ait değerlerin az olması, Alan Kesişme Oranı için ise değerlerin fazla olması ilgili navigasyon ağının, yayaların yürüme örüntülerine geometrik açıdan daha benzer olduğunu ortaya koymaktadır. Çizgi tabanlı benzerlik ölçüleri arasındaki farklar incelendiğinde, Hausdorff mesafesi ve Kıvrımlılık ölçüleri açısından ONİYSG tabanlı navigasyon ağı, yayaların yürüme örüntülerine diğer ağlara kıyasla daha yakındır. Uzunluk ölçüsü

Tablo 5. Geometrik benzerlik ölçüleri için betimleyici istatistikler (The descriptive statistics for the geometric similarity measures)

Ağ		OED		Grid		ONİYSG		EDA	
		Ort.	Ss.	Ort.	Ss.	Ort.	Ss.	Ort.	Ss.
Çizgi Tabanlı	ΔL (m)	2,551	1,198	1,070	1,078	1,167	0.899	2,332	0,856
	ΔD_H (m)	2,071	0,210	2,482	0,407	1,810	0,290	2,089	0,462
	ΔS	0,108	0,037	0,088	0,134	0,046	0,031	0,145	0,143
	$\Delta\theta_M$ (°)	68,257	49,332	64,571	57,662	70,680	61,892	49,787	30,161
Çokgen Tabanlı	ΔP (m)	5,134	2,437	2,215	2,100	2,336	1,790	4,659	1,727
	ΔA (m^2)	1,280	0,613	0,552	0,528	0,571	0,431	1,153	0,431
	ΔS_G (m)	0,483	0,273	0,942	0,383	0,602	0,273	0,557	0,343
	A_{KO} (%)	52,193	7,613	21,642	3,488	53,911	6,661	28,678	3,841
	ΔDB	0,027	0,034	0,045	0,041	0,018	0,013	0,111	0,101
	ΔDD	0,018	0,030	0,042	0,060	0,009	0,012	0,106	0,125
	ΔEDG	0,036	0,034	0,044	0,050	0,016	0,013	0,111	0,096
	$\Delta\theta_{MASD}$ (°)	6,243	10,339	3,445	4,076	3,602	3,989	3,791	3,999

açısından ise Grid tabanlı navigasyon ağı en yakın ağdır; ancak ONİYSG tabanlı navigasyon ağı ile aradaki fark küçük düzeydedir (0,1 metre). Benzer rotaların daha az uzunluk farklarına sahip olması beklense de uzunluk ölçüsü, bir yolun geometrisini doğrudan temsil etmediği için kaba bir göstergedir. Ortalama Dönüklük Açısı ölçüsü için sonuçlar incelendiğinde ise EDA tabanlı navigasyon ağı, yayaların yürüme örüntülerine daha yakın sonuç vermiştir; ancak Ortalama Dönüklük Açısı ölçüsü yapısı gereği aykırı değerlere oldukça eğilimlidir. EDA tabanlı navigasyon ağında doğrudan görünebilirlik durumunda düğüm noktaları en kısa kenarları oluşturacak şekilde birleştirildiğinden düğüm sayısı diğer navigasyon ağlarına kıyasla daha azdır; diğer navigasyon ağlarında küçük açı farkları da hesaba katıldığından ortalama değerler daha az olabilmektedir. Ortalama Dönüklük Açısı için diğer navigasyon ağları arasındaki farklar ise küçük düzeydedir.

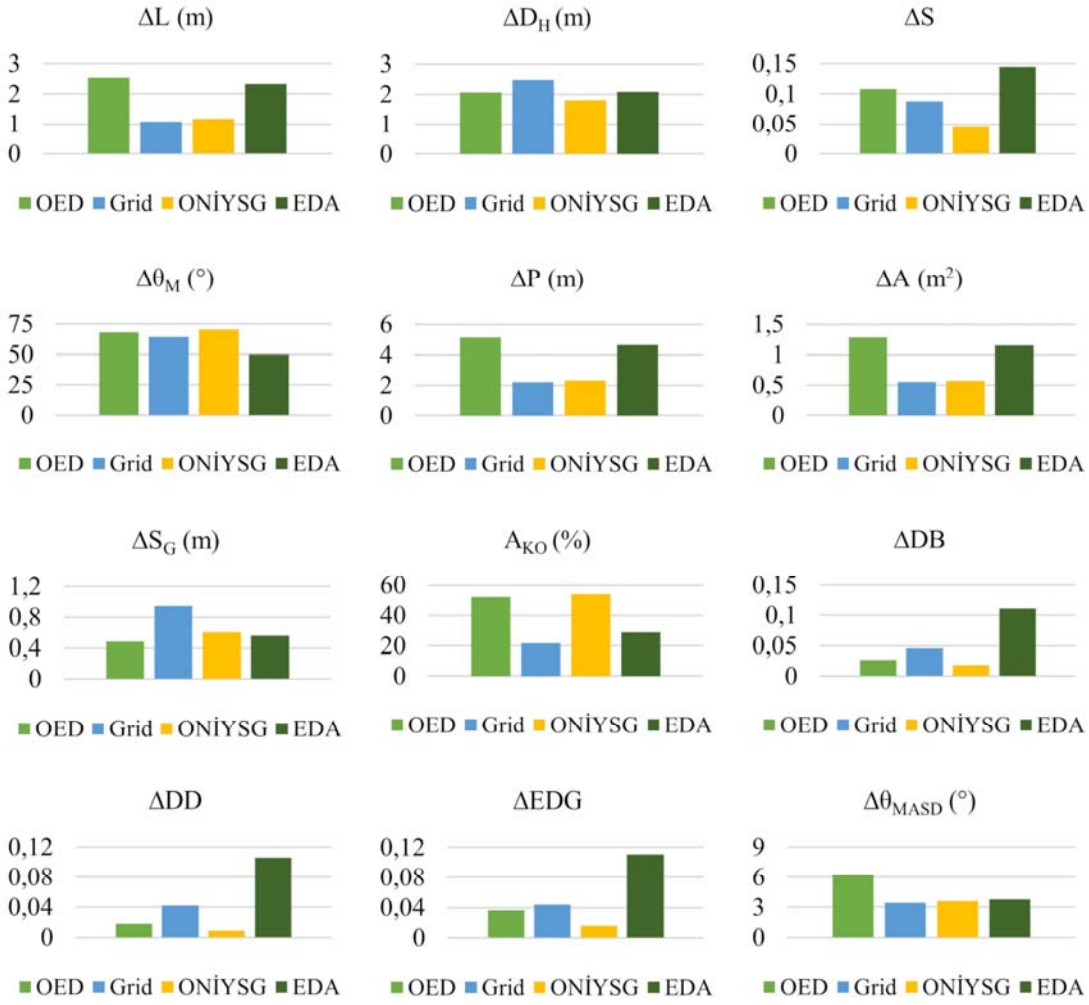
Çokgen tabanlı geometrik benzerlik değerlendirmesi incelendiğinde ise bir çokgenin boyutunu ifade eden Çevre ve Alan ölçüleri için Grid ve ONİYSG tabanlı navigasyon ağları, yayaların gerçek yürüme örüntülerine daha yakın sonuçlar vermiştir. Konumu ifade eden Ağırlık Merkezleri Arasındaki Mesafe ölçüsü için ise OED tabanlı navigasyon ağı, en yakın sonuçları vermiştir, OED'i sırasıyla EDA ve ONİYSG tabanlı navigasyon ağları izlemektedir. Çalışmada, katılımcılar uzun mesafe yürümeleri gereken düz koridorlarda genellikle koridor orta ekseninden yürümeyi tercih etmişlerdir; iç mekânların doğrudan birbirlerini görmeleri durumunda ise genellikle en kısa rotaya benzer biçimde yürümeyi tercih etmişlerdir. Bu durum, Ağırlık Merkezleri Arası Mesafe ölçüsü için sırasıyla OED ve EDA tabanlı navigasyon ağlarının, yayaların yürüme örüntülerine daha benzer olması durumunu açıklayabilmektedir. Alan Kesişme Oranı açısından ONİYSG ve OED tabanlı navigasyon ağları, yayaların yürüme örüntülerine daha yakın sonuç vermiştir. Yayalar uzun ve geniş koridorlarda, koridor orta ekseninde yürümeyi tercih ettiklerinden ve iç mekânların doğrudan birbirini gördüğü veya iç mekânı niteleyen tabela vb. unsurları gördüklerinde ise en kısa rota oluşturacak şekilde yürüdüklerinden ONİYSG tabanlı navigasyon ağında Voronoi çokgenlerinin komşuluk durumları kullanılarak üretilen rotalar, Alan Kesişme Oranı bakımından yayaların yürüme örüntülerine daha benzer olma durumunu açıklamaktadır. Şekli (Biçimi) ifade eden Dışbükeylik, Dikdörtgensellik, Eşdeğer Dikdörtgen Göstergesi ve çokgenin dönüklüğünü ifade eden Dönüklük Açısı dikkate alındığında, dönüklük bakımından küçük bir farkla geride kalsa da (0,157°) ONİYSG navigasyon ağı, bu ölçüler açısından da yayaların yürüme örüntülerine geometrik benzerlik açısından daha yakındır. Genel olarak ortalama farklar ve standart sapmalar dikkate alındığında, ONİYSG navigasyon ağının yayaların yürüme örüntülerine geometrik olarak daha benzer olduğu söylenebilmektedir. Şekil 7'de ölçülere ait ortalama değerler sütun grafiği ile görselleştirilmiştir. Şekilde, Alan Kesişme Oranı hariç diğer ölçülere ait değerlerin az olması, Alan Kesişme Oranı için ise değerlerin fazla olması ilgili navigasyon ağının, geometrik açıdan daha benzer olduğunu ortaya koymaktadır.

4.2. Kriter Bağımsızlıkları (Independence of the Criteria)

Kriter bağımsızlıklarının incelenmesi için yapılan çoklu doğrusal bağlantı testine ilişkin sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. VEF ve TOL değerleri incelendiğinde ΔP, ΔA, ΔDB, ΔDD ve ΔEDG ölçülerinde çoklu doğrusal bağlantı sorunu göze çarpmaktadır. İlgili ölçülerden, ilişkili ölçü gruplarının tespiti için hesaplanan Spearman sıralı korelasyon katsayıları Tablo 7'de verilmiştir. Buna göre ΔP-ΔA (ρ = 0,993), ΔDB-ΔDD (ρ = 0,927), ΔDB-ΔEDG (ρ = 0,941) ve ΔDD-ΔEDG (ρ = 0,995) ölçü gruplarının ilişkili olduğu tespit edilmiştir. İlişkili olduğu tespit edilen ölçü grupları, Temel Bileşenler Analizi yöntemi ile tek birer değişken olarak indirgenmiştir. Analize göre ΔP-ΔA ölçü çiftinin doğrusal kombinasyonundan elde edilen temel bileşen "Boyut" olarak adlandırılırken, ΔDB-ΔDD-ΔEDG ölçü grubundan elde edilen temel bileşen "Çokgensellik" olarak adlandırılmıştır. Sonuçlar incelediğinde Çevre (ΔP) ve Alan (ΔA) ölçülerinin ilişkili olması olağandır. Bir şeklin çevresi arttıkça alanı da oranı değişmekle birlikte artmaktadır. Diğer ilişkili ölçüler (Dışbükeylik, Dikdörtgensellik ve Eşdeğer Dikdörtgen Göstergesi) incelendiğinde, bu ölçülerin benzer terimler kullanılarak hesaplanmaları (Eş. 12-14) ve ortalama farklarının benzer düzeylerde olmaları dolasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Temel Bileşenler Analizi ile toplamda 5 adet ölçü, 2 kriter olarak indirgenmiştir. Bu durum, BAHS sürecinde karar vericilerin yapması gereken ikili karşılaştırma sürecini azaltmakta ve karşılaştırma tutarlılığını artırabilmektedir [61]. Genel olarak, kriter bağımsızlıklarının incelenerek boyut indirgeme işlemi ile çalışmada BAHS yöntemi ile hesaplanan ağırlıkların daha tutarlı ve doğru olacağı öngörülmektedir.

4.3. BAHS Yöntemi ile Hesaplanan Kriter Ağırlıkları (Weights of the Criteria Calculated by the FAHP Method)

Navigasyon ağı seçimi için literatürde yapılan çalışmalarda, her bir kriter için ayrı birer değerlendirme yapılmakta [13, 18, 36, 62] ve bu durum navigasyon ağı seçimi için belirsizlik yaratabilmektedir. Bunun yerine, kapsayıcı bir değerlendirme için kullanılan kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi adına uzman görüşlerinden yararlanılarak ikili karşılaştırmalar ile kriterlerin önem dereceleri BAHS yöntemi ile hesaplanmıştır (Tablo 8). Kurulan hiyerarşik yapıya göre önce ana kriterler kendi içinde ağırlıklandırılmış ve alt kriter ağırlıkları hesaplandıktan sonra hiyerarşik yapı göz önünde bulundurularak global kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. 7 adet karar vericinin görüşleri doğrultusunda BAHS yöntemi ile ana kriterler sırasıyla 0,356 ve 0,644 olarak hesaplanmıştır. Bu durumun sebebinin çokgen tabanlı geometrik benzerlik değerlendirmesinin, yayaların iç



Şekil 7. Çalışmada kullanılan geometrik benzerlik ölçülerine ait sütun grafikleri
(Bar charts of the geometric similarity measures used in the study)

mekân içerisindeki genişliğini dikkate aldığından daha gerçekçi bir geometrik benzerlik değerlendirilmesi yapılmasına imkân tanıması olduğu düşünülmektedir. Kriterlerin global ağırlıkları incelendiğinde özellikle Alan Kesişme Oranı (0,3085), Hausdorff Mesafesi (0,1727) kriterlerinin global ağırlıklarının yüksek olduğu gözükmektedir (Tablo 8). Alan Kesişme Oranı, MASD gibi yardımcı şekiller yerine doğrudan yürüme örüntüleri ve iç mekân rotalarına ait tampon bölgeleri kullandığı için ve rota boyunca hareketi temsil ettiğinden ağırlığının yüksek olması olağan olarak görülmüştür. Aynı şekilde, Hausdorff Mesafesi'nin farklı ölçekteki mekânsal veri tabanlarında çizgi detaylarının eşleştirilmesi için sık kullanılan önemli bir ölçü olması nedeniyle diğer kriterlere kıyasla ağırlığının yüksek olması olağandır.

Çalışmada geometrik benzerliği değerlendirmek adına iki farklı ana kriter ve sırasıyla 4 ve 5 adet olmak üzere toplam 9 adet alt kriter, bir karar verme problemi olarak ele alınmış ve karar verme probleminin yapısına uygun olarak 4 katmanlı (Amaç, Ana Kriterler, Alt Kriterler, Alternatifler) bir hiyerarşi olarak modellenerek geometrik benzerliğin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Bu sayede, iç mekân rotaları ve yayaların yürüme örüntüleri geometrik benzerlik açısından çok kriterli ve kapsayıcı olarak ele alınmıştır. AHS yöntemlerinin ilkelerinden olan önceliklerin sentezi ilkesine göre her bir alt kriterin global ağırlıkları, bir üst katmandaki kriter ağırlıkları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Böylelikle, her bir kriterin ayrı ayrı değerlendirme probleminin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Çalışmada ortaya konan kriterler dışında daha fazla sayıda geometrik benzerlik ölçüsü, kriter olarak yönteme eklenerek benzerlik değerlendirmesi için kullanılabilecek olmasına rağmen bu durum BAHS yönteminde yapılan ikili karşılaştırmaların sayısını (n(n-1)/2) artıracağından bilişsel bir süreç olan ikili karşılaştırmaların doğruluğunu ve tutarlılığını azalmaktadır [61]. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda çalışmada geometrik benzerlik değerlendirmesi için önemli bulunarak kullanılan kriterlerin kapsayıcı bir geometrik benzerlik değerlendirmesi için yeterli olduğu düşünülmektedir.

4.4. TOPSIS Yöntemi ile Navigasyon Ağlarının Sıralanması
(Ranking of the Navigation Networks by the TOPSIS Method)

Navigasyon ağlarının TOPSIS yöntemi ile geometrik benzerlik açısından sıralanması için her bir kriterin fayda ve zarar durumları göz önüne alınması ile hesaplanan pozitif (A^+) ve negatif (A^-) ideal çözüm değerleri (Eş. 26 ve 27) Tablo 9'da verilmiştir. Çalışmada kullanılan kriterlerden Alan Kesişme Oranı, fayda kriteri (yüksek olması tercih edilen) yapısında iken diğer kriterler zarar (düşük olması tercih edilen) yapısındadır.

Tablo 6. Çoklu doğrusal bağlantı testi sonuçları
(Results of the multicollinearity test)

Değerlendirme	Ölçü	VEF	TOL
Çizgi Tabanlı	ΔL	1,920	0,521
	ΔD_H	1,222	0,818
	ΔS	2,198	0,455
	$\Delta\theta_M$	1,180	0,848
Çokgen Tabanlı	ΔP	*840,762*	*0,001*
	ΔA	*831,717*	*0,001*
	ΔS_G	1,629	0,614
	A_{KO}	1,797	0,557
	ΔDB	*58,164*	*0,018*
	ΔDD	*42,722*	*0,023*
	ΔEDG	*65,179*	*0,015*
	$\Delta\theta_{MASD}$	1,761	0,568

Tablo 7. İlişkili ölçüler için Spearman sıralı korelasyon katsayıları
(Spearman rank correlation coefficients for the correlated measures)

Ölçü çifti	Korelasyon katsayısı
ΔP-ΔA	0,993
ΔDB-ΔDD	0,927
ΔDB-ΔEDG	0,941
ΔDD-ΔEDG	0,995

Eş. 28 ve 29. kullanılarak hesaplanan alternatiflerin (navigasyon ağlarının) pozitif ve negatif ideal çözümlere olan mesafeleri (S^+ ve S^-), ideal çözüme olan göreceli uzaklık değerleri (C^*) ve navigasyon ağlarının geometrik benzerlik açısından sıralamaları, Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 10 incelediğinde, TOPSIS yöntemi ile yapılan sıralamaya göre ONİYSG tabanlı navigasyon ağının, yayaların yürüme örüntülere geometrik açıdan en benzer ağ olduğu göze çarpmaktadır. ONİYSG tabanlı navigasyon ağını sırasıyla OED, Grid ve EDA tabanlı navigasyon ağları izlemektedir. İdeal çözüme olan göreceli uzaklıklar incelendiğinde ONİYSG navigasyon ağının mutlak ideal çözüm değeri olan C = 1'e oldukça yakın olduğu gözlenmektedir ($C_{ONİYSG}$ = 0,9189). OED tabanlı navigasyon ağının ideal çözüme olan göreceli uzaklık değeri ise orta derecedir (C_{OED} = 0,7056). Grid ve EDA tabanlı navigasyon ağının ideal çözüme olan göreceli uzaklık değerleri ise sırasıyla C_{Grid} = 0,3828 ve C_{EDA} = 0,2858'dir.

Tablo 10. Pozitif (S^+) ve negatif (S^-) ideal çözümlere olan uzaklıklar ve navigasyon ağlarının sıralanması
(The distances to positive and negative ideal solutions and ranking of the navigation networks)

Navigasyon ağı	S_i^+	S_i^-	C_i	Sıra
OED	0,0621	0,1489	0,7056	2
Grid	0,1376	0,0854	0,3828	3
ONİYSG	0,0152	0,1719	0,9189	1
EDA	0,1449	0,0580	0,2858	4

Literatürde yapılan çalışmalarda [4, 13, 18, 32, 36] çeşitli kriterler açısından öne çıkan görünürlük bölümlendirmesi kategorisinde yer alan EDA tabanlı navigasyon ağı ise yayaların yürüme örüntülerine olan benzerlik açısından oldukça geride kalmıştır. Bu durum deneyde yer alan katılımcıların çoğunun çalışma alanına oldukça aşina olmasına rağmen ilgili görevdeki iç mekâna ait göze çarpan bir nesne ya da kapıyı görene kadar çoğunlukla koridor orta ekseninde yürümesi ile açıklanabilmektedir. Katılımcılar, göze çarpan nesneleri (tabela vb.) veya iç mekâna ait kapıyı gördüklerinde ise orta eksen yerine en kısa şekilde iç mekâna gitmeyi tercih etmişlerdir. Bu durumun, ONİYSG tabanlı navigasyon ağındaki Voronoi çokgenlerinin komşuluk durumlarından gelen ekstra rotalar aracılığıyla hem orta ekseni hem de görünürlük çizgilerinden oluşan en kısa rotayı belli bir dereceye kadar modelleyebilmesiyle ilgili olduğu düşünülmektedir. BAHS yöntemi kullanılarak uzman görüşleri doğrultusunda ağırlıklandırılan kriterler ve TOPSIS yöntemi ile sıralanan alternatifler, orta eksen tabanlı yöntemlerin (ONİYSG ve OED) yayaların iç mekân içerisindeki yürüme örüntülerine daha benzer olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla bu navigasyon ağları tarafından üretilen iç mekân rotalarının, yayaların bilişsel bir süreç olan yön bulma eylemini [8] bilişsel yükü arttırmayacak şekilde destekleyebileceğini ortaya koymaktadır; ancak bu durumun çalışma alanına özgü olup olmadığının farklı yapı ve fonksiyonlara sahip iç mekânlarda da test edilerek doğrulanması gerekmektedir.

Tablo 8. BAHS yöntemi ile hesaplanan kriter ağırlıkları (Criteria weights computed by the FAHP method)

Ana kriter	Lokal ağırlık	Alt kriter	Lokal ağırlık	Global ağırlık
Çizgi Tabanlı Benzerlik	0,356	Uzunluk	0,100	0,0356
		Hausdorff Mesafesi	0,485	0,1727
		Kıvrımlılık	0,295	0,1050
		Ortalama Dönüklük Açısı	0,120	0,0427
Çokgen Tabanlı Benzerlik	0,644	Boyut	0,058	0,0374
		Ağırlık Merkezi Arası Mesafe	0,232	0,1494
		Alan Kesişme Oranı	0,479	0,3085
		Çokgensellik	0,108	0,0696
		Dönüklük Açısı	0,123	0,0792

Tablo 9. Pozitif (A^+) ve negatif ideal (A^-) çözüm değerleri (The positive and negative ideal solution values)

Kriter	A^+	A^-
Uzunluk	0,0100	0,0239
Hausdorff Mesafesi	0,0735	0,1008
Kıvrımlılık	0,0234	0,0738
Ortalama Dönüklük Açısı	0,0167	0,0236
Boyut	-0,0192	0,0220
Ağırlık Merkezi Arası Mesafe	0,0539	0,1051
Alan Kesişme Oranı	0,1999	0,0803
Çokgensellik	-0,0327	0,0578
Dönüklük Açısı	0,0309	0,0559

5. Sonuçlar (Conclusions)

Navigasyon ağları, iç mekânların karmaşık yapısının ve iç mekân unsurlarının birbirleriyle olan ilişkilerinin topolojik birliktelik çizgeleri olarak ifade edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca rota hesaplama algoritmalarıyla hesaplanan iç mekân rotaları, navigasyon sistemleri için kritik bir önem arz etmektedir. Bu yönüyle, iç mekân navigasyonunun önemli bileşenlerinden olan ve bilişsel bir süreç olan yön bulma sürecini desteklemektedir [52]. Yayaların yön bulma eyleminde başarıya ulaşmaları için onlara izlemeleri için sunulan iç mekân rotaları, bilişsel yüklerini azaltıcı yönde olmalıdır. Dolayısıyla, yayaların iç mekân içerisindeki gerçek yürüme örüntülerine geometrik açıdan benzer olmalıdır; ancak literatürde yapılan çalışmalarda bu durum şu ana dek herhangi bir çalışma tarafından değerlendirilmemiştir.

Bu çalışmada, yayaların iç mekân içerisindeki yürüme örüntüleri ve navigasyon ağları aracılığıyla hesaplanan iç mekân rotaları arasındaki geometrik benzerliğin ortaya konması adına CBS ve ÇKKA tabanlı bütünleşik bir yöntem sunulmuştur. İlk aşamada, literatürde çeşitli iç mekân navigasyonu uygulamalarında kullanılan OED, Grid, ONİYSG ve EDA algoritmaları tabanlı 4 adet navigasyon ağı çalışma bölgesi için CBS ortamında oluşturulmuştur. Sonrasında, çalışma alanında bir deney yürütülerek katılımcılara çeşitli görevler verilmiş; katılımcılar ilgili görevleri yerine getirirken yürüme örüntüleri toplanmış ve CBS ortamında yeniden oluşturulmuştur. Daha sonra, eşlenmiş iç mekân rotaları ve yayaların iç mekân içerisindeki yürüme örüntüleri için geometrik benzerliği ortaya koymak adına çizgi ve çokgen tabanlı olmak üzere çeşitli geometrik benzerlik ölçüleri hesaplanmıştır. Literatürde navigasyon ağlarının kullanılabilirlikleri değerlendirilirken, kullanılan her bir kriter için ayrı sıralamalar yapılmakta ve bu durum farklı uygulamalar için navigasyon ağı seçim sürecinde belirsizlik yaratabilmektedir. Bu durumun çözümü için geometrik benzerliği ortaya koymak amacıyla kullanılan ölçüler, BAHS süreci ile uzman görüşleri doğrultusunda ağırlıklandırılmıştır. Ölçülerin global ağırlık değerleri, TOPSIS yöntemi ile navigasyon ağlarının yayaların yürüme örüntülerine olan geometrik benzerliği açısından sıralanması için kullanılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen bulgulara göre temelinde orta eksen çıkarımı tabanlı ve aynı zamanda görünürlük tabanlı navigasyon ağlarının en kısa rotalarını belirli ölçüde temsil eden ONİYSG tabanlı navigasyon ağı, yayaların yürüme örüntülerine en benzer ağ olarak bulunmuştur. Literatürde, rota uzunluğu ve rota üzerinde yapılan dönüş sayısı kriterleri açısından öne çıkan EDA tabanlı navigasyon ağı ise geometrik benzerlik açısından geride kalmıştır; ancak burada hiçbir navigasyon ağının tam anlamıyla yayaların yürüme örüntülerine geometrik açıdan benzemediği not edilmelidir. Çalışmada önerilen yaklaşım ile navigasyon ağı üretim ve seçim sürecinin ÇKKA ile desteklenerek iç mekân navigasyon uygulamaları için bilimsel bir altlık teşkil edeceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada sunulan yaklaşım ile edinilen bulgular neticesinde farklı navigasyon ağlarının çeşitli durumlar için kombine edilerek yeni bir navigasyon ağı üretiminin, yayaların yürüme örüntülerine olan geometrik benzerliği artıracağı düşünülmektedir. Ayrıca, bu çalışmada önerilen CBS ve ÇKKA tabanlı bütünleşik yaklaşımın geometrik benzerlik ölçülerine ek olarak dönüş sayısı, düğüm noktası sayısı, mekân dizimi ölçülerini de kapsayacak şekilde farklı fonksiyonlara sahip binalarda (hastane, havalimanı vb.) değerlendirildiği bir çalışma gelecek çalışmalarda ele alınabilir.

Kaynaklar (References)

1. Huang, H., Gartner, G., Krisp, J. M., Raubal, M., Van de Weghe, N., Location based services: Ongoing evolution and research agenda, Journal of Location Based Services, 12 (2), 63-93, 2018.
2. Gunduz, M., Isikdag, U., Basaraner, M., Trending technologies for indoor fm: Looking for "geo" in information, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-2/W1, 277-283, 2016.
3. Raper, J., Gartner, G., Karimi, H., Rizos, C., Applications of location-based services: A selected review, Journal of Location Based Services, 1 (2), 89-111, 2007.
4. Vanclooster, A., Vanhaeren, N., Viaene, P., Ooms, K., De Cock, L., Fack, V., Van de Weghe, N., De Maeyer, P., Turn calculations for the indoor application of the fewest turns path algorithm, International Journal of Geographical Information Science, 33 (11), 2284–2304, 2019.
5. Rüetschi, U. J., Timpf, S., Modelling wayfinding in public transport: Network space and scene space, Spatial Cognition IV, Reasoning, Action, Interaction, Spatial Cognition 2004, Lecture Notes in Computer Science, Editörler: Barkowsky, T., Freksa, C., Knauff, M., Krieg-Brückner, B., Nebel, B., Springer, Berlin, Heidelberg, 3343, 24-41, 2005.
6. Fellner, I., Huang, H., Gartner, G., "Turn left after the WC, and use the lift to go to the 2nd floor"—Generation of landmark-based route instructions for indoor navigation, ISPRS International Journal of Geo-Information, 6 (6), 183, 2017.
7. Giudice, N. A., Walton, L. A., Worboys, M., The informatics of indoor and outdoor space: A research agenda, Proceedings of the Second ACM SIGSPATIAL International Workshop On Indoor Spatial Awareness, San Jose, CA, New York, 47-53, 2 November, 2010.
8. Arthur, P., Passini, R., Wayfinding: People, signs and architecture, McGraw Hill, New York, 1992.
9. Vanclooster, A., Van de Weghe, N., De Maeyer, P., Integrating indoor and outdoor spaces for pedestrian navigation guidance: A review, Transactions in GIS, 20 (4), 491-525, 2016.
10. Jamshidi, S., Ensafi, M., Pati, D., Wayfinding in interior environments: An integrative review. Frontiers in Psychology, 11, 549628, 1-24, 2020.
11. De Cock, L., Ooms K., Van de Weghe, N., Vanhaeren, N., Pauwels, P., De Maeyer, P., Identifying what constitutes complexity perception of decision points during indoor route guidance, International Journal of Geographical Information Science, 35 (6), 1232–1250, 2021.
12. Ohm, C., Müller, M., Ludwig, B., Displaying landmarks and the user's surroundings in indoor pedestrian navigation systems, Journal of Ambient Intelligence And Smart Environments, 7 (5), 635-657, 2015.
13. Park, J., Goldberg, D. W., Hammond, T., A comparison of network model creation algorithms based on the quality of wayfinding results, Transactions in GIS, 24 (3), 602–622, 2020.
14. Afyouni, I., Ray, C., Claramunt, C., Spatial models for context-aware indoor navigation systems: A survey, Journal of Spatial Information Science, 4 (4), 85-123, 2012.
15. Zhou, Z., Weibel, R., Ritcher, KF., Huang, H., HIVG: A hierarchical indoor visibility-based graph for navigation guidance in multi-storey buildings, Computers, Environment And Urban Systems, 93, 101751, 2022.
16. Bilgili, A., Şen, A., Başaraner, M., İç mekân navigasyonu ağ modelleri: Karşılaştırmalı bir inceleme, Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 9 (2), 108-126, 2022.
17. Karas, I. R., Batuk, F., Akay, A. E., Baz, I., Automatically extracting 3D models and network analysis for indoors, Innovations in 3D Geo Information Systems, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Editörler: Abdul-Rahman, A., Zlatanova, S., Coors, V., Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
18. Vanclooster, A., Van de Weghe, N., Fack, V., De Maeyer, P., Comparing indoor and outdoor network models for automatically calculating turns, Journal of Location Based Services, 8 (3: 11th International Symposium on Location-Based Services), 148–165, 2014.
19. Lee, D. T., Medial Axis Transformation of a planar shape, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-4 (4), 363–369, 1982.
20. Lee, J., A spatial access-oriented implementation of a 3-D GIS topological data model for urban entities, GeoInformatica, 8, 237–264, 2004.
21. Lee, J., A three-dimensional navigable data model to support emergency response in microspatial built-environments, Annals of the Association of American Geographers, 97 (3), 512–529, 2007.
22. Becker, T., Nagel, C., Kolbe, T. H., A multilayered space-event model for navigation in indoor spaces, 3D Geo-Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Editörler: Lee, J., Zlatanova, S., Springer, Berlin, Heidelberg, 61–77, 2009.
23. Jamali, A., Rahman A. A., Boguslawski, P., Kumar, P., Gold, C. M., An automated 3D modeling of topological indoor navigation network, GeoJournal, 82, 157–170, 2017.

24. Lin, W. Y., Lin, P. H., Intelligent generation of indoor topology (i-GIT) for human indoor pathfinding based on IFC models and 3D GIS technology, Automation in Construction, 94, 340–359, 2018.

25. Mortari, F., Zlatanova, S., Liu, L., Clementini, E., Improved Geometric Network Model (IGNM): A novel approach for deriving connectivity graphs for indoor navigation, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II–4, 45–51, 2014.

26. Li, X., Claramunt, C., Ray, C., A grid graph-based model for the analysis of 2D indoor spaces, Computers, Environment and Urban Systems 34 (6), 532–540, 2010.

27. Wang, B., Li, H., Rezgui, Y., Bradley, A., Ong, H. N., BIM based virtual environment for fire emergency evacuation. Scientific World Journal, 2014.

28. Xu, M, Wei, S., Zlatanova, S., Zhang, R., BIM-based indoor path planning considering obstacles, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W4, 417–423, 2017.

29. Xu, W., Liu, L., Zlatanova, S., Penard, W., Xiong, Q., A pedestrian tracking algorithm using grid-based indoor model, Automation in Construction, 92, 173–187, 2018.

30. Lewandowicz, E., Lisowski, P., Flisek, P., A modified methodology for generating indoor navigation models, ISPRS International Journal of Geo-Information, 8 (2), 60, 2019.

31. Turner, A., Doxa, M., O'Sullivan, D., Penn, A., From isovists to visibility graphs: A methodology for the analysis of architectural space, Environment and Planning B: Planning and Design, 28 (1), 103–121, 2001.

32. Pang, Y., Zhou, L., Lin, B., Lv, G., Zhang, C., Generation of navigation networks for corridor spaces based on indoor visibility map, International Journal of Geographical Information Science, 34 (1), 177–201, 2020.

33. Yang, L., Worboys, M., Generation of navigation graphs for indoor space, International Journal of Geographical Information Science, 29 (10), 1737–1756, 2015.

34. Stoffel, EP., Lorenz, B., Ohlbach, H. J., Towards a semantic spatial model for pedestrian indoor navigation, Advances in Conceptual Modeling – Foundations and Applications, ER 2007, Lecture Notes in Computer Science, Cilt 4802, Springer, Berlin, Heidelberg, 328-337, 2007.

35. Lee, JK., Eastman, C. M., Lee, J., Kannala, M., Jeong, YS., Computing walking distances within buildings using the Universal Circulation Network, Environment and Planning B: Planning and Design, 37 (4), 628–645, 2010.

36. Liu, L, Zlatanova, S., A "door-to-door" path-finding approach for indoor navigation, Proceedings of the Gi4DM 2011: GeoInformation for Disaster Management, Antalya, Turkey, 3-8 May, 2011.

37. Kneidl, A., Borrmann, A., Hartmann, D., Generation and use of sparse navigation graphs for microscopic pedestrian simulation models, Advanced Engineering Informatics 26 (4), 669–680, 2012.

38. Chehreghan, A., Abbaspour, R. A., An assessment of spatial similarity degree between polylines on multi-scale, multi-source maps, Geocarto International, 32 (5), 471-487, 2016.

39. Angel S., Parent J., Civco D. L., Ten compactness properties of circles: Measuring shape in geography, The Canadian Geographer / Le Géographe Canadien, 54, 441–461, 2010.

40. Basaraner, M., Cetinkaya, S., Performance of shape indices and classification schemes for characterising perceptual shape complexity of building footprints in GIS, International Journal of Geographical Information Science, 31 (10), 1952–1977, 2017.

41. Duman, H. S., Başaraner, M., Şekil göstergeleri ve topluluk öğrenmesi sınıflandırma algoritmaları ile bina detaylarının şekil karmaşıklık analizi, Geomatik, 7 (3), 197-208, 2022.

42. Huang, H., Kieler, B., Sester, M., Urban building usage labeling by geometric and context analyses of the footprint data. Proceedings of 26th International Cartographic Conference, Dresden, Germany, 25–30 August, 2013.

43. Çetinkaya S., Kartografik genelleştirmede bina dizilimlerinin karakterizasyonu ve yorumlanmasına ilişkin yeni yaklaşımlar, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.

44. Yan, H., Weibel, R., Yang, B., A multi-parameter approach to automated building grouping and generalization, Geoinformatica, 12, 73-89, 2008.

45. Elias, B., Extracting landmarks with data mining methods. Editörler: Kuhn, W., Worboys, M. F., Timpf, S., Spatial information Theory: Foundations of Geographic Information Science, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg, 2825, 375–389, 2003.

46. Grabler, F., Agrawala, M., Sumner, R. W., Pauly, M., Automatic generation of tourist maps, ACM Transactions on Graphics, 27 (3), 1-11, 2008.

47. Ehrlich, D., Kemper, T., Blaes, X., Soille, P., Extracting building stock information from optical satellite imagery for mapping earthquake exposure and its vulnerability, Natural Hazards, 68, 79–95, 2013.

48. Ustaoglu, E., Sisman, S., Aydınoglu, A. C., Determining agricultural suitable land in peri-urban geography using GIS and Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) techniques, Ecological Modelling, 455, 109610, 2021.

49. Saaty, T. L., The Analytic Hierarachy Process, Mcgraw Hill, New York, 1980.

50. Çalık A., Ergülen A., A novel fuzzy group decision making approach for buying a house in pandemic process, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (2), 821-833, 2023.

51. Chen, J., Clarke, K. C., Indoor cartography, Cartography and Geographic Information Science, 47 (2), 95-109, 2020.

52. Liu, L., Li, B., Zlatanova, S., van Oosterom, P., Indoor navigation supported by the Industry Foundation Classes (IFC): A survey, Automation in Construction, 121, 103436, 2021.

53. Dijkstra, E. W., A note on two problems in connexion with graphs, Numerische Mathematik, 1, 269–271, 1959.

54. Hölscher, C., Brösamle, M., Vrachliotis, G., Challenges in multilevel wayfinding: A case study with the space syntax technique, Environment and Planning B: Planning and Design, 39 (1), 63–82, 2012.

55. Li, R., Klippel, A., Wayfinding behaviors in complex buildings: The impact of environmental legibility and familiarity, Environment and Behavior, 48 (3), 482–510, 2016.

56. Lu, Y., Ye, Y., Can people memorize multilevel building as volumetric map? A study of multilevel atrium building, Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 46 (2), 225–242, 2019.

57. Basaraner, M., Geometric and semantic quality assessments of building features in OpenStreetMap for some areas of Istanbul, Polish Cartographical Review, 52 (3), 94-107, 2020.

58. Buckley, J. J., Fuzzy hierarchical analysis, Fuzzy Sets and Systems, 17 (3), 233–247, 1985.

59. Forman, E., Peniwati, K., Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process, European Journal of Operational Research, 108 (1), 165-169, 1998.

60. Hwang, CL., Yoon, K., Multiple attributes decision making, Methods and Applications A State-of-the-Art Survey, Springer, Berlin, Heidelberg, 1981.

61. Rezaei, J. Best-worst multi-criteria decision-making method, Omega, 53, 49-57, 2015.

62. Vanclooster, A., Ooms, K., Viaene, P, Veerle, F., Van de Weghe, N., De Maeyer, P., Evaluating suitability of the least risk path algorithm to support cognitive wayfinding in indoor spaces: An empirical study, Applied Geography, 53, 128–140, 2014.