T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAYLI SİSTEM PROJELERİNDE DEMİRYOLU HATTI UYGUNLUĞUNUN PROJE KRİTERLERİNE GÖRE ANALİZİ

Feyza Sinem BOZKURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Uzaktan Algılama ve CBS Programı

Danışman

Prof. Dr. Fatih GÜLGEN

Şubat, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAYLI SİSTEM PROJELERİNDE DEMİRYOLU HATTI UYGUNLUĞUNUN PROJE KRİTERLERİNE GÖRE ANALİZİ

Feyza Sinem BOZKURT tarafından hazırlanan tez çalışması 12.02.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Uzaktan Algılama ve CBS Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fatih GÜLGEN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fatih GÜLGEN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Müslüm HACAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ahmet Özgür DOĞRU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Fatih GÜLGEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Raylı Sistem Projelerinde Demiryolu Hattı Uygunluğunun Proje Kriterlerine Göre Analizi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Feyza Sinem BOZKURT

İmza

Sevgili eşime

ve

aileme

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sürecinde emeği geçen tüm kişilere içten şükranlarımı sunarım:

Öncelikle, yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlanma fırsatı bulduğum, her aşamada rehberliğiyle beni yönlendiren, akademik desteği ve sabrıyla bu çalışmanın şekillenmesine büyük katkı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Fatih GÜLGEN'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez sürecinin kimi zaman yoğun, kimi zaman da yorucu dönemlerinde yanımda olan ve bana her daim destek veren, sabrı, sevgisi ve anlayışıyla her zaman yanımda olan sevgili eşime ve manevi desteğini esirgemeyen aileme bu süreci daha güçlü tamamlamamı sağladıkları için şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu yolculuğun teknik ve duygusal zorluklarında bana destek olan, motivasyonumu kaybettiğim anlarda yanımda olan, fikirleri ve moral desteği sağlayan dostluklarıyla bana güç veren kıymetli arkadaşlarıma içten teşekkür ederim.

Tüm bu sürecin, akademik gelişimime olduğu kadar kişisel gelişimime de katkı sağladığını belirtmek isterim. Bu sürecin en başından itibaren, karşılaştığım zorluklarda gösterdiğim çabayı ve ilerlemeyi destekleyen en büyük güç yine kendim oldum. Bu çalışmayı, inançla ve özveriyle kendi emeğini ortaya koymanın verdiği iç huzurla tamamlamaktan mutluluk duyuyorum. Kendime, uzun soluklu bu akademik yolculukta yılmadan devam etmede gösterdiğim azim, özveri ve öğrenme isteği için içtenlikle teşekkür ediyorum.

Son olarak, bu tezin bilimsel altyapısına dolaylı veya doğrudan katkı sunan tüm akademisyenlere, kurumlara ve İstanbul'un sürdürülebilir ulaşımına ilham veren mühendislerine şükranlarımı sunarım.

Feyza Sinem BOZKURT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 5

1.1.1 Sürdürülebilir Kent İçi Ulaşım ve Raylı Sistemler 5

1.1.2 Güzergah Planlamasında ÇKKV Yöntemleri ve AHP 8

1.1.3 CBS ve Mekansal Analizi 10

1.1.4 CBS ve AHP Entegrasyonu ile Uygunluk Analizi 12

1.2 Tezin Amacı 15

1.3 Hipotez 15

2 İSTANBUL'DA KENT İÇİ ULAŞIM VE RAYLI SİSTEMLER 17

2.1 İstanbul Hakkında Bilgiler 17

2.2 İstanbul Ulaşım Ağı Sistemi 23

2.2.1 Karayolu Ulaşımı 27

2.2.2 Denizyolu Ulaşımı 29

2.3 İstanbul Raylı Sistem Ulaşım Ağı 30

2.3.1 İstanbul'da Raylı Sistem Kronolojisi 37

3 MATERYAL VE YÖNTEM **41**

3.1 Çalışma Alanı: M5 Üsküdar – Samandıra Metro Hattı.....41

3.2 Raylı Sistem Güzergâh Projesinin Planlama ve Tasarım Aşamaları 49

3.3 Araştırma Modeli ve Kurgusu.....55

3.4 Veri Seti 58

3.4.1 Veri Türleri ve Temini 60

3.4.2 Kriterlerin Mekânsal Temsili ve CBS Entegrasyonu 61

3.5 Metodoloji.....64

3.5.1 Proje Kriterlerinin AHP ile Ağırlıklandırılması 64

3.5.2 CBS Tabanlı Mekansal Uygunluk Analizi 69

3.5.3 Uygunluk Haritası Değerlendirme Yaklaşımı 70

4 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME **72**

4.1 AHP Sonuçları: Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Analizi 72

4.2 Uygunluk Haritası ve Güzergah Analizi.....76

4.3 M5 Hattı Proje Kriterleri ile Model Sonuçlarının Karşılaştırması.....81

4.4 Tartışma 83

4.4.1 Güçlü Yönler 83

4.4.2 Zayıf Yönleri ve Veri Kalitesi Sınırlılıkları 84

5 SONUÇ **86**

KAYNAKÇA **90**

A UZMAN DEĞERLENDİRMESİ **106**

B AHP ANALİZİ HESAPLAMALARI **115**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **126**

SİMGE LİSTESİ

CI	Tutarlılık Analizi
CR	Tutarlılık Oranı
RI	Tutarlılık İndeksi
S	Uygunluk Skoru
W_i	Ağırlık Değeri
λ_{max}	En Büyük Özdeğer
$\sum$	Toplam

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AHP	Analitik Hiyerarşi Süreci
ANP	Analitik Ağ Prosesi
ATO	Otomatik Tren İşletimi
ATP	Otomatik Tren Koruma Sistemi
ATS	Otomatik Tren Durdurma Sistemi
BEDAŞ	Boğaziçi Elektrik Dağıtım Müessesesi
BM	Birleşmiş Milletler
BRT	Otobüs Hızlı Transit - Metrobüs
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
CSV	Virgülle Ayrılmış Değer Uzantılı Dosya Formatı
ÇED	Çevresel Etki Değerlendirmesi
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
DWG	Çizim Dosya Formatı
EN	Avrupa Standardı
EPSG	Avrupa Petrol Araştırma Grubu
F-AHP	Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci Yaklaşımı
GIS	Coğrafi Bilgi Sistemi
GoA4	Otomatik Tren İşletim Sistemi Otomasyon Derecesi
GP	Hedef Programlama
GSYH	Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
HRS	Yüksek Hızlı Tren
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
INRIX	ABD Merkezli Ulaşım Analitiği Firması
İBB	İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İETT	İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri Genel Müdürlüğü

İGDAŞ	İstanbul Gaz Dağıtım Sanayi ve Ticaret A.Ş.
İPA	İstanbul Planlama Ajansı
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
İSTKA	İstanbul Kalkınma Ajansı
İZBAN	İzmir Banliyö Sistemi
MCDM	Çok Kriterli Karar Verme
MÖ	Milattan Önce
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
NATM	Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi
ÖHO	Özel Halk Otobüsleri
SCADA	Merkezi Denetleme (Denetim) ve Kontrol ve Veri Topla Sistemi
SDG	Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
SHP	Shape Dosya Formatı
SUMP	Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı
TBM	Tünel Açma Makinası
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TFN-AHP	Üçgensel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci Yaklaşımı
TOD	Transit Odaklı Gelişim
TOPSIS	İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği
TUREF	Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı
UAB	Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı
UIC	Uluslararası Demiryolu Birliği
UITP	Uluslararası Toplu Taşıma Birliği
WGS 84	Dünya Jeodezi Sistemi 1984
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
YHT	Yüksek Hızlı Treni

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Şehirlere göre en yüksek on trafik geçikme süresi (INRIX, 2024) **2**

Şekil 2.1 İstanbul ili haritası (Saygılı, 2018) **17**

Şekil 2.2 İstanbul mevcut arazi kullanım haritası (İBB Şehir Planlama Müdürlüğü, 2018) **18**

Şekil 2.3 İstanbul'un yıllara göre nüfusu ve nüfus artışı değişim grafiği (TÜİK, 2025) **19**

Şekil 2.4 İstanbul'un yıllara göre nüfus yoğunluğu değişimi (TÜİK, 2025) **20**

Şekil 2.5 İstanbul ili demografik göstergeleri (TÜİK, 2024b) **20**

Şekil 2.6 İstanbul bölgelere göre nüfus yoğunluğu (2023) (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2011) **21**

Şekil 2.7 İstanbul bölgelere göre istihdam yoğunluğu (2023) (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2011) **21**

Şekil 2.8 İstanbul ulaşım araçları (İBB, 2022) **24**

Şekil 2.9 Günlük yolculukların türel dağılım oranları (2020-2040) **25**

Şekil 2.10 Toplu taşıma türel dağılımı (2020-2040) **25**

Şekil 2.11 İstanbul'da sera gazı emisyon miktarının sektörel dağılımları (İBB Çevre Koruma ve Kontrol Başkanlığı, 2023a) **26**

Şekil 2.12 İstanbul şehir hatları sefer haritası (İBB Şehir Hatları, 2025) **30**

Şekil 2.13 Mevcut raylı sistem ağı **33**

Şekil 2.14 İstanbul raylı sistem ağ haritası (Metro İstanbul, 2025a) **33**

Şekil 2.15 2014 – 2024 yılları arası yıllık yolculuk değerleri değişimi (Metro İstanbul, 2024a) **34**

Şekil 2.16 Yıllara göre genel toplam yolculuk sayıları (2024) (Metro İstanbul, 2024b) **35**

Şekil 3.1 M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı **41**

Şekil 3.2 M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı istasyonları **42**

Şekil 3.3 M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı – Anadolu Yakası raylı sistem hatları **43**

Şekil 3.4 M5 hattı boyunca nüfus yoğunluğu haritası **44**

Şekil 3.5 M5 hattı istasyonları ve aktarmalar **45**

Şekil 3.6 İstanbul kabartma haritası – M5 hattı **47**

Şekil 3.7 M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı çalışma alanı **48**
Şekil 3.8 Projenin genel iş akışı aşamaları **50**
Şekil 3.9 Araştırma süreci ve yöntem akış şeması **57**
Şekil 3.10 Analizde kullanılan kriterlerin veri türleri, kaynakları ve CBS işlem adımları **63**
Şekil 4.1 M5 hattı güzergah yatırım maliyeti ve yolculuk talebi **76**
Şekil 4.2 Konut alanları ve kamu-eğitim alanları **77**
Şekil 4.3 M5 hattı güzergah işletme-bakım maliyeti ve sefer sıklığı **77**
Şekil 4.4 Jeolojik faktörler ve toplu taşıma entegrasyonu **77**
Şekil 4.5 M5 hattı güzergah işletme hızı ve hat uzunluğu **78**
Şekil 4.6 Arkeolojik ve tarihi koruma alanları ve nüfus yoğunluğu **78**
Şekil 4.7 M5 hattı güzergah eğimi ve imar planı uyumu **78**
Şekil 4.8 M5 hattı diğer raylı sistemlerle entegrasyonu ve ticari-sosyal alanlar ... **79**
Şekil 4.9 Altyapı çakışması ve doğal afet etkileşimi **79**
Şekil 4.10 M5 hattı (Üsküdar-Kısıklı bölgesi) güzergah uygunluk haritası **80**
Şekil 4.11 M5 hattı (Üsküdar-Kısıklı bölgesi) güzergah karşılaştırması **82**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 İstanbul'un mevcut raylı sistem hatları (İBB, 2025) **31**
Tablo 3.1 M5 metro hattı teknik özellikleri (İBB, 2025; Metro İstanbul, 2025b) **46**
Tablo 3.2 Raylı sistem güzergah tasarım kriterleri **54**
Tablo 3.3 Metro hattı kriter değerlendirme listesi **59**
Tablo 3.4 Analizde kullanılan kriterlerin veri türleri, kaynakları **62**
Tablo 3.5 Analizde kullanılan Ana/Alt kriterler ve kriter sınıfları **65**
Tablo 3.6 AHP ikili karşılaştırma tercih ölçeği (Saaty, 1990) **67**
Tablo 3.7 AHP rastgele tutarlılık indeksi (RI) değerleri (Saaty, 1990) **68**
Tablo 4.1 AHP ikili karşılaştırma özet tablosu **73**
Tablo 4.2 AHP kriter ağırlıkları, uygunluk değerleri ve tutarlılık oranı **75**

ÖZET

Raylı Sistem Projelerinde Demiryolu Hattı Uygunluğunun Proje Kriterlerine Göre Analizi

Feyza Sinem BOZKURT

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Fatih GÜLGEN

Günümüzde dünya genelindeki hızlı nüfus artışı ve kentleşme, özellikle büyük şehirlerde trafik yoğunluğu ve ulaşım sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu karmaşık sorunlara sürdürülebilir çözümler bulmak, kentsel yaşam kalitesi ve çevresel hedefler açısından kritik öneme sahiptir. Raylı sistemler, yüksek taşıma kapasiteleri, uzun vadede enerji verimliliği ve düşük karbon salınımları sayesinde bu ihtiyaca yönelik en etkili ve sürdürülebilir toplu taşıma çözümlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

İstanbul gibi kalabalık ve dinamik şehirlerde, raylı sistem güzergahlarının doğru bir şekilde planlanması, yatırım verimliliği, kentsel sürdürülebilirlik, toplumsal fayda ve ulaşım stratejileri için hayati önem taşır. Ancak güzergah belirleme süreci; teknik, çevresel, sosyal, ekonomik ve kentsel planlama gibi çok sayıda kriterin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir karar verme sürecidir.

Bu tez çalışmasında büyükşehir ölçeğinde mevcut raylı sistem hatlarının geriye dönük değerlendirilmesinde ve gelecekteki planlamalarda analitik ve mekânsal temelli bir karar destek modeli geliştirilmesine zemin oluşturarak ülkemizin

sürdürülebilir ulaşım hedeflerine katkı sağlanması amaçlamaktadır. Bu kapsamda, İstanbul'un M5 Üsküdar-Samandıra Metro Hattı'nın, proje aşamasında dikkate alınan kriterleri incelenmiş, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarından analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve coğrafi bilgi sistemi (CBS) mekânsal analiz araçları kullanılarak ilgili metro hattı için bir uygunluk değerlendirme haritası üretilmiştir. AHP tekniği ile literatürde tanımlanan çok sayıda kriter uzman görüşleri ve pratik uygulama esaslarına dayalı olarak değerlendirilmiş ve hiyerarşik yapıda ağırlıklı optimize edilmiş bir kriter seti oluşturulmuştur. CBS ortamında elde edilen mekânsal verilerin AHP ağırlıklarıyla entegre edilmesi sayesinde M5 hattının mevcut güzergahı üzerindeki mekânsal uygunluk düzeylerini ortaya koyan bir değerlendirme haritası oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular, AHP ve CBS entegrasyonuna dayalı bu yaklaşımın, raylı sistem güzergahlarının çok boyutlu analizi ve karar destek sistemlerinin geliştirilmesi için önemli bir potansiyel sunduğunu göstermiştir.

Bu çalışma, karar sürecinin sistematikleştirilmesi, uzman görüşlerinin matematiksel modele dahil edilmesi ve coğrafi bağlamda görsel sonuçlar sunması olarak açıklanan temel üstünlüklere sahiptir. Ancak, AHP'nin uzman görüşlerine dayalı öznel değerlendirmelere duyarlı olması ve CBS analizlerinin veri kalitesine bağımlı kalması çalışmanın iki kritik sınırıdır.

Anahtar Kelimeler: Raylı sistem, sürdürülebilir ulaşım, çok kriterli karar verme yöntemi, AHP-CBS entegrasyonu, metro hattı, güzergâh planlaması

ABSTRACT

Analysis of Railway Line Suitability According to Project Criteria in Rail System Projects

Feyza Sinem BOZKURT

Department of Geomatic Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Fatih GÜLGEN

Today, rapid population growth and urbanization around the world bring traffic density and transportation problems, especially in large cities. Finding sustainable solutions to these complex problems is critical in terms of urban quality of life and environmental goals. Rail systems stand out as one of the most effective and sustainable public transportation solutions to this need thanks to their high transport capacity, long-term energy efficiency and low carbon emissions.

In crowded and dynamic cities like Istanbul, proper planning of rail system routes is vital for investment efficiency, urban sustainability, social benefit, and transportation strategies. However, the route determination process is a complex decision-making process that requires the simultaneous evaluation of numerous criteria including technical, environmental, social, economic, and urban planning factors.

This thesis aims to contribute to the sustainable transportation goals of our country by laying the groundwork for the development of an analytical and spatial-based decision support model for the retrospective evaluation of existing rail system lines at the metropolitan scale and future planning. In this context, the

criteria considered during the project phase of Istanbul's M5 Üsküdar–Samandıra Metro Line were examined, and a suitability assessment map for the relevant metro line was produced using the Analytic Hierarchy Process (AHP), one of the multi-criteria decision-making (MCDM) approaches, and Geographic Information System (GIS) spatial analysis tools. Using the AHP technique, numerous criteria identified in the literature were evaluated based on expert opinions and practical application principles, and a weighted, optimized set of criteria was created in a hierarchical structure. By integrating the spatial data obtained in the GIS environment with the AHP weights, an evaluation map was created that reveals the spatial suitability levels along the current route of the M5 line. The findings show that this approach, based on AHP and GIS integration, offers significant potential for the multidimensional analysis of rail system routes and the development of decision support systems.

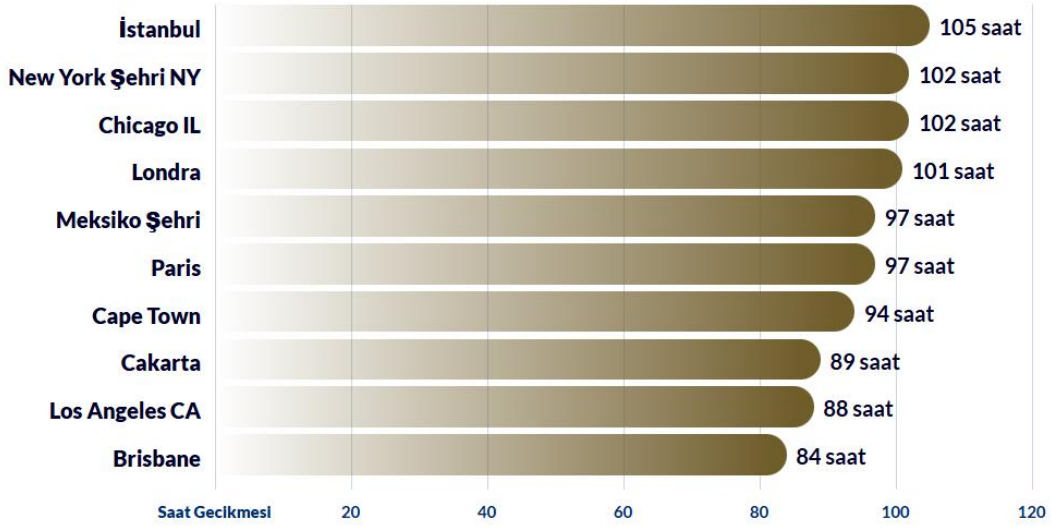
This study has fundamental advantages, namely the systematization of the decision-making process, the inclusion of expert opinions in the mathematical model, and the presentation of visual results in a geographical context. However, two critical limitations of the study are the sensitivity of AHP to subjective assessments based on expert opinions and the dependence of GIS analyses on data quality.

Keywords: Rail system, sustainable transportation, multi-criteria decision-making method, AHP-CBS integration, metro line, route planning

1
GİRİŞ

21. yüzyıl, insanlığın hızlı olarak kentleştiği ve kentli nüfusun artış hızının ivmelendiği dönemlerinden biridir. Birleşmiş Milletler (BM)'in 2022 yılında yayınladığı World Urbanization Prospects (2018) raporuna göre dünya nüfusunun %56'sı şehirlerde yaşamaktadır. Bu oranın 2050 yılında %68'e ulaşması beklenmektedir. Bu öngörü, dünya genelinde yaklaşık 2,5 milyar yeni kentsel nüfusun ortaya çıkacağı anlamına gelmektedir (United Nations, 2018b). Kentleşme eğilimleri New York, Londra, Tokyo, Şanghay, Moskova ve Delhi gibi küresel metropollerde hızla artmakta ve metropollerde yaşam kontrolsüz bir büyümeyle karşı karşıya kalmaktadır. Artan nüfus yoğunluğu dünya genelinde mevcut kentsel altyapılar ve hizmetler üzerinde muazzam bir baskı oluşturmaktadır. Şehirlerde artan nüfusla birlikte, kentsel hareketlilik talebinin katlanması, kent içi ulaşım sistemleri, trafik sıkışıklığı, hava kirliliği, enerji tüketimi, artan seyahat süreleri, yakıt tüketimi, karbon salınımı ve buna bağlı çevresel ve ekonomik verimsizlikler gibi kronikleşmiş ulaşım problemlerini kaçınılmaz kılmaktadır (Banister, 2008). Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'de büyük şehirlerdeki trafik sıkışıklığı her yıl milyarlarca dolarlık ekonomik kayba neden olmaktadır (Schrank vd., 2019). Avrupa'da ise karbon emisyonlarının %25'inden fazlası ulaşımdan kaynaklanmakta olup bu emisyonların %70'inden fazlası karayolu taşımacılığına aittir (European Environment Agency, 2023; Sims vd., 2014). Uzak Doğu'nun mega kentlerinde ise yoğun nüfus ve sınırlı alan, toplu taşıma sistemlerini adeta bir varoluşsal zorunluluk haline getirmiştir. Rusya'nın geniş coğrafyasındaki büyük şehirler benzer şekilde ulaşım ağlarının optimizasyonu konusunda önemli yatırımlar yapmaktadır. Şehirlerin yaşanabilirliğinin sürdürülebilmesi ve kentsel yaşam kalitesinin yükseltilmesi adına, entegre, erişilebilir, yüksek verimli ve çevresel açıdan duyarlı toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi, küresel ölçekte stratejik bir öncelik olarak kabul edilmektedir.

2023 yılında ABD merkezli ulaşım analitiği firması INRIX tarafından yayınlanan Küresel Trafik Skoru Endeksi'ne göre, Londra, Paris, New York ve İstanbul gibi metropoller, yıllık ortalama trafik gecikme süreleri açısından dünya sıralamasında üstlerde yer almaktadır (Şekil 1.1). Aynı endekse göre, Türkiye'nin en büyük metropolü olan İstanbul'da sürücülerin yıllık ortalama 105 saatini trafikte geçirdiği hesaplanmıştır (INRIX, 2024). Bu durum, ulaşım sistemlerinin kapasitesi, metropol kentlerin yaşam kalitesi, ekonomik verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği açısından yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır.



Şekil 1.1 Şehirlere göre en yüksek on trafik geçikme süresi (INRIX, 2024)

Trafikte harcanan süreyi azaltmak ve kent içi ulaşımda sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için birçok ülke büyük kentlerde en etkili ve çevreci çözüm olarak raylı sistemleri benimsemektedir (Banister, 2008). Raylı sistemler, erişilebilirliği arttırmanın yanında ulaşım entegrasyonu bakımından da çok önemlidir (Papa ve Bertolini, 2015). ABD'de New York metrosu, Avrupa'da Londra ve Paris, Asya'da Tokyo ve Seul, Rusya'da Moskova raylı sistemlerin büyük metropollerde ulaşım altyapısındaki başarısının önemli örnekleri olarak öne çıkmaktadır. Bu şehirlerde raylı sistemlerin toplam ulaşım içerisindeki payı %40 ile %60 arasındadır ve sistemler entegre ulaşım modelleriyle desteklenmektedir (Cervero ve Murakami, 2009; UITP, 2024). Örneğin Tokyo'da günlük metro yolculuğu sayısı 9 milyona yaklaşmakta, Seul'da bu rakam 7 milyonu geçmektedir (Jun ve Yun, 2023; Seoul Metropolitan Government, 2024; Statistics Bureau of Japan, 2025).

Raylı sistemler, yüksek taşıma kapasiteleri sayesinde geniş kitleleri kısa sürede ve güvenli bir şekilde taşıyabilmekte, karayolu tabanlı taşımacılığa kıyasla önemli ölçüde düşük karbon emisyonu ve enerji tüketimi sunmakta ve modern şehirlerin ulaşım omurgası haline gelmektedir (Banister, 2008). Bir demiryolu hattı, tek bir otobüs hattına veya yüzlerce özel araca kıyasla çok daha fazla yolcuyu aynı anda taşıyarak karayolu üzerindeki yükü önemli ölçüde azaltmaktadır. Uzun vadede işletme maliyetlerinin daha öngörülebilir olması ve kamu kaynaklarının etkin şekilde kullanımına olanak sağlaması demiryolu yapımını destekleyen diğer önemli unsurlardır. Ayrıca arazi kullanım planlamasına entegre edilebilme potansiyelleri kentlerin geleceği için demiryollarının stratejik önemini pekiştirmektedir (Cervero ve Murakami, 2009). Raylı sistemlerin çevresel sürdürülebilirliğe olan katkısı, özellikle iklim değişikliğiyle mücadele hedefleri doğrultusunda uluslararası düzeyde kabul görmektedir (Creutzig vd., 2021; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.), 2023).

İstanbul Avrupa ve Asya kıtasını birbirine bağlayan, Türkiye'nin sürekli göç alan en önemli mega-kentidir. Nüfus artışı ve kentsel yayılma talebi ulaşım ihtiyaçlarını sürekli olarak yükseltmektedir. İstanbul'un kendine özgü karmaşık topografyası, Boğaz'ın ayırıcı etkisi ve mevcut ulaşım altyapısının doygunluğa ulaşması, sürdürülebilir ve etkin toplu taşıma çözümlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Ulaşımda özel araç kullanım oranının %80'e yaklaşması, toplu taşımaya erişimin zorluğu, hizmet kalitesi ve ulaşım entegrasyonundaki eksiklikler İstanbul'un çözüm bekleyen en önemli sorunları arasındadır (İBB, 2022). Bu nedenle, raylı sistemlerin ulaşım ağının temelini oluşturması kentin gelecek perspektifinde merkezi bir rol oynamaktadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB)'nin uzun vadeli ulaşım ana planları içinde raylı sistem yatırımları önceliklendirilmiştir. Böylece şehrin farklı bölgelerini birbirine bağlanarak ulaşım süresinin kısaltılması ve yaşam kalitesinin artırılması hedeflenmektedir. Yeni demiryolu hatları için rotaların doğru belirlenmesi, şehir ulaşım ağlarının optimizasyonu ve sürdürülebilir kentsel gelişim için hayati bir adımdır. Sadece bugünün değil, gelecek nesillerin ulaşım ihtiyaçlarını karşılayabilecek, esnek ve dirençli bir ulaşım sistemini geliştirmek için coğrafi bilgi sistemi (CBS) ve mekânsal analiz araçlarından yararlanmak gerekir.

Raylı sistem projelerinin başarısı, güzergahlarının bilimsel ve analitik yöntemlerle doğru bir şekilde planlanmasına bağlıdır. Güzergah belirleme süreci, yalnızca

teknik fizibiliteyi (eğim, zemin yapısı, mühendislik gereksinimleri) değil, aynı zamanda çevresel etkileri (ekosistem duyarlılıkları, gürültü kirliliği), sosyo-ekonomik faktörleri (nüfus yoğunluğu, istihdam merkezlerine erişim, sosyo-ekonomik tabakalaşma), mevcut arazi kullanımını ve kentsel planlama ilkelerini de kapsayan çok sayıda ve genellikle birbiriyle çelişen kriterin bütüncül olarak değerlendirilmesini gerektirir (Malczewski, 1999). Bu tarz karmaşık bir karar verme probleminde gerekli hassasiyetin gösterilmemesi projenin ekonomik verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Yüksek kamulaştırma maliyetleri, düşük yolcu sayıları gibi sorunların yanında toplumsal ve çevresel açıdan yerinden edilmeler ya da doğal alan tahribatı gibi istenmeyen sonuçlar doğurabilir.

Güzergâh planlamasında teknik yeterliliklerin yanı sıra, çevresel hassasiyetler, yatırım maliyetleri, sosyo-demografik yapı, afet riski ve imar durumu gibi pek çok kriterin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Karmaşık karar verme süreçlerinde, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımları arasında yer alan analitik hiyerarşi süreci (analytic hierarchy process-AHP), karar vericilere sistematik ve karşılaştırmalı değerlendirme yapma imkânı sunmaktadır (Saaty, 1990). Ayrıca, CBS araçları bu kriterlerin mekânsal boyutunu analiz edebilmeyi sağlamakta ve karar sürecini mekânsal tabana taşımaktadır (Malczewski, 2006). Son yıllarda bu iki yöntemin entegrasyonu, özellikle sürdürülebilir kentsel ulaşım projelerinde önemli başarılar sağlamıştır (Aquilué Junyent vd., 2024; Zhang vd., 2014).

Bu çalışmada, İstanbul'da halihazırda işletmede olan M5 Üsküdar-Samandıra metro hattı referans alınarak, raylı sistem güzergâh planlamasını etkileyen kriterler AHP ile ağırlıklandırılmış ve bu ağırlık değerleri CBS tabanlı mekânsal analizde kullanılarak güzergâh uygunluk değerlendirmesi için bütünleşik bir model önerilmiştir. Model, literatür taramaları, uzman görüşleri ve açık veri kaynakları ile desteklenmiş; sürdürülebilir ulaşım ilkelerine katkı sunacak biçimde yapılandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, karar vericilere teknik, sosyal ve çevresel ölçütlerin birlikte değerlendirilebildiği bütüncül bir yaklaşım sunmayı hedeflemektedir.

1.1 Literatür Özeti

Bu bölümde ilk olarak sürdürülebilir kent içi ulaşım ve raylı sistemlerin çok boyutlu etkileri üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Ardından raylı sistem güzergahı planlamasında ÇKKV yöntemleri ve AHP kullanılarak yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Devamında, raylı sistem rota belirleme süreçlerinde CBS ve mekânsal analiz yöntemlerinin birlikte kullanıldığı çalışmalardan bahsedilmiştir. Son olarak, AHP ile CBS entegre edilerek çok kriterli mekansal uygunluk analizine yönelik yapılan çalışmalar incelenmiştir.

1.1.1 Sürdürülebilir Kent İçi Ulaşım ve Raylı Sistemler

Kentleşme oranlarının hızla artması, motorlu taşıt trafiğinin büyümesi ve iklim değişikliğinin etkileri, kent içi ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirlik ekseninde yeniden ele alınmasını gerektirir. Bu bağlamda ortaya çıkan Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik (Sustainable Urban Mobility-SUM) yaklaşımı, ekonomik verimliliğin yanında çevre koruma ve sosyal eşitlik kavramlarını da kapsayan bütüncül bir yaklaşımı ifade etmektedir (Banister, 2008). Bu paradigma içinde raylı sistemler, yüksek yolcu kapasitesi, düşük enerji tüketimi ve minimum arazi kullanımı gibi temel özellikleri sayesinde sürdürülebilir kent içi ulaşımın omurgasını oluşturmaktadır (Rodrigue, 2020). Ayrıca, BM'nin Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (Sustainable Development Goals-SDG) içerisinde, 11 numaralı sürdürülebilir şehirler ve topluluklar (SDG 11) ile 13 numaralı iklim eylemi (SDG 13) hedeflerine doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu katkı, toplu taşımanın erişilebilirliği artırması, kentsel karbon emisyonlarını azaltması ve şehirlerin çevresel dayanıklılığını güçlendirmesiyle gerçekleşmektedir (OECD, 2019; United Nations, 2018a).

Kentlerin gelişmesi ve yayılması ile özel araç kullanımının çevresel sonuçlarına karşı raylı sistemler sürdürülebilir kent içi hareketlilik bağlamında stratejik bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır (Zhao ve Shen, 2019). Givoni ve Banister (2010) bütünleşik ulaşım planlamasında raylı sistemlerin temel bir yapı taşı olduğunu ve ulaşım çözümlerinin yanında kentsel yaşanabilirliği de şekillendirdiğini belirtmiştir. Cervero ve Guerra (2011), nüfus yoğunluğu ve ulaşım altyapısı arasındaki ilişkinin sürdürülebilir ulaşım için temel belirleyici kriter

olduğunu ortaya atmış ve raylı sistemlerin yoğun bölgelerde daha etkin çalıştığını iddia etmiştir.

Raylı sistemlerin çevresel etkileri üzerine yapılan ampirik çalışmalar karbon emisyonlarını azaltmada ve enerji verimliliğini artırmada raylı sistemlerin nicel olarak ölçülebilir katkılar sunduğunu belirtmektedir. UITP (2025) verilerine göre, raylı sistemler otobüslere kıyasla kilometre başına yaklaşık %40 daha az enerji tüketmektedir. Newman ve Kenworthy (2015), raylı sistemlerin fosil yakıt tüketimini azaltılması, trafik yoğunluğunun düşürülmesi ve kent merkezlerine erişimi kolaylaştırması sayesinde metropollerde otomobil bağımlılığını azalttığından bahsetmiştir. Ayrıca, UITP (2023), Küresel Kentsel Mobilite Göstergeleri raporu, Asya-Pasifik bölgesindeki metropollerde raylı sistem yatırımlarının, toplam taşıt kaynaklı emisyonları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Benzer biçimde, Guo ve Chen (2019), Asya metropollerinde raylı sistemlerin hava kalitesi üzerindeki olumlu etkilerini vurgulamıştır. Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization - WHO, 2021), elektrikli raylı sistemlerin hava kalitesini iyileştirerek halk sağlığına olan olumlu katkılarını vurgulamaktadır. Benzer şekilde yapılan güncel çalışmalar da elektrikli raylı sistemlerin hem çevresel hem sağlık temelli sürdürülebilirlik politikalarının temel bileşeni olduğunu göstermektedir (Gössling ve Choi, 2015; International Energy Agency, 2019; Nieuwenhuijsen, 2021). Rodrigue (2020), raylı sistemlerin kentsel mekân organizasyonuna ve arazinin daha verimli kullanılmasına katkı sağladığından bahsetmiş ve karbon emisyonlarının azaltılmasında kritik rol oynadığını ifade etmiştir. Jing vd. (2022), ampirik olarak toplu taşıma yatırımlarının karbon emisyonlarını önemli ölçüde önlediğini iddia etmiştir. Zhang (2022), raylı sistemlerdeki zamansal ve mekânsal yolcu akış dinamiklerine dayalı olarak geliştirdiği değerlendirme modelleri sayesinde çevre koruma, enerji tasarrufu ve karbon emisyonu azaltma bağlamında bir teknik çerçeve oluşturmuştur. Sun ve Le (2024), Pekin örneğinde geliştirilmiş bu modellerin pratik uygulamalarını test etmiş, kentsel raylı sistemlerinin enerji tasarrufu ve emisyon azaltma hedeflerine ulaşmada etkili olduğunu doğrulamıştır. Bu bağlamda, raylı sistemler toplu taşıma modları arasında en düşük karbon yoğunluğuna sahip ve enerji tüketimi açısından en verimli seçenektir (International Energy Agency, 2021).

Diğer taraftan son yıllarda raylı sistemlerin SDG'ye olan çok boyutlu katkılarını ortaya koyan birçok çalışma yapılmıştır. Temelde raylı sistemlerin ekonomik, çevresel ve mekânsal etkileri üzerin yapılan bu çalışmalar, bu sistemlerin aynı zamanda arazilerin finansal değeri, kentsel gelişimi ve toplumsal eşitlik boyutlarında da dönüştürücü sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir. Cervero ve Murakami (2009), Hong Kong gibi yüksek nüfus yoğunluğu olan bir şehirde raylı sistemlerin arazi değerlerini artırdığını ve transit odaklı gelişimi teşvik ettiğini belirtmiştir. Onların değerlendirmesine göre Hong Kong örneğinde metro istasyonları çevredeki gayrimenkul değerlerini %25-30 oranında arttırmış ve karma kullanımlı ve yaya dostu mahallelerin oluşumunu desteklemiştir.

Sürdürülebilir ulaşımın çok boyutlu doğasında raylı sistemler, kamu taşımacılığında sosyal eşitliği destekleyici yönü nedeniyle, çok kriterli bir karar destek modeli içinde sosyal boyutta da değerlendirilmelidir (Litman, 2022; Anastasiadou ve Gavanas, 2025). Loo ve du Verle (2017), metroların farklı sosyo-ekonomik grupların eşit erişimini sağlayarak kentsel eşitsizliğin azaltılmasına yardımcı olduğunu ve toplumsal kaynaşmayı teşvik ettiğini belirtmiştir. Latin Amerika'da geliştirilen raylı sistem ve toplu taşıma projeleri, özellikle Bogotá ve Quito örneklerinde olduğu gibi, düşük gelirli bölgelerin erişimini artırarak sosyal içermeyi güçlendirmiştir (Bocarejo S. ve Oviedo H., 2012; Davila, 2013; Guerra, 2014; Vecchio vd., 2020) de Alba-Martínez vd. (2020) ve Scholl vd. (2022), benzer şekilde Latin Amerika örneklerinde raylı sistemlerin sosyal eşitsizlikleri azaltmada etkili olduğundan bahsetmiştir. Liu ve Zhao (2023), farklı sosyo-ekonomik grupların iş, eğitim ve sağlık hizmetlerine eşit erişimini sağlayarak kentsel eşitsizliğin azaltılmasında raylı sistemlerin rolünü vurgulamıştır.

Raylı sistemlerin çok boyutlu ve bütünleşik etkileri göz önünde bulundurulduğunda Dünyanın en önemli metropollerinden biri olan İstanbul özelinde de değerlendirmelerin yapılması gerekir. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar, raylı sistemlerin kent içi ulaşımdaki payının artırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. İBB'nin 2022 yılında yayınladığı SUM planına göre, mevcut metro hatları kent içi yolculukların yalnızca %15'ini karşılamaktadır (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2023). Uluslararası Demiryolu Birliği'nin (International Union of Railways-UIC, 2023) raporuna göre, gelişmiş metropollerde raylı sistem yatırımları kent içi ulaşımda modal payın artışında belirleyici unsurlardan biri olduğunu

vurgular (UIC, 2023). Bu durum, yüksek kapasiteli ve enerji verimli ulaşım altyapılarının, sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikalarının merkezinde yer aldığını göstermektedir (Pulido vd., 2018). İBB (2023) raporları, İstanbul'un 2030 hedefinde raylı sistem ağını 1.100 km'ye çıkararak ulaşım payını %40'a yükseltmeyi planladığını göstermektedir. Benzer şekilde, İstanbul'daki raylı sistem yatırımlarının trafik sıkışıklığı kaynaklı ekonomik kayıpları azaltma potansiyeline dikkat çekmektedir. Bu iddialar, raylı sistemleri salt bir ulaşım meselesi olmaktan çıkarıp, kentin ekonomik rekabet gücünü, çevresel dayanıklılığını ve sosyal içermesini şekillendirecek stratejik bir dönüşüm projesi haline getirmektedir. Dolayısıyla, İstanbul'un sürdürülebilir kentsel geleceği, büyük ölçüde raylı sistem odaklı, entegre ve çok modlu bir ulaşım vizyonunun başarısına bağlıdır.

1.1.2 Güzergah Planlamasında ÇKKV Yöntemleri ve AHP

Kent içi ulaşım planlamasında güzergâh seçimi, çok boyutlu kriterlerin aynı anda değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir karar problemidir. Teknik, çevresel, ekonomik, sosyal ve mekânsal boyutların eş zamanlı olarak birlikte ele alınmasını sağlayan ÇKKV, karar vericilere ulaşım problemlerinin çözümünde sistematik bir çerçeve sunmaktadır (Inan ve Kara, 2022; Temizer, 2021).

Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen temel bir metot olarak öne çıkan AHP, karmaşık problemleri hiyerarşik bir yapıya dönüştürerek kriterlerin ikili karşılaştırmalar yoluyla ağırlıklandırılmasına ve alternatiflerin sıralanmasına imkân tanımaktadır (Saaty ve Vargas (2012). Saaty (1990), yöntemin önemli özelliğini, karar vericilerin sübjektif yargılarını matematiksel tutarlılık çerçevesinde sayısallaştırma yeteneği olarak açıklamaktadır. Bu yönüyle AHP, ulaşım planlamasında hem objektif hem de şeffaf biçimde karar desteği sağlayarak analiz etmeye imkân tanır (Erdem, Özdemir ve Koşualp, 2025; Khakbazan, Ezati ve Ahadi, 2025).

Yöntemin ulaşım planlamasındaki uygulamaları incelendiğinde, yıllar içinde evrimleşen ve genişleyen kullanım alanlarını ortaya koymaktadır. Banai (2006), ABD’de Memphis hafif raylı sistem koridoru seçiminde AHP’nin uygulanmasını ele alarak, yöntemin karar sürecinde farklı paydaşların sübjektif görüşlerini sistematik biçimde değerlendirmeye dönüştürdüğünü göstermiştir. Söderholm ve Nyström (2009), demiryolu altyapı bakımında karar verme ve uzman yargısındaki

rolünü vurgulayarak, demiryolu sistemlerinde güvenlik ve bakım eylemlerine öncelik vermek için şeffaflığı ve izlenebilirliği destekleme yeteneğini vurgulamaktadır. De Luca (2014), stratejik ulaşım planlamasında halkın katılımını değerlendirmek üzere geliştirdiği AHP tabanlı modelde, öznel yargıların ölçülebilir kriterlere dönüştürülmesinin karar verme kalitesini artırdığını vurgulamıştır. Deluka-Tibljaš vd. (2014), farklı ulaşım modlarının (demiryolları, yollar, bisiklet, metro hatları) güzergah seçimi ve ulaşım nesnelerinin önceliklendirilmesinde maliyet, güvenlik ve çevresel etki gibi çeşitli kriterleri değerlendirerek, sonuçta maliyet azaltmaya yardımcı olacak ve ulaşım altyapısı planlamasında karar vermeyi geliştirerek metro sistemleri de dahil olmak üzere demiryolu güzergahlarını optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Zhang vd. (2014) çalışmasında, maliyet, teknoloji ve çevre gibi faktörlere odaklanarak yüksek hızlı demiryolu hattı seçimini optimize etmek için AHP tartışmaktadır.

Ayrıca, literatürde AHP'nin tek başına değil, diğer yöntemlerle hibrit olarak kullanılmasına yönelik Arampatzis vd. (2004), yöntemi hedef programlama ile birleştirerek hedeflerin ve kısıtların eş zamanlı olarak optimize edilmesini sağlamıştır. Chen ve Wu (2013) ise AHP-TOPSIS entegrasyonu ile raylı sistem yatırımlarının sürdürülebilirlik performansını değerlendiren bir model önermiştir. AHP'nin uygulanabilirliğinin yanında, yöntemin sınırlılıkları da tartışılmıştır. Ishizaka ve Labib (2011), öznel değerlendirmelerin karar sürecinde hatalara yol açabileceğini, tutarlılık indeksinin mutlaka kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

AHP, sürdürülebilirlik ve teknolojik entegrasyon odaklı çalışmalarda da kullanılmaktadır. Kiciński ve Solecka (2018), Polonya'nın Krakow kentinde kentsel ulaşım sistemine AHP yönteminin bütünleştirilmesi toplu taşıma sistemlerinde kullanıcı memnuniyetini %30 oranında artırdığını göstermiştir. Raharjo ve Hartati (2017) ile Szatmári (2021) ulaşım istasyonu yer seçimi ve güvenlik düzeyinin analizlerinde AHP'yi kullanmıştır. Galdiani vd. (2022), İran'daki demiryolu yeniden yapılandırmasına ilişkin vaka çalışmaları yaparak ulaştırma altyapısı projelerini önceliklendirmek için farklı karar modelleri incelenmiş ve seçilen AHP modeline göre, İran demiryolu ağlarındaki demiryolu yeniden inşa projelerini önceliklendirmiştir. Chintakayala ve Prasad (2025) Hindistan'da Transit Odaklı Gelişim (TOD) uygunluğunu ölçmek, Raspati, Sari ve

Meidiana (2025) ise Endonezya'nın Bandung kentinde CO_2 emisyon azaltım alternatiflerini değerlendirmek için AHP'yi kullanmış ve yöntemin sürdürülebilir ulaşım planlamasında bir araç olduğu, çevresel kriterlerle bütünleşik planlama perspektifi sunduğunu göstermiştir. Benzer şekilde uzaktan algılama verileriyle desteklenen AHP modelleri, elektrikli araç şarj altyapısının konumlandırılmasında da etkin biçimde kullanılmaktadır (Halder, 2025). Ayrıca güzergâh alternatiflerinin sıralanması, ulaşım modlarının önceliklendirilmesi ve entegrasyon planlarının geliştirilmesi süreçlerinde yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir (Anastasiadou ve Kehagia, 2025; Mazzei ve Michelotti, 2025).

Türkiye'de ise özellikle raylı sistem planlaması ve ulaştırma yatırımlarında karar süreçlerinde ÇKKV yöntemleri giderek daha fazla kullanılmaktadır. Gerçek vd. (2004), İstanbul raylı sistem ağlarını AHP ve analitik ağ prosesi (ANP) yöntemiyle değerlendirerek, mühendislik, maliyet ve çevresel kriterlerin bütüncül biçimde incelendiği öncü bir model ortaya koymuştur. Devam eden yıllarda Hamurcu ve Eren (2015, 2018) ve Taş vd. (2017), Ankara ve İstanbul'daki monoray projelerinin önceliklendirilmesi ve güzergâh seçiminde AHP–GP (Hedef Programlama) tabanlı bir modeli uygulayarak farklı bütçe senaryolarına göre sıralamıştır. Eren vd. (2018), tramvay araçlarının seçiminde AHP–TOPSIS yaklaşımını kullanarak çok kriterli karar analizin teknik ve mali boyutları dengelediğini göstermiştir. Yücel ve Taşabat (2019), İstanbul raylı sistem projelerinin seçiminde AHP–TOPSIS yöntemleriyle analiz ederek hiyerarşik değerlendirmeler sunarken, Özarpa vd. (2021) ise kent içi akıllı ulaşım kapsamında yeni raylı sistem hatlarının kurulumu için AHP–PROMETHEE yöntemlerini birleştirerek karma modelini vurgulamıştır. Ayrıca Kaya, Özkan ve Akar (2025), Türkiye'de elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılmasında AHP algoritmalarıyla çoklu kriterlerin başarıyla optimize edildiğini ortaya koymuştur.

1.1.3 CBS ve Mekansal Analizi

Kent içi ulaşım planlamasında mekânsal boyutun doğru analiz edilmesi, sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmak açısından kritik öneme sahiptir. CBS, mekânsal verilerin toplanması, depolanması, analiz edilmesi ve görselleştirilmesi yoluyla karar vericilere güçlü bir destek sunmaktadır (Malczewski, 2006). Özellikle raylı sistem güzergâh planlamasında, arazi kullanımı, nüfus yoğunluğu, topografya, mevcut ulaşım ağı ve çevresel hassasiyet alanları gibi teknik, çevresel ve sosyo-

ekonomik verilerin bir arada değerlendirilmesini sağlaması CBS'nin önemini artırmaktadır (Mohan vd., 2025).

CBS'nin ulaşım planlamasındaki uygulamalarına yönelik erken dönem çalışmalar, sistemin temel mekânsal analiz ve veri yönetimi kapasitelerine odaklanmıştır. Guler vd. (2004), Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) şebekesi için istasyonlar, hat kesimleri ve bakım faaliyetlerini içeren CBS tabanlı Demiryolu Varlık Yönetim Sistemi'ni geliştirmiştir. Sotoudeh vd. (2004)'de metro hattı planlamasında CBS'nin çevresel etki değerlendirmesi için kullanılabileceğini, özellikle arazi örtüsü, kültürel miras alanları gibi verileri katmanlayarak geleneksel yöntemlere göre daha çevre dostu olduğunu, olası risklerin öngörülmesine katkı sunduğunu belirtmiştir.

Zaman içinde CBS uygulamaları, daha karmaşık analizlere ve sürdürülebilirlik odaklı değerlendirmelere evrilmiştir. Yalçıner, Eğercioğlu ve Çete (2013), İzmir-Bornova-Üçyol metro hattı ve İzban hafif raylı sisteminin planlama aşamasında CBS tabanlı konum-uygunluğu ve erişilebilirlik analizleriyle desteklenmiş, yatırım verimliliği ve yolcu kapasitesi tahmininde mekânsal verinin nasıl kullanıldığını göstermiştir. Chen vd. (2017) ise dört Pekin demiryolu hattının karbon azaltım etkilerini değerlendirmek için CBS ağ ölçüm araçlarını akıllı kart verileriyle birleştirmiş ve mod değişimi analizi yoluyla ölçülebilir emisyon azaltımlarını incelemiştir. 2019 yılında yapılan bir çalışmada, Londra'da ulaşım erişilebilirliği, arazi kullanım morfolojisi ve enerji tüketimini entegre eden bir yöntem geliştirildi ve entegre yatırımların, demiryolu ağıyla ilgili enerji kullanımı da dahil olmak üzere, kentsel sürdürülebilirliği nasıl artırabileceği değerlendirilmiştir (Carpentieri vd., 2019).

Yakın dönem çalışmalarında ise Önden ve Çakmak (2020), İstanbul'da metro ağının kapsama alanını mekansal analizlerle incelemiş ve mevcut hatların kent nüfusunun %42'sine hizmet ettiğini; tamamlanan projelerle bu oranın %87'ye çıkabileceği hesaplanmıştır. İncirci ve Ekmekçi (2021) toplu taşıma duraklarının yer seçiminde bu entegrasyonu kullanarak, erişilebilirlik ve yolcu talebi gibi kriterleri mekânsal olarak analiz ederek karar vericilerin sadece en uygun yeri değil, aynı zamanda en yüksek faydayı sağlayacak lokasyonu seçmesine yardımcı olduğunu vurgulamıştır. Zhao vd. (2021), Çin'in Haikou şehrinde CBS teknolojisi kullanılarak kentsel raylı sistem hatları ve istasyonlarının, kentsel planlama ve yolcu akış verileri dikkate

alınarak optimizasyonu değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, Aslan ve Aydar (2022) ise CBS temelli mekansal analiz yöntemiyle ulaşım entegreli otopark politikalarını değerlendirerek, mekânsal analizlerin ulaşım talebiyle kentsel karar süreçlerini güçlendirdiğini belirtmiştir. Şengüler ve Duran (2023), Bursa T2 tramvay hattı çevresinde yoğunluk, karışık kullanım ve yaya erişimi gibi değişkenleri kullanarak istasyon bazlı TOD indekslerini hesaplamış; istasyon sınıflandırması ve iyileştirme stratejilerini tamamen mekânsal analizle ortaya koymuştur.

Güncel araştırmalarda, Zaroujtaghi vd. (2025), 2004-2024 yılları arasında yaptığı sistematik incelemede, CBS'nin ulaşım planlamasında "veri odaklı, sürdürülebilir kentsel hareketlilik planlamasının temel bileşenlerinden biri" haline geldiğini ve yapay zeka ile bütünleşmenin yeni olanaklar sunduğunu vurgulamıştır. Calderón-Ramírez vd. (2025), Meksika'daki toplu taşımada ulaşım eşitsizliklerini ve kentsel hareketlilik sorunlarını CBS tabanlı mekânsal analiz yoluyla inceleyerek çevresel etkilerini somut haritalarla ortaya koymuştur. Zargarzadeh (2025), toplu taşıma ve motorsuz ulaşım modlarının birlikte değerlendirilmesi yaklaşımının kentsel sürdürülebilirliğe katkı sağladığını belirtmiştir. Son olarak, Valipour Malakshah ve Amini (2026) da kent içi ulaşım ağlarında kavşakların önem derecesinin belirlenmesi için bu yöntemi kullanılarak, ağ dayanıklılığını artırıcı planlama stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımıştır.

1.1.4 CBS ve AHP Entegrasyonu ile Uygunluk Analizi

Ulaşım planlamasında mekânsal ve çok kriterli karar verme süreçlerini bir araya getiren CBS ve AHP entegrasyonu, karmaşık güzergâh ve yer seçimi problemlerine sistematik çözümler sunmaktadır. Bu entegrasyon, AHP'nin kriter ağırlıklarını belirleme gücüyle CBS'nin mekânsal verileri analiz etme ve görselleştirme yeteneğini bir araya getirerek, güzergah ve istasyon yer seçiminde karar süreçlerini desteklemektedir (López ve Monzón, 2010; Malczewski ve Rinner, 2015; Mosadeghi vd., 2015).

Bu entegrasyonun erken dönem uygulamalarında Verma vd. (2005), CBS'nin çok kriterli karar analizi ile kullanıldığında mekânsal kriterleri görselleştirmedeki gücünü vurgulayarak, ulaşım planlamasında çok boyutlu verilerin etkin yönetilebileceğini göstermiştir. Farkas (2009) ise metro-raylı sistem güzergâh ve istasyon seçiminde CBS-ÇKKV entegrasyonu yaklaşımını uygulamıştır.

Brunner vd. (2011) tarafından Honolulu'da ulaşım arz ve talep dengesini sağlamak için optimum geçiş rotasını belirlemede bu teknolojileri kullanarak teknik, sosyal, ekonomik ve çevresel hususları sistematik olarak değerlendirmiştir. Benzer şekilde, De Luca vd. (2012), İtalya'nın güneyinde bulunan bir bölgede "yüksek hızlı tren" (HRS) koridor seçimini optimize etmek için bu yöntemi önererek yapılan çalışmada üç olası koridoru ele almıştır.

Zamanla yöntem, daha karmaşık planlama süreçlerine ve farklı coğrafyalara uygulanmıştır. Eldeeb, Elmitiny ve Darwish (2015), bu yöntemle "Toplu Taşıma Uygunluk Haritası" geliştirerek ulaşım planlamasında mekânsal analizlerin karar doğruluğunu %25 oranında artırdığını göstermiştir. Taye (2016) ise Addis Ababa hafif raylı sisteminde istasyon yer seçimi için topoğrafya, erişilebilirlik ve nüfus yoğunluğu gibi parametreleri kullanarak bu modeli uygulamıştır. Farooq vd. (2018) yaptığı çalışmada, Pekin ile XiongAn arasında yeni bir yüksek hızlı demiryolu hattı için bu modeli geliştirip, süre, maliyet, güvenlik ve çevre gibi kriterlere dayanarak en iyi seçeneği önermiştir.

Yakın dönemde yapılan çalışmalarda Song vd. (2021), Çin'de çevresel etki değerlendirmesi ve otomatize demiryolu tasarımını bütünleştiren, iki aşamalı bir yöntem önermiştir. Nsaif, Hassan ve Hasan (2023) ise toplu taşıma ağlarının optimizasyonu ve planlamasındaki gelişimi özetleyerek, gelecekte büyük veri ve gerçek zamanlı sensörlerle destekleneceğini öngörmüştür. Singh vd. (2024), Allahabad şehrinde minimum maliyet ve yüksek öncelik endeksine sahip en iyi rotayı değerlendirerek AHP-CBS temelli güzergah optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Benzer şekilde Luo (2024), Çin'in az gelişmiş bölgelerinde Hanzhong-Bazhong yüksek hızlı tren projesinde, 13 alt kriteri içeren CBS-AHP yaklaşımıyla, sürdürülebilir demiryolu gelişimi ve maliyet etkinliğini birlikte değerlendirmiştir. Moura vd. (2024) ise Brezilya'nın Salvador kentinde bisiklet paylaşım sistemleri ile raylı sistemlerin model analiziyle çok modlu ulaşım planlamasını değerlendirmiştir. Junyent vd. (2024); Fernanda ve Ávalos (2022), sürdürülebilir ulaşım merkezlerinin yer seçimi için bu yaklaşımı kullanmıştır.

Suvish (2025), Tiruchirapalli şehrinde mevcut ve gelecekteki ulaşım zorluklarını ele almak için en uygun metro ağı konumlarını belirlemede, AHP ile belirlenen kriter ağırlıkların CBS'de mekânsal haritalara dönüştürülmesinin planlama doğruluğunu artırdığını ortaya koymuştur. Alyami vd. (2025), zorlu arazilerde yol

ağı planlaması için CBS tabanlı Bulanık AHP (F-AHP) çerçevesi sunarak, yol altyapısı gelişimini optimize etmede yaklaşımın gelişmiş uygulamalarını göstermiştir.

Türkiye'de yapılan çalışmalar da bu yöntemin etkinliğini göstermektedir. Kırlangıçoğlu (2014) İstanbul raylı sistem güzergah planlamasında 19 alt kriter üzerinden AHP-CBS yaklaşımını uygulayarak en uygun hat koridorlarını belirlemiştir. Benzer şekilde, Ulvi, Düzkaya ve Orman (2018) Ankara Ulaşım Ana Planı kapsamında bu yaklaşımı kullanarak alternatif ulaşım senaryolarının uygunluk analizini gerçekleştirmiştir. Yıldırım ve Bediroğlu (2019) ise Erzincan-Trabzon Yüksek Hızlı Tren (YHT) projesinin optimum güzergahının belirlenmesi için CBS-AHP entegrasyonunu kullanarak hibrit model oluşturarak, inşaat öncesi çalışmalardan elde edilen farklı güzergahlar ile karşılaştırmıştır. Özceylan, Erbaş ve Çetinkaya (2021), yüksek hızlı tren güzergâh seçiminde CBS–AHP tabanlı bir model geliştirerek iklim, arazi kullanımı ve nüfus yoğunluğu gibi mekânsal kriterlerin karar sürecine nasıl entegre edilebileceğini ortaya koymuştur. Benzer biçimde, Gebze–Darıca Hafif Raylı Sistem Projesi'nde, bütünleştirilmiş modelden elde edilen uygunluk haritası mevcut güzergâhla karşılaştırılmıştır (Urhan ve Salihoğlu, 2021). Ayrıca, Özceylan ve Çetinkaya (2021) Türkiye'de YHT güzergah seçiminde F-AHP–CBS modelinin klasik AHP'ye göre %12 daha tutarlı sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Çalışkan ve Atahan (2023) ise İstanbul'un kentsel demiryolu taşımacılığı planlamasında halkın beklentilerini ve sosyo-ekonomik faktörleri ele alan, kartografik modelleme (bindirme analizi) ile AHP-CBS'yi entegre eden hibrit bir model sunmaktadır. Gülalan, Ernst ve Karabulut (2025), Şanlıurfa örneğinde ise, kentsel büyüme modellemesi kapsamında ulaşım altyapısı planlamasında mekânsal kriterlerin karar süreçlerine etkin biçimde entegre edilebildiğini göstermiştir.

Literatürde ayrıca AHP–CBS entegrasyonunun gelişmiş türevleri de yer almaktadır. Mosadeghi vd. (2015) F-AHP yöntemlerinin mekânsal belirsizlikleri azaltarak uygunluk analizlerinin doğruluk oranını artırdığını vurgulamıştır. Ghorbanzadeh, Blaschke ve Duleba (2018) tarafından geliştirilen "interval-AHP" modeli, farklı paydaş gruplarının görüşlerini karar sürecine dahil ederek ulaşım sistemlerinde sosyal kabul edilebilirlik ve çevresel sürdürülebilirlik boyutunu incelemiştir. Singh vd. (2019) ise F-AHP yöntemini CBS ile birleştirerek rota

planlamasında belirsizliklerin etkisini azaltan bir metodoloji önermiştir. Zheng vd. (2021) ise Cheng-Kun demiryolu hattında jeolojik tehlikelerin risk değerlendirmesi için CBS ile üçgensel bulanık AHP (TFN-AHP) entegre ederek jeolojik tehlike analizlerinde hibrit bir yöntemin kullanılabilirliğini göstermiştir.

1.2 Tezin Amacı

İstanbul'un raylı sistem güzergâh planlamasının teknik, çevresel ve sosyo-ekonomik açıdan ulusal ve uluslararası standartlara bağlı şekilde bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekir.

Bu bağlamda tez çalışması kapsamında, İstanbul'un demografik ve coğrafi açıdan raylı sistem optimizasyona uygun bir bölgesinde özgün bir vaka çalışması oluşturulması ve çok kriterli değerlendirme parametrelerinin mekânsal analizlerle desteklendiği bütünleşik bir yaklaşım ile optimum metro güzergahın belirlenmesi amaçlanmaktadır. Böylece pratikte, yerel yönetimlere ve planlama kuruluşlarına raylı sistem güzergâh planlaması için sistematik bir karar destek sistemi önerilmesi, ulaşım yatırımlarının mühendislik, sürdürülebilirlik, maliyet ve sosyal kabul edilebilirlik açılarından değerlendirilmesine yönelik somut kriterler sunulması hedeflenmektedir.

Nihai olarak, araştırma bulguları ışığında İstanbul ve benzer metropoller için sürdürülebilir ulaşım planlamasına yönelik öneriler geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, geliştirilen uygunluk analizi modeline ilişkin aşağıdaki hipotezler tanımlanmıştır:

- Raylı sistem güzergâh planlamasını etkileyen çoklu kriterler, AHP ve CBS entegrasyonu kullanılarak bütünleşik bir model dahilinde etkin bir şekilde değerlendirilebilir.
- Bu entegrasyon modelin kullanılması, demiryolu güzergâh planlamasında karar verme sürecinin doğruluğunu ve mekânsal tutarlılığını artırır ve objektif bir güzergâh uygunluk haritası oluşturulmasını sağlar.

- Teknik etkenler, ulaşım entegrasyonu ve maliyet, sosyo-demografik ve çevresel faktörlere kıyasla raylı sistem güzergâh uygunluğunun belirlenmesinde daha yüksek bir ağırlığa sahiptir.

2
İSTANBUL'DA KENT İÇİ ULAŞIM VE RAYLI SİSTEMLER

2.1 İstanbul Hakkında Bilgiler

İstanbul, tarihsel süreçte iki kıtayı birleştiren benzersiz coğrafi konumuyla küresel öneme sahip bir dünya kenti olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'nin kuzeybatısında, Marmara Bölgesi'nde yer alan kentin stratejik önemi, Asya ve Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan tek şehir olmasından kaynaklanır. Kuzeyde Karadeniz, güneyde Marmara Denizi ile çevrili olan kentin doğusunda Kocaeli, batısında ise Tekirdağ bulunur (Şekil 2.1). Bu eşsiz konum, aynı zamanda kenti dünyanın en işlek su yollarından biri olan İstanbul Boğazı'na ev sahibi yapmaktadır.

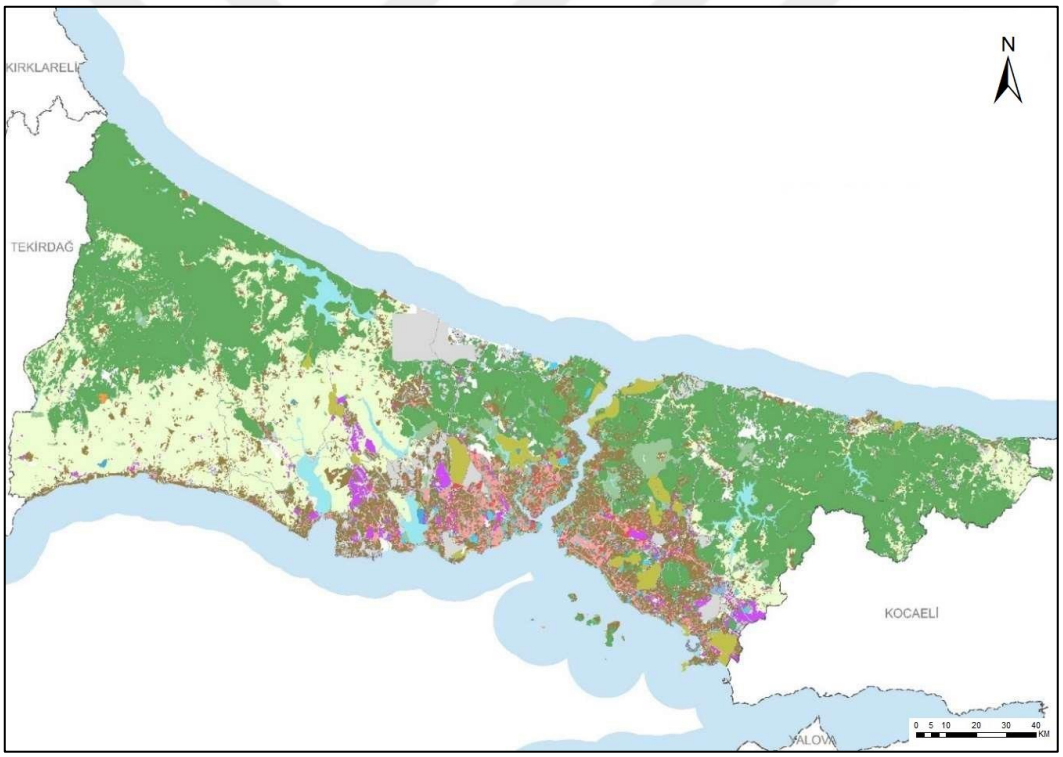


Şekil 2.1 İstanbul ili haritası (Saygılı, 2018)

Şehrin tarihi, günümüzde "tarihi yarımada" olarak bilinen bölge ve yakın çevresinde MÖ 6. binyıla kadar uzanan yerleşim izlerine dayanmaktadır. Tarih boyunca Roma, Bizans ve Osmanlı İmparatorluğu gibi büyük devletlere başkentlik

yapmış olan İstanbul, 1923'te başkentin Ankara'ya taşınmasıyla bu resmi statüsünü yitirmiş olsa da ülkenin ticaret, sanayi, kültür ve turizm merkezi olmayı sürdürmüştür. Şehrin Doğu ve Batı medeniyetlerinin tarihsel bir bağlantısı olarak rolü, günümüzdeki karmaşık sosyo-ekonomik ve kültürel yapının temelini oluşturmaktadır. Tarihsel perspektifte ele alındığında, İstanbul'un kentsel kimliği, 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren gelişmeye başlayan modern kent içi toplu ulaşım sistemleriyle birlikte evrilmiştir (Tekeli, 2010).

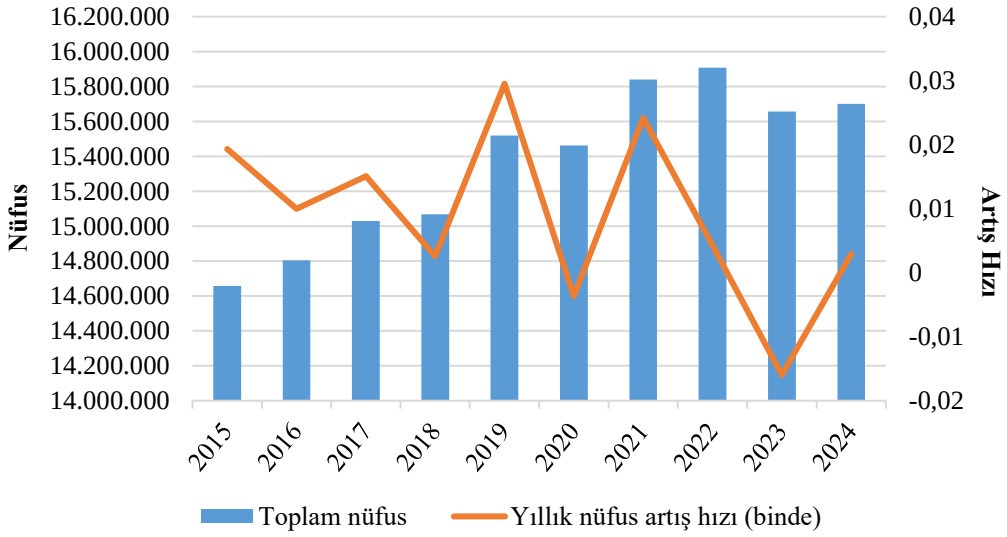
Bugünkü idari sınırlarıyla ele alındığında, İstanbul'un arazi kullanımı genellikle konut, ticaret, ofis ve diğer fonksiyonların bir arada bulunduğu "karma arazi kullanımı" olarak karakterize edilmektedir. Bu karma yapı, topografik özelliklerin de etkisiyle bir sokak ve hatta bir bina ölçeğinde dahi görülen parçacıl kent gelişimini ortaya koymaktadır (Şekil 2.2).



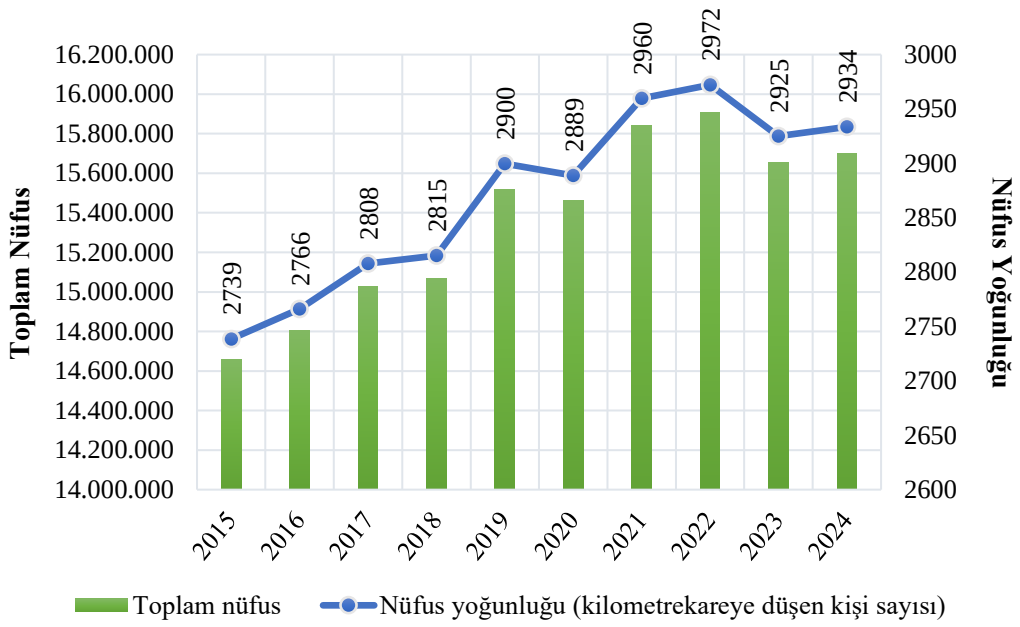
Şekil 2.2 İstanbul mevcut arazi kullanım haritası (İBB Şehir Planlama Müdürlüğü, 2018)

İstanbul, 15,7 milyonu aşan nüfusu ile Türkiye'nin en kalabalık şehridir ve ülke nüfusunun yaklaşık %18'ini barındırmaktadır (TÜİK, 2025). Nüfusun yaklaşık üçte ikisi Avrupa Yakası'nda, geri kalanı ise Anadolu Yakası'nda yaşamaktadır. Kentin nüfusu, 39 ilçede yaşamakta olup, ilçelerin 25'i Avrupa, 14'ü ise Anadolu Yakası'ndadır. Bu mekânsal dağılım, kıtalararası yolculuk talebinde ulaşım

sistemleri üzerinde asimetrik bir yük oluşturmaktadır. TÜİK (2025) verilerine göre İstanbul sürekli olarak Türkiye'nin en fazla nüfusa sahip şehridir ve son 10 yılda nüfus artış hızı yavaşlasa da artış eğilimi sürmektedir (Şekil 2.3). 2024 yılı itibariyle nüfusunun, 7.820.462'ü erkekler ve 7.881.140 kadınlardan oluşmaktadır. Artan nüfusun, fiziksel olarak sınırlı yerleşim alanlarına sıkışması sonucu kentte son 10 yılda nüfus yoğunluğu da artmıştır (Şekil 2.4). Bu durum, kentteki arazi baskısının ve yaşam alanı dengesizliğinin artmasına yol açmaktadır. Kentsel nüfusunun yıllar içinde artışı ve bu ölçüde yoğunlaşması, ulaşım sistemlerinde yüksek talep baskısı, trafik sıkışıklığı ve çevresel sürdürülebilirlik sorunlarını da beraberinde getirmiştir (Yayla, 2023). Şehir, her yıl sürekli olarak hem yurt içinden hem de yurt dışından göç almaktadır ve bu durum, onu Türkiye'nin en dinamik demografik yapısına sahip ili haline getirmiştir (Şekil 2.5).

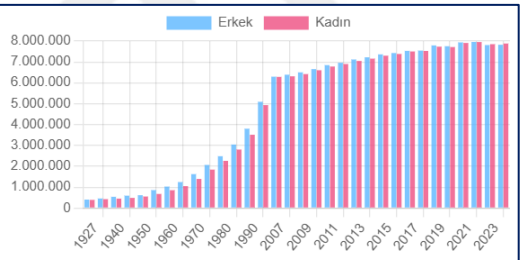


Şekil 2.3 İstanbul'un yıllara göre nüfusu ve nüfus artışı değişim grafiği (TÜİK, 2025)



Şekil 2.4 İstanbul'un yıllara göre nüfus yoğunluğu değişimi (TÜİK, 2025)

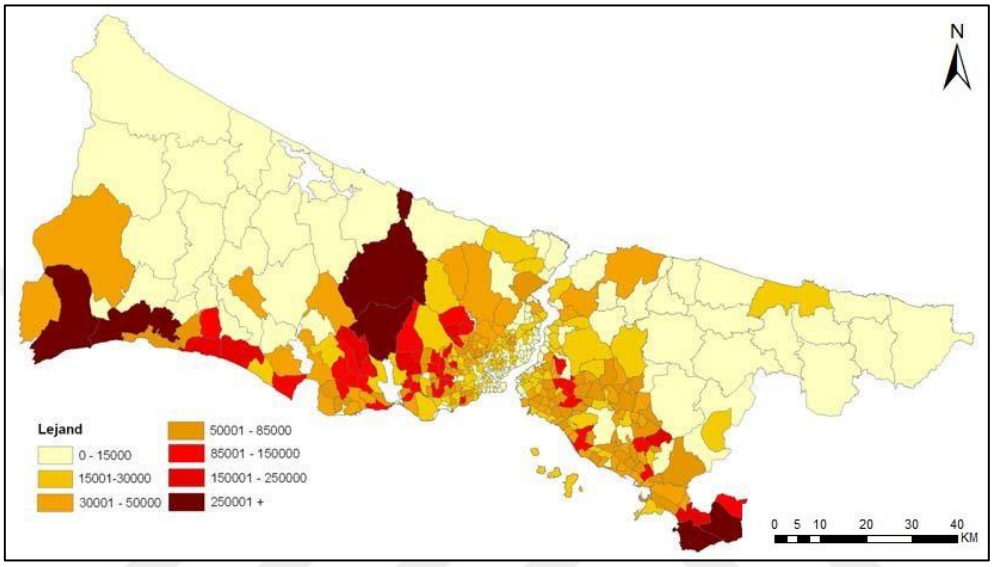
Toplam	15.701.602
Erkek	7.820.462
Kadın	7.881.140
Ortanca Yaş	34,5
Nüfus Yoğunluğu	2933,6
Nüfus Artış Hızı(Binde)	2,9
Yabancı Nüfus	562.806
Yurtdışı Doğumlu Nüfus	993.714



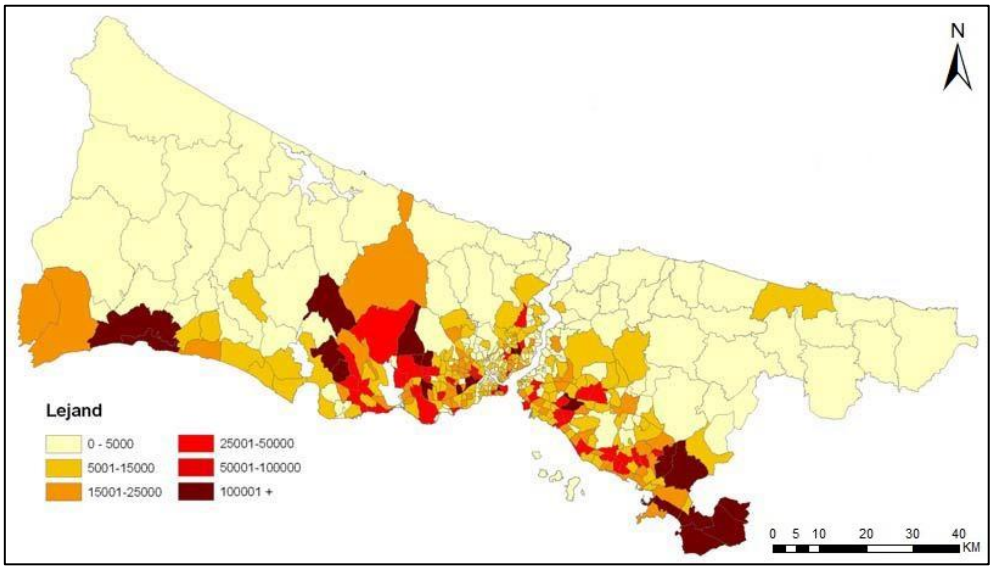
Şekil 2.5 İstanbul ili demografik göstergeleri (TÜİK, 2024b)

İstanbul'da nüfus ve istihdam bakımından yoğunlaşma ilçeler ölçeğinde farklılaşmaktadır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de görüldüğü üzere, tarihsel gelişime paralel biçimde bir yoğunlaşma göstermektedir. Bu yoğunlaşma, özellikle tarihi yarımadanın batısı, Haliç'in kuzeyi ve İstanbul Boğazı'nın doğusunda kıyı boyunca uzanmaktadır. Bu yoğunlaşma görülen bölgeler arazi kullanımı ve çeşitliliği bakımından doygun hale gelmiş merkezi bölgeleri işaret etmektedir. Merkezi bölgelerdeki yoğunlaşma eğilimine karşın, İstanbul'un merkezden uzak kent çeperlerinde konut ağırlıklı arazi kullanımının yayılması sonucu bu alanlar kentleşmenin göreceli olarak mekânsal dengesizliğini artmıştır. Bu bağlamda İstanbul'da kentsel alan ve çeperlerdeki yoğunlaşma-yayılma dengeli dağılmamıştır. Kentsel büyümenin bu kontrolsüz yayılımı, yerleşimlerin ulaşım

altyapısı ile uyumsuz gelişmesine neden olarak ulaşım altyapısı üzerindeki baskıyı artırmakta; ortalama seyahat mesafelerini uzatarak kent içindeki erişilebilirlik eşitsizliklerine sebep olmakta ve toplu taşıma sistemlerinin kapsayıcılığıyla verimli işletilmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum çevresel sürdürülebilirlik açısından da yeni planlama yaklaşımlarını zorunlu kılmaktadır (Canitez vd., 2020; Öztaşkın ve Levend, 2023).



Şekil 2.6 İstanbul bölgelere göre nüfus yoğunluğu (2023) (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2011)



Şekil 2.7 İstanbul bölgelere göre istihdam yoğunluğu (2023) (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2011)

İstanbul ekonomik açıdan, tarihsel olarak kara ve deniz ticaret yollarının kesişim noktasındaki konumu sayesinde ülke ekonomisinin kalbi haline gelmiştir. Günümüzde bu rolünü daha da güçlendirerek, Türkiye'nin gayri safi yurt içi hasılasının (GSYH) yaklaşık %30,4'ünü üretmekte ve ihracatın %45'inden fazlasını gerçekleştirmektedir (İSTKA, 2023). İstanbul, Levent, Maslak ve Şişli gibi semtlerde yoğunlaşan finans sektörüyle Türkiye'nin mali başkenti konumundadır. Aynı zamanda, otomotiv, tekstil, kimya ve elektronik gibi sektörlerde ülkenin en büyük üretim tesislerine ev sahipliği yaparak sanayide de liderdir. Türkiye'ye gelen yabancı turistlerin yaklaşık %35'i İstanbul'u tercih etmekte ve şehir, önemli bir turizm geliri kaynağı olmaya devam etmektedir (Seymen, 2023). Bu durum, kenti hem uluslararası bir ticaret hem de turizm merkezi haline getirmiştir.

Bu ekonomik yoğunluk, yüksek nüfus yoğunluğuyla birlikte, kent içi hareketlilik talebini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Günlük ortalama yaklaşık 30,3 milyon yolculuk gerçekleşmekte olup, bu yolculukların %54'ü toplu taşımayla, %46'sı özel araçlarla yapılmaktadır (Demir, 2025; İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2023). Ekonomik ağırlık, günlük işgücü hareketliliğini ve kargo trafiğini aşırı derecede yoğunlaştırmakta, dolayısıyla sürdürülebilir bir ulaşım altyapısı kurma zorunluluğunu stratejik bir öncelik haline getirmektedir.

İstanbul'un coğrafi yapısı, ulaşım planlamasında hem fırsatlar hem de kısıtlar yaratmaktadır. Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı'nın oluşturduğu doğal sınırlar ve topografik yapısının getirdiği yükselti farklılıkları, kentin morfolojik yapısını şekillendirir. Kentin kuzey-güney yönündeki orman ve su havzaları, güneydeki yoğun yerleşim alanlarıyla birlikte doğal bariyerler oluşturmaktadır. Bu coğrafi kısıtlar, kentin ulaşım sistemleri üzerinde de belirleyici bir rol oynayarak ulaşım ağlarının planlanmasında mühendislik açısından önemli zorluklar yaratmaktadır.

İstanbul'un tarihsel birikimi, demografik, ekonomik ve mekânsal dinamikleri, kenti yüksek ulaşım talebine sahip karmaşık bir sistem haline getirmiştir. Bu koşullar, kent içi ulaşım planlamasının sadece teknik mühendislik çözümlerini değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik ve çevresel faydayı da önceliklendirmeyi gerektirmektedir. Bu durum, mevcut ulaşım altyapısının yeniden değerlendirilmesi ve raylı sistem temelli sürdürülebilir ulaşım politikalarının geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

2.2 İstanbul Ulaşım Ağı Sistemi

İstanbul'un ulaşım sistemi, kentin coğrafi, demografik ve ekonomik özellikleriyle doğrudan ilişkili, karmaşık bir yapıya sahiptir. Şehrin iki kıta üzerinde konumlanması, ulaşım planlamasında köprü, tünel, denizyolu ve raylı sistemlerin birlikte kullanıldığı çok modlu bir ulaşım yapısını zorunlu hale getirmiştir (Akkaya ve Kızıltaş, 2023; Doğan ve Doğan, 2020; Özer ve Kocaman, 2008). Bu çok modlu yapı, tarihsel bir evrim süreci sonucunda ortaya çıkmıştır.

Bu dönüşümle günümüzde kentin ulaşım sistemi geniş bir toplu taşıma ağına sahiptir. Lastik tekerlekli karayolu, raylı ve füniküler sistemleri ile denizyolu olmak üzere üç ana modalitede, İBB koordinasyonunda belediye iştiraklerinin de bulunduğu çok aktörlü (İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri (İETT), Metro İstanbul A.Ş., Şehir Hatları A.Ş., özel işletmeciler vb.) bir yapı ile yönetilmektedir (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2011). Toplu taşıma modları arasında hafif raylı sistemler (tramvay, nostaljik tramvay, füniküler, tarihi tünel ve teleferik), metro, Marmaray, Metrobüs, deniz ulaşımı (deniz otobüsü, vapur ve deniz motoru), otobüs, minibüs taksi ve taksi dolmuş sistemleri yer almaktadır (İBB, 2022) (Şekil 2.8).

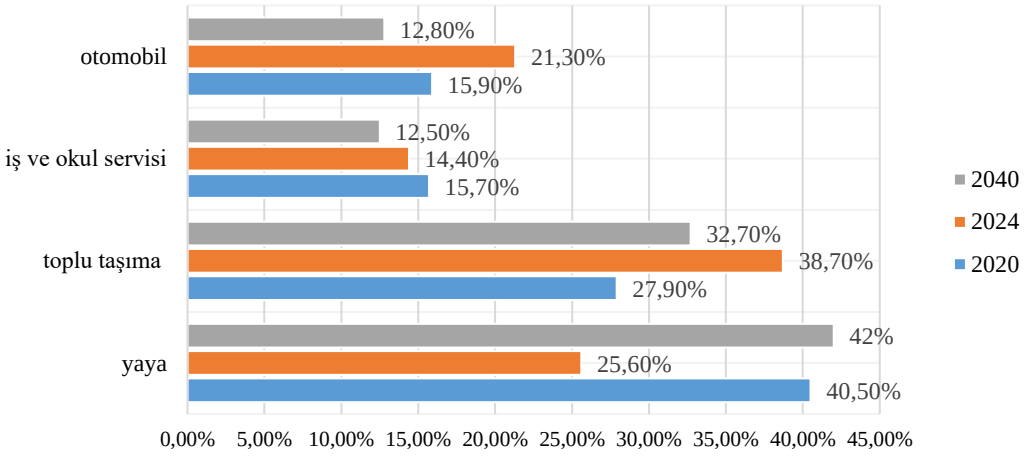
2023 yılı itibarıyla kentte 37.000 kilometreyi aşan yol ağı, 2024 yılı itibariyle 380,7 kilometrelik aktif raylı sistem hattı, 50'den fazla deniz iskelesi, 10.000'den fazla otobüs ve minibüs ile hizmet veren çok bileşenli bir sistem bulunmaktadır (İBB, 2022, 2025).



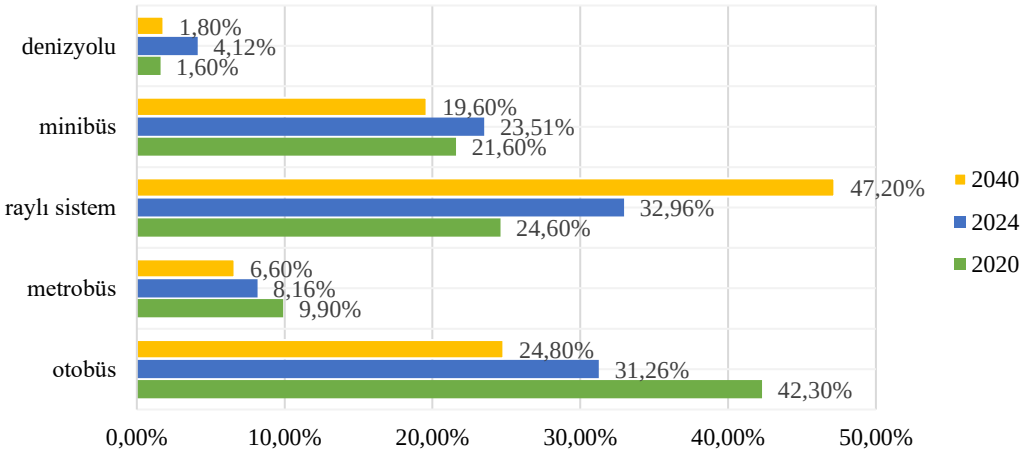
Şekil 2.8 İstanbul ulaşım araçları (İBB, 2022)

Kentteki hareketlilik talebi incelendiğinde, günlük yolculuk sayısı yaklaşık 30,3 milyon düzeyindedir. Günlük yolculukların 2020 ile 2024 yılları karşılaştırıldığında, yaya payı %40,5'ten %25,6'ya, servis araçları payı %15,7'den %14,4'e gerilerken, toplu taşıma payı %27,9'dan %38,7'ye ve özel araç payı %15,9'dan %21,3'e yükseldiği görülmektedir (İBB, 2022, 2025; İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2011) (Şekil 2.9). Buna karşılık, özel araç kullanımının yolculuk içindeki payının, 2040 hedefleri doğrultusunda istikrarlı biçimde azaldığını göstermektedir. Bu eğilim, İstanbul'un sürdürülebilir kentsel ulaşım hedefleriyle uyumlu bir dönüşüme işaret etmektedir.

Toplu taşıma sistemi içindeki modal dağılım incelendiğinde ise raylı sistemlerin payı 2020'de %25-30 iken 2024'te %30-35'e ulaşmış, denizyolu payı %1,5-2'den %4'e çıkarken lastik tekerlekli araçların payı %39,4 ile hâlen baskındır (İBB, 2022, 2025; İETT, 2024b; UITP, 2023) (Şekil 2.10). Bu oranlar, İstanbul'un toplu taşıma sisteminin hâlen ağırlıklı olarak karayolu tabanlı olduğunu, ancak ileriye yönelik hedeflerde raylı sistemlerin modal payının giderek yükseldiğini göstermektedir.



Şekil 2.9 Günlük yolculukların türel dağılım oranları (2020-2040)

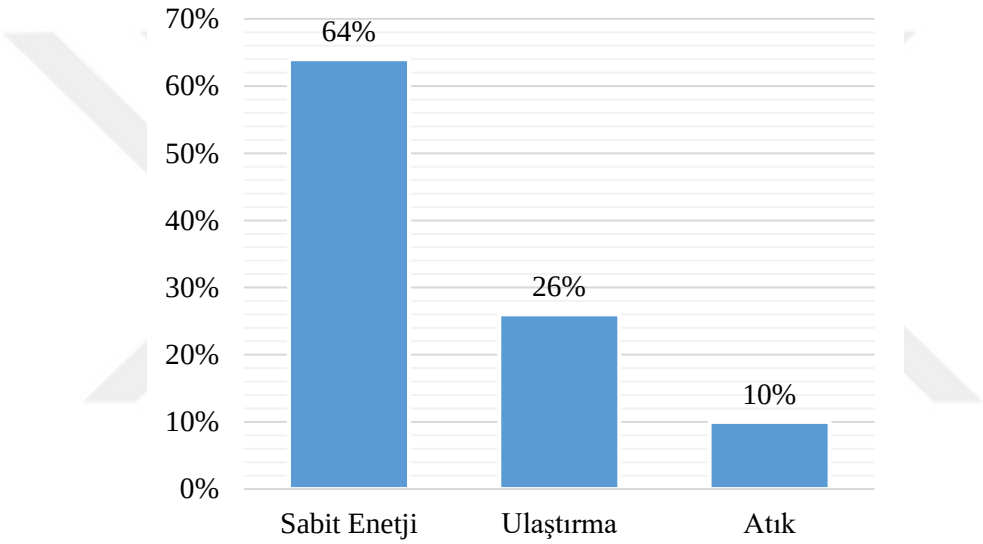


Şekil 2.10 Toplu taşıma türel dağılımı (2020-2040)

İstanbul ulaşım sisteminin en temel sorunu, sınırlı kara alanı ile sürekli artan talep arasındaki dengesizliktir. TÜİK (2025c) verilerine göre, İstanbul'daki motorlu kara taşıtı sayısı 6 milyon 076 bin 938'e ulaşmıştır. Bu rakam, Türkiye'deki toplam araç payının yaklaşık %19'una karşılık gelmektedir. İBB'nin Ulaşım ve Hareketlilik Raporu (2022) verilerine göre, kentte günlük ortalama 7,5 milyon araç hareketi gerçekleşmektedir (İBB, 2022). 2024 yılına gelindiğinde bu sayı yaklaşık 8 milyon seviyesine ulaşmıştır. İBB SUMP (2023) raporlarına göre 2040 yılında 9,6 milyon araç hareketine çıkması beklenmektedir. Bu durum mevcut ulaşım altyapısı üzerinde sürekli artan bir baskı oluşturmaktadır (Canitez vd., 2020; İBB, 2022; İBB Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı, 2021; TÜİK, 2024a)

İstanbul'da ulaşımın çevresel boyutu da giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Kentin sera gazı emisyonlarının en büyük kaynaklarından biri ulaşım sektörüdür.

Sektör, kentin toplam karbon salınımlarının yaklaşık %26'sını oluşturmaktadır (Şekil 2.11). Bu oran, yıllık yaklaşık 7,5–7,6 milyon ton CO_2 düzeyine karşılık gelmekte; emisyonların %82'si karayolu taşımacılığından, yalnızca %4'ü raylı sistem ve denizyolu ulaşımından kaynaklanmaktadır (Demir, 2025; İBB Çevre Koruma ve Kontrol Başkanlığı, 2023a, 2023b; İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2023; İPA, 2023). Aynı zamanda, kentin toplam enerji tüketiminde ulaşım sektörünün payı %31'ine denk gelmektedir. Bu veriler, ulaşımda trafik yoğunluğunun azaltılması hem de düşük karbonlu sistemlere geçişin kentin iklim politikaları açısından stratejik önemini ortaya koymaktadır (İBB Çevre Koruma ve Kontrol Başkanlığı, 2021, 2023b, 2023a).



Şekil 2.11 İstanbul'da sera gazı emisyon miktarının sektörel dağılımları (İBB Çevre Koruma ve Kontrol Başkanlığı, 2023a)

Bu çevresel ve operasyonel zorluklar, sürdürülebilir bir ulaşım dönüşümünü zorunlu kılmaktadır. Çok modlu sistem, İstanbul'un kentsel hareketliliğinde farklı ulaşım türlerinin birbirini tamamladığı bir bütünlük sunmaktadır. Aşağıda, bu sistemin ana bileşenlerini oluşturan ulaşım modları sırasıyla ele alınmıştır. Bu kapsamda öncelikle, bu bileşenlerden karayolu (Bölüm 2.2.1) ve denizyolu (Bölüm 2.2.2) ulaşım alt yapıları incelenmiştir. Raylı sistemler, kapsamı ve gelecek projeksiyonlarındaki önemi nedeniyle ayrı bir ana başlıkta (Bölüm 2.3) ele alınmıştır.

2.2.1 Karayolu Ulaşımı

İstanbul'un kentsel hareketliliğinde, tarihsel gelişim süreci ve altyapı esnekliği nedeniyle karayolu, toplu taşımanın en yaygın modu olarak öne çıkmaktadır. Sistem, İBB koordinasyonunda, başta İETT ve özel operatörler aracılığıyla yürütülmektedir. Bu yapı, otobüs, Özel Halk Otobüsleri (ÖHO), Metrobüs ve minibüs, dolmuş, servis gibi çeşitli paratransit ulaşım türlerinin oluşturduğu bütünleşik bir ağ yapısına sahiptir (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2023; İETT, 2024a, 2024b).

Kent geneline yayılan otobüs ağı, raylı sistemlerin erişemediği bölgelerde temel ulaşım hizmetini sağlarken, aynı zamanda metro istasyonlarına yolcu taşıyan besleyici hatlar olarak da işlev görmektedir (İETT, 2024a). Günümüzde 800'ü aşkın hatla kent genelinde hizmet sunan otobüs sitemi, toplu taşımadaki erişim ağının en geniş bileşenidir (Gwilliam, 2003; İETT, 2024a, 2024b). Bu durum, raylı sistemlerin çevresinde gelişen çok modlu ulaşım zincirlerinin kent genelinde entegrasyonunu desteklemektedir.

İstanbul'daki otobüs taşımacılığının önemli bir alt sistemi olan metrobüs sistemi, 2007 yılında faaliyete geçen ve 50 km uzunluğa sahip hat, Beylikdüzü ile Söğütlüçeşme arasında hizmet vermektedir. Yılda yaklaşık 288,500 milyon yolcusu olan günlük ortalama 790 bin civarı yolcu taşıyan metrobüs, Bus Rapid Transit (BRT) modeline dayanmakta olup, yüksek frekanslı seferleri, özel şerit kullanımı ve hızlı aktarma olanaklarıyla raylı sistem benzeri bir hizmet kalitesi sunmaktadır (Çetin vd., 2022; Demirtaş ve Acar, 2020; İETT, 2024b). Bu hat, Asya ve Avrupa yakaları arasında doğrudan bir toplu taşıma aksı oluşturarak, kentsel erişilebilirliğin sürekliliğine katkı sağlamaktadır.

İstanbul için bir diğer toplu taşıma türü de ana toplu taşıma sistemlerini tamamlayıcı nitelikte olan minibüs ve dolmuş sistemleridir. Bu sistemler, düşük taşıma kapasiteli ve özellikle raylı sistem veya otobüs hatlarının bulunmadığı bölgelerde kısa mesafeli yolculuklar için esnek erişim olanağı sunmaktadır. Özel bir durağı yoktur ve yolcu isteği üzerine dur-kalk yaparak çalışmaktadır. Durak bazlı çalışmadıkları için düzensiz ve hat yoğunluğu trafik akışını olumsuz etkileyebilmektedir (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2011).

Ayrıca kentte karayolu taşımacılığı kapsamında değerlendirilen servis araçları ve havalimanı bağlantı hatları (Havaist/Havabüs) da İstanbul'un ulaşım sisteminde belirli işlevlere sahiptir. Servis taşımacılığı, günün özellikle belirli zaman dilimlerinde sunduğu kapıdan kapıya hizmet bakımından diğer türlere göre daha konforlu bir seçenek sunmaktadır. Benzer şekilde Havaist/Havabüs hatları, İstanbul'un havalimanlarına şehir içinden konforlu, düzenli ve doğrudan ulaşım sağlayarak, kent için önemli olan uluslararası ulaşım ağlarına bağlantı işlevini üstlenmektedir. Ancak her iki sistem de bir yandan erişilebilirliği ve seyahat konforunu artırırken, diğer yandan kent genelindeki araç sirkülasyonunu artırması nedeniyle trafik yoğunluğu üzerinde dönemsel baskılar oluşturabilmektedir (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2011).

Son yıllarda kentin bazı alanlarında karayolu taşıma sistemlerinin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik uygulamaların hayata geçirilmesine örnek olarak, İstanbul Adalar'da elektrikli araç tabanlı toplu taşıma sistemi hizmete alınmıştır. Bu yaklaşım, İstanbul'un ulaşım politikalarında sürdürülebilirlik vurgusunun güçlendiğinin bir adımı olarak görülebilir. Ayrıca bu dönüşüm, karbon emisyonlarını azaltma hedefiyle uyumlu bir uygulama örneği olmakla birlikte, bu tür çözümlerin kent genelindeki ulaşım sorunlarını tek başına çözme kapasitesi sınırlıdır (İETT, 2024b).

İstanbul'daki karayolu ulaşımının mevcut altyapısı, artan motorlu araç sayısı karşısında yetersiz kalmaktadır. TÜİK (2025) verilerine göre, kayıtlı motorlu taşıt sayısı yaklaşık 6,1 milyona ulaşmıştır (İBB, 2022; TÜİK, 2025c). Son on yılda (2015-2025) araç sahipliğinde yaklaşık %58'in üzerinde bir artış gözlenmesine rağmen, yol kapasitesi aynı oranda genişlememiştir. Bu dengesizlik, trafik yoğunluğunun artmasına, yolculuk sürelerinin uzamasına ve hava kirliliği gibi sorunların artmasına yol açmaktadır (İPA, 2023; TÜİK, 2025c). Bu durum, kentte karayolu odaklı ulaşımın sınırlılığını ve raylı sistemler gibi yüksek kapasiteli ve düşük karbonlu alternatif modların geliştirilmesinin gerekliliğinin önemini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, karayolu toplu taşıma sistemleri İstanbul'un ulaşım yapısında gerekli ve tamamlayıcı bir rol üstlenmekle birlikte, uzun vadeli çözüm arayışlarının merkezinde raylı sistemlerin yer alması kaçınılmaz görünmektedir (Litman, 2018; Papa ve Bertolini, 2015).

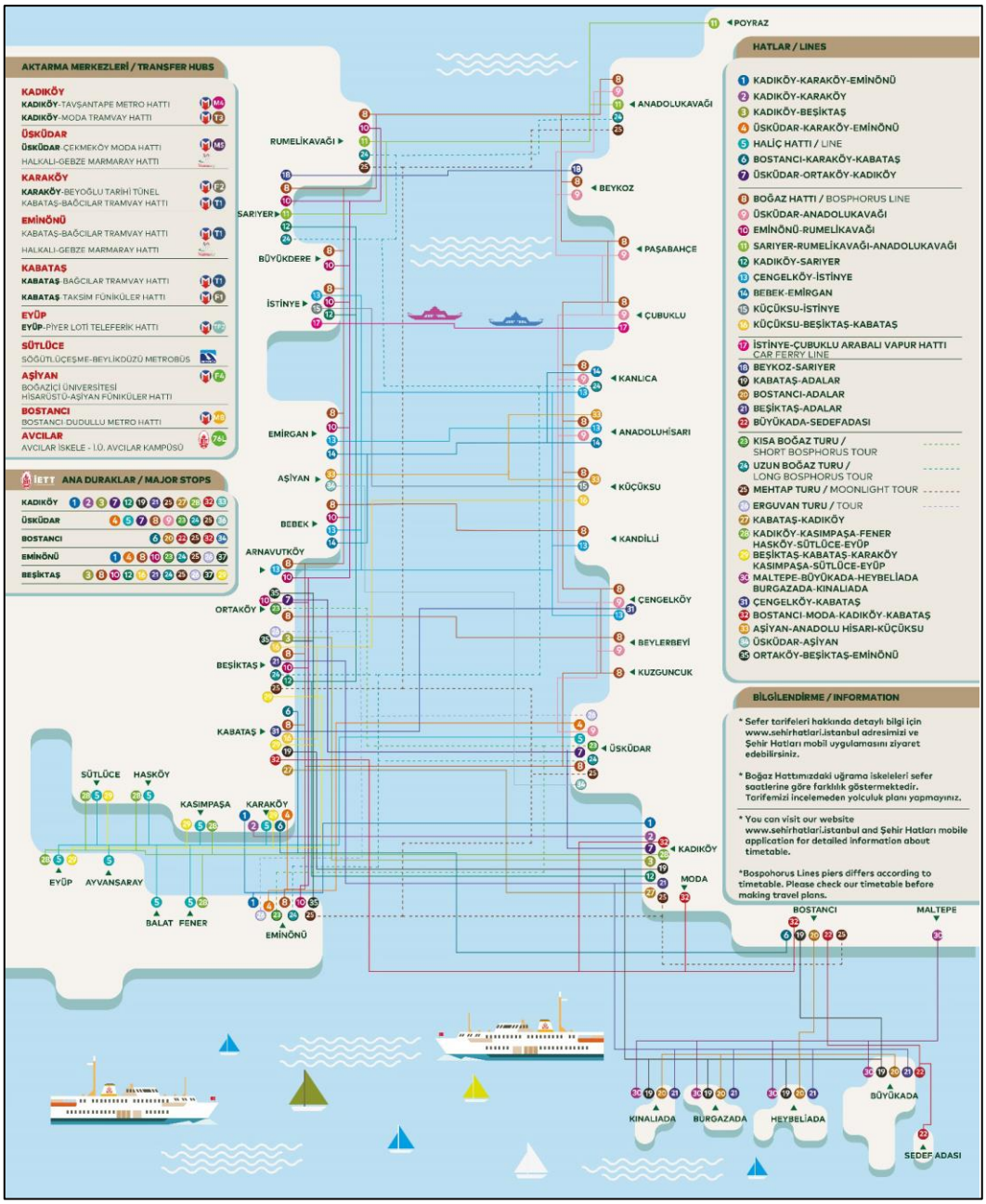
2.2.2 Denizyolu Ulaşımı

İstanbul'un coğrafi yapısını belirleyen, kenti iki kıta arasında ayıran Boğaz'ın doğal bir sonucu olarak iki yakayı birbirine bağlayan ve tamamlayıcı ulaşım modu olan denizyolu ulaşımı, tarihsel süreçten günümüze kentsel hareketliliğin vazgeçilmez bir bileşenidir. Şehir, tarih boyunca deniz taşımacılığıyla biçimlenmiş olup, bu mod günümüzde de kent içi ulaşım sisteminin tamamlayıcı unsuru olarak önemini korumaktadır (Çancı ve Önden, 2015; İlsever ve Cılız, 2024; Pratas vd., 2023).

Günümüzde deniz ulaşımı, İBB'nin iştirak şirketi olan Şehir Hatları A.Ş. ve İBB denetiminde çalışan özel sektör işletmecileri (Turyol, Dentur Avrasya vb.) tarafından sağlanmaktadır. Şehir Hatları A.Ş. kent içi düzenli hat seferlerini işletirken, özel firmalar (örneğin Turyol ve Dentur) kısa mesafeli yolcu taşımacılığı yapmaktadır. Sistem genel olarak ellinin üstünde iskelede hizmet vermekte ve İstanbul'un farklı bölgeleri arasında yılda yaklaşık 40 milyon yolcunun düzenli ulaşımını sağlamaktadır (İBB, 2025; İPA, 2024) (Şekil 2.12).

Denizyolu taşımacılığının, toplam yolculuklar içindeki payı düşük görünse de (%3-4) özellikle Boğaz geçişlerinde karayolu trafiğini azaltan stratejik bir moddur. Bu sistem, diğer toplu taşıma sistemleriyle entegrasyon sağlayarak çok modlu ulaşım yapısının etkinliğini artırmaktadır. Marmaray ve metro hatlarıyla yapılan aktarmalar, yolculuk sürelerinin kısalmasına ve kıtalar arası geçişlerde karbon salımının düşmesine katkı sağlamaktadır (Abu-Aisha vd., 2024; Li vd., 2024; Peng vd., 2025). Bu yönüyle sadece bir geçiş aracı değil, kentsel ulaşım zincirinin kritik bir halkası, alternatif ve çevre dostu bir ulaşım modu olarak işlev görmektedir (Lanzini vd., 2022; Sachs vd., 2021) (Şekil 2.12).

Denizyolu ulaşımı İstanbul'un çok modlu ulaşım sisteminde tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Raylı sistemler ve karayolu toplu taşımayla bütünleşmesi, kentin sürdürülebilir ulaşım vizyonunun önemli bir bileşenidir (İlsever ve Üstündağ, 2024; Pratas vd., 2023).



Şekil 2.12 İstanbul şehir hatları sefer haritası (İBB Şehir Hatları, 2025)

2.3 İstanbul Raylı Sistem Ulaşım Ağı

İstanbul'un ulaşım sisteminde raylı sistemler, yüksek yolcu kapasitesi, düşük karbon salımı ve enerji verimliliğiyle kentin sürdürülebilir hareketlilik stratejisinin merkezinde yer almaktadır (European Environment Agency, 2021; International Energy Agency (IEA), t.y., 2019). Kentin coğrafi kısıtları, nüfus yoğunluğu ve trafik tıkanıklığı gibi faktörler, karayolu odaklı ulaşımdan toplu taşıma odaklı bir modele geçişi zorunlu hale getirmiştir (Liu vd., 2024; Nguyen-Phuoc vd., 2018). Bu bağlamda raylı sistem ağı, karayolu ve denizyolu sistemleri ile entegre çalışan,

kentin iki yakasını birleştiren ve ana arterlerdeki trafik yükünü hafifleten temel ulaşım omurgasını oluşturmaktadır (İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2023) (Şekil 2.14).

Günümüzde İstanbul'daki raylı sistem taşımacılığı, metro, hafif raylı sistem, tramvay, nostaljik tramvay, banliyö treni, füniküler ve teleferik hatlarından oluşan kapsamlı bir ağdır. Sistemin sorumlu kuruluşları İBB ve Ulaştırma Bakanlığı olup işletimi İBB'ye bağlı Metro İstanbul A.Ş. ve Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (UAB)'ye bağlı TCDD Taşımacılık A.Ş. tarafından yürütülmektedir (Şekil 2.15). Bu ağ; sürücüsüz tam otomatik (M5, M7, M8), sürücülü (M1, M2, M4 vb.) metrolar, kentsel yüzeyde çalışan modern tramvaylar (T1, T4, T5), topoğrafik engelleri (eğimi) aşmak için kurulan füniküler (F1, F4), teleferikler ve nostaljik hatlardan oluşmaktadır. Bu yerel ağa ek olarak, UAB'ye bağlı TCDD Taşımacılık tarafından metro ve Marmaray (Gebze-Halkalı) banliyö hattı da işletilmektedir.

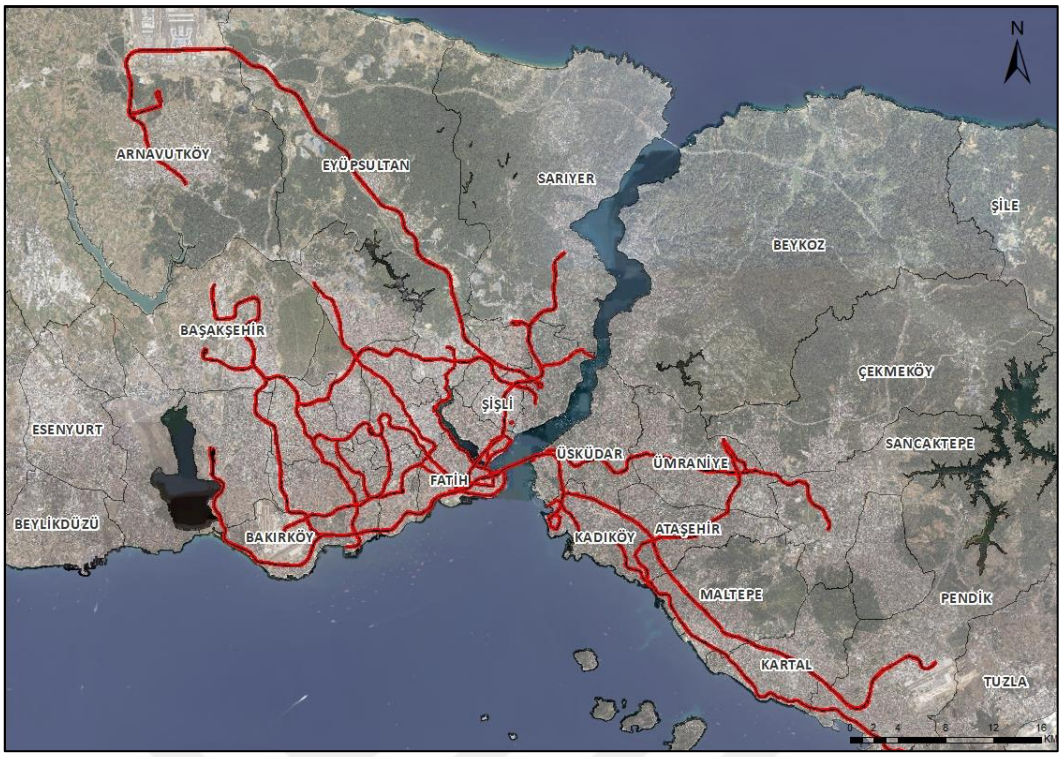
2024 yılı itibarıyla İstanbul'da 179,1 km metro, 50,3 km hafif metro, 53,1 km tramvay, 2,8 km füniküler, 4,2 km nostaljik tramvay, 90,6 km banliyö hattı ve 0,7 km teleferik olmak üzere yaklaşık 380,7 km uzunluğunda raylı sistem hattı mevcuttur (İBB, 2025). Bu hatların yaklaşık %60'ı Avrupa Yakası'nda, %40'ı Anadolu Yakası'nda hizmet vermektedir. Toplam 25 aktif hat içinde M2, M1, T1, M4, M5 ve Marmaray, en yoğun yolcu hacmine sahip ana koridorları oluşturmaktadır (Tablo 2.1, Şekil 2.13).

Tablo 2.1 İstanbul'un mevcut raylı sistem hatları (İBB, 2025)

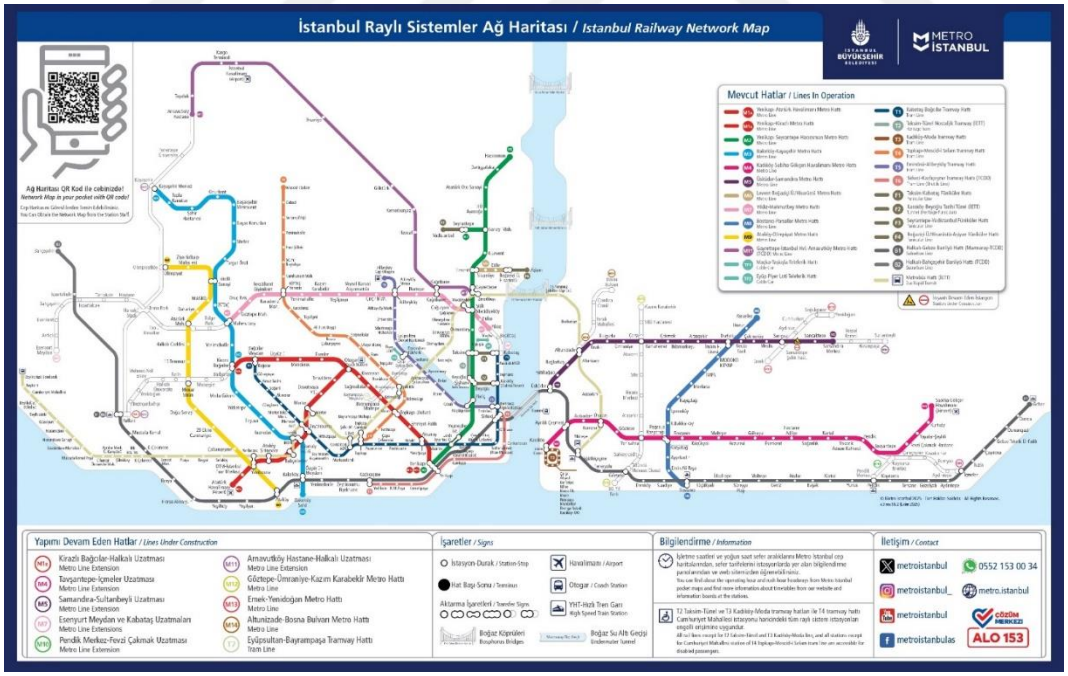
	Hat No	Hat Adı	Sistem	Km	Maks. Yolcu Sayısı (kişi/gün)
İBB	M1A	Yenikapı-Atatürk Havalimanı	Metro	21,0	408.863
	M1B	Otogar-Bağcılar (Kirazlı)	Metro	5,8	
	M2	Yenikapı–Hacıosman	Metro	23,5	633.264
	M3	Bakırköy-Kayaşehir	Metro	26,7	159.232
	M4	Kadıköy-Sabiha Gökçen Hvl.	Metro	33,6	387.853
	M5	Üsküdar-Samandıra	Metro	26,5	376.797
	M6	Levent–Boğaziçi Üni/Rumeli Hisarüstü	Metro	3,3	25.506

Tablo 2.1 İstanbul'un mevcut raylı sistem hatları (İBB, 2025) (devamı)

	Hat No	Hat Adı	Sistem	Km	Maks. Yolcu Sayısı (kişi/gün)
İBB	M7	Kabataş-Mahmutbey (Mahmutbey-Yıldız)	Metro	20,0	272.204
	M8	Bostancı-Dudullu-Parseller	Metro	14,3	84.274
	M9	Ataköy-İkitelli (Bahariye-Olimpiyat)	Metro	17,2	77.674
	T1	Kabataş-Bağcılar	Tramvay	19,3	454.038
	T2	Taksim-Tünel	Nost. Tramvay	1,6	2.244
	T3	Kadıköy-Moda	Nost. Tramvay	2,6	4.627
	T4	Topkapı-Mescid-i Selam	Tramvay	15,3	225.985
	T5	Eminönü-Alibeyköy	Tramvay	10,1	120.249
	TF1	Maçka-Taşkışla	Teleferik	0,3	2.144
	TF2	Eyüp-Piyer Loti	Teleferik	0,4	6.662
	F1	Taksim-Kabataş	Füniküler	0,6	23.796
	F2	Tünel (Karaköy-Beyoğlu)	Füniküler	0,6	16.410
	F3	Seyrantepe-Vadistanbul	Füniküler	0,7	-
	F4	Boğaziçi Üni.-Hisarüstü-Aşiyan	Füniküler	0,8	10.173
UAB	M11	Gayrettepe-İstanbul Havalimanı (Kağıthane-İstanbul Havalimanı)	Metro	37,5	33.976
	T6	Sirkeci-Kazlıçeşme	Tramvay	8,3	18.805
	B1	Halkalı-Gebze (Marmaray)	Banliyö	76,6	734.553
	B2	Halkalı-Bahçeşehir	Banliyö	14,0	468



Şekil 2.13 Mevcut raylı sistem ağı

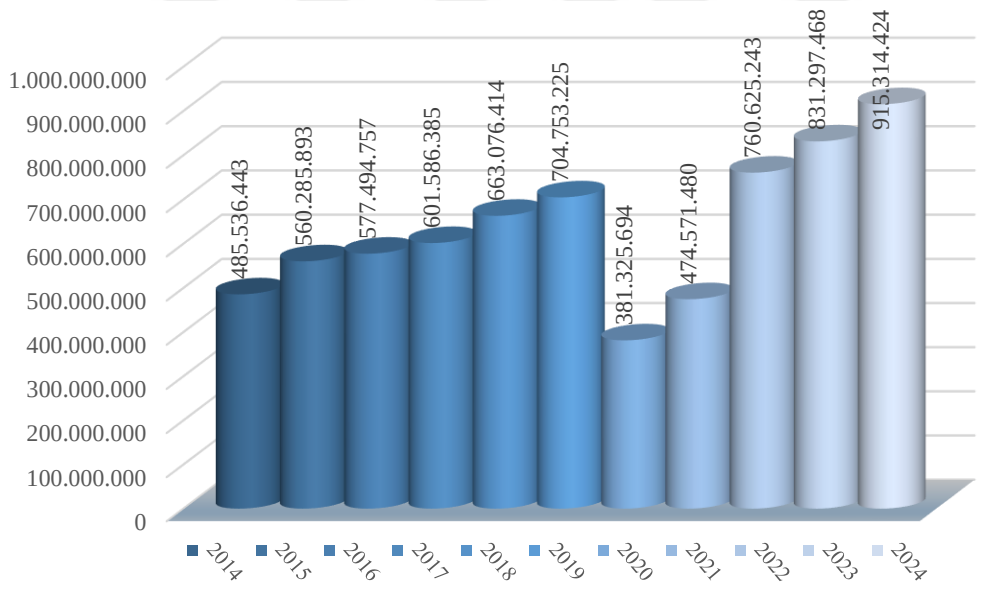


Şekil 2.14 İstanbul raylı sistem ağ haritası (Metro İstanbul, 2025a)

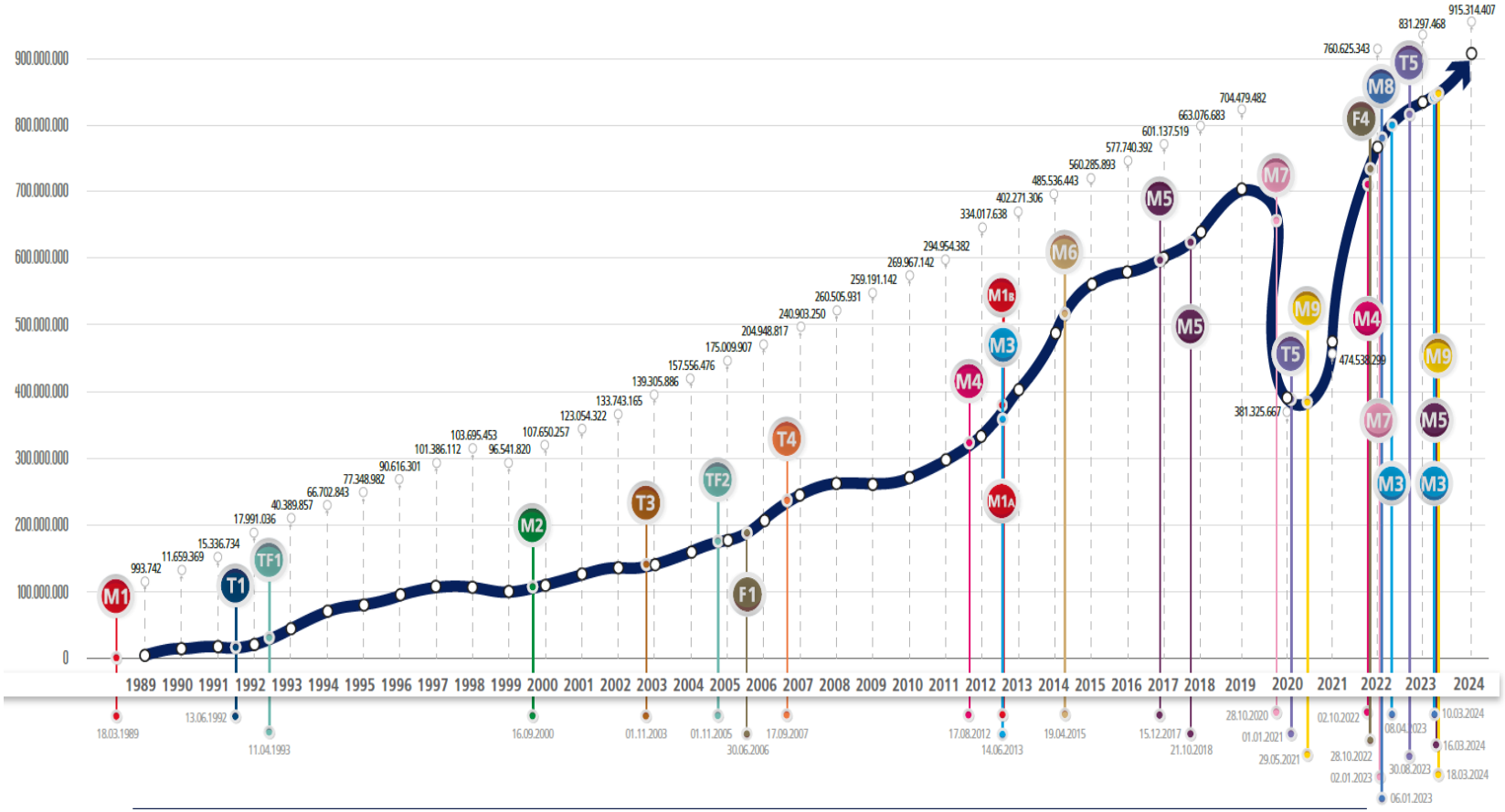
Mevcut sistemin operasyonel verileri incelendiğinde, günlük ortalama 4,1 milyon yolcu raylı sistemleri kullanmakta, bu da toplam toplu taşıma yolculuklarının

yaklaşık %36'sına karşılık gelmektedir (Metro İstanbul, 2024a) (Şekil 2.15). Kentin ana aksları diyebileceğimiz kuzey-güney aksında işleten M2 Yenikapı–Hacıosman, doğu-batı aksında işleyen M4 Kadıköy–Sabiha Gökçen Havalimanı, 2017'den itibaren hizmete giren ve kısa sürede yüksek yolcu sayısına ulaşan M5 Üsküdar–Çekmeköy ile M1A/B Yenikapı–Atatürk Havalimanı–Kirazlı hatları oluşturmakta; Marmaray ise kıtalar arası kesintisiz bir koridor işlevi görmektedir (İBB, 2025).

Yolcu talebindeki artış, sistemin genişleme hızını da tetiklemiştir. 2024 yılında M5 hattının Çekmeköy-Samandıra etabının ve M9 hattının Ataköy-İkitelli etabının hizmete açılmasıyla birlikte 2023 yılına göre %10,1 artış göstererek tüm hatlarda toplam 915 milyon yolcuya ulaşmıştır (Şekil 2.15, Şekil 2.16). Bu artışın önemli bir bölümü, Anadolu Yakası'nda hizmet veren ve yüksek nüfuslu Çekmeköy-Sancaktepe bölgesini Üsküdar ve Marmaray ile buluşturan M5 Hattı sayesinde gerçekleşmiştir. Bu artış, raylı sistemlerin kentte artan yolcu talebini karşılama kapasitesinin göstergesidir.



Şekil 2.15 2014 – 2024 yılları arası yıllık yolculuk değerleri değişimi (Metro İstanbul, 2024a)



Şekil 2.16 Yıllara göre genel toplam yolculuk sayıları (2024) (Metro İstanbul, 2024b)

İstanbul gibi mega kentlerde raylı sistemler sürdürülebilir ulaşımın temel bileşeni görevinde, yüksek kapasiteli toplu taşıma sistemleridir. Ayrıca enerji verimliliği, emisyon değerleri ve yolculuk güvenilirliği açısından karayolu temelli toplu taşıma modlarına (otobüs, minibüs) ve özel araç kullanımına kıyasla belirgin üstünlüklere sahiptir (Hayashi vd., 2011; Kenworthy, 2008; Vuchic, 2007). Bu üstünlük, öncelikle taşıma kapasitesindeki çarpıcı farkta kendini gösterir.

Ulaşım modlarının verimliliği incelendiğinde, raylı sistemlerin mekânsal kapasite avantajı çarpıcı verilerle ortaya çıkmaktadır. Uluslararası Toplu Taşıma Birliği (UITP) ve akademik araştırma verilerine göre, bir metro hattı saatte tek yöndeki taşıma kapasitesi 40.000-80.000 yolcu arasında değişmekte olup, gelişmiş kent örneklerinde ise ortalama 60.000 yolcu/saat/yön seviyesindedir. Buna karşılık, bu kapasite bir otobüs hattı için 8.000 ila 15.000 yolcu, özel araç şeridi için ise sadece 1.500 ila 2.500 araç (yaklaşık 3.000 yolcu) ile sınırlıdır (Cirit, 2014; Litman, 2023; Rodrigue, 2024; UITP, 2023; Vuchic, 2007). Bu veriler, aynı fiziksel koridorda raylı sistemin taşıma kapasitesinin karayoluna kıyasla 4 ila 10 kata kadar daha verimli olabildiğini göstermektedir. Nitekim, aynı yolcu hacmini (örneğin 70.000 yolcu/saat) karayolu ile taşıyabilmek için onlarca şeritli otoyola (20 şeritli bir otoyol) veya binlerce otobüs (2.000 adet otobüs) gerekeceği hesaplanmaktadır (Rodrigue, 2024; UITP, 2023; Volodin vd., 2020; Vuchic, 2007). Ayrıca, elektrikli altyapıları sayesinde raylı sistemlerin yolcu başına düşen enerji tüketimi otobüslere göre yaklaşık %40-%50 ve karbon emisyonu ise karayolu modlarına göre yaklaşık %70 ila %90 oranında daha düşüktür (Arıkan vd., 2024; Litman, 2023; Rodrigue, 2024; Smit ve Boulter, 2024). Bu göstergeler, raylı sistemlerin hem kapasite hem de çevresel performans açısından kentsel sürdürülebilirlik hedeflerine en uygun ulaşım türü olduğunu göstermektedir.

Raylı sistemlerin etkinliği, diğer ulaşım modlarıyla kurduğu entegrasyonla doğrudan ilişkilidir. İstanbul'da Yenikapı, Üsküdar, Kadıköy, Mecidiyeköy, İstanbul Havalimanı, Sabiha Gökçen Havalimanı gibi aktarma merkezleri; metro, tramvay, metrobüs, banliyö, otobüs ve denizyolu hatlarını bir araya getirerek çok modlu (multimodal) ulaşım sistemini mümkün kılmaktadır. Bu bütünleşik yapı, yolculuk sürelerini kısaltmakta, aktarma kolaylığı sağlamakta ve ulaşım ağının mekânsal verimliliğinin artırmasına katkı sağlamaktadır (Givoni ve Banister, 2010; İETT, 2014; Ilicali vd., 2014).

Tez kapsamında çalışma alanı olarak ele alınan Anadolu Yakası'nda bulunan M5 Üsküdar–Samandıra Metro Hattı, İstanbul'da tam otomatik (sürücüsüz) işletilen ilk metro hattı olması nedeniyle modern raylı sistem teknolojilerinin bir temsilcisidir. Anadolu Yakası'nın tarihi ve yoğun merkezini (Üsküdar) kuzeydeki hızla büyüyen yerleşim bölgelerine (Ümraniye, Çekmeköy, Sancaktepe) bağlamaktadır. 2024 yılında hattın Çekmeköy–Samandıra Merkez etabının açılmasıyla hattın toplam uzunluğu 26,5 km'ye ulaşmıştır. Hattın tamamının devreye alınmasıyla günlük ortalama 350.000 yolcu taşımakta olan M5 hattı, Marmaray ve diğer metro hatlarıyla bağlantı sağlayarak, Anadolu Yakası'nda çok modlu entegrasyonun merkezi konumundadır (Metro İstanbul, 2024a; Ozcelik, 2023). Hattın özellikle başlangıç noktası olan Üsküdar istasyonu, Marmaray, otobüs ve deniz yolu hatlarıyla güçlü bir multimodal aktarma merkezidir. Bu hat, Anadolu Yakası'nda en yüksek yolcu hacmine sahip iç hat olmasının yanı sıra, çok modlu ulaşım zincirlerinin kavşak noktasında yer alması nedeniyle, bu tez çalışmasında örnek alan olarak seçilmiştir. Bu özelliğiyle, güzergah planlama kriterlerinin raylı sistemlerin kentsel sürdürülebilirlik, erişilebilirlik ve sosyal bütünleşme üzerindeki etkilerini analiz etmek açısından örnek bir uygulama alanı oluşturmaktadır (Altuntaş ve Eyigün, 2021; Ozcelik, 2023).

2.3.1 İstanbul'da Raylı Sistem Kronolojisi

İstanbul'da kent içi raylı sistemlerin gelişimi, kentin büyüme dinamikleri, ulaşım politikalarındaki değişimlerle paralel ve teknolojik ilerlemelerle doğrudan bağlantılı ilerlemiştir. Şehrin raylı sistem tarihi, 1980'li yıllarda modern metro planlarının yeniden gündeme gelmesiyle yeni bir döneme girmiştir. Mevcut ağın ortaya çıkışı, karayolu odaklı ulaşımdan sürdürülebilir ve yüksek kapasiteli toplu taşımaya stratejik bir dönüşümün göstergesidir. Bu tarihsel gelişim, kabaca beş ana evrede ele alınabilir: erken dönem ve modern toplu ulaşımın başlangıcı (1871-1950), raylı sistemlerde kurumsal altyapının oluşumu ve ilk modern yatırımlar (1988-1999), metro ağının hızla genişlemesi (2000-2009), entegrasyon ve çok modlu sisteme geçiş (2010-2019) ile teknolojik dönüşüm ve kentsel yayılım (2020-günümüz).

İstanbul'da modern toplu ulaşımın temelleri, 19. yüzyıl sonlarında atılmıştır (Karakoç, 2015). 1871'de Azapkapı-Beşiktaş hattında hizmete giren atlı tramvay, kısa sürede kent içi taşımacılığın temelini oluşturmuştur (İETT, 2024a; Karakoç,

2015). 1875 yılında hizmete giren ve dünyanın en eski ikinci metrosu olan Tünel (F2 Karaköy-Beyoğlu) kentsel ulaşımda yeni bir dönemin başlangıcını temsil etmiştir. 20. Yüzyılın ilk yarısında elektrikli tramvaylar (1914) ve otobüs hatlarının (1926) eklenmesiyle sistem çeşitlenmiş, 1950'li yıllarda ise karayolu yatırımlarının öncelik kazanmasıyla toplu taşımayı gölgelemiştir (İETT, t.y., 2024a; Tekeli, 2010) . Bu dönemde artan kent nüfusu, özel araç kullanımının hızla yükselmesine yol açmış ve bu durum trafik sıkışıklığı, çevresel kirlilik ve enerji verimsizliği gibi sorunları beraberinde getirerek toplu taşımaya dönüş ihtiyacını güçlendirmiştir (Doğan ve Doğan, 2020; Karakoç, 2015; Ocak ve Manisalı, 2006).

İstanbul'un raylı sistem tarihindeki modern dönemi, kurumsal altyapının oluşturulmasıyla başlamıştır. 1988 yılında İBB tarafından İstanbul Ulaşım A.Ş.'nin (günümüzde Metro İstanbul A.Ş.) kurulması, sistemin planlanması, tek elden yönetilmesi adına başlangıcı oluşturmuştur. Bunu takiben, 1989 yılında açılan M1 (Yenikapı-Atatürk Havalimanı) hattının ilk etabı olan Aksaray–Otogar kesimi, kentin ilk hafif metro sistemi olarak hizmete girmiş, böylece kent ulaşımında karayolu dışı bir toplu taşıma alternatifi fiilen devreye girmiştir. 1990'lı yıllar boyunca, özellikle Tarihi Yarımada ve çevresindeki lastik tekerlekli araç baskısını hafifletmek amacıyla tramvay projeleri ön plana çıkmıştır. 1992'de T1 (Kabataş-Bağcılar) hattının Topkapı–Sirkeci etabı açılmış; 1993'te TF1 Maçka–Taşkışla Teleferik Hattı faaliyete geçmiştir. T1 hattı 1994 ve 1996 yıllarındaki uzatmalarla Zeytinburnu ve Eminönü'ne kadar genişletilerek kentin en yoğun yolcu koridorlarından biri haline gelmiştir.

2000'li yıllar, İstanbul ulaşımında modern metro ağının hızla genişleyerek "metroya geçiş" ve "entegrasyon" dönemi olarak nitelendirilebilir. 2000 yılında M2 (Yenikapı-Hacıosman) Metro Hattı'nın Taksim–4. Levent etabının hizmete girmesiyle kentin MİA (Merkezi İş Alanı) aksını yeraltından birbirine bağlayarak modern metro işletmeciliğinin miladını ve sistemin kuzey ekseninde genişlemesinin ilk adımını oluşturmuştur. Bu dönemde ağın kapsamı, M1 hattının 2002'de Atatürk Havalimanı'na ulaşmasıyla uluslararası bir boyut kazanarak hava ulaşımıyla entegre hale gelmiştir. Aynı dönemde T3 Kadıköy–Moda nostaljik tramvayı (2003) işletmeye alınmış; 2005 yılında TF2 Eyüp–Piyer Loti Teleferik Hattı hizmete başlamıştır. 2006'da T2 Zeytinburnu-Bağcılar Tramvay Hattı

hizmete girmiş, gene aynı yıl, F1 Taksim–Kabataş Füniküler Hattı (2006) Avrupa Yakası'nda önemli bir dikey bağlantı kurmuştur.

2007–2010 dönemi, raylı sistem ağının çevre ilçelere yayılmaya başladığı bir genişleme sürecini temsil etmektedir. T4 Topkapı–Mescid-i Selam Tramvay Hattı 2007'de hizmete girmiş, 2009'da M2 hattı kuzeyde Atatürk Oto Sanayi, güneyde Şişhane istasyonlarına kadar uzatılmıştır. 2010 yılında M2'ye Darüşşafaka ve Seyrantepe istasyonlarının eklenmesiyle hat 20 km uzunluğa ulaşmıştır. Bu dönemde raylı sistem ağı yalnızca hat uzunluğu açısından değil, erişim çeşitliliği bakımından da büyüme göstermiştir.

2010'lu yıllara gelindiğinde ise raylı sistemler teknolojik ilerleme ve Anadolu Yakası'na taşınarak coğrafi genişleme açısından bir kırılma dönemi olmuştur. 2012 yılında hizmete giren 22 km uzunluğundaki M4 (Kadıköy-Tavşantepe) hattı, Anadolu Yakası'nın ilk yeraltı metrosu olma özelliğini taşımaktadır. Bu dönem ayrıca, M2 hattının kademeli olarak Hacıosman'a ve Yenikapı'ya uzatılması, füniküler (F1) ve teleferik hatlarının eklenmesiyle sistemin teknolojik çeşitliliğinin arttığı evresidir. 2013 yılında tamamlanan Marmaray (B1) hattı kentin doğu-batı eksenindeki kopukluğu gidererek kıtalararası kesintisiz ulaşım dönemini başlatmıştır. Aynı yıl M3 (Kirazlı-Olimpiyat) hattı ve M1B Yenikapı–Kirazlı bağlantısı hizmete açılmıştır. 2014'te Yenikapı Aktarma Merkezi açılarak M1A, M1B ve M2 hatları Marmaray ile entegre edilmiştir. 2015'te M6 Levent–Boğaziçi Üniversitesi/Hisarüstü hattı, kısa mesafeli ama stratejik bir üniversite bağlantısı olarak işletmeye alınmıştır.

2015 sonrası dönem, teknolojik dönüşüm ve ağın kentsel çeperlere yayılması ile kapasite ve erişim açısından karakterize edilebilir. 2016'da M4 hattı Tavşantepe'ye uzatılmıştır. 2017 yılında İstanbul'un ve Türkiye'nin ilk tam otomatik sürücüsüz metrosu olan M5 (Üsküdar-Çekmeköy) hattının ilk etabı (Üsküdar-Yamanevler) hizmete girmiştir. Bu hat, 2018'de Çekmeköy'e, 2024'te ise Samandıra Merkez'e kadar uzatılarak Üsküdar, Ümraniye ve Çekmeköy ilçelerini birbirine bağlayan Anadolu Yakası'nın stratejik doğu-batı koridorundan biri haline gelmiştir. 2019 yılında aynı zamanda 6 metro hattında (M1A-M1B-M2-M4-M5-M6) "Gece Metrosu" gibi uygulamalarının da başlatılmasıyla İstanbul, dünyada hafta sonları 24 saat metro işletmesi yapan sayılı şehirlerin arasına girmiştir.

2020’li yıllar, sürücüsüz metro teknolojilerinin yaygınlaşması, yeni hatların devreye girmesi ve mevcut sistemlerin entegrasyonunun güçlenmesiyle karakterizedir. Avrupa Yakası’nda 2020’de açılan sürücüsüz M7 (Mecidiyeköy-Mahmutbey) hattı ve 2021’de T5 (Eminönü-Alibeyköy) tramvayı, M9 Ataköy–Olimpiyat hattının ilk etabı, 2022’de F4 (Boğaziçi Üni. Hisarüstü-Aşiyan) füniküleri ve M4 hattının Sabiha Gökçen Havalimanı uzatması tamamlanarak hizmete açılmıştır. Anadolu Yakası’nda 2022’de hizmete giren M8 (Bostancı-Dudullu) hattı, kuzey-güney aksındaki dikey bağlantıları güçlendirmiştir. 2024 yılı, ağın yeni uzatmalarla hızla genişlediği yıllardan biri olmuştur. Aynı yıl, M3 hattı Bakırköy Sahil uzatması, M9 hattı Ataköy-İkitelli kesimi ve M5 hattı Samandıra etabı ardı ardına hizmete açılarak sistemin toplam uzunluğu ve yolcu kapasitesi rekor seviyeye ulaşmıştır. 2025 yılı itibarıyla da M3 hattına eklenen Yıldıztepe istasyonu ile ağın kılcal erişimi daha da artırılmıştır.

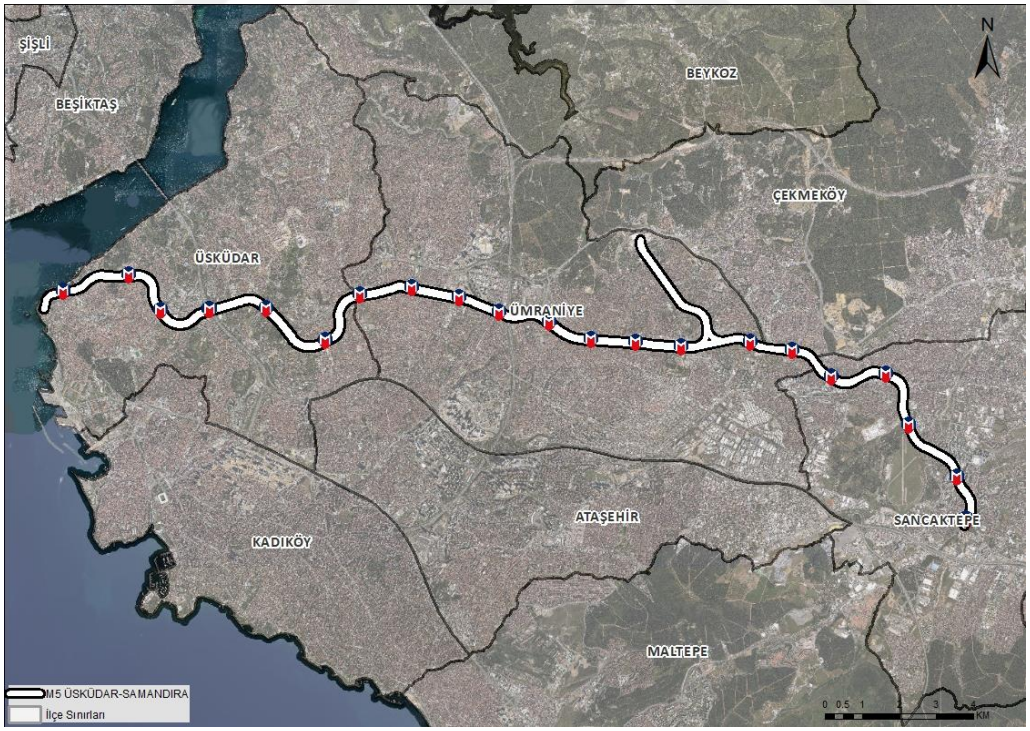
Bu sürekli genişleme, İstanbul’un ulaşım sorunlarına yönelik çözüm arayışında raylı sistemleri merkeze alan politik bir iradeyi yansıtmaktadır. Bu kronolojik süreç, İstanbul’da raylı sistemin yalnızca fiziksel bir altyapı yatırımı değil, aynı zamanda kent ölçeğinde sürdürülebilir ulaşım politikasının temel unsuru haline geldiğini göstermektedir (Basrawi ve Şenbil, 2025; Givoni ve Banister, 2010; Özer ve Kocaman, 2008).

3
MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde çalışma bölgesi, kullanılan veri seti, uygunluk haritası için oluşturulan hiyerarşi yapısı, AHP – CBS entegrasyon modelinin uygulanması için teknik veriler ile uzman görüşlerinin toplanması ve değerlendirilmesi kısımları açıklanmıştır.

3.1 Çalışma Alanı: M5 Üsküdar – Samandıra Metro Hattı

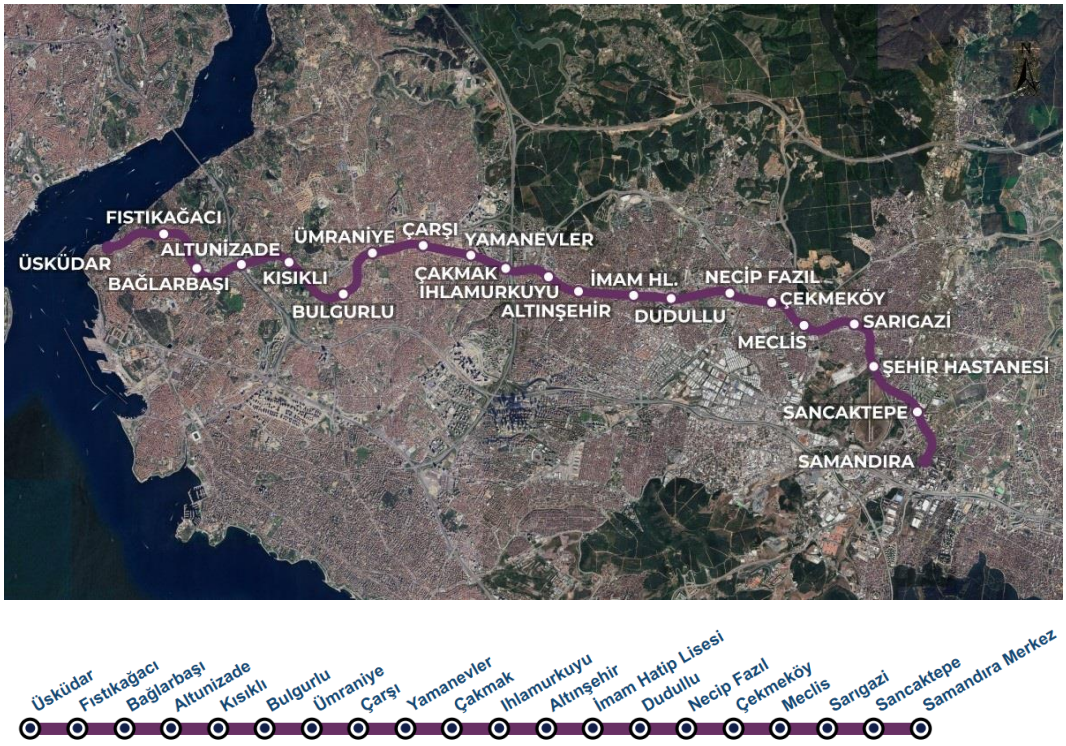
Bu tez çalışması, İstanbul'un Anadolu Yakası'nda hizmet veren ve kentin önemli raylı sistem yatırımlarından biri olan M5 Üsküdar–Samandıra Metro Hattı olarak belirlenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı

M5 Üsküdar–Samandıra (Çekmeköy–Sancaktepe) Metro Hattı, İstanbul'un Anadolu Yakası'nda hizmet veren ikinci metro hattıdır. Anadolu Yakası'nda doğu–batı yönünde uzanarak kentsel ulaşım ağının stratejik bir arterini oluşturmaktadır.

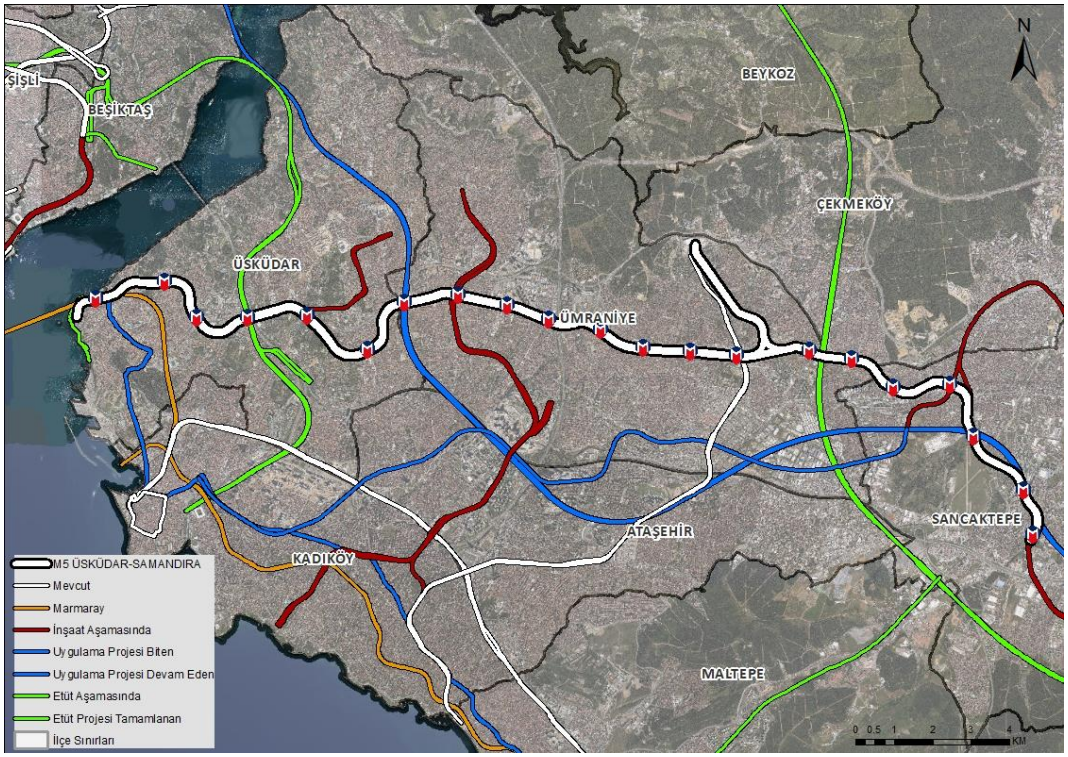
Aynı zamanda İstanbul ve Türkiye'nin ilk tam otomatik sürücüsüz (GoA4 sinyalizasyon sistemi) metro hattı olması nedeniyle operasyonel güvenilirliği ve verimliliği en yüksek hatlardan biridir (Metro İstanbul, 2025b). Hat, İstanbul'un merkezi konumundaki Üsküdar ilçesinden başlayarak Ümraniye, Çekmeköy ve Sancaktepe ilçelerinden geçmekte ve toplam uzunluğu yaklaşık 26,5 km olup, toplam 20 istasyondan oluşmakta ve tamamı yer altı tünel sisteminden meydana gelmektedir. Temel istasyonları arasında Üsküdar, Altunizade, Bulgurlu, Ümraniye, Çarşı, Yamanevler, Çakmak, Ihlamurkuyu ve Samandıra Merkez bulunmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı istasyonları

Hattın ilk etabı 2017 yılında Üsküdar-Yamanevler bölümüyle hizmete açılmış, ikinci etabı olan Yamanevler–Çekmeköy kesimi 2018 yılında işletmeye açılmıştır. Son olarak hattın Çekmeköy–Sancaktepe–Samandıra etabı, 2024 yılı itibarıyla hizmete açılarak kentin merkezini doğu çeperindeki yerleşimlerle bağlamıştır (İBB, 2025; Metro İstanbul, 2025b). İBB'nin raylı sistemleri için ileriye dönük belirlediği stratejik plan doğrultusunda, hattın kapasitesini ve erişim alanını artırmaya yönelik planlar mevcuttur. Bu kapsamda, hattın Sultanbeyli yönüne uzatılması için inşaat çalışmaları devam etmekte olup, Kurtköy bölgesine genişletilmesi için proje geliştirme çalışmaları aktif olarak sürdürülmektedir. Söz konusu bu genişleme

etapları tamamlandığında, Anadolu Yakası'nın kuzey bölgelerindeki yerleşim alanları, doğu-batı yönünde Üsküdar ilçesi ile daha güçlü erişim ağına sahip olacak; kuzey-güney ekseninde yer alan dikey yeni hatların entegrasyonu sayesinde Avrupa Yakası'na bağlanmanın yanı sıra kıyı bölgelerine, Marmaray, metrobüs hizmetleri ve deniz yollarına erişimi kolaylaştıracak alternatif ulaşım yöntemlerine bağlantı sağlayacaktır (Şekil 3.3).



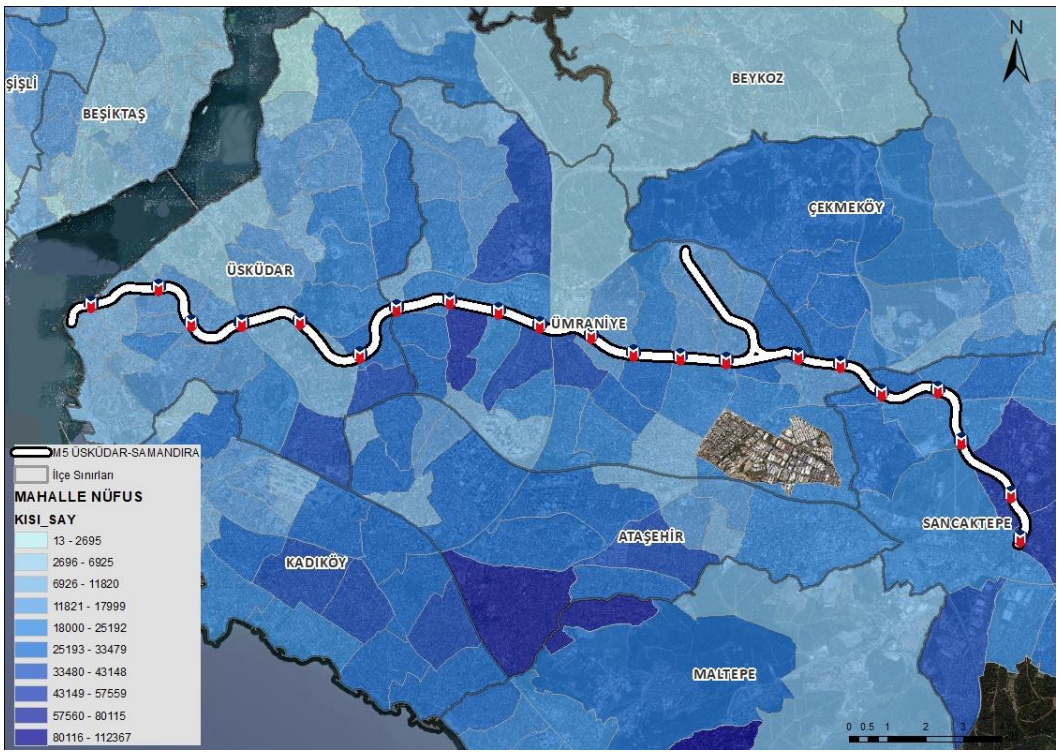
Şekil 3.3 M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı – Anadolu Yakası raylı sistem hatları

M5 hattı, güzergahı boyunca Üsküdar, Ümraniye, Çekmeköy ve Sancaktepe ilçelerini birbirine bağlayarak bu bölgelerdeki kentsel ulaşım erişilebilirliğini önemli ölçüde iyileştirmiştir (Şekil 3.3). Bu ilçeler, demografik yoğunluk (Şekil 3.4) ve arazi kullanım yoğunluğu açısından önemli farklılıklar gösterir:

- Üsküdar: Marmara kıyısında yer alan, yoğun tarihi dokuda kültürel merkezlerinden biri ve yoğun konut ile ticaret alanları bulunan yüksek nüfus hareketliliğine sahip bir aktarma merkezidir.
- Ümraniye: Son yıllarda hızla büyüyen, nüfus yoğunluğu artan, yüksek ticari aktivite ve yoğun konut alanlarının bulunduğu bir geçiş noktasıdır.

- Çekmeköy ve Sancaktepe: Kentsel dönüşümün hızla yaşandığı, kentsel yayılmanın yeni odak noktaları haline gelmiş, yeni konut alanlarının ve düşük yoğunluklu yapılaşmanın hâkim olduğu bölgelerdir (İPA, 2023).

Güzergâh boyunca nüfus yoğunluğu Çekmeköy'de km²'de 2.000 kişi civarından Üsküdar'da 22.000 kişinin üzerine çıkan, geniş bir aralıkta değişmekte ve oldukça heterojen bir yoğunluk profili olduğu görülmekte, bu da hattın yolcu potansiyelini ortaya koymaktadır (Nüfusu, 2024).

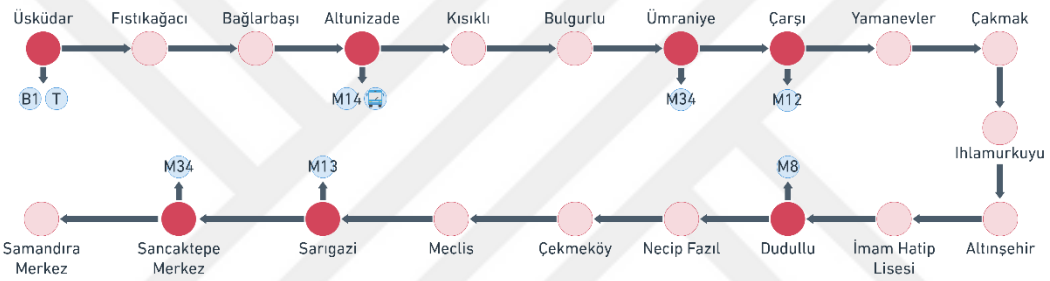


Şekil 3.4 M5 hattı boyunca nüfus yoğunluğu haritası

Hat, Üsküdar İstasyonu'ndan Marmaray (şehirlerarası ve uluslararası raylı sistem bağlantısı) ve denizyolu hatlarına doğrudan bağlantı kurarak, Anadolu Yakası'nın doğu ucunda yaşayan büyük bir nüfusun hızlı, kesintisiz ve entegre bir şekilde Avrupa Yakası'na ve diğer ana merkezlere ulaşımını sağlamaktadır. Bu bütünleşik rolü, M5 hattını, karayolu bağımlılığını azaltma ve kentte sürdürülebilir ulaşım politikalarını güçlendirme hedefleri için vazgeçilmez bir referans noktası yapmaktadır (Şekil 3.3).

Hattın diğer ulaşım araçları ile bağlantısı, 7 aktarma istasyonuyla birlikte mevcutta 3, planlanan veya inşaat aşamasındaki hatlarla birlikte ise toplamda 10 farklı hat ile entegrasyonu bulunmaktadır (Şekil 3.5).

- Üsküdar İstasyonu'nda Üsküdar-Harem Tramvay Hattı, Üsküdar-Kadıköy-Maltepe Tramvay Hattı ve Marmaray hattı ile,
- Altunizade İstasyonu'nda M14 Altunizade-Çamlıca Metro Hattı ve Metrobüs hattı ile,
- Ümraniye ve Sancaktepe İstasyonlarında HIZRAY hattı ile,
- Çarşı İstasyonu'nda M12 Göztepe-Ümraniye-Kazım Karabekir Metro Hattı ile,
- Dudullu İstasyonu'nda M8 Bostancı-Dudullu-Parseller Metro Hattı ile,
- Sarıgazi İstasyonu'nda M13 Yenidoğan-Söğütlüçeşme Metro Hattı ile aktarma yapılabilecektir.



Şekil 3.5 M5 hattı istasyonları ve aktarmalar

M5 hattı, teknik olarak Türkiye'nin ilk tam otomatik GoA4 sinyalizasyon sistemi ile işletilmekte sürücüsüz metro modunda faaliyet göstermektedir. Hat üzerinde 80 km/saat azami hız ve pik saatte 250 saniye sefer sıklığı bulunmakta olup ortalama işletme hızı 38 km/sa'dir. İstasyonlar arası ortalama mesafe 1 km, hattın uçtan uca yolculuk süresi ortalama 43 dk. civarındadır. (Metro İstanbul, 2025b) (Tablo 3.1). Yer altı tünel altyapısı ve enerji geri kazanımlı frenleme sistemleri gibi özellikleriyle hat, İstanbul'da sürdürülebilir kentsel ulaşımın modern bir örneğini teşkil etmektedir. Hatta kullanılan rejeneratif frenleme sistemi, işletme sürecinde elektrik enerjisinin yaklaşık %20'sini geri kazandırmaktadır (Gok vd., 2024; İşçan vd., 2022; Metro İstanbul, 2023). SCADA tabanlı kontrol altyapısı, otomatik tren işletimi (ATO), tren koruma (ATP) ve denetim sistemleri (ATS) gibi ileri seviye sinyalizasyon teknolojileri, operasyonel güvenilirliği artırmakta ve bakım maliyetlerinde tasarruf sağlamaktadır (Kaymakçi vd., 2023). Hattın tam yeraltı tünel sistemi ile inşa edilmiş olması, hem yüzey trafiği üzerindeki baskıyı azaltmakta hem de çevresel etkileri minimize etmektedir. Ayrıca, metro, Marmaray

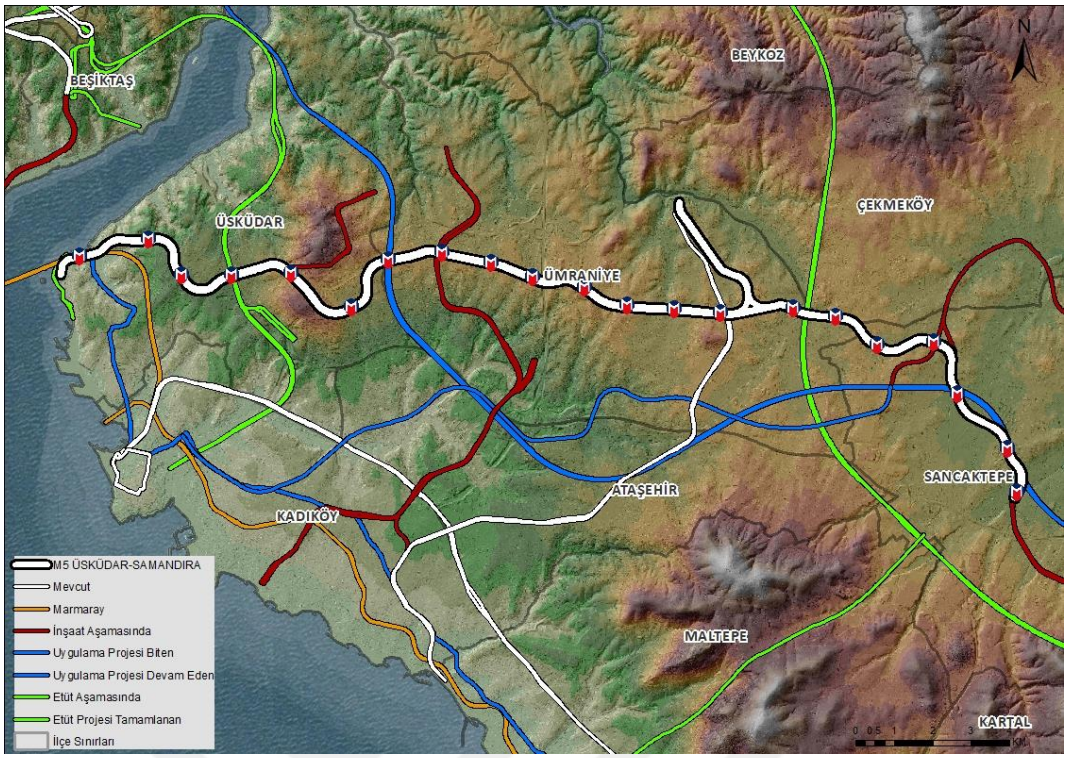
ve diğer ulaşım sistemleriyle entegre yapısı sayesinde çok modlu ulaşım ağının önemli bir bileşeni ve kıtalararası ulaşım ağının önemli bir bağlantı noktası görevini üstlenmektedir.

Tablo 3.1 M5 metro hattı teknik özellikleri (İBB, 2025; Metro İstanbul, 2025b)

Parametre	**Değer**	**Açıklama**
Hat Uzunluğu	26,5 km	Yer altı ve yer üstü bölümleri
İstasyon Sayısı	20	Tamamı engelli erişimine uygun
Sefer Süresi	43 dk.	Tek yön seyahat süresi
Günlük Yolcu Kapasitesi	376.797 kişi/gün	Tek yön taşıma kapasitesi (2024 yılı)
Azami Hız	80 km/saat	Ticari işletme hızı
Tren Aralığı	250 saniye	Yoğun saatlerde
Sefer Sayısı	520	Tek yönde günlük sefer sayısı
Araç Sayısı	126 adet	6'lı tren işletmesine uygun
İşletme Saatleri	06:00-24:00	Haftanın 7 günü aktif

Coğrafi olarak hat, Marmara Denizi kıyısındaki düşük rakımlı Üsküdar bölgesinden başlayarak, doğuya doğru ortalama +194 metre kot farkına ulaştığı bölgelerden geçerek Kısıklı-Bulgurlu istasyonları arası yer yer yükselen ve alçalan bir topografyada ilerlemektedir. En düşük nokta -17m ile Üsküdar İstasyonu, en yüksek nokta ise +137m ile Ihlamurkuyu İstasyonu seviyesindedir (Şekil 3.6). Hattın maksimum eğimi %4,1 olup, bu diğer metro tünelleri için kabul edilebilir sınır içerisindedir (BS EN 13803:2017, 2017).

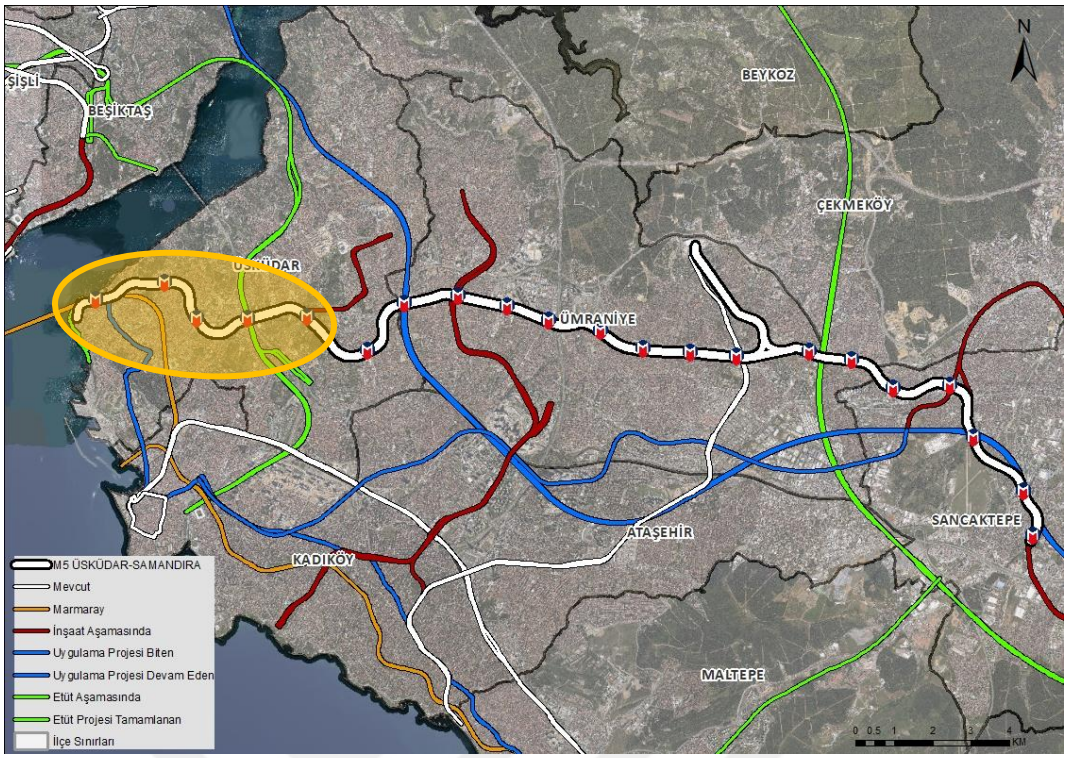
Jeolojik olarak hat, Kurtköy Formasyonu (Arkozik kumtaşı ve konglomera), Aydos Formasyonu (Kuvars arenit, kuvarsit), Gözdağ Formasyonu (Şeyl, kumtaşı ve killi kireçtaşı), Dolayoba Formasyonu (kireçtaşı, şeyl) ve Tuzla Formasyonu (Yumrulu kireçtaşı) birimlerinden oluşan farklı jeolojik tabakalar üzerinden geçerek inşa edilmiştir. Bu durum, kazı aşamalarında farklı tünel açma yöntemlerinin kullanılmasını gerektirmiştir. Bu durum, hat güzergâhında hem tünel derinlikleri hem de istasyon konumlarının eğim, jeolojik yapı ve zemin koşulları açısından mühendislik planlamasında belirleyici unsurlardan olmuştur.



Şekil 3.6 İstanbul kabartma haritası – M5 hattı

Hattın sahip olduğu kentsel çeşitlilik, mekânsal karmaşıklık ve çoklu ulaşım entegrasyonu gibi özellikleri araştırma açısından analitik değer taşıyan nitelikler sunmaktadır.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen analizlerin uygulama alanı, hattın tamamı yerine ilk beş istasyonunu kapsayan Üsküdar–Kısıklı kesimi üzerinde odaklanmıştır (Şekil 3.7). Bu kesim, hattın en yoğun yolcu trafiğine sahip aynı zamanda topoğrafik ve yapısal olarak en karmaşık bölümüdür. Bu koridor, tarihi doku, yüksek ticari, konut yoğunluğu ve sınırlı açık alanlar ile dar sokak ağı gibi planlama kısıtlarının bir arada görüldüğü karma arazi kullanımı ve yüksek kot farkları, kamulaştırma riski ve altyapı çakışmalarının üst düzeyde yaşandığı bir kentsel çevre ile karakterizedir. Eğim oranları bazı bölgelerde %3,5'in üzerine çıkmaktadır. Bu özellikler, raylı sistem güzergâh planlamasında çevresel, sosyo-ekonomik ve teknik faktörlerin etkileşimde olduğu eşzamanlı olarak değerlendirilmesi gereken karmaşık bir yapıyı ortaya koymakta olup örnek bir vaka çalışması sunmaktadır.



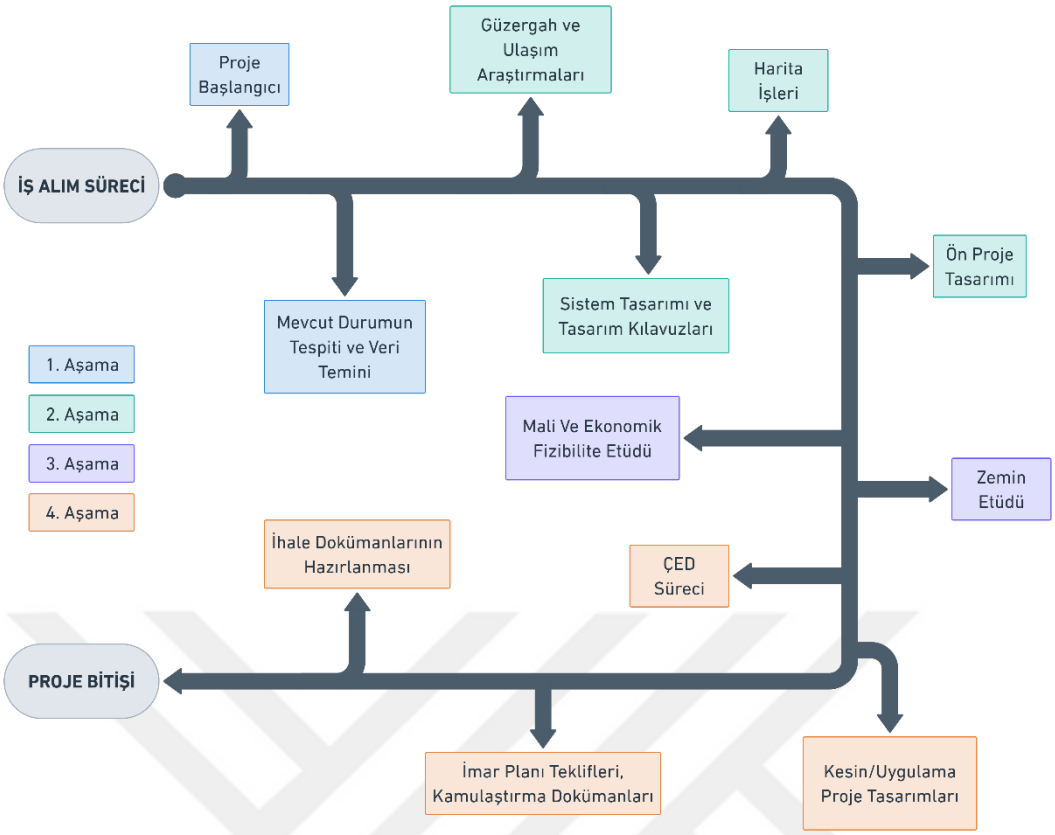
Şekil 3.7 M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı çalışma alanı

Araştırma kapsamında, Üsküdar, Fıstıkağacı, Bağlarbaşı, Altunizade ve Kısıklı istasyonlarını kapsayan güzergâh üzerinde, AHP ile tanımlanan kriterlerin CBS tabanlı mekansal analiz yöntemiyle entegrasyonunu temel almış; planlama aşamasındaki önerilen güzergah ile uygulama aşamasındaki nihai güzergah arasındaki uygunluk ve sapmaları incelemiştir. Tarihi kısıtların, yüksek kamulaştırma maliyetlerinin ve zorlu topoğrafyanın birleştiği bu alanda, bir güzergâhın teorik olarak en uygun yerden geçmesi ile uygulamada inşa edilebilir olması arasındaki gerilimin en net gözlemlendiği yerdir.

Bu kapsamda, oluşturulan AHP-CBS tabanlı uygunluk haritası (Şekil 4.10) üzerinden güzergâh seçim kararlarının planlama kriterleriyle ne ölçüde örtüştüğü, hangi çevresel ve teknik faktörlerin değişikliğe neden olduğu analiz edilmiştir. Bu seçim, planlama sürecindeki idari, teknik veya mali kısıtların rotayı nasıl şekillendirdiğini nicel olarak analiz etmeye olanak tanımaktadır. Böylece model, raylı sistem güzergah planlamasında AHP–CBS entegrasyonunun karar vericilere veriye dayalı, tekrarlanabilir ve ölçülebilir bir değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır.

3.2 Raylı Sistem Güzergâh Projesinin Planlama ve Tasarım Aşamaları

Kentsel raylı sistem projeleri, yüksek maliyetleri, uzun yapım süreleri ve kentsel doku üzerindeki geri dönülmez etkileri nedeniyle, titizlikle yönetilmesi gereken, doğrusal ve çok disiplinli bir planlama sürecini gerektirir. Bu projeler, tekrarlı ve birbiriyle yakından entegre çok sayıda aşamadan oluşur. Bu süreç, stratejik kararların alındığı ön planlamadan başlayıp, işletmeye almaya kadar uzanan karmaşık bir iş akışını kapsamaktadır. M5 Üsküdar-Samandıra Metro Hattı gibi karmaşık bir altyapı projesinin hayata geçirilmesi de Şekil 3.8'de şematize edilen genel iş akışını takip eden, birbirini besleyen ardışık aşamalardan oluşmuştur. Bu çalışmanın odak noktası, aşağıda şematik olarak özetlenen ve geleneksel bir raylı sistem projesinin ana aşamalarını gösteren sürecin, "Mevcut Durumun Tespiti ve Veri Temini" ile "Proje Tasarımı" aşamalarına doğrudan katkı sağlamaktadır. Geliştirilen AHP-CBS tabanlı uygunluk analizi, geleneksel proje döngüsünün özellikle "Güzergâh Araştırması, Alternatiflerin Değerlendirilmesi ve Optimal Koridorun Seçimi" aşamasına entegre edilerek, karar vericilere sayısal ve mekânsal bir altlık sunan bir karar destek aracı olarak konumlandırılmıştır. Projenin genel iş akışı, temel olarak aşağıdaki aşamaları içerir.



Şekil 3.8 Projenin genel iş akışı aşamaları

Bu projelerde planlama ve tasarım süreci; ulaşım talebinin doğru analiz edilmesi, teknik ve çevresel koşulların değerlendirilmesi ve mühendislik çözümlerinin kentsel bağlamla uyumlu biçimde geliştirilmesi üzerine kuruludur. (Papa ve Bertolini, 2015).

Raylı sistem güzergah planlaması, literatürde genellikle dört ana aşamada ele alınmaktadır: (1) Mevcut Durum Analizi ve Veri Temini, (2) Güzergah Araştırmaları, Alternatiflerin Değerlendirilmesi ve Ön Tasarım, (3) Detaylı Proje Analizi, (4) Kesin/Uygulama Proje Tasarımı ve İhale Dokümanlarının Hazırlanması (Vuchic, 2007). M5 hattının planlama süreci de bu çerçevede ilerlemiştir.

Projenin başlangıç aşamasında birincil odak noktası olarak güzergah ve sistem seçimine altlık oluşturacak, ulaşım talebi, arazi kullanımı, demografik yapı, mevcut toplu taşıma hatları ve altyapı ağları vb. veriler toplanarak bütüncül olarak analiz edilir. Bu tez çalışması kapsamında, M5 hattının çalışma alanı olarak seçilmesinde bu aşamada yapılan ön değerlendirmeler ve yoğun yolcu talebi, mevcut ulaşım ağı gibi teknik zorluklar etkili olmuştur. Bu kapsamlı veri seti, Üsküdar'dan

Samandıra'ya uzanan koridor içinde birden fazla teknik olarak mümkün güzergah alternatifinin tanımlanmasını sağlamıştır. Dolayısıyla bu aşama, tezin veri setini ve kapsamını belirleyen temel girdiyi oluşturmuştur.

İkinci aşama, toplanan veriler ışığında alternatif güzergâhların detaylı olarak değerlendirildiği, ön tasarımın ve optimal güzergahın belirlendiği iteratif süreçtir. Karar vericiler için erişilebilirlik, maliyet, çevresel etki, mühendislik uygunluğu ve arazi yapısı gibi birbiriyle çelişen değişkenler arasındaki denge bu aşamada kurulur. M5 gibi çok bileşenli bir projede, hat uzunluğu, eğim, istasyon yerleri, diğer hatlarla entegrasyon, yatırım maliyeti, zemin koşulları ve tarihi doku gibi onlarca faktörün aynı anda ve tutarlı bir şekilde dikkate alınması gerekmektedir. AHP gibi çok kriterli karar verme yöntemleri, tüm değişkenler arasındaki dengeyi kurmak için kullanılır. AHP yöntemi, karar kriterlerinin önem derecelerini uzman görüşleri ve mühendislik verileriyle ağırlıklandırarak, alternatif güzergâhların sayısal olarak karşılaştırılmasını mümkün kılmıştır (Kriswardhana vd., 2025; Saaty, 1990).

Üçüncü aşamada, ön proje tasarımı yapılır. Alternatifler arasından seçilen güzergâhın teknik olarak uygulanabilirliği test edilir. Bu aşamada güzergâh için zemin etütleri, jeoteknik analizler, tünel derinlikleri, istasyon konumları, hat geçişleri, eğim limitleri, inşa edilebilirlik ve maliyet analizleri gibi teknik detaylarla şekillendirilir. Aynı anda değerlendirilmesi gereken harita, inşaat, mimari, elektrik, mekanik, sinyalizasyon ve elektromekanik sistemler gibi ilgili tüm disiplinlerin mühendislik analizleri, karşılaştırılarak teknik fizibilite test edilir. M5 hattının tam otomatik işletmeye uygun olarak tasarlanması gibi kararlar bu aşamada netlik kazanmıştır. Ayrıca, güzergâhın Üsküdar–Kısıklı arasındaki kesimi zemin koşulları ve kentsel yoğunluk bakımından en karmaşık bölüm olduğu için bu aşama, planlama sürecinin en kritik noktalarından birini oluşturmuştur.

Dördüncü ve son aşama olan nihai proje ve uygulama tasarımı aşamasında, teknik detaylar kesinleştirilir ve uygulamaya esas mühendislik çizimleri oluşturulur. Ayrıca, bu aşama çevresel etki değerlendirmesi (ÇED), imar planı değişiklikleri, kamulaştırma süreçleri, gibi değerlendirmelerle desteklenir.

Güzergah mühendisliğinin temel öğelerinden biri, raylı sistem hattı için optimum güzergahın ve istasyon yerlerinin belirlenmesidir. Güzergah alternatifleri ve olası istasyon konumları belirlenirken ve değerlendirilirken İdare talepleri, İdare ile

yapılan toplantılar, "İstanbul Metropoliten Alanı Entegre Kentsel Ulaşım Planı" raporu, gerçekleştirilen saha gezileri ve proje kapsamında elde edilen veriler göz önünde bulundurularak yapılır. Dolayısıyla güzergâh planlamasında karar süreci yalnızca mühendislik parametreleriyle değil, aynı zamanda kentsel doku ve erişilebilirlik dinamikleriyle de ilişkilidir. Bu nedenle, hattın geçtiği bölgelerdeki nüfus yoğunluğu, arazi kullanımı ve diğer toplu taşıma sistemleriyle entegrasyon unsurları da analiz sürecine dahil edilmiştir (Tablo 3.2). Ayrıca yapılan çalışmalarda, mevcut, inşaat aşamasında ya da proje aşamasında olan metro hatları ile etkileşimler dikkate alınır. Nihai güzergah, belirlenen istasyonların bulundukları konuma en iyi derecede hizmet edebileceği şekilde elde edilir. Ayrıca kamulaştırma durumları ve güzergaha ait teknik özellikler de (kurb, tünel ve istasyon derinliği, hat uzunluğu vb.) nihai güzergahın belirlenmesi sürecinde önemli faktörler oluşturur.

- Güzergah koridorunun yakın çevresi arazi kullanım özellikleri,
- İmar planları,
- Merkezler arasında bağlantı oluşturması,
- Ulaşım ana planı,
- Yolculuk talepleri,
- Diğer toplu taşıma sistemleri ile entegrasyon sağlanması,
- Mevcut ve proje aşamasında olan demiryolu hatları ile entegrasyon,
- Zemin özellikleri, ve
- Maliyet

Güzergah alternatiflerinin ve olası istasyon konumlarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi esnasında şu verilerden yararlanılır;

- Topografik ve kadastral veriler, jeolojik ön çalışma
- Mülkiyet ve imar durumu bilgileri,
- Mevcut altyapı hatları,
- Bölgede yapılması planlanan yatırımlar.
- Zemin, arkeoloji ve tarihsel çalışma,
- İstanbul Ulaşım Masterplan'ında amaçlanan ulaşım bağlantıları ve yolcu talebi çalışmaları,
- Planlanan yollar, kavşaklar,

- Mevcut, proje aşamasında olan ya da planlanan demiryolu hatları,

İstasyon konumları ve güzergah alternatifleri birbiriyle karşılaştırılırken şu faktörler göz önünde bulundurulmuştur;

- İstasyonun hizmet etmesi istenen bölgeler,
- Kamulaştırma veya tahsis durumları, yıkım işleri
- Altyapı tesisleri
- Trafik düzenleme durumları,
- İstasyon derinliği,
- İstasyonun inşaa edilebilirliği
- Geotektik ve Jeolojik faktörler,
- Hattın maliyeti ve uzunluğu,
- Hattın diğer metro hatlarıyla etkileşimi.
- Arkeolojik ve tarihi alanlara mesafesi
- Arazi mülkiyet durumu, kullanım yapısı
- Yolculuk Süresi,
- Maksimum düşey eğim
- Hattın mühendislik açısından zorlukları / inşa edilebilirlik,
- Bölgedeki yapılar, yapı stoğu mevcut durumu ve kalitesi
- Hattın diğer raylı sistemlere ve toplu taşıma sistemlerine etkisi,
- Sürdürülebilirlik (Çevresel / Ekonomik / Sosyal Etki),

Hat tasarımı planlaması genel hatlarıyla aşağıdaki alt başlıklar altında ele alınır:

- Ulaşım Kalitesi; bir konumun merkezlere bağlantısından kaynaklanan insan çekme potansiyeli,
- Kamu algısı; ulaşım ağının imajının modern ve kullanıcı dostu olarak algılanmasını sağlaması,
- Yapım; gelecekteki potansiyel ihtiyaçları karşılamak için raylı sistem ağ uzantılarına veya diğer ulaşım türleriyle bağlantılara uygun esneklikte,
- Operasyonel; güvenli tren işletmeciliği, işletme esnasında sürdürülebilir esneklikte ve sistem işlemleri için yeterli esneklikte.

Tablo 3.2 Raylı sistem güzergah tasarım kriterleri

Kriter	**Koşullar**
Bölgesel Kriter	Arazi kullanımı
	Nüfus
	Erişebilirlik
Fonksiyonel Kriter	İstasyonlar arasındaki ortalama uzaklıklar
	İstasyonların ortalama derinlikleri
	İstasyon ve yolcu konforu
	Toplam uzunluk
	Yolcuların hattaki konforu
	Simülasyon sonuçları (yolculuk zamanı)
	Simülasyon sonuçları (her bir aracın km başına elektrik tüketimi)
	Güzergah özellikleri (min. yatay yarıçap, maks. eğim)
Finansal Kriter	Yatırım maliyetleri
Çevresel Kriter	İşletme esnasında gürültü ve kirlilik
	İşletme esnasında yerel kirlilik
Turizm ve Kültür Kriteri	Kültürel ve turistik ihtiyaçlara cevap vermesi
Sosyal Kriter	Nüfus değişimlerindeki istemsiz etkiler
	İşin yürütülmesi sırasında, yerel halk ve işletmeler üzerindeki etkisi
Riskler	Geoteknik riskler
	Topografik riskler
	İşlerin yürütülmesi sırasında nesneler (araçlar, köprüler, alt geçitler ve binalar) üzerindeki etkiler

Raylı sistem güzergâh projelerinin planlama ve tasarım süreci, klasik mühendislik yaklaşımlarını aşarak veri temelli, katılımcı ve çok kriterli bir karar verme çerçevesine evrilmiştir. Bu çalışmada kullanılan AHP–CBS tabanlı analiz yaklaşımı da bu dönüşümün bir örneği olarak, planlama sürecinin bilimsel temellere dayalı biçimde yeniden değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Bu metodolojik yaklaşım, klasik mühendislik projelendirmesinden farklı olarak karar sürecine nicel, şeffaf ve tekrarlanabilir bir yapı kazandırmıştır. AHP–CBS entegrasyonu, yalnızca bu tezdeki uygulama alanı için değil, gelecekteki raylı sistem projeleri için de karar destek aracı niteliği taşımaktadır.

3.3 Araştırma Modeli ve Kurgusu

Bu çalışmanın araştırma modeli, Bölüm 3.2'de tanımlanan raylı sistem planlama sürecinin, özellikle "Güzergah Araştırmaları, Alternatiflerin Değerlendirilmesi ve Optimal Koridorun Seçimi" aşamasında karşılaşılan çok kriterli ve mekânsal karmaşıklığı çözmeye yönelik kurgulanmıştır. Araştırmanın modeli, AHP ve CBS metodolojilerinin sıralı entegrasyonuna dayanmaktadır. Kent içi raylı sistem güzergâh planlamasındaki karar alma süreçlerinin şeffaflığını ve rasyonelliğini artırmak amacıyla hibrit bir araştırma modeli benimsemiştir. Geleneksel güzergâh belirleme yaklaşımları, çok sayıda ve birbiriyle çatışan kriteri (çevresel kısıtlar, sosyo-ekonomik fayda, teknik fizibilite) eş zamanlı ve objektif bir biçimde değerlendirmede yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, çalışmanın kurgusu, hem kriterlerin önem düzeyindeki sübjektifliği yönetmeyi hem de sonuçların mekânsal etkilerini yüksek çözünürlükte analiz etmeyi hedeflemektedir (Malczewski, 2006).

Araştırmanın kavramsal çerçevesi, M5 metro hattının Üsküdar-Kısıklı kesiminde, proje aşamasında öngörülen güzergâhı ile uygulama aşamasında gerçekleşen güzergâhı arasındaki uyum düzeyinin AHP-CBS entegrasyonu ile değerlendirilmesini oluşturmaktadır. Bu kapsamda, söz konusu güzergâh değişikliğinin; teknik, çevresel, ekonomik ve sosyal kriterler açısından ne ölçüde optimize edildiği araştırılmaktadır.

AHP-CBS entegrasyonu, ulaşım planlamasında karar sürecini hem nicel hem de mekânsal olarak doğrulayan bütüncül bir analiz yaklaşımı sunar (Brunner vd., 2011; Farooq vd., 2018).

Araştırma modelinin genel işleyişi ve aşamaları Şekil 3.9'daki akış şemasında özetlenmekte olup model, veri toplama, kriter belirleme, ağırlıklandırma, mekânsal analiz ve uygunluk değerlendirmesi olmak üzere dört temel aşamadan oluşmaktadır:

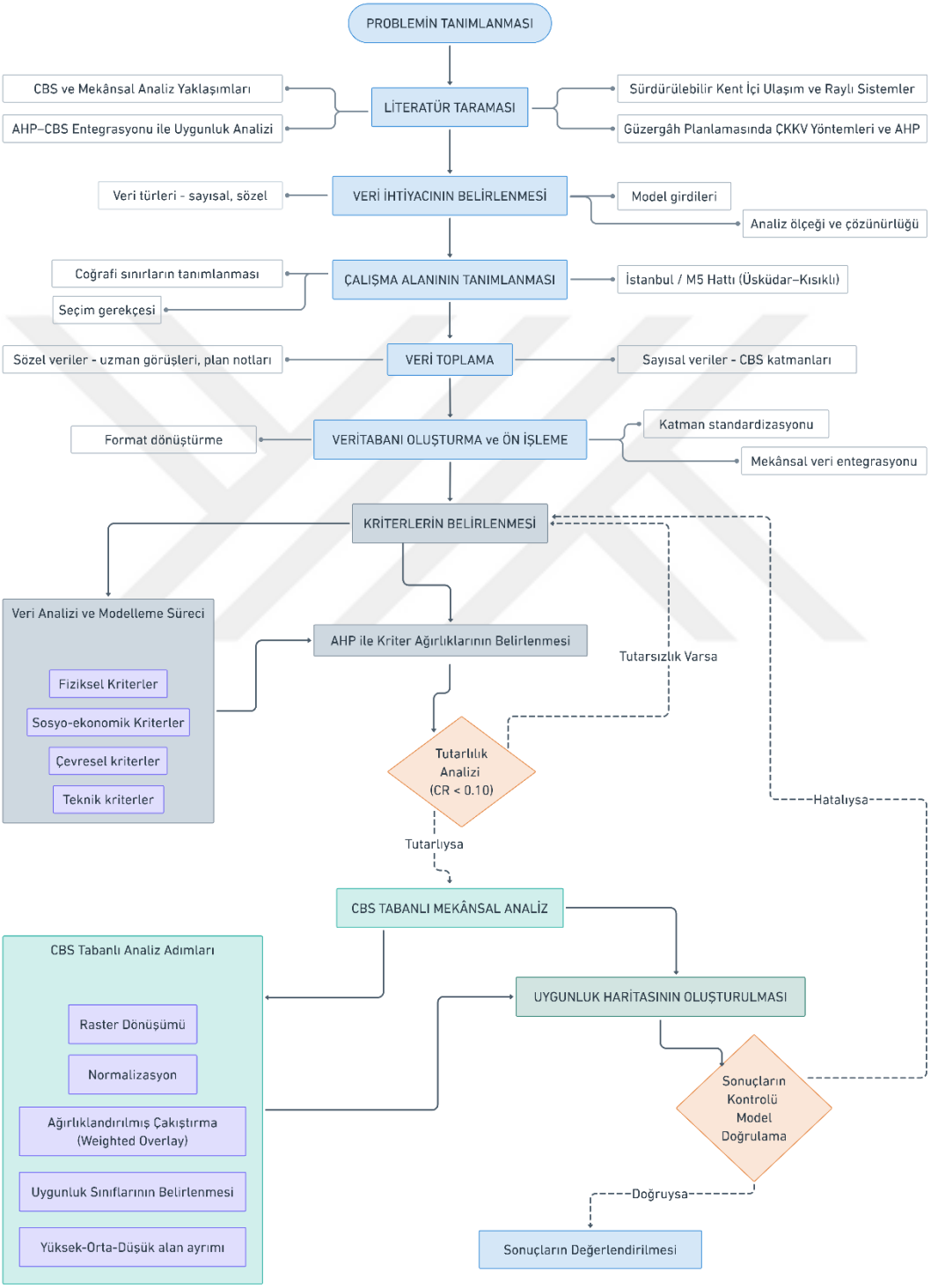
- Veri Toplama, Ön İşleme ve Kriterlerin Belirlenmesi: Raylı sistem güzergâh planlamasında etkili olan teknik-mühendislik, arazi-çevresel, ulaşım-entegrasyon, sosyal-demografik faktörler, ekonomik, operasyon-hizmet kalitesi ve kentsel planlama-gelecek projeksiyonu unsurlarını içeren tematik veriler toplanmıştır. Kapsamlı literatür taraması ve sektörde

deneyimli uzman görüşleri doğrultusunda ilk etapta geniş bir kriter havuzu oluşturularak, yedi ana kriter ve atmış altı alt kriter belirlenmiştir. Veriye erişilebilirlik, CBS'de temsil edilebilirlik ve analiz edilebilirlik ilkeleri göz önünde bulundurularak bir optimizasyon sürecinden geçirilen bu havuz, nihai olarak yedi ana kriter ve on dokuz alt kriterden oluşan nihai kriter setine indirgenmiştir.

- AHP ile Kriter Ağırlıklandırması: Belirlenen kriterler AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır (Saaty, 2008). Bu aşamada, ikili karşılaştırmalar yoluyla kriterlerin göreli önem dereceleri matematiksel olarak hesaplanmış ve tutarlılık analizi ile modelin güvenilirliği test edilmiştir. Bu işlemler sonucunda elde edilen ağırlıklar, mekânsal analizde kullanılmak üzere CBS ortamına aktarılacak sayısal parametreleri oluşturmuştur.
- CBS Tabanlı Veri Entegrasyonu ve Mekânsal Uygunluk Analizi: AHP ile ağırlıklandırılan kriterlere ilişkin mekânsal veriler CBS ortamında sayısal katmanlar halinde işlenmiş ve normalize edilmiştir. Her bir kriter için raster tabanlı veri katmanları oluşturulmuş; uygunluk sınıfları yeniden sınıflandırılmıştır.
- AHP ile hesaplanan ağırlıklar, ağırlıklı örtüşüm yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda mekânsal uygunluk haritası üretilmiştir. Çalışma alanındaki her bir nokta için 1 (en düşük) ile 9 (en yüksek) arasında değişen bir nihai uygunluk puanı hesaplanmıştır. Bu harita, çalışma alanındaki her bir hücrenin raylı sistem güzergâhı için uygunluk değerini göstermektedir.
- Model Doğrulama ve Karşılaştırma: Geliştirilen uygunluk haritası, planlama aşamasında tasarlanan hat güzergâhı ile karşılaştırılarak, modelin mekânsal doğruluğu analiz edilmiştir. Bu karşılaştırma, AHP–CBS entegrasyonunun planlama aşamasında alınan kararlarını öngörme ve doğrulama yeteneği değerlendirilecektir.

Bu bütünleşik metodoloji, araştırmanın kurgusunu ardışık ve sistematik bir yapıya oturtmaktadır. Modelin kurgusu, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak yalnızca kriter ağırlıklarının belirlenmesiyle sınırlı kalmayıp, planlama ve

uygulama arasındaki uyumun mekânsal olarak ölçülmesini de içermektedir. Böylece model hem karar destek sistemi hem de doğrulama aracı işlevi görmektedir.



Şekil 3.9 Araştırma süreci ve yöntem akış şeması

3.4 Veri Seti

Bu çalışmada, M5 Metro Hattı güzergahının Üsküdar–Kısıklı kesiminin uygunluk analizine yönelik geliştirilen model, nicel ve nitel veri türlerini bir arada kullanan kapsamlı bir veri setine dayanmaktadır. Veri seti, CBS tabanlı mekânsal analiz sürecine uygun olarak yapılandırılmış ve tüm veriler, AHP yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıklarıyla entegre edilerek çok kriterli karar verme yaklaşımı kapsamında çeşitli tematik veri katmanlarının entegrasyonuna dayanarak değerlendirilmiştir.

Veri seçimi süreci, araştırma modelinde tanımlanan kapsam doğrultusunda, raylı sistem güzergâh planlamasında ulusal ve uluslararası literatürde kabul görmüş teknik standartlar, aynı zamanda sektördeki deneyimli uzmanlar ve aynı şekilde literatürde sıklıkla kullanılan kriterlerin taranması ve İstanbul ölçeğinde temin edilebilir verilerin analize uygunluklarının değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Veri setinin oluşturulmasında temel ilke, analitik anlam taşıyan, mekânsal olarak temsil edilebilir ve sayısal formata dönüştürülebilir kriterlerin seçilmesi olmuştur. Bu kapsamda, raylı sistem güzergâhlarını etkileyen faktörler teknik, çevresel, sosyo-demografik, ulaşım, ekonomik, operasyonel ve kentsel planlama olmak üzere yedi ana grupta toplanmış; her biri altında yer alan kriterler uzman görüşleri ve literatür desteğiyle belirlenmiştir. Kabul görmüş 66 farklı alt kriter tespit edilmiştir (Tablo 3.3).

Modeli oluşturan bu kriter grupları şunlardır:

- Teknik ve Mühendislik Faktörleri: Hattın inşasını doğrudan etkileyen eğim, hat uzunluğu ve işletme hızı verileri.
- Arazi ve Çevresel Faktörler: Koruma alanları (arkeolojik/doğal), jeolojik yapı (zemin) ve doğal afet riskleri.
- Sosyal ve Demografik Faktörler: Nüfus yoğunluğu ve kentsel donatılara (konut, eğitim, sağlık) erişim mesafeleri.
- Ulaşım ve Entegrasyon: Diğer toplu taşıma modları (Metrobüs, Marmaray, Denizyolu) ile bağlantı ve istasyon erişilebilirliği.
- Ekonomik Faktörler: Yapım maliyetleri, işletme giderleri ve kamulaştırma gereksinimleri.

- Operasyon ve Hizmet Kalitesi: Sistemin işletme performansı, yolcu taşıma kapasitesi, sefer sıklığı ve konfor parametreleri.
- Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu: Mevcut imar durumu, plan kararları ve kentsel gelişim bölgeleri.

Çalışmada, literatürde yer alan benzer çok kriterli ulaşım modellemelerinden farklı olarak, yalnızca CBS analizine uygun olduğu düşünülen veri katmanları seçilmiş ve veri işleme sürecinin kapsamlı hale gelmemesi amacıyla 66 alt kriterden 19'u değerlendirmeye alınmıştır. Böylece analiz hem mekânsal olarak anlamlandırılma potansiyeli yüksek olan faktörlere odaklanılmasını hem de hesaplama etkinliği açısından dengeli bir yapıya kavuşturulmuştur. Bu 19 Alt Kriter, çalışmanın AHP modeline girdi sağlamıştır. AHP'nin temel dayanağı olan veriler, belirlenen kriter setinin ikili karşılaştırma matrisleri üzerinden değerlendirilmiştir. AHP analizleri sonucunda, tüm kriterlerin ağırlık değerleri belirlenmiş ve modelin tutarlılık oranı kontrol edilmiştir. Her ana kriter, alt kriterlerle detaylandırılmış ve Tablo 3.3'te gösterildiği şekilde tanımlanmıştır.

Tablo 3.3 Metro hattı kriter değerlendirme listesi

Ana Kriterler	**Alt Kriterler**	
Teknik ve Mühendislik	• Hat uzunluğu	• İşletme hızı
	• Yatay kurp adetleri	• Konfor /Güvenlik
	• Düşey kurp adetleri	• İstasyon derinliği
	• Hattın eğim durumu	• Sinyalizasyon sistemi
	• Hattın uzayabilme ihtimali	• Titreşim ve gürültü seviyeleri
Arazi ve Çevresel Faktörler	• Doğal alanlara yakınlık	• Kıyı şeridine erişim
	• Açık ve yeşil alanlara erişim	• Zemin sıvılaşma riski
	• Mevcut altyapı ile çakışma durumu	• Kirletici (SO2 ve PM10) konsantrasyon değerleri
	• Su kaynaklarına etkisi (Hidrolojik faktörler)	• Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları
	• Jeolojik faktörler	• Doğal afet riski
	• Yükselti haritaları	• Bakı haritaları
	• CO2 salınım-emisyon azalımı	• Eğim haritası
	• Heyelan riski	
Sosyal ve Demografik Faktörler	• Nüfus yoğunluğu	• Alışveriş merkezleri ve ticari alanlara yakınlık
	• Trafik analiz bölgeleri TAB nüfus yoğunluğu verisi	• Sosyal ve spor tesislerine yakınlık

Tablo 3.3 Metro hattı kriter değerlendirme listesi (devamı)

Ana Kriterler	Alt Kriterler	
Sosyal ve Demografik Faktörler	• Konut alanlarına yakınlık	• Sanayi-ticaret alanlarına yakınlık
	• Kamu kurumlarına yakınlık	• Eğitim, yurt alanlarına yakınlık
	• Sağlık birimlerine yakınlık	
Ulaşım ve Entegrasyon	• Toplu Taşıma Entegrasyonu	• Mevcut ve Planlanan Raylı Sistemlerle Entegrasyon
	• Kavşaklara uzaklık	• Açık/kapalı otoparklara yakınlık
	• Park & Ride olanakları	• Karayolu trafik yoğunluğu
	• Havaalanı, Terminal ve Gar Yapılarına Yakınlık	• Yaya ve bisiklet yolları ile entegrasyon
Ekonomik Faktörler	• Yatırım maliyeti	• Kamulaştırma ihtiyacı
	• Hattın yapım maliyeti	• Gayrimenkul değerlendirme
	• İşletme maliyeti	• Enerji tüketimi
	• Araç maliyeti	• Finansman modeli
	• Bakım maliyeti	•
Operasyon ve Hizmet Kalitesi	• Sefer sıklığı	• İstasyon tipi
	• Ortalama yolculuk süresi	• İstasyonlar arası mesafe
	• Yolcu talebi çalışmaları (günlük yolculuk sayısı)	• İstasyon toplam adedi
	• Yolcu taşıma kapasitesi	• Peron boyu
	• Vagon sayısı	
Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	• İmar planı	• Ulaşım Ana Planına uygunluk
	• Kentsel gelişim bölgeleri	• Önemli projelerle etkileşim
	• Gelecek nüfus projeksiyonları	• Gelecek projeksiyonunda nüfus yoğunluğunun artacağı öngörülen alanlara yakınlık

3.4.1 Veri Türleri ve Temini

Kullanılan veriler; sayısal, sözel ve plan bazlı olmak üzere üç grupta sınıflandırılmıştır:

- Sayısal veriler, coğrafi bilgi sistemlerinde doğrudan kullanılabilen SHP, DWG, CAD veya raster formatındaki veri katmanlarını içermektedir. Bu kapsamda Metro İstanbul, İBB CBS Portalı ve MTA gibi kurumlardan alınan veriler kullanılmıştır.

- Sözel veriler, tablo veya metin formatında olup, örneğin, TÜİK verileri, fizibilite raporları, işletme verileri, istasyon kapasite değerleri, CBS analizine dâhil edilmeden önce sayısal forma dönüştürülmüştür.
- Plan temelli veriler, 1/1000 ölçekli Uygulama İmar Planı gibi kurumsal dokümanlardan elde edilmiştir. Bu veriler, plan kararlarına uygunluk analizinde kullanılmıştır.

AHP ağırlıklarını CBS ortamına aktarmadan önce uygulanan veri işleme ve standartlaştırma sürecidir. Tüm veriler WGS 84 / TUREF TM30 koordinat sistemine dönüştürülmüş, mekânsal bütünlük sağlanmıştır. Verilerin farklı ölçeklerde ve formatlarda olması nedeniyle ön işleme aşamasında yeniden sınıflandırma, topoloji kontrolü ve öznitelik standartlaştırması yapılmıştır.

3.4.2 Kriterlerin Mekânsal Temsili ve CBS Entegrasyonu

CBS tabanlı mekânsal uygunluk haritasının üretimi için, AHP'de belirlenen on dokuz alt kriterin her birine karşılık gelen mekânsal veri katmanları kullanılmıştır. Veri katmanlarının her biri, analiz sürecinde kullanılmak üzere vektör veya raster formata dönüştürülmüştür. Nokta (örneğin istasyon, durak, kamu kurumu), çizgi (örneğin mevcut hat, karayolu, altyapı) ve poligon (örneğin imar alanı, jeolojik bölge, yeşil alan) tipindeki katmanlar için farklı mekânsal işlemler uygulanmıştır.

CBS ortamında gerçekleştirilen başlıca dönüşüm işlemleri şunlardır:

- Yakınlık analizleri – belirli tesislere veya alanlara mesafe temelli uygunluk hesaplaması,
- Yeniden sınıflandırma – kriterlerin 1–9 arasında uygunluk değerlerine dönüştürülmesi,
- Raster dönüşümü – tüm katmanların tek çözünürlükte raster yapısına çevrilmesi,
- Ağırlıklı çakıştırma – AHP ağırlıkları ile kriter katmanlarının birleştirilmesi.

Bu işlemler sonucunda, farklı veri türlerinden elde edilen kriter katmanları analiz için ortak mekânsal ve sayısal ölçeğe getirilmiştir.

Aşağıdaki tabloda, çalışma için gerekli veri türleri, kaynak kurumlar, veri formatları özetlenmiştir.

Tablo 3.4 Analizde kullanılan kriterlerin veri türleri, kaynakları

Veri Tipi	Veri Türü (Örnek)	Veri Formatı	Veri Kaynağı Kurumları
Noktasal Veriler	Duraklar, İstasyonlar, Sosyal Tesisler, Kamu Kurumları vs.	Point (Nokta) (SHP)	İETT, İBB Ulaşım Haritaları, İBB Kent Bilgi Sistemi (İstanbul Arazi Kullanım Haritaları)
Çizgisel Veriler	Güzergâh Hatları, Karayolu Ağları, Kıyı Hattı, Fay Hatları	Line (Çizgi) (CAD, SHP)	Plan-Profil DWG dosyaları, MTA, Zemin Raporları, İBB Açık Veri Portalı, Harita Genel Müdürlüğü (Fay Hatları)
Alansal Veriler	Arazi Kullanımı, Korunan Alanlar, Jeolojik Paftalar, Bölgesel Sınırlar, Kamu Kurumları, Ticari Alanlar vs.	Polygon (Alan) (SHP)	İBB Kent Bilgi Sistemi (İstanbul Arazi Kullanım Haritaları), Zemin Raporları, MTA, İBB İmar Planları, İBB Açık Veri Portalı
Çoklu Çizgisel Veriler	Mevcut Altyapı Hatları (Su, Elektrik, Doğalgaz vb.), Metro Ağları	Polyline (Çoklu Çizgi) (SHP)	İBB Altyapı Haritaları, İSKİ, BEDAŞ, İGDAŞ, İBB Raylı Sistemler Haritası
Tablo Verileri	Proje Özellikleri, Yatırım/Bakım Maliyeti, Yolcu Talebi, Sefer Sıklığı, Bölgesel istatistik, İşletme Giderleri	Tabular (Excel/CSV)	Proje Fizibilitesi, Ulaşım Raporları, Metro İstanbul Veri Raporları, İBB Finans Raporları, TÜİK, İBB Açık Veri Portalı

Aşağıdaki tabloda, çalışmada kullanılan ana ve alt kriterler, veri türleri, kaynak kurumlar, veri formatları ve uygulanan CBS analiz yöntemleri özetlenmiştir (Şekil 3.10).

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Veri Türü	Veri Kaynağı	Veri Formatı	CBS Analiz Yöntemi
Teknik ve Mühendislik Faktörleri	Hat uzunluğu	Güzergah hattı	Plan-Profil DWG dosyası	Line (CAD, SHP)	Güzergah uzunluğu ölçümü + sınıf ataması (field calculator + classify)
	Hattın eğim durumu	Güzergah hattı	Plan-Profil DWG dosyası	Line (CAD, SHP)	Eğim bilgisinin "field calculator" ile atanması.
	İşletme hızı	Proje özellik tablosu	Fizibilite / İşletme raporu	Tabular (XLS, CSV)	Hız verisi tablodan manuel atanır.
Arazi ve Çevresel Faktörler	Arkeolojik ve tarihi koruma alanları	Korunan alan sınırları	İBB CBS Servisleri	Polygon (SHP)	Buffer alanları → Rasterize → Reclassify
	Jeolojik faktörler (litolojik yapıya uygunluk)	Litoloji paftası / jeolojik harita	İBB zemin etütleri, MTA	Polygon (SHP)	Litoloji verisi → Reclassify (vektör-zemin ilişkisi) Attribute Reclass → Raster
	Doğal afet riski (fay hatları, sel, heyelan vb.)	Fay hatları / risk alanları	MTA, İBB CBS Servisleri	Polygon / Line (SHP)	Merge → Buffer zonları → Rasterize → Reclassify
	Mevcut altyapı ile çakışma durumu	Altyapı hatları	İSKİ, BEDAŞ, İGDAŞ, İBB altyapı haritaları vb.	Polyline (SHP)	Intersect (Intersect / Near / Overlap) → Sayısallaştırma → Rasterize → Reclassify
Sosyal ve Demografik Faktörler	Nüfus yoğunluğu	Bölgesel istatistik (TAB, mahalle, ilçe)	TÜİK, İstanbul ulaşım etütleri, İBB açık veri portalı	Tabular (CSV)	Attribute Join → Normalize → Reclassify
	Konut alanlarına yakınlık	Fonksiyonel arazi kullanımı	İBB arazi kullanım haritası	Polygon (SHP)	Buffer alanları → Rasterize → Reclassify
	Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	Kamu kurumları (okul, hastane, yurt)	İBB arazi kullanım haritası, İBB kent bilgi sistemi	Point / Polygon (SHP)	Buffer alanları → Rasterize → Reclassify
	Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	Ticari alanlar (AVM, sosyal tesisler)	İBB arazi kullanım haritası, İBB kent bilgi sistemi	Point / Polygon (SHP)	Buffer alanları → Rasterize → Reclassify
Ulaşım ve Entegrasyon	Toplu taşıma entegrasyonu (Otobüs, minibüs, taksi durakları, havalimanı, terminal, gar yapıları)	Duraklar, istasyonlar vs.	İETT, İBB ulaşım hharitaları, İBB kent bilgi sistemi (İstanbul arazi kullanım haritaları)	Point / Line (SHP)	Buffer alanları → Rasterize → Reclassify
	Mevcut ve planlanan raylı sistemlerle entegrasyon	Metro hattı ağı	İBB raylı sistemler haritası	Polyline (SHP)	Buffer alanları → Rasterize → Reclassify
Ekonomik Faktörler	Yatırım maliyeti (Yapım, araç)	Proje fizibilite raporu	Proje fizibilite raporları, İBB Ulaşım Daire Başkanlığı, İBB finans raporları, Metro İstanbul finansal verileri	Tabular (XLS, PDF)	Güzergah uzunluğu + maliyet katsayısı manuel raster atama.
	İşletme ve bakım maliyetleri	Proje fizibilite raporu (işletme giderleri/km)	Metro İstanbul işletme fizibilite faaliyet raporları,	Tabular (XLS, PDF)	Alan bazlı raster atama (kategori bazında).
Operasyon ve Hizmet Kalitesi	Sefer sıklığı	Metro sefer planı verisi	Metro İstanbul, proje teknik verileri	Tabular (XLS)	Raster değer atama.
	Yolcu talebi ve taşıma kapasitesi	Günlük yolcu sayısı, saatlik kapasite verisi	Ulaşım etüt raporları, Metro İstanbul teknik raporları	Tabular (XLS, PDF)	Raster değer atama.
Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	İmar durumu	Planlama verisi	İBB Nazım ve Uygulama Planları	Polygon (CAD/SHP)	Plan uyumu derecesine göre rastere değer atama. Reclassify from attribute
	Kentsel gelişim bölgeleri	Strateji planı / dönüşüm master planı	İstanbul Çevre Düzeni Planı, İBB Stratejik Plan, İBB Kentsel Dönüşüm Master Planı	Polygon (SHP)	Gelişim bölgelerine yakınlığa göre raster değer atama. Reclassify → Raster

Şekil 3.10 Analizde kullanılan kriterlerin veri türleri, kaynakları ve CBS işlem adımları

3.5 Metodoloji

Bu bölümde, M5 raylı sistem hattının Üsküdar-Kısıklı kesimi için güzergâh uygunluk analiz modelinin teknik uygulama adımları detaylandırılmıştır. Metodoloji, nicel kriter ağırlıklarını belirleyerek AHP ile bu ağırlıkları mekânsal analize yansıtmak için CBS tekniklerinin sıralı ve bütünleşik kullanımına dayanmaktadır.

Modelin temel amacı, M5 Üsküdar–Kısıklı metro hattı güzergâhının mekânsal uygunluk düzeyini değerlendirmek ve planlama aşamasında öngörülen güzergâhla uygulamada inşa edilen hat arasındaki farklılıkları analitik biçimde ortaya koymaktır.

3.5.1 Proje Kriterlerinin AHP ile Ağırlıklandırılması

Bu çalışmada AHP, kriterlerin göreli önem derecelerini belirlemek ve CBS analizine ağırlık değerleri sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu tezin ilk metodolojik adımı, kriterlerin önem düzeylerini matematiksel bir kesinliğe ulaştırmaktır.

3.5.1.1 Kriter Hiyerarşisinin Oluşturulması

Güzergah tasarımı planlamasına yönelik kriterler, ulusal ve uluslararası standartlar, literatür taraması, İstanbul Ulaşım Ana Planı ve benzer metro projelerinin teknik şartnameleri incelenerek oluşturulmuştur. Bu süreçte, raylı sistem güzergâhını etkileyen başlangıçtaki geniş kriter setinden, veriye erişim güvenilirliği ve standardizasyonu, CBS analizi için mekânsal olarak uygunluk, kriterler arasındaki anlamlı çakışmaların minimize edilmesi ilkeleri göz önünde bulundurulmuş ve nihai değerlendirmede Tablo 3.5'te listelenen hiyerarşik yapı (Amaç →Ana Kriterler → Alt Kriterler), AHP uygulaması için temel çerçeveyi oluşturmuştur.

Tablo 3.5 Analizde kullanılan Ana/Alt kriterler ve kriter sınıfları

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Alt Kriter Sınıfları
Teknik ve Mühendislik Faktörleri	Hat uzunluğu	0-5 km
		5-10 km
		10-20 km
		20-30 km
		30 + km
	Hattın eğim durumu	0-3 %
		3-6 %
		> 6 %
	İşletme hızı	<40 km/sa.
		40-60 km/sa.
		60 + km/sa.
Arazi ve Çevresel Faktörler	Arkeolojik ve tarihi koruma alanları	Alan içinde
		0-100 m
		100-250 m
		Alan dışında
	Jeolojik faktörler	Sağlam Kaya-düşük risk
		Orta Sertlikte Zemin-orta risk
		Yumuşak Zemin-yüksek risk
	Doğal afet riski	0-50 m (yüksek riskli alan)
		50-100 m (orta riskli alan)
		>100 m (afet riski düşük alan)
	Mevcut altyapı ile çakışma durumu	Çakışma yok / minimum (ideal) (0–1 altyapı hattı → Düşük çakışma)
		Orta düzeyde çakışma (2–3 → Orta çakışma)
		Yoğun çakışma (kritik) (4+ → Yüksek çakışma)
Sosyal ve Demografik Faktörler	Nüfus yoğunluğu	<10000 kişi/km2
		10000-15000 kişi/km2
		15000-18000 kişi/km2
		18000-20000 kişi/km2
		>20000 kişi/km2
	Konut alanlarına yakınlık	0-10 m
		10-30 m
		30-60 m
		>60 m
	Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	0-10 m
		10-30 m
		30-60 m
		>60 m
	Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	0-10 m
		10-30 m
		30-60 m
		>60 m

Tablo 3.5 Analizde kullanılan Ana/Alt kriterler ve kriter sınıfları (devamı)

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Alt Kriter Sınıfları
Ulaşım ve Entegrasyon	Toplu taşıma entegrasyonu	0-100 m
		100-250 m
		250-500 m
		500-750 m
		≥750 m
	Mevcut ve planlanan raylı sistemlerle entegrasyon	2 veya daha fazla doğrudan bağlantı
		1 raylı sistem hattına bağlantı
		Bağlantı yok veya zayıf
Ekonomik Faktörler	Yatırım maliyeti (Yapım, Araç)	<600 milyon ₺/km
		600–1 milyar ₺/km
		>1 milyar ₺/km
	İşletme ve bakım maliyetleri	<50 milyon ₺/km/yıl
		50–100 milyon ₺/km/yıl
		>100 milyon ₺/km/yıl
Operasyon ve Hizmet Kalitesi	Sefer sıklığı	≤3 dakika
		3–6 dakika
		>6 dakika
	Yolcu talebi ve taşıma kapasitesi	>350.000 yolcu/gün
		200.000 – 350.000
		<200.000
Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	İmar planı	Tam uyum (onaylı 1/5000 + 1/1000 planlarda tanımlı)
		Kısmi uyum (sadece 1/5000 veya 1/1000 planla örtüşüyor)
		Plan dışı / uyumsuz
	Kentsel gelişim bölgeleri	Gelişim bölgesi içinde
		Gelişim bölgesine yakın (0–1 km)
		Gelişim bölgesi dışında (>1 km)

3.5.1.2 AHP ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

AHP, karar vericinin ikili karşılaştırmalar yaparak kriterler arasındaki göreceli önemi 1'den 9'a kadar değişen Saaty Ölçeği ile değerlendirmesine olanak tanır (Saaty, 1990).

Tablo 3.6 AHP ikili karşılaştırma tercih ölçeği (Saaty, 1990)

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Eşit Önemli	Her iki kriter karar açısından eşit öneme sahiptir.
3	Biraz Daha Önemli	Bir kriter diğerine göre az bir üstünlüğe sahiptir.
5	Güçlü Önemli	Bir kriter diğerine göre belirgin biçimde daha önemlidir.
7	Çok Güçlü Önemli	Bir kriter diğerine göre büyük ölçüde baskındır.
9	Aşırı Derecede Önemli	Bir kriterin diğerine göre üstünlüğü mutlak düzeydedir.
2, 4, 6, 8	Ara Değerler	Ara önem derecelerini ifade eder; iki yakın düzey arasında tercih belirtmek için kullanılır.
1/x (Ters değer)	Ters Karşılaştırma	Eğer kriter *i*, *j*'ye göre *x* kat daha az önemliyse, $a_{ij} = 1/x$ olarak alınır.

Bu süreç, aşağıdaki matematiksel adımları takip eder:

- Karşılaştırma Matrisinin Oluşturulması: Ana Kriterler ve kendi altındaki Alt Kriterler için birbirlerine göre önem derecelerini gösteren *n x n* boyutunda ters-simetrik *A* matrisi oluşturulur (Saaty, 1990, 2008). Bu matris, a_{ij} elemanlarından oluşur ve *i.* kriterin *j.* kriterle karşılaştırıldığında göreli önemini ifade eder. Matris, aşağıdaki gibi tanımlanır:

  $A = [a_{ij}]$ matrisinde,

  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, $\quad a_{ii} = 1$ şartı sağlanır.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

- Matrisin Normalizasyonu: Matristeki her bir değerin, ait olduğu sütun toplamına bölünmesiyle normalize edilmiş matris A^* elde edilir (Malczewski ve Rinner, 2015; Saaty, 1990). Bu işlem, değerlerin 0 ile 1 arasında bir ölçeğe taşınmasını sağlar.

$$Sütun\ Toplamı = \sum_{i=1}^{n} a_{ij} \qquad a_{ij}^{*} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}} \tag{3.2}$$

- Özvektör (Eigenvector) Hesaplanması: Matrisin normalleştirilmesiyle edilen özvektör, her bir kriterin göreceli ağırlık değerini (W_i) verir (Saaty, 1990, 2003). Normalleştirilmiş matrisin her bir satırının ortalaması alınarak, her bir kriterin ağırlık vektörü (W_i) hesaplanır. Bu ağırlıklar, CBS'deki örtüşme işlemine girdi olarak kullanılacak katsayılardır.

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}^*}{n} \qquad (3.3)$$

Burada W_i kriterin ağırlığını, a_{ij} i ve j kriterleri arasındaki göreli önemi ifade etmektedir.

- Tutarlılık Oranının Kontrolü (CR): AHP'nin güvenilirliği, tutarlılık oranı (Consistency Ratio-CR) ile ölçülmüştür (Saaty, 1990, 2008). Uzman yargılarındaki tutarsızlık seviyesini gösteren CR değerinin 0.10'dan küçük olması (CR<0.10), matrisin kabul edilebilir bir tutarlılık sergilediğini ve elde edilen ağırlıkların güvenilir olduğunu gösterir (Malczewski, 2006; Saaty, 1990).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad ve \quad CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \qquad (3.4)$$

Burada,

- *CI* tutarlılık indeksi,
- λ_{max} matrisin en büyük özdeğeri
- *RI* ise rastgele tutarlılık indeksidir.
- *n* matris boyu

Tablo 3.7 AHP rastgele tutarlılık indeksi (RI) değerleri (Saaty, 1990)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

3.5.2 CBS Tabanlı Mekansal Uygunluk Analizi

AHP'den elde edilen nicel kriter ağırlıkları (W_i), güzergâh uygunluk haritasını üretmek amacıyla CBS ortamına aktarılmıştır. Bu aşama, AHP ile CBS'nin bütünleştiği (CBS-ÇKKV) temel adımdır (Malczewski, 2006).

3.5.2.1 Mekânsal Veri Standardizasyonu

Ağırlıklı örtüşme işlemine geçmeden önce, Bölüm 3.4 Veri Seti'nde detaylandırılan 19 farklı mekânsal veri katmanının, farklı ölçü birimlerinden kaynaklanan yanlılığı gidermek amacıyla standartlaştırılması yapılmıştır. Bu süreçte:

- Tüm vektör katmanlar (çizgi, nokta, poligon), analizler için uygun bir koordinat sistemine (EPSG: 5254) dönüştürülmüştür.
- "Yakınlık" temelli kriterler (okul, hastane, metro istasyonu vb.) için mesafe tabanlı en yakın merkez mesafesi ve Öklid mesafesi algoritması ile mesafe haritaları oluşturulmuş ve ardından tampon bölge analizleri yapılmıştır. "Çakışma/Çakışmama" temelli kriterler (altyapı çakışması, koruma alanları vb.) için kesişim analizi teknikleri kullanılmıştır.
- Her bir mekânsal veri katmanı (örn: Nüfus Yoğunluğu, Eğim), raylı sistem güzergâhı uygunluğunun o kriterin performans sınıflarına karşılık gelen 1 (En Az Uygun) ile 9 (En Çok Uygun) arasında değişen bir uygunluk skalasına göre raster formata dönüştürülmüştür.
- Bu skorlama, Alt Kriter Sınıfları için önceden belirlenen nicel eşik değerlerine (örn: 0-50 metre uzaklık → 9 puan, >500 metre uzaklık → 1 puan) dayanmıştır. Böylece, farklı birimlere sahip tüm kriterler, karşılaştırılabilir ve toplanabilir nitelikte standart puanlara dönüştürülmüştür.

Uygulanan bu işlem adımları mekânsal karar destek modeli entegrasyon ilkesine dayanmaktadır (Farooq vd., 2018; Malczewski, 2006; Oswald Beiler & Treat, 2015).

3.5.2.2 Ağırlıklandırılmış Çakıştırma/Örtüşme

Uygunluk analizi, standardize edilmiş tüm raster haritaların AHP ile elde edilen ağırlıkları kullanılarak birleştirildiği Ağırlıklandırılmış Örtüşme tekniği aracılığıyla

gerçekleştirilmiştir. Bu teknik, nihai uygunluk haritasını (S) aşağıdaki formülle hesaplar:

$$S = \sum_{i=1}^{n} (w_i \times x_i) \quad (3.5)$$

Burada:

- S: Nihai Güzergâh Uygunluk Skoru (Uygunluk Haritası)
- w_i: AHP'den elde edilen *i* kriterinin nicel ağırlık değeri.
- x_i: *i* kriterinin CBS ortamında standartlaştırılmış uygunluk değeri.
- *n*: Toplam Alt Kriter Sayısı (19).

Bu işlem sonucunda, M5 Üsküdar–Kısıklı hattı çevresindeki tüm alanlar, 0 ile 1 arasında (veya ölçeklendirilmiş 0-100 arasında) değişen bir uygunluk skoru alarak Nihai Güzergâh Uygunluk Haritasını oluşturmuştur.

3.5.3 Uygunluk Haritası Değerlendirme Yaklaşımı

Oluşturulan Nihai Uygunluk Haritasının sadece teorik bir sonuç olarak kalmaması, aynı zamanda yorumlanabilir ve uygulanabilir sonuçlar elde etmek için aşağıdaki adımlarla değerlendirilmiştir.

1. Uygunluk Sınıflandırması: Üretilen sürekli uygunluk haritası (S), istatistiksel yöntemlerle (örn: doğal kırılma noktaları) çok yüksek, yüksek, orta, düşük ve çok düşük olmak üzere beş farklı uygunluk sınıfına ayrılmıştır. Bu yöntem, sınıflar içindeki varyansı minimize ederek en homojen sınıfları oluşturmayı sağlamıştır.
2. Karşılaştırmalı Analiz: Sınıflandırılmış Uygunluk Haritası üzerine, M5 Üsküdar–Kısıklı hattının proje/uygulama aşamasındaki güzergâhı bir çizgi katmanı olarak yerleştirilmiştir. Bu mekânsal örtüşme analizi, güzergâhın, modelin öngördüğü çok yüksek ve yüksek uygunluk sınıflarına ne oranda denk geldiği nicel olarak hesaplanmıştır. Bu karşılaştırma, geliştirilen AHP-CBS modelinin potansiyel rotayı ne ölçüde optimize edebileceğini veya mevcut rotadaki olası sapmaları akademik olarak değerlendirmeyi sağlamıştır.

Bu analiz yaklaşımı, benzer biçimde Brunner vd. (2011); Djouani vd. (2022); Özdemir vd. (2018) tarafından geliştirilen CBS tabanlı ulaşım planlama modellerinde doğrulama adımı olarak uygulanmıştır.

Bu değerlendirme yöntemi M5 hattının planlama kararlarıyla mekânsal olarak ne ölçüde uyumlu olduğunu göstermekle kalmamış, aynı zamanda AHP–CBS modelinin uygulanabilirliğini de doğrulamıştır.

4
BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

4.1 AHP Sonuçları: Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Analizi

Bu bölümde, Bölüm 3'te sunulan metodolojinin İstanbul M5 Metro Hattı Üsküdar–Kısıklı kesimi üzerindeki uygulaması sonucunda elde edilen bulgular sunulmaktadır. Çalışmanın analitik çerçevesi, iki temel aşamadan oluşmaktadır: (i) AHP yöntemi ile kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve (ii) CBS ortamında ağırlıklı örtüştürme analizi ile uygunluk haritalarının üretilmesi.

İlk aşamada, Bölüm 3.5.1.1'de tanımlanan 7 ana kriter ve 19 alt kriterden oluşan hiyerarşik yapı için uzman değerlendirmeleri toplanmıştır. Raylı sistem planlama, harita mühendisliği, inşaat mühendisliği, kentsel planlama ve ulaştırma alanlarında görev yapan 10 uzman, Saaty Ölçeği (1–9) kullanılarak kriterlerin ikili karşılaştırmalarını gerçekleştirmiştir. Uzman değerlendirmelerine göre her bir kritere atanan puanlar Ek-A'da sunulmuştur.

Toplanan uzman görüşleri, Bölüm 3.5.1.2'de açıklanan AHP matematiksel prosedürü (karşılaştırma matrisi oluşturma, normalizasyon, özvektör hesaplama ve tutarlılık kontrolü) ile işlenmiştir. Ana kriterler ve her bir ana kritere ait alt kriterler için ayrı ayrı ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuş, ağırlık vektörleri hesaplanmış ve tutarlılık oranları (CR) kontrol edilmiştir. Tüm AHP hesaplama adımları, karşılaştırma matrisleri, normalize matrisler, ağırlık vektörleri, λ_{max}, CI ve CR değerleri Ek-B'de detaylı olarak yer almaktadır.

Bu hesaplamalar sonucunda ana kriterler ve bunlara bağlı alt kriterlerin ağırlık katsayı dağılımları hesaplanarak Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Tabloda, her ana kriterin genel ağırlığı ile birlikte, her alt kriterin kendi ana kriteri içindeki yerel ağırlığı ve tüm hiyerarşi içindeki küresel (genel) ağırlığı sunulmaktadır.

Tablo 4.1 AHP ikili karşılaştırma özet tablosu

Ana Kriterler	Ağırlık Değeri	Alt Kriterler	Ağırlık Değeri	Genel Ağırlık
Teknik ve Mühendislik Faktörleri	31,8%	Hat uzunluğu	0,252	8,0%
		Hattın eğim durumu	0,589	18,7%
		İşletme hızı	0,159	5,1%
Arazi ve Çevresel Faktörler	15,4%	Arkeolojik ve tarihi koruma alanları	0,126	1,9%
		Jeolojik faktörler	0,492	7,6%
		Doğal afet riski	0,311	4,8%
		Mevcut altyapı ile çakışma durumu	0,071	1,1%
Sosyal ve Demografik Faktörler	6,4%	Nüfus yoğunluğu	0,126	0,8%
		Konut alanlarına yakınlık	0,415	2,7%
		Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	0,289	1,9%
		Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	0,169	1,1%
Ulaşım ve Entegrasyon	19,2%	Toplu taşıma entegrasyonu	0,250	4,8%
		Mevcut ve planlanan raylı sistemlerle entegrasyon	0,750	14,4%
Ekonomik Faktörler	13,8%	Yatırım maliyeti (Yapım, Araç)	0,750	10,4%
		İşletme ve bakım maliyetleri	0,250	3,5%
Operasyon ve Hizmet Kalitesi	8,8%	Sefer sıklığı	0,250	2,2%
		Yolcu talebi ve taşıma kapasitesi	0,750	6,6%
Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	4,5%	İmar planı	0,750	3,4%
		Kentsel gelişim bölgeleri	0,250	1,1%
Cr		**0,0403**		

Ana kriterlerin ağırlıkları incelendiğinde, en önemli üç faktörün sırasıyla Teknik ve Mühendislik Faktörleri (0.318), Ulaşım ve Entegrasyon (0.192) ile Ekonomik Faktörler (0.138) olduğu tespit edilmiştir. Bu hiyerarşi, bir raylı sistem projesinin fizibilitesinde, mühendislik gereksinimlerinin (zemin, eğim) ve kentsel ağa entegrasyonun, maliyet faktörlerinden dahi daha kritik bir öncelik taşıdığını kanıtlamaktadır.

Alt kriterler düzeyinde ise, özellikle Teknik alanda yer alan Hat Uzunluğu (0.252) ve Eğitim Durumu (0.589), Sosyal alanda Konut Alanlarına Yakınlık (0.415) ve Ulaşım alanında Mevcut ve Planlanan Raylı Sistemlerle Entegrasyon (0.750) faktörlerinin, en yüksek bireysel ağırlığa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, güzergâhın sadece teknik olarak uygulanabilir olmasının değil, aynı zamanda mevcut toplu taşıma omurgasına güçlü bir aktarma kapasitesi sunmasının da temel bir zorunluluk olduğunu göstermektedir (Song vd., 2021).

AHP analizinin güvenilirliği, CR kontrolü ile sağlanmıştır. Tüm karşılaştırma matrisleri için hesaplanan CR değeri, Saaty (1990) tarafından önerilen kabul eşiği olan 0.10'dan küçük çıkmıştır (Örn: Ana Kriter Matrisi için CR = 0.040). Bu sonuç, değerlendirmelerin akademik standartlara uygun bir tutarlılık sergilediğini ve elde edilen nihai ağırlıkların, CBS analizine güvenle girdi olarak aktarılabileceğini teyit etmektedir (Saaty, 2008).

Tablo 4.2'de, ana ve alt kriterlerin ağırlık dağılımları ile alt kriterlere ait kriter sınıfları için belirlenen uygunluk değerleri ve CR değerlerini içeren bütünleşik özet liste gösterilmiştir. Söz konusu şekil, hiyerarşik yapının her bir katmanındaki göreceli önem düzeylerini ve mekânsal analiz aşamasında kullanılacak olan puanlama setlerini bir bütün halinde sunmaktadır.

Tablo 4.2 AHP kriter ağırlıkları, uygunluk değerleri ve tutarlılık oranı

Ana Kriterler	Ağırlık Değeri	Alt Kriterler	Ağırlık Değeri	Genel Ağırlık	Alt Kriter Sınıfları	Uygunluk Değeri	Skor Değeri
Teknik ve Mühendislik Faktörleri	0,318	Hat uzunluğu	0,252	8%	0-5 km	9	0,721
					5-10 km	7	0,561
					10-20 km	5	0,401
					20-30 km	3	0,240
					30 + km	1	0,080
		Hattın eğim durumu	0,589	19%	0-3 %	9	1,686
					3-6 %	5	0,937
					> 6 %	1	0,187
		İşletme hızı	0,159	5%	< 40 km/sa	1	0,051
					40-60 km/sa	5	0,253
					60 + km/sa	9	0,456
Arazi ve Çevresel Faktörler	0,154	Arkeolojik ve tarihi koruma alanları	0,126	2%	Alan içinde	1	0,019
					0-100 m	5	0,097
					100-250 m	7	0,136
					Alan dışında	9	0,175
		Jeolojik faktörler (litolojik yapıya uygunluk)	0,492	8%	Sağlam Kaya - düşük risk	9	0,683
					Orta Sertlikte Zemin - orta risk	5	0,379
					Yumuşak Zemin - yüksek risk	1	0,076
		Doğal afet riski (fay hatları, sel, heyelan vb.)	0,311	5%	0-50 m (yüksek riskli alan)	1	0,048
					50-100m (orta riskli alan)	5	0,240
					>100 m (afet riski düşük alan)	9	0,432
		Mevcut altyapı ile çakışma durumu	0,071	1%	Çakışma yok / minimum (ideal) (0–1 altyapı hattı → Düşük çakışma)	9	0,099
					Orta düzeyde çakışma (2–3 → Orta çakışma)	5	0,055
					Yoğun çakışma (kritik) (4+ → Yüksek çakışma)	1	0,011
Sosyal ve Demografik Faktörler	0,064	Nüfus yoğunluğu	0,126	1%	< 10000 kişi/km2	1	0,008
					10000 - 15000 kişi/km2	3	0,024
					15000 - 18000 kişi/km2	5	0,040
					18000 - 20000 kişi/km2	7	0,057
					> 20000 kişi/km2	9	0,073
		Konut alanlarına yakınlık	0,415	3%	0-10 m	9	0,241
					10-30 m	7	0,187
					30-60 m	5	0,134
					> 60 m	1	0,027
		Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	0,289	2%	0-10 m	9	0,168
					10-30 m	7	0,130
					30-60 m	5	0,093
					> 60 m	1	0,019
		Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	0,169	1%	0-10 m	9	0,098
					10-30 m	7	0,076
					30-60 m	5	0,054
					> 60 m	1	0,011
Ulaşım ve Entegrasyon	0,192	Toplu taşıma entegrasyonu (Otobüs, Minibüs, Taksi durakları, havalimanı, terminal, gar yapıları)	0,250	5%	0 - 100 m	9	0,432
					100 - 250 m	7	0,336
					250 - 500 m	5	0,240
					500 - 750 m	3	0,144
					>= 750 m	1	0,048
		Mevcut ve planlanan raylı sistemlerle entegrasyon	0,750	14%	2 veya daha fazla doğrudan bağlantı	9	1,295
					1 raylı sistem hattına bağlantı	5	0,720
					Bağlantı yok veya zayıf	1	0,144
Ekonomik Faktörler	0,138	Yatırım maliyeti (Yapım, Araç)	0,750	10%	< 600 milyon ₺/km	9	0,934
					600 – 1 milyr ₺/km	5	0,519
					> 1 milyar ₺/km	1	0,104
		İşletme ve bakım maliyetleri	0,250	3%	< 50 milyon ₺/km/yıl	9	0,311
					50 – 100 milyon ₺/km/yıl	5	0,173
					> 100 milyon ₺/km/yıl	1	0,035
Operasyon ve Hizmet Kalitesi	0,088	Sefer sıklığı	0,250	2%	≤ 3 dakika	9	0,197
					3 – 6 dakika	5	0,110
					> 6 dakika	1	0,022
		Yolcu talebi ve taşıma kapasitesi	0,750	7%	> 350.000 yolcu/gün	9	0,592
					200.000 – 350.000	5	0,329
					< 200.000	1	0,066
Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	0,045	İmar durumu	0,750	3%	Tam uyum (onaylı 1/5000 + 1/1000 planlarda tanımlı)	9	0,306
					Kısmi uyum (sadece 1/5000 veya 1/1000 planla örtüşüyor)	5	0,170
					Plan dışı / uyumsuz	1	0,034
		Kentsel gelişim bölgeleri	0,250	1%	Gelişim bölgesi içinde	9	0,102
					Gelişim bölgesine yakın (0–1 km)	5	0,057
					Gelişim bölgesi dışında (>1 km)	1	0,011
Cr	0,0403						

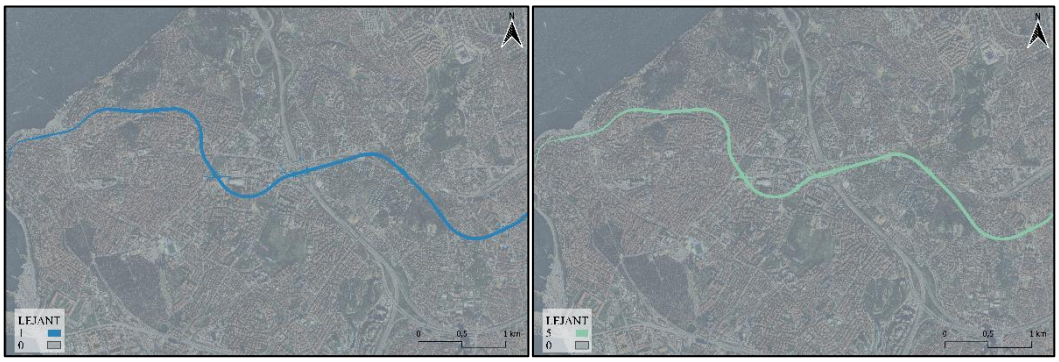
4.2 Uygunluk Haritası ve Güzergah Analizi

AHP'den elde edilen (W_i) ağırlıkları, Bölüm 3.5.2'de detaylandırılan Ağırlıklandırılmış Örtüşme yöntemi ile CBS ortamında mekânsal veri katmanlarına uygulanmış ve Nihai Güzergâh Uygunluk Haritası üretilmiştir. Ağırlıklandırılmış çakıştırma analizi sonucu üretilen nihai uygunluk haritası, çalışma alanını yüksek, orta ve düşük uygunluk olmak üzere beş sınıfa ayırmaktadır.

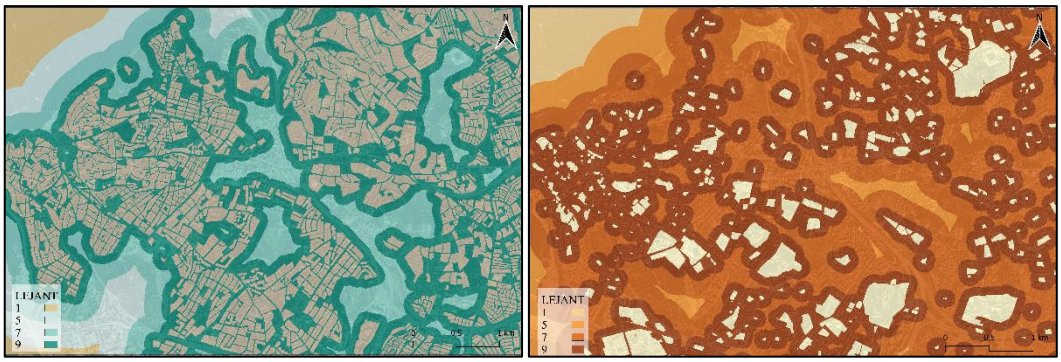
CBS analizine geçişte, 3.4 Veri Seti'nde listelenen tüm vektör veriler, raster formata dönüştürülmüş ve 1'den 9'a kadar değişen uygunluk skorlarıyla yeniden sınıflandırılmıştır. Bu süreç, Şekil 4.1'den Şekil 4.9 arası örneklendiği gibi, her bir alt kriterin (Korunması Gereken Alanlar, Jeolojik Faktörler, Konut Alanlarına Yakınlık) mekânsal etkisini nicel bir zemine taşımıştır.

AHP ile elde edilen kriter ağırlıkları, CBS ortamına aktarılmış ve tüm veriler raster formatına dönüştürülmüştür. Bu aşamada:

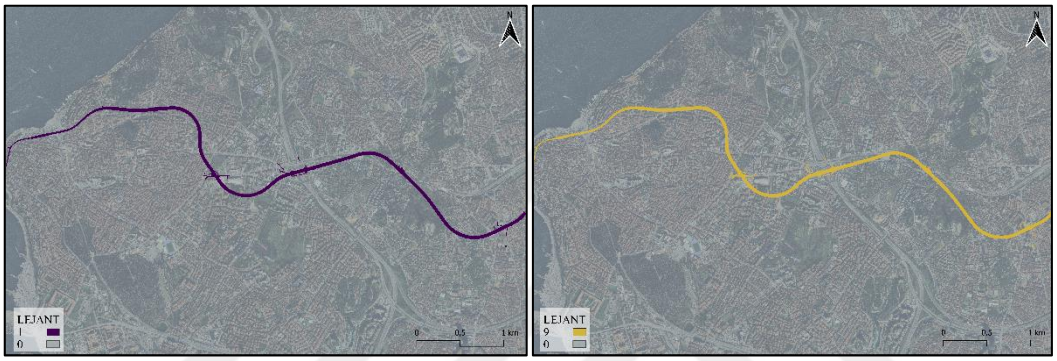
- Eğim, litoloji, doğal afet riski ve koruma alanları gibi çevresel katmanlar,
- Nüfus yoğunluğu, konut alanlarına yakınlık, kamu hizmetlerine erişim gibi sosyo-demografik katmanlar,
- Toplu taşıma entegrasyonu, yatırım maliyeti, imar planı ve taşıma kapasitesi gibi teknik ve ekonomik faktörler analizde kullanılmıştır.



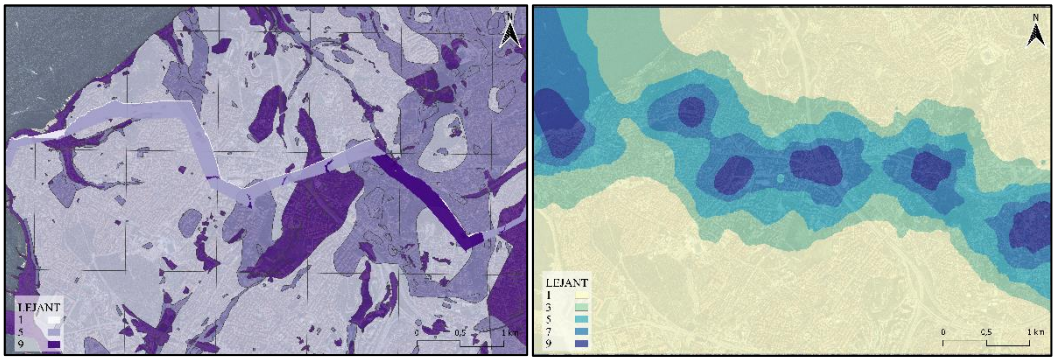
Şekil 4.1 M5 hattı güzergah yatırım maliyeti ve yolculuk talebi



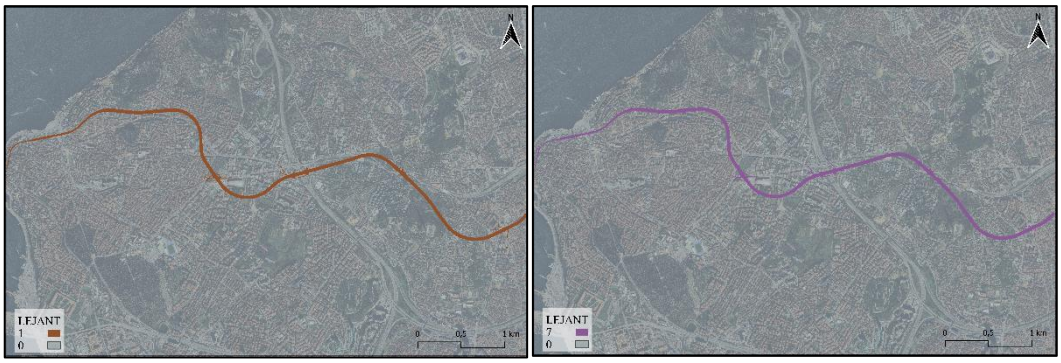
Şekil 4.2 Konut alanları ve kamu-eğitim alanları



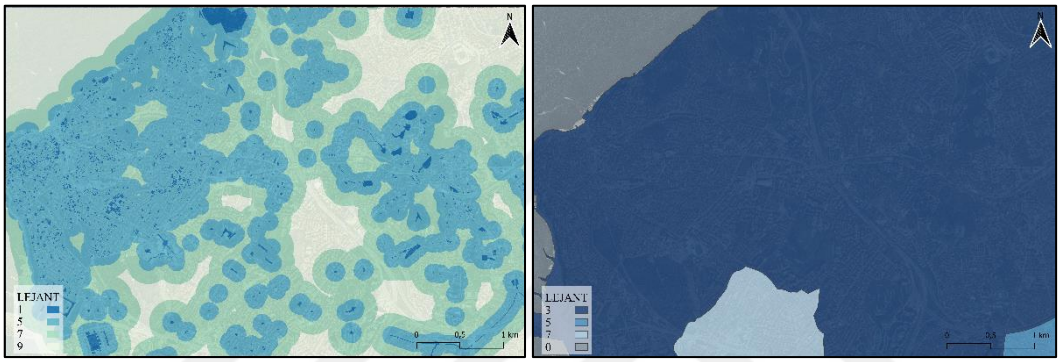
Şekil 4.3 M5 hattı güzergah işletme-bakım maliyeti ve sefer sıklığı



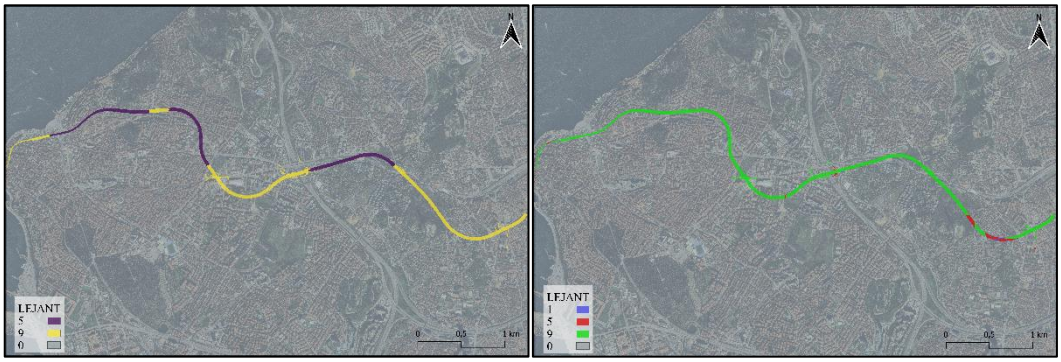
Şekil 4.4 Jeolojik faktörler ve toplu taşıma entegrasyonu



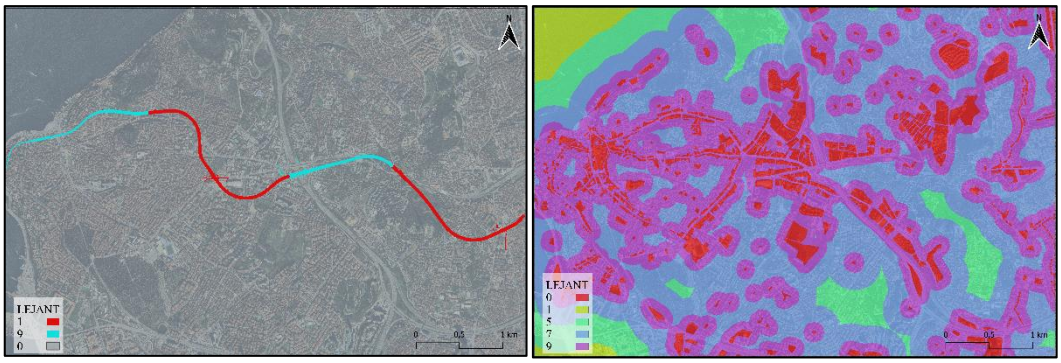
Şekil 4.5 M5 hattı güzergah işletme hızı ve hat uzunluğu



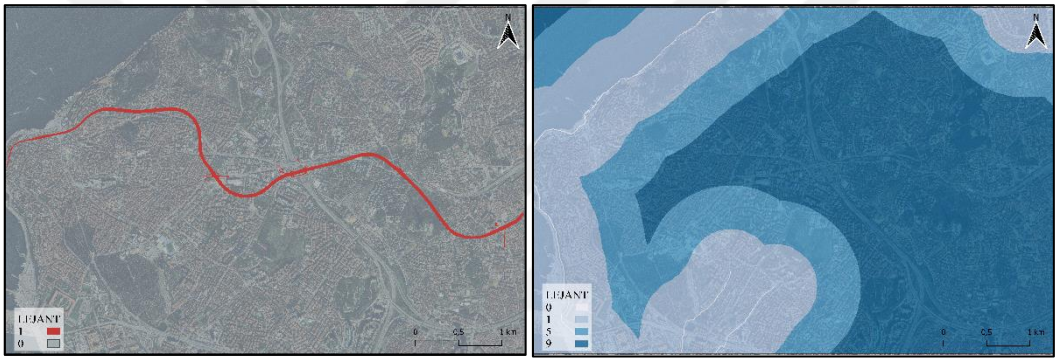
Şekil 4.6 Arkeolojik ve tarihi koruma alanları ve nüfus yoğunluğu



Şekil 4.7 M5 hattı güzergah eğimi ve imar planı uyumu



Şekil 4.8 M5 hattı diğer raylı sistemlerle entegrasyonu ve ticari-sosyal alanlar



Şekil 4.9 Altyapı çakışması ve doğal afet etkileşimi

Her bir katman, AHP analizinden gelen ağırlık değerleriyle raster veriye dönüştürülmüş ve normalize edilmiştir. Tüm kriter haritalarının AHP ağırlıkları ile çakıştırılması sonucunda, Şekil 4.10'da gösterilen Nihai Güzergâh Uygunluk Haritası elde edilmiştir.



Şekil 4.10 M5 hattı (Üsküdar-Kısıklı bölgesi) güzergah uygunluk haritası

Elde edilen uygunluk haritası, çalışma alanının (M5 Üsküdar–Çekmeköy Hattı koridoru) genelinde yüksek, orta ve düşük uygunluk zonları şeklinde sınıflandırılmıştır. Sonuçlara göre:

- Yüksek uygunluk bölgeleri (0.75–1.00 arası ve üzeri) ağırlıklı olarak düşük eğimli, sağlam zeminli, mevcut ulaşım ağlarına yakın ve yoğun nüfuslu kentsel alanlarda yer almaktadır.
- Orta uygunluk bölgeleri (0.50–0.75 arası), çoğunlukla kısmen eğimli topoğrafyaya ve karma arazi kullanımlarına sahip geçiş zonlarıdır.
- Düşük uygunluk bölgeleri (0.00–0.50 arası) ise jeolojik risklerin, afet zonlarının veya yoğun altyapı çakışmalarının bulunduğu alanlarda yoğunlaşmaktadır.

Harita üzerindeki mekânsal dağılımda, Üsküdar-Samandıra hattı koridorunun belirgin ve sürekliliğin yüksek ve orta uygunluk bölgelerinde yoğunlaştığı, genellikle mevcut ulaşım akslarına paralel ve yüksek nüfus yoğunluğuna sahip kentsel merkezlere yakın bölgelerde kümelendiğini göstermiştir. Bu alanlar, modelin yüksek ağırlık verdiği Ulaşım ve Entegrasyon faktörleri ile doğrudan ilişkilidir. En düşük uygunluk skorları ise, ağırlıklandırmada yüksek çıkan

Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları ve Doğal Afet Riskleri gibi kısıtlayıcı faktörlerin bulunduğu bölgelerde görülmüştür. Bu sonuç, tezin kullandığı entegre modelin, planlama kriterlerini mekânsal gerçekliğe başarılı bir şekilde yansıttığını göstermektedir (Malczewski, 2006).

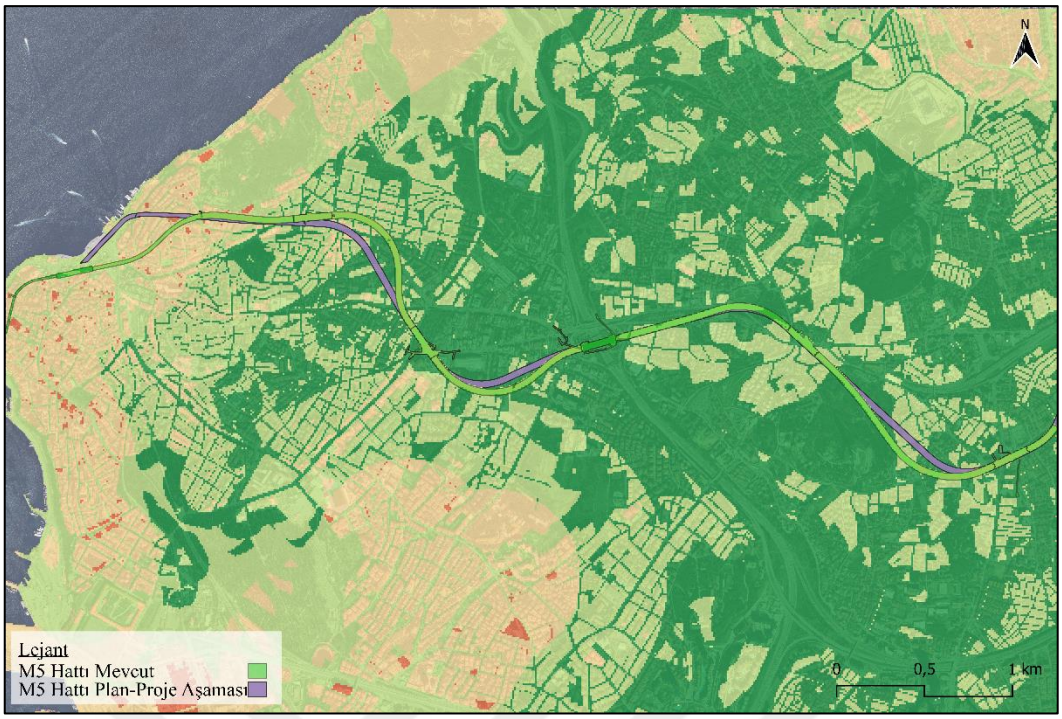
Kriter ağırlıklarının mekânsal izdüşümüne göre:

- Yatırım maliyeti (0,10) ve raylı sistem entegrasyonu (0,14) kriterlerinin, hat boyunca belirleyici etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu faktörler, özellikle güzergâhın aktarma merkezlerine yakın kısımlarında yüksek uygunluk değerleri üretmiştir.
- Jeolojik faktörler (0,08) ve afet riski (0,05) ise güzergâhın doğu kesimlerinde uygunluğu sınırlandıran başlıca unsurlar olmuştur.
- Sosyal erişilebilirlik kriterleri (konut ve kamu kurumlarına yakınlık) kentsel merkezlere yakın bölgelerde belirgin bir uygunluk artışı sağlamıştır.

Bu sonuçlar, çok ölçütlü mekânsal analiz yaklaşımlarının, kentsel raylı sistem planlamasında yalnızca mühendislik faktörlerini değil, aynı zamanda erişilebilirlik, sürdürülebilirlik ve çevresel koruma boyutlarını da birlikte değerlendirmeye olanak sağladığını göstermektedir (Brunner vd., 2011; Djouani vd., 2022).

4.3 M5 Hattı Proje Kriterleri ile Model Sonuçlarının Karşılaştırması

Bu tez çalışmasının özgün katkısını oluşturan bu aşamada, modelden elde edilen teorik uygunluk bulguları, M5 hattının Üsküdar–Kısıklı bölgesinin mevcut uygulama güzergâhı ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, M5 hattının Üsküdar–Kısıklı kesimine ait uygulama güzergâhı ile planlama aşamasındaki proje hattı, oluşturulan uygunluk haritası üzerine entegre edilerek değerlendirilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 M5 hattı (Üsküdar-Kısıklı bölgesi) güzergah karşılaştırması

Görsel analizde; yeşil renkli hat, inşa edilmiş fiili güzergâhı, mor renkli hat ise planlama aşamasında belirlenen proje güzergâhını temsil etmektedir. Altlık harita ise AHP ağırlıklarına göre oluşturulmuş raster uygunluk değerlerini içermektedir. Bu değerler 0 ile 1 arasında normalize edilmiş olup, yeşilden sarıya doğru artan uygunluk seviyelerini göstermektedir.

Model sonuçlarına göre, hattın büyük ölçüde "Yüksek" ve "Çok Yüksek" uygunluk zonlarından geçtiği tespit edilmiştir. Üsküdar–Bağlarbaşı arasındaki güzergah kesimi özellikle arazi eğimi ve ulaşım entegrasyonu açısından yüksek uygunluk sınıfı içinde yer almakta olup optimum konumda bulunmaktadır. Buna karşılık, Altunizade–Kısıklı arası bölümde kısmen daha düşük uygunluk değerleri gözlemlenmiştir. Bu durum, mevcut jeoteknik koşullar, topografik eğim farklılıkları ve yoğun yapılaşma gibi koşulların yanı sıra projelerin planlama kriterlerinden ziyade kamulaştırma kısıtları, mevcut yeraltı altyapı çakışmaları, teknik zorunluluklar veya idari kısıtların etkisi nedeniyle rotayı değiştirmek zorunda kaldığını göstermektedir.

Nicel olarak değerlendirildiğinde, M5 hattının mevcut güzergâhının yaklaşık %85'inin modelin öngördüğü "Çok Yüksek" ve "Yüksek" uygunluk sınıfları içinden geçtiği görülmektedir. Geri kalan %15'lik bölüm ise "Orta" ve "Düşük" uygunluk

sınıflarına denk gelmektedir. Bu durum, modelin büyük ölçüde uygulamaya yakın doğrulukla çalıştığını ve planlama aşamasındaki mühendislik kararlarının rasyonelliğini desteklediğini göstermektedir.

Ayrıca, güzergahlar arasındaki konumsal sapmaların çoğunlukla topografik sınırlamalar ve arazi kullanımı kısıtları nedeniyle ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Örneğin, Kısıklı çevresinde düşük uygunluk değerlerine rağmen güzergâhın bu bölgeden geçmesi, teknik zorunlulukların (örneğin diğer hatlarla entegrasyon veya tünel derinliği gereksinimi) etkili olduğunu göstermektedir.

Modelin doğrulama açısından yüksek uyum göstermesi, AHP–CBS yaklaşımının yalnızca alternatif güzergâh belirleme aracı olarak sınırlı kalmadığını, aynı zamanda uygulama sonrası planlama doğrulama ve optimizasyon süreçlerinde fizibilite ve sürdürülebilirlik açısından geriye dönük olarak da analitik biçimde test edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda çalışma, geleneksel sezgisel yaklaşımlara kıyasla şeffaf, savunulabilir ve nicel temellere dayanan planlama kararlarını mümkün kılmaktadır.

4.4 Tartışma

Bu çalışmada geliştirilen AHP–CBS tabanlı mekânsal analiz modeli, raylı sistem güzergâh planlamasına sistematik, sayısal ve mekânsal bir çerçeve kazandırmaktadır. Modelin güçlü yönleri, yalnızca teknik doğruluğu değil, aynı zamanda karar süreçlerinde şeffaflık ve yeniden üretilebilirliği artırmasıyla ön plana çıkmaktadır.

4.4.1 Güçlü Yönler

AHP-CBS entegrasyonu, raylı sistem güzergâh planlama sürecine üç temel güçlü yön sunmaktadır. İlk olarak, yöntemin objektiflik ve şeffaflık düzeyi yüksektir. AHP kullanımı, güzergâh seçimini siyasi veya subjektif etkilerden arındırarak, uzman yargılarına dayalı, matematiksel temele oturtulmuş, tekrarlanabilir ve nicel bir karar süreci sunar. İkinci olarak, bu model bütüncül analize olanak tanımaktadır. 3.5.1'de belirlenen birbiriyle çatışan teknik, çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlardaki 19 Alt Kriteri aynı analitik çerçevede birleştirerek, karar vericilere tek bir mekânsal çıktı üzerinden kapsamlı bir değerlendirme olanağı sunar (Malczewski, 2006). Modelin bir diğer önemli avantajı, karşılaştırma yeteneğidir.

CBS tabanlı uygunluk haritaları, karmaşık kriterlerin mekânsal dağılımını anlaşılır bir görsel dil ile ifade ederken; model, teorik olarak optimum rotayı belirlemenin yanı sıra, mevcut uygulama rotası (M5 Hattı) ile bilimsel bir karşılaştırma yaparak projenin rasyonellik seviyesini ölçme imkânı sunmuştur. Bu yönüyle model, yalnızca analiz aracı olarak değil, aynı zamanda uygulama sonrası planlama doğrulama ve karar destek sistemi olarak da kullanılabilir hale gelmiştir.

4.4.2 Zayıf Yönleri ve Veri Kalitesi Sınırlılıkları

Geliştirilen hibrit modelin etkinliği, bazı operasyonel ve veriye dayalı sınırlılıklar dahilinde değerlendirilmelidir. Bu bağlamda belirtilmesi gereken ilk husus, çalışmanın mekânsal kapsamına ilişkindir. Mekânsal analiz, M5 Metro Hattı'nın tamamı yerine Üsküdar–Kısıklı kesimi ile sınırlandırılmıştır. Kesim seçiminde, söz konusu koridorun topoğrafik çeşitlilik, kentsel doku yoğunluğu ve güzergâh alternatifleri açısından temsil edici bir örnek alan niteliği taşıması belirleyici olmuştur. Bununla birlikte, analizin hattın tamamına genişletilmesi durumunda bazı sonuçların farklılaşabileceği göz ardı edilmemelidir. Özellikle hattın diğer kesimlerindeki arazi kullanım deseni, demografik yapı ve mevcut ulaşım altyapısı ile entegrasyon koşulları, ağırlıklı uygunluk haritasının uzamsal dağılımını ve dolayısıyla teorik optimum rota önerisini değiştirebilir. Bu durum, modelin sonuçlarının genellenebilirliği açısından bir sınırlılık oluşturmakla birlikte, geliştirilen metodolojinin hattın tamamına ya da farklı raylı sistem koridorlarına uyarlanmasının önünde herhangi bir teknik engel bulunmamaktadır.

Kriter ağırlıkları, sınırlı sayıdaki uzman panelinin sübjektif yargılarına bağlıdır; bu, modelin nihai sonucunun büyük ölçüde uzman profillerinin öncelik algısına bağlı olduğu anlamına gelir. CR hesaplamaları bu insan kaynaklı sapmayı minimize etse de tamamen ortadan kaldırılamaz (Saaty, 2008). Modelin statik yapısı da başka bir kısıtlayıcı unsur olarak değerlendirilebilir. Modelin doğruluğu, kullanılan verilerin (nüfus yoğunluğu, arazi kullanımı vb.) toplandığı anın kentsel yapısını yansıtır; trafik simülasyonları veya seyahat sürelerinin değişimi gibi dinamik zaman parametreleri analize dahil edilememiştir. Son olarak, veri kalitesi bağlamında ise en büyük sınırlılıklar veri kalitesi ve çözünürlük kaynaklıdır. Analizlerde kullanılan TÜİK ve İBB gibi kurumsal verilerin mekânsal çözünürlüğü, özellikle kentsel kılcal düzeydeki detayları yakalamada kısıtlı kalabilmektedir. Verilerin format dönüşümü (vektörden rastera) sırasında oluşan genellemeler ve bazı alt kriterler için eksiksiz

veri erişiminin zorluğu, sonuçların mutlak kesinliğini belirli ölçüde sınırlandırmıştır.

5
SONUÇ

Bu çalışma, kentsel raylı sistem güzergâh planlamasının çok boyutlu doğasını ele almak için AHP ve CBS entegrasyonuna dayanan bütünleşik bir değerlendirme modeli önermiş ve İstanbul M5 Üsküdar-Samandıra Metro Hattı'nın Üsküdar-Kısıklı kesimi üzerinde uygulanmıştır. Araştırmada elde edilen sonuçlar, geleneksel planlama yöntemlerine kıyasla, AHP-CBS tabanlı yaklaşımın, teknik fizibiliteyle birlikte çevresel uygunluk ve sosyo-ekonomik sürdürülebilirliği aynı anda optimize etme potansiyeli yüksek, şeffaf ve tekrarlanabilir bir karar destek mekanizması sunduğunu ortaya koymuştur. Modelin ürettiği mekânsal uygunluk haritası, proje planlama aşamasında öngörülen güzergah ile fiilen inşa edilen hat arasındaki yüksek düzeyde uyumun görselleştirilmesini sağlamış ve bu yöntemle geliştirilen analizlerin, planlama kararlarının mekânsal tutarlılığını nesnel biçimde değerlendirme imkânı tanımıştır.

AHP aşamasında, uzman görüşleri ve literatür taramasıyla belirlenen kriterlerin ağırlıklandırılması, İstanbul gibi karmaşık metropollerde raylı sistem güzergâhı planlamasında teknik ve mühendislik faktörleri, arazi ve çevresel koşullar, ulaşım entegrasyonu gibi unsurların beklenenden daha yüksek bir önceliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur. Papa ve Bertolini (2015), ulaşım ve arazi kullanım entegrasyonunun sürdürülebilir kentsel gelişim üzerindeki kritik rolünü vurgulayarak bu sonucu desteklemektedir. CBS tabanlı analizler ise, M5 hattının Üsküdar-Kısıklı koridorunda, yüksek nüfus yoğunluğuna sahip alanlara erişim sağlamada etkili olduğunu, ancak topoğrafik kısıtlar ve mevcut yoğun yapılaşmış çevre nedeniyle belirli kesimlerde hattın teknik ve çevresel uygunluk açısından zorlukları bulunduğunu göstermiştir. Bu durum, İstanbul'un kendine özgü kentsel morfolojisinin, raylı sistem güzergâhlarını şekillendirmedeki belirleyici etkisini açık biçimde ortaya koymuştur.

Geliştirilen modelin, mevcut M5 güzergâhı ile yüksek düzeyde uyum göstermesi, yöntemin geçerliliğini ve İstanbul bağlamında uygulanabilirliğini güçlendirmiştir. Bu yüksek uyum oranı, AHP–CBS tabanlı analizlerin güzergâh seçiminde hem doğrulama amacıyla hem de alternatif güzergah senaryolarını değerlendiren etkili bir karar destek mekanizması olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu bulgu, dünyanın farklı bölgelerinde benzer metodolojileri kullanan çalışmalarla paralellik göstermektedir. Malczewski (2006)'nin çok kriterli karar analizinde CBS entegrasyonuna ilişkin temel çerçevesi ve Farooq vd. (2019) tarafından Çin'de yüksek hızlı tren güzergâhı planlamasında gerçekleştirilen uygulama, bu metodolojinin ulaşım planlamasındaki geçerliliğini göstermektedir. Türkiye'de ise, Yıldırım ve Bediroglu (2019) ve Kırlangıçoğlu (2014) gibi araştırmacıların çalışmaları, bu yöntemin demiryolu ve metro hatları planlamasında güvenilir bir araç olduğunu desteklemektedir. Dolayısıyla, çalışma literatüre İstanbul'un özgün kentsel dokusu üzerinde test edilmiş bir model çalışması üzerinden somut bir doğrulama sağlamıştır.

Elde edilen bulgular, kriterlerin mekânsal dağılımının güzergâh seçimi üzerindeki etkisini açıkça göstermiştir. Özellikle eğim, jeolojik yapı ve afet riski gibi teknik ve çevresel değişkenlerin güzergah belirleme sürecinde ağır basması, İstanbul'un topografik ve jeoteknik yapısının raylı sistem planlamasında kritik önemde olduğunu doğrulamaktadır. Sosyal kriterlerin mekânsal uygunluk haritasına etkisinin görece sınırlı kalması, bu tür projelerde toplumsal faydanın mekânsal olarak daha bütüncül analiz edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durum gelecekteki çalışmalar için önemli bir değerlendirme alanı açmaktadır. Bu bulgu, ulaşım yatırımlarında sosyal eşitlik ve erişilebilirlik kriterlerinin daha belirgin dahil edilmesinin gerekliliğini ortaya koymakta, Litman (2022) ve Nsaif vd. (2023) tarafından geliştirilen sosyal adalet temelli ulaşım modelleriyle uyum göstermektedir. Böylece, raylı sistem planlamasında teknik uygunluk kadar sosyal sürdürülebilirliğin de mekânsal analizlerle değerlendirilmesi gerektiği yönündeki yaklaşım desteklenmiştir.

Çalışma, yöntemsel açıdan da önemli bir katkı sağlamaktadır. AHP–CBS entegrasyonu, farklı veri türlerini bir araya getirerek çok kriterli analizlerde hem analitik hem mekânsal doğruluk sağlamaktadır. Bu yönüyle model, karar vericilere ve yerel yönetimlere, veri temelli, tekrarlanabilir ve şeffaf bütünleşik bir planlama

yaklaşımı sunmaktadır. Ayrıca, yöntemin farklı kentsel altyapı projelerine uyarlanabilir olması, genelleştirilebilme ihtimalini artırmaktadır. Böylece sürdürülebilir ve dirençli kentler inşa etme hedefine yönelik katkısı genişletilebilir. Benzer biçimde AHP–CBS temelli analizlerin farklı coğrafyalarda yürütülen çalışmalarda da ulaştırma planlamasında güvenilir ve ölçeklenebilir sonuçlar ürettiği ortaya konulmuştur (Brunner vd., 2011; De Luca vd., 2012; Farooq vd., 2019).Bu durum, geliştirilen modelin sadece İstanbul için değil, benzer mekânsal karmaşıklığa sahip diğer metropoller için de uyarlanabilir bir çerçeve sunduğunu göstermektedir.

Çalışmanın belirli sınırlılıkları ise gelecekte yapılacak araştırmalara yön gösterebilecek niteliktedir. Analizlerde kullanılan kriter sayısı 19 ile sınırlı tutulmuş, enerji verimliliği, karbon ayak izi analizi, kentsel ısı adası etkisi ve daha detaylı sosyal eşitlik göstergeleri gibi faktörler modele dahil edilmemiştir. Gelecek çalışmalarda bu değişkenlerin entegrasyonu, değerlendirmenin kapsamını genişletecektir. Ayrıca AHP yönteminin öznel değerlendirmelere dayalı yapısı, karar verici sayısının artırılması ve uzman kadronun disiplinler arası yapısının güçlendirilmesi veya F-AHP gibi yöntemlerle daha dengeli hale getirilebilir. Benzer şekilde, makine öğrenmesi algoritmalarının (örneğin, evrimsel sinir ağları) CBS ve AHP ile entegre edildiği hibrit modeller, güzergâh uygunluk tahminlerinin doğruluğunu ve hızını artırabilir. Bunu yanı sıra, modelin statik bir yapıya sahip olması, hızla değişen kentsel dinamikleri yeterince yansıtmamaktadır. Nüfus projeksiyonları, arazi kullanımı değişimleri ve yeni ulaşım yatırımlarının dinamik entegrasyonunu içeren modellerin geliştirilmesi, planlama süreçlerinin gerçek zamanlı doğruluğunu artıracaktır.

Çalışmanın bulgu ve sınırlılıkları ışığında, yerel yönetimler ve planlama kuruluşları, raylı sistem projelerinin erken planlama ve fizibilite aşamalarında AHP-CBS tabanlı analizleri standart bir değerlendirme aracı olarak kullanması önerilmektedir. Bu yaklaşım, yatırım kararlarının şeffaf, veriye dayalı ve paydaş katılımına açık hale gelmesine katkı sağlayacaktır. İstanbul özelinde geliştirilen model, kentte planlanan diğer raylı sistem hatlarının (örneğin, M12, M13 hatları) mevcut ağla ve kent dokusuyla olan entegrasyonunu bütüncül olarak değerlendirmek için de kullanılabilir. Ayrıca, modelin kentsel dönüşüm alanları,

sosyal kırılganlık haritaları ve erişilebilirlik analizleriyle birlikte kullanılması, ulaşım yatırımlarının mekânsal adalet hedeflerine olan katkısını artırabilir.

Sonuç olarak, bu tez, İstanbul gibi mega kentlerde raylı sistem güzergâh planlamasının yalnızca mühendislik temelli bir süreç olmadığını, teknik, çevresel, sosyal ve ekonomik boyutların birlikte ele alınması gereken çok katmanlı bir karar verme problemi olduğunu göstermektedir. AHP-CBS entegrasyonu, bu çok boyutlu yapıyı sayısal ve mekânsal temele oturtarak kentsel ulaşım planlamasının karmaşık karar verme süreçlerine bilimsel, sistematik ve mekânsal bir çerçeve sunmuştur. Elde edilen bulgular, yöntemin hem mevcut hatların değerlendirilmesinde hem de yeni güzergâhların geliştirilmesinde güçlü ve tekrarlanabilir bir araç sunduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilir kentsel ulaşım hedefleri doğrultusunda yapılacak raylı sistem yatırımlarının rasyonel ve bütüncül temellere dayandırılmasına katkı sunmaktadır. İstanbul özelinde geliştirilen model, benzer kentsel karmaşıklığa sahip diğer dünya metropolleri için de uyarlanabilir ve ölçeklendirilebilir bir altyapı çerçevesi sunmaktadır.

KAYNAKÇA

Abu-Aisha, T., Audy, J. F., & Ouhimmou, M. (2024). Toward an efficient sea-rail intermodal transportation system: A systematic literature review. *Journal of Shipping and Trade 2024 9:1*, *9*(1), 23. https://doi.org/10.1186/S41072-024-00182-Z

Akkaya, D., & Kızıltaş, Ç. (2023). Ulaştırmanın Kentleşme Üzerine Etkisinin Kent İçi Ulaştırmada Türel Dağılıma Göre Analiz Edilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (50), 190-197. https://doi.org/10.31590/EJOSAT.1074796

Altuntaş, S., & Eyigün, Y. (2021). Sürdürülebilir Kent İçi Ulaşım Politikaları Raylı Sistemler Örneği. *Istanbul Commerce University Journal of Tecnologies and Applied Sciences*, *3*(2), 217-233. https://dergipark.org.tr/en/pub/icujtas/article/885193

Alyami, H. A. M., Alqadhi, S., & Mallick, J. (2025). Multicriteria decision-making for optimized road network planning in challenging landscapes: a Saudi Arabian case study. *Frontiers in Engineering and Built Environment*, *5*(4), 300-314. https://doi.org/10.1108/FEBE-02-2025-0012

Anastasiadou, K., & Gavanas, N. (2025). Evaluation and Selection of Public Transportation Projects in Terms of Urban Sustainability Through a Multi-Criteria Decision-Support Methodology. *Future Transportation 2025*, *5*(3), 90. https://doi.org/10.3390/FUTURETRANSP5030090

Anastasiadou, K., & Kehagia, F. (2025). Road Safety Improvement and Sustainable Urban Mobility: Identification and Prioritization of Factors and Policies Through a Multi-Criteria Approach. *Urban Science 2025*, *9*(4), 93. https://doi.org/10.3390/URBANSCI9040093

Aquilué Junyent, I., Martí Casanovas, M., Roukouni, A., Moreno Sanz, J., Roca Blanch, E., & Correia, G. H. de A. (2024). Planning shared mobility hubs in European cities: A methodological framework using MCDA and GIS applied to Barcelona. *Sustainable Cities and Society*, *106*, 105377. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2024.105377

Arampatzis, G., Kiranoudis, C. T., Scaloubacas, P., & Assimacopoulos, D. (2004). A GIS-based decision support system for planning urban transportation policies. *European Journal of Operational Research*, *152*(2), 465-475. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00037-7

Arıkan, Y., Akkaş, Ö. P., & Çam, E. (2024). Raylı Sistemlerde Enerji Verimliliğinin Sağlanmasına Yönelik Kapsamlı Bir Araştırma. *Geliştirme Dergisi International Journal of Engineering Research and Development UMAGD*, *16*(1), 30-46. https://doi.org/10.29137/umagd.1347640

Aslan, S., & Aydar, U. (2022). Çanakkale İli Merkez İlçesinin Otopark Sorununun Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile Analizi ve Çözüm Önerileri. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, *4*(1), 34-46. https://doi.org/10.56130/TUCBIS.1040112

Banai, R. (2006). Public Transportation Decision-Making: A Case Analysis of the Memphis Light Rail Corridor and Route Selection with Analytic Hierarchy Process. *Journal of Public Transportation*, *9*(2), 1-24. https://doi.org/10.5038/2375-0901.9.2.1

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, *15*(2), 73-80. https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2007.10.005

Basrawi, M., & Şenbil, M. (2025). Istanbul Rail Transit Ridership Changes: The Impact of Station Characteristics and Network Growth (2013-2023). *Thinking of Urban Decoding Journal (TUDEJ)*, *2*(1), 65-87. https://doi.org/10.69992/0.2025.11

Bocarejo S., J. P., & Oviedo H., D. R. (2012). Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments. *Journal of Transport Geography*, *24*, 142-154. https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2011.12.004

Brunner, I. M., Kim, K., & Yamashita, E. (2011). Analytic hierarchy process and geographic information systems to identify optimal transit alignments. *Transportation Research Record*, (2215), 59-66. https://doi.org/10.3141/2215-06

BS EN 13803:2017. (2017). *Railway applications - Track - Track alignment design parameters - Track gauges 1 435 mm and wider*.

Calderón-Ramírez, J., Gutiérrez-Moreno, M., Mungaray-Moctezuma, A., Sánchez-Atondo, A., García-Gómez, L., Montoya-Alcaraz, M., & Núñez-López, I. (2025). Spatial Analysis of Public Transport and Urban Mobility in Mexicali, B.C., Mexico: Towards Sustainable Solutions in Developing Cities. *Sustainability 2025*, *17*(17), 7802. https://doi.org/10.3390/SU17177802

Canitez, F., Alpkokin, P., & Kiremitci, S. T. (2020). Sustainable urban mobility in Istanbul: Challenges and prospects. *Case Studies on Transport Policy*, *8*(4), 1148-1157. https://doi.org/10.1016/J.CSTP.2020.07.005

Carpentieri, G., Zucaro, F., Guida, C., & Granata, L. (2019). GIS-Based Spatial Analysis for the Integrated Transport-Land Use-Energy Planning: An Application to the Greater London. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, *13*(11), 663-675. https://doi.org/10.17265/1934-7359/2019.11.001

Cervero, R., & Guerra, E. (2011). *UC Berkeley Recent Work Title Urban Densities and Transit: A Multi-dimensional Perspective Urban Densities and Transit: A Multi-dimensional Perspective*. https://escholarship.org/uc/item/3mb598qr

Cervero, R., & Murakami, J. (2009). Rail and property development in Hong Kong: Experiences and extensions. *Urban Studies*, *46*(10), 2019-2043. https://doi.org/10.1177/0042098009339431

Chen, F., Shen, X., Wang, Z., & Yang, Y. (2017). An Evaluation of the Low-Carbon Effects of Urban Rail Based on Mode Shifts. *Sustainability*, *9*(3), 401. https://doi.org/10.3390/SU9030401

Chen, F., & Wu, Z. (2013). Comprehensive evaluation for urban public transport network based on TOPSIS. *Applied Mechanics and Materials*, *361-363*, 1998-2001. https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.361-363.1998

Chintakayala, L. S., & Prasad, C. S. R. K. (2025). Quantifying suitability of transit-oriented development in Indian cities. *Innovative Infrastructure Solutions*, *10*(7), 271. https://doi.org/10.1007/S41062-025-02079-7

Cirit, F. (2014). *Sürdürülebilir Kent İçi Ulaşım Politikaları ve Toplu Taşıma Sistemlerinin Karşılaştırılması, Uzmanlık Tezi*. T.C Kalkınma Bakanlığı, İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Ankara.

Creutzig, F., Niamir, L., Bai, X., Cullen, J., Díaz-José, J., Figueroa, M., Grübler, A., Lamb, W., Leip, A., Masanet, E., Mata, E., Mattauch, L., Minx, J., Mirasgedis, S., Mulugetta, Y., Nugroho, S., Pathak, M., Perkins, P., Roy, J., … Ürge-Vorsatz, D. (2021). Demand-side solutions to climate change mitigation consistent with high levels of wellbeing. *Nature Climate Change*, *12*, 36-46. https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-127928/V1

Çalışkan, B., & Atahan, A. O. (2023). Cartographic Modelling and Multi-Criteria Analysis (CMCA) for Rail Transit Suitability. *Urban Rail Transit*, *9*(1), 1-18. https://doi.org/10.1007/S40864-023-00186-1/FIGURES/12

Çancı, M., & Önden, İ. (2015). *İstanbul'da Deniz Ulaşımının Geleceğinin Değerlendirilmesi*.

Çetin, A., & Ilicali, M. (2022). İstanbul Metrobüs Toplu Taşıma Sisteminde Kullanılan Otobüs Tipinin İstasyonlarda Bekleme Sürelerine Etkisinin İncelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *21*(41), 30-54. https://doi.org/10.55071/TICARETFBD.981138

Davila, J. D. (2013). *Urban Mobility and Poverty: Lessons from Medilllin and Soacha* (J. D. Davila, Ed.). Development Planning Unit, UCL and Universidad Nacional de Colombia. https://www.bartlett.ucl.ac.uk/dpu/metrocables/book/Davila_2013_UrbanMobility_Poverty_Eng.pdf

de Alba-Martínez, H., Grindlay, A. L., & Ochoa-Covarrubias, G. (2020). (In)Equitable Accessibility to Sustainable Transport from Universities in the Guadalajara Metropolitan Area, Mexico. *Sustainability 2021*, *13*(1), 55. https://doi.org/10.3390/SU13010055

De Luca, M., Dell'Acqua, G., & Lamberti, R. (2012). High-Speed Rail Track Design Using GIS And Multi-Criteria Analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *54*, 608-617. https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2012.09.778

De Luca, S. (2014). Public engagement in strategic transportation planning: An analytic hierarchy process based approach. *Transport Policy*, *33*, 110-124. https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2014.03.002

de Moura, R. A. V., Delgado, J. P. M., De Freitas Dourado, A. B., & de Andrade, M. O. (2024). Exploring the modal integration of bike-sharing and urban rail transit: Multi-Criteria Evaluation in GIS for the city of Salvador (Bahia – Brazil). *Case Studies on Transport Policy*, *16*, 101182. https://doi.org/10.1016/J.CSTP.2024.101182

Deluka-Tibljaš, A., Karleuša, B., Šurdonja, S., & Dragičević, N. (2014). Use of AHP multi-criteria method for transportation infrastructure planning. *International Scientific Conference People, Buildings and Environment 2014, an international scientific conference, Kroměříž, Czech Republic*, 123-134. https://www.fce.vutbr.cz/ekr/PBE/Proceedings/2014/011_14103.pdf

Demir, A. (2025). *ESAM Sorunlar, Politikalar ve Stratejik Yaklaşımların Değerlendirilmesi İstanbul Ulaşımına Bütüncül Yaklaşım*. www.esamistanbul.org

Demirtaş, E. A., & Acar, R. (2020). Performance Evaluation of Istanbul Metrobus System Through Data Envelopment Analysis. *Transportation in Developing Economies 2020*, *6*(2), 1-11. https://doi.org/10.1007/S40890-020-00107-Y

Djouani, I., Dehimi, S., & Redjem, A. (2022). Evaluation Of The Efficiency And Quality Of The Tram Route Of Setif City, Algeria: Combınıng Ahp And GIS Approaches. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic SASA*, *72*(1), 85-102. https://doi.org/10.2298/IJGI2201085D

Doğan, K., & Doğan, M. (2020). İstanbul'da Yerleşme - Ulaşım İlişkisine Coğrafi Bakış. *Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi*, *3*(2), 320-344. https://doi.org/10.33712/MANA.763498

Eldeeb, G., Elmitiny, N., & Darwish, G. (2015). Developing Transit Suitability Map Using GIS and Analytical Hierarchy Process. *Journal of Intelligent Transportation and Urban Planning*, *3*(4), 108-115. https://doi.org/10.18005/ITUP0304001

Erdem, M., Özdemir, A., Kosunalp, S., & Iliev, T. (2025). Assessment of Sustainability and Risk Indicators in an Urban Logistics Network Analysis Considering a Business Continuity Plan. *Applied Sciences 2025*, *15*(9), 5145. https://doi.org/10.3390/APP15095145

Eren, T., Hamurcu, M., & Dinç, S. (2018). Kentsel Ulaşım İçin Alternatif Tramvay Araçlarının Çok Kriterli Seçimi. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, *4*(2), 124-135. https://doi.org/10.30855/gmbd.2018.04.02.007

European Environment Agency. (2021). *Rail and waterborne - best for low-carbon motorised transport*. European Environment Agency (EEA). https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/rail-and-waterborne-best-for-low-carbon-motorised-transport

European Environment Agency. (2023). *TERM 2022: Transport and Environment Reporting Mechanism*. European Environment Agency (EEA). https://doi.org/10.2800/619886

Farkas, A. (2009). An Intelligent GIS-Based Route/Site Selection Plan of a Metro-Rail Network. *Studies in Computational Intelligence*, *243*, 719-734. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03737-5_51

Farooq, A., Xie, M., Stoilova, S., & Ahmad, F. (2019). Multicriteria Evaluation of Transport Plan for High-Speed Rail: An Application to Beijing-Xiongan. *Mathematical Problems in Engineering*, *2019*(1), 8319432. https://doi.org/10.1155/2019/8319432

Farooq, A., Xie, M., Stoilova, S., Ahmad, F., Guo, M., Williams, E. J., Gahlot, V. K., Yan, D., & Issa, A. M. (2018). Transportation planning through GIS and multicriteria analysis: Case study of Beijing and XiongAn. *Journal of Advanced Transportation*, *2018*(1), 2696037. https://doi.org/10.1155/2018/2696037

Fernanda, M., & Ávalos, N. (2022). *Integrating Sustainable Criteria Through an AHP-GIS Method to Allocate Mobility Hubs Using Open Data Sources, Study Project,*. TUM School of Engineering and Design, Technical University of Munich, Munich, Germany.

Galdiani, M. A., Mohit, M. A., & Mosayebi, S. A. (2022). Investigation and Prioritization of Railway Reconstruction Projects by Using Analytic Hierarchy Process Approach Case Study: Kerman and Southeastern Areas in Iranian Railways. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *66*(3), 671-680. https://doi.org/10.3311/PPCI.19543

Gerçek, H., Karpak, B., & Kılınçaslan, T. (2004). A multiple criteria approach for the evaluation of the rail transit networks in Istanbul. *Transportation*, *31*(2), 203-228. https://doi.org/10.1023/B:PORT.0000016572.41816.D2/METRICS

Ghorbanzadeh, O., Moslem, S., Blaschke, T., & Duleba, S. (2018). Sustainable Urban Transport Planning Considering Different Stakeholder Groups by an Interval-AHP Decision Support Model. *Sustainability 2019*, *11*(1), 9. https://doi.org/10.3390/SU11010009

Givoni, M., & Banister, D. (2010). *Integrated Transport From Policy To Practice*. Routledge Taylor & Francis Group, London and New York. https://doi.org/10.4324/9780203850886

Gok, U., Andic, C., Aydin, E., & Turkay, B. (2024). Energy Optimization in Metro Line by Using Regenerative Energy. *HORA 2024 - 6th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE)*, 1-4. https://doi.org/10.1109/HORA61326.2024.10550498

Gomeju, T. (2016). *Accessibility and Suitability Analysis of Light Rail Station Location by using (AHP) and GIS: Case study on Existing and Future Expansion of Addis Ababa LRT Respectively, Master of Science Thesis* [Addis Ababa University, Addis Ababa Institute Of Technology School of Civil And Enviromental Engineering]. http://etd.aau.edu.et/handle/123456789/15449

Gössling, S., & Choi, A. S. (2015). Transport transitions in Copenhagen: Comparing the cost of cars and bicycles. *Ecological Economics*, *113*, 106-113. https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2015.03.006

Guerra, E. (2014). Mexico City's suburban land use and transit connection: The effects of the Line B Metro expansion. *Transport Policy*, *32*, 105-114. https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2013.12.011

Guler, H., Akad, M., & Ergun, M. (2004). Railway Asset Management System in Turkey: A GIS Application. *FIG Working Week 2004, Athens, Greece*, 1-11.

Guo, S., & Chen, L. (2019). Can urban rail transit systems alleviate air pollution? Empirical evidence from Beijing. *Growth and Change, 50*(1), 130-144. https://doi.org/10.1111/GROW.12266

Gwilliam, K. (2003). Urban transport in developing countries. *Transport Reviews, 23*(2), 197-216. https://doi.org/10.1080/01441640309893

Halder, B. (2025). Remote Sensing-based optimal electric vehicle charging station identification in Kolkata urban agglomeration. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 139*, 104580. https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104580

Hamurcu, M., & Eren, T. (2015). Ankara Büyükşehir Belediyesi'nde Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi İle Monoray Güzergâh Seçimi. *Transit 8. Uluslararası Ulaşım Teknolojileri Sempozyumu ve Fuarı, İstanbul, Türkiye*. https://www.researchgate.net/publication/313859776

Hamurcu, M., & Eren, T. (2018). Transportation planning with analytic hierarchy process and goal programming. *International Advanced Researches and Engineering Journal, 2*(2), 92-97. https://dergipark.org.tr/en/pub/iarej/issue/38845/402522

Hayashi, Y., Mai, X., & Kato, H. (2011). The Role of Rail Transport for Sustainable Urban Transport. Içinde W. Rothengatter, Y. Hayashi, & W. Schade (Ed.), *Transport Moving to Climate Intelligence: New Chances for Controlling Climate Impacts of Transport after the Economic Crisis* (ss. 161-174). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7643-7_11

İBB. (2022). *İstanbul Ulaşım ve Hareketlilik Raporu*.

İBB. (2025). *İBB Faaliyet Raporu 2024*.

İBB Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı, & Akıllı Şehir Şube Müdürlüğü. (2021). *2030 İstanbul Akıllı Şehir Stratejik Planı*.

İBB Çevre Koruma ve Kontrol Başkanlığı. (2021). *İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı*.

İBB Çevre Koruma ve Kontrol Başkanlığı. (2023a). *İklim Değişikliği İzleme Raporu 2023*.

İBB Çevre Koruma ve Kontrol Başkanlığı. (2023b). *İstanbul Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı*.

İBB Şehir Hatları. (2025). *İBB Şehir Hatları Sefer Haritası*. https://sehirhatlari.istanbul/tr. https://files.sehirhatlari.istanbul/Sefer-Haritasi-Line-Map.pdf

İBB Şehir Planlama Müdürlüğü. (2018). *İstanbul Arazi Kullanımı*. https://sehirplanlama.ibb.istanbul/istanbul-arazi-kullanimi/

İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı. (2011). *İstanbul Metropoliten Alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı (İUAP)*.

İBB Ulaşım Dairesi Başkanlığı. (2023). *İstanbul Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı, SKHP, İBB*. www.arup.com

İETT. (t.y.). *İETT Tarihçe*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri Genel Müdürlüğü. Geliş tarihi 02 Kasım 2025, gönderen https://iett.istanbul/icerik/kisa-tarihce

İETT. (2014). *Toplu Ulaşımda Modlar Arası Entegrasyon Vizyonu*.

İETT. (2024a). *İETT 2024 Faaliyet Raporu*.

İETT. (2024b). *Sürdürülebilirlik Raporu (2022-2024)*.

Ilicali, M., Catbas, N., Kiziltas, M., & Ongel, A. (2014). Multimodal Transportation Issues in Istanbul: A Case Study for Traffic Redistribution Due to Long Span Bridge Rehabilitation. *Advanced Materials Research, 831*, 413-417. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.831.413

İlsever, C., & Cılız, A. B. (2024). Organik Ulaşım Stratejisi Bağlamında İstanbul'da Deniz Yolu Toplu Taşımacılığının Geliştirilmesi. *Aurum Sosyal Bilimler Dergisi, 9*(1), 63-93. https://doi.org/10.62393/AURUM.1470990

İlsever, C., & Üstündağ, K. İ. (2024). Kent İçi Deniz Yolu Toplu Taşımacılığının Entegrasyona Dayalı Olarak Geliştirilmesi: İstanbul - Bostancı Vapur İskelesi Çevresi Saha Çalışması. *Kent Akademisi, 17*(5), 1759-1785. https://doi.org/10.35674/KENT.1491705

Inan, A., & Kara, H. (2022). Urban Railway System Route Selection in Turkey Based on Socio-Economic and Technical Criteria Using the Analytical Hierarchy Process. *Transportation Research Record, 2676*(10), 633-644. https://doi.org/10.1177/03611981221090513

İncirli, N., & EKMEKÇİ, İ. (2021). Determining the Location of The Urban Transport Interchanges Based on the Geographic Information System: the Case Study for Istanbul. *Journal of Polytechnic, 24*(3), 1121-1128. https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.780055

INRIX. (2024). *Global Traffic Scorecard*. INRIX (Leading Transportation Analytics Solutions), Bellevue, Washington, ABD. https://inrix.com/scorecard/

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.). (2023). Transport. Içinde *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ss. 1049-1160). Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926.012

International Energy Agency (IEA). (t.y.). *Rail - IEA*. International Energy Agency (IEA), Paris, France. Geliş tarihi 22 Aralık 2025, gönderen https://www.iea.org/energy-system/transport/rail

International Energy Agency (IEA). (2019). *The Future of Rail Opportunities for energy and the environment*. www.iea.org/t&c/

International Energy Agency (IEA). (2021). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. www.iea.org/t&c/

İPA. (2023). *İstanbul'da Sürdürülebilir Ulaşıma Doğru Kasım 2023* (İstanbul Planlama Ajansı (İPA), Ed.). İstanbul Büyükşehir Belediyesi Kültür AŞ.

İPA. (2024). *İPA Vizyon 2050 İzinde İstanbul'da Sürdürülebilir Ulaşımın İnşası*.

İsçan, S., Ünver, Ü., & Güneş, T. (2022). Energy management system for Istanbul urban electric transportation systems: Proposition and evaluation of performance tracking system for traction electric consumption. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *37*(2), 889-905. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.786144

Ishizaka, A., & Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, *38*(11), 14336-14345. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2011.04.143

İSTKA. (2023). *2024-2028 İstanbul Bölge Planı (TR10 Düzey-2 Bölgesi)*.

Jing, Q. L., Liu, H. Z., Yu, W. Q., & He, X. (2022). The Impact of Public Transportation on Carbon Emissions—From the Perspective of Energy Consumption. *Sustainability 2022*, *14*(10), 6248. https://doi.org/10.3390/SU14106248

Jun, M. J., & Yun, M. Y. (2023). Station-Level Effects of the COVID-19 Pandemic on Subway Ridership in the Seoul Metropolitan Area. *Transportation Research Record*, *2677*(4), 802-812. https://doi.org/10.1177/03611981221096665

Karakoç, E. (2015). Cumhuriyet Döneminde İstanbul'da Ulaşım. Içinde *Büyük İstanbul Tarihi* (C. 6). İslam Araştırmaları Merkezi (İSAM). https://istanbultarihi.ist/226-cumhuriyet-doneminde-istanbulda-ulasim

Kaya, F., Özkan, P., & Akar, O. (2025). Comparative Performance Analysis of Algorithm Applications Used in Determining EVFCS Locations. *The Black Sea Journal of Sciences*, *15*(3), 1306-1324. https://doi.org/10.31466/KFBD.1699614

Kaymakçi, Ö. T., Yakin, İ., & Söylemez, M. T. (2023). Demiryolu Sinyalizasyon Sistemi İçin Hibrit Bir RAMS Değerlendirme Yöntemi. *Araştırma Makalesi Research Article Demiryolu Mühendisliği*, (17), 145-160. https://doi.org/10.47072/demiryolu.1216606

Kenworthy, J. (2008). An International Review of The Significance of Rail in Developing More Sustainable Urban Transport Systems in Higher Income Cities. *World Transport Policy & Practice*, *14*(2), 21-37. https://www.gtkp.com/knowledge/an-international-review-of-the-significance-of-rail-in-developing-more-sustainable-urban-transport-systems-in-higher-income-cities/

Khakbazan, M., Ezati, A., & Ahadi, H. (2025). Prioritizing Metro System Development for Sustainable Urban Transport in Metropolitan Areas in Iran: A Multi-Criteria Approach. *Applied Innovations in Industrial Management* , *5*(1), 42-61. https://doi.org/10.63630/AIIM.51.42

Kırlangıçoğlu, C. (2014). *Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Raylı Sistem Güzergah Tasarımı: İstanbul Örneği, Doktora Tezi* [T.C. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Coğrafya Anabilim Dalı, İstanbul]. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2532.4641

Kiciński, M., & Solecka, K. (2018). Application of MCDA/MCDM methods for an integrated urban public transportation system – case study, city of Cracow.

Archives of Transport, *46*(2), 71-84. https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.2107

Kriswardhana, W., Toaza, B., Esztergár-Kiss, D., & Duleba, S. (2025). Analytic hierarchy process in transportation decision-making: A two-staged review on the themes and trends of two decades. *Expert Systems with Applications*, *261*, 125491. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2024.125491

Lanzini, P., Panjako, A., & Stocchetti, A. (2022). Identifying Travel Demand Priorities in Maritime Transport A Behavioural Approach. Içinde *Priorities for the Sustainability of Maritime and Coastal Passenger Transport in Europe* (ss. 47-63). Edizioni Ca' Foscari. https://doi.org/10.30687/978-88-6969-617-6/003

Li, S., Wu, J., Jiang, Y., & Yang, X. (2024). Impacts of the sea-rail intermodal transport policy on carbon emission reduction: The China case study. *Transport Policy*, *158*, 211-223. https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2024.09.019

Litman, T. (2018). *Evaluating Public Transit Criticism: Systematic Analysis of Political Attacks on High Quality Transit, and How Transportation Professionals Can Effectively Respond*. www.vtpi.orgInfo@vtpi.org

Litman, T. (2022). Evaluating Transportation Equity: Guidance for Incorporating Distributional Impacts in Transport Planning. Içinde *ITE Journal*. https://www.vtpi.org/equity.pdf

Litman, T. (2023). Land Use Impact Costs of Transportation. *World Transport Policy & Practice*, *1*(4), 9-16. www.vtpi.org

Liu, C. Y., & Zhao, J. Z. (2023). Transit Investment and Income Inequality in U.S. Metropolitan Areas. *Journal of Planning Education and Research*, *45*(3), 487-499. https://doi.org/10.1177/0739456X231209498

Liu, Z., Xia, H., & Zhang, T. (2024). A review of research methods on the coupling relationship between urban rail transit and urban space: revealing spatiotemporal relationships through big data. *International Journal of Digital Earth*, *17*(1), 2339363. https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2339363

Loo, B. P. Y., & du Verle, F. (2017). Transit-oriented development in future cities: towards a two-level sustainable mobility strategy. *International Journal of Urban Sciences*, *21*(sub1), 54-67. https://doi.org/10.1080/12265934.2016.1235488

López, E., & Monzón, A. (2010). Integration of Sustainability Issues in Strategic Transportation Planning: A Multi-criteria Model for the Assessment of Transport Infrastructure Plans. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, *25*(6), 440-451. https://doi.org/10.1111/J.1467-8667.2010.00652.X

Luo, Z. (2024). *Localization of the High-Speed Rail: The Case of Hanzhong-Bazhong HSR, Master of Science Thesis* [KTH Royal Institute of Technology]. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-350145

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(7), 703-726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508

Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science* (C. 1). Springer Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4

Malczewski, Jacek. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. Içinde *GIS and multicriteria decision analysis* (C. 18, 4.2.1). J. Wiley & Sons. https://books.google.com/books/about/GIS_and_Multicriteria_Decision_Analysis.html?hl=tr&id=2Zd54x4_2Z8C

Mazzei, M., & Michelotti, C. (2025). Smart Data and Decision Support System for Local Optimization of Electric Charging Stations. *IEEE Access*, *13*, 124910-124931. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3586099

Metro İstanbul. (2023). *Metro İstanbul Sürdürülebilirlik Raporu 2023*. https://www.metro.istanbul/Dosyalar/efqm/surdurebilirlik_raporu2023.pdf

Metro İstanbul. (2024a). *2024 Metro Istanbul Faaliyet Raporu*.

Metro İstanbul. (2024b). *Yıllara Göre Genel Toplam Yolcu Sayıları*.

Metro İstanbul. (2025a). *İstanbul Raylı Sistemler Ağ Haritaları*. https://www.metro.istanbul/yolcuhizmetleri/agharitalari

Metro İstanbul. (2025b). *Üsküdar-Samandıra Metro Hattı*. https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz/HatDetay?hat=M5

Mohan, S., Munoth, N., & Sharma, N. (2025). Smart buildings and cities with remote sensing and GIS. Içinde S. Mohan, N. Munoth, & N. Sharma (Ed.), *Smart Buildings and Cities with Remote Sensing and GIS* (1st bs). Chapman and Hall/CRC Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003453321

Mosadeghi, R., Warnken, J., Tomlinson, R., & Mirfenderesk, H. (2015). Comparison of Fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, *49*, 54-65. https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2014.10.001

Naryaprağı Gülalan, S., Ernst, F. B., & Karabulut, A. İ. (2025). Future Modeling of Urban Growth Using Geographical Information Systems and SLEUTH Method: The Case of Sanliurfa. *Sustainability*, *17*(15), 6833. https://doi.org/10.3390/SU17156833/S1

Newman, P., & Kenworthy, J. (2015). The end of automobile dependence: How cities are moving beyond car-based planning. Içinde *The End of Automobile Dependence: How Cities Are Moving Beyond Car-Based Planning* (1. bs). Island Press-Center for Resource Economics, Washington DC. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-613-4

Nguyen-Phuoc, D. Q., Currie, G., De Gruyter, C., & Young, W. (2018). Congestion relief and public transport: An enhanced method using disaggregate mode shift evidence. *Case Studies on Transport Policy*, *6*(4), 518-528. https://doi.org/10.1016/J.CSTP.2018.06.012

Nieuwenhuijsen, M. J. (2021). New urban models for more sustainable, liveable and healthier cities post covid19; reducing air pollution, noise and heat island effects and increasing green space and physical activity. *Environment International*, *157*, 106850. https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2021.106850

Nsaif, B. S., Hassan, N. D., & Hasan, Q. F. (2023). Synergizing Geographic Information Systems (GIS) And Multicriteria Decision Making Analysis (MCDA) For Public Transit Network Optimization: A Review. *Scholar's Digest- Journal Of Multidisciplinary Studies*, *2*(12), 1-20. https://scholarsdigest.org/index.php/sdjms/article/view/520

Nüfusu. (2024). *İstanbul İlçeleri Nüfusu*. https://www.nufusu.com/ilceleri/istanbul-ilceleri-nufusu

Ocak, İ., & Manisalı, E. (2006). Kentsel Raylı Taşıma Üzerine Bir İnceleme (İstanbul Örneği). *Sakarya University Journal of Science*, *10*(2), 51-59. https://dergipark.org.tr/en/pub/saufenbilder/article/220719

OECD. (2019). *ITF Transport Outlook 2019*. https://doi.org/https://doi.org/10.1787/transp_outlook-en-2019-en.

Orman, A., Düzkaya, H., Ulvi, H., & Akdemir, F. (2018). Multi-Criteria Evaluation by Means of Using the Analytic Hierarchy Process in Transportation Master Plans: Scenario Selection in the Transportation Master Plan of Ankara. *Gazi University Journal of Science*, *31*(2), 381-397. https://dergipark.org.tr/en/pub/gujs/issue/37206/384573

Oswald Beiler, M. R., & Treat, C. (2015). Integrating GIS and AHP to Prioritize Transportation Infrastructure Using Sustainability Metrics. *Journal of Infrastructure Systems*, *21*(3), 04014053. https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000245

Ozcelik, M. (2023). The Benefits of Uncertainty and Risk Assessment Studies on the M5 Metro Line (Istanbul-Turkey). *Kocaeli Journal of Science and Engineering (KOJOSE)*, *6*(1), 13-25. https://doi.org/10.34088/kojose.1051138

Önden, İ., & Çakmak, E. (2020). İstanbul'un Arazi Kullanım Değişimi Ve Metro Ağı Kapsama Alanlarına Yönelik Mekansal Analizler. *Beykoz Akademi Dergisi*, *8*(2), 328-340. https://doi.org/10.14514/BYK.M.26515393.2020.8/2.328-340

Özarpa, C., Kınacı, F. B., & Avcı, İ. (2021). Kent İçi Akıllı Ulaşımda Karma Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile Yeni Hat Kurulumunun Belirlenmesi. *Kent Akademisi*, *14*(4), 995-1006. https://doi.org/10.35674/KENT.977741

Özceylan, E., Erbaş, M., Çetinkaya, C., & Kabak, M. (2021). Analysis of Potential High-Speed Rail Routes: A Case of GIS-Based Multicriteria Evaluation in Turkey. *Journal of Urban Planning and Development*, *147*(2), 04021012. https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000674

Özdemir, A., & Özdemir, A. (2018). Toplu Taşıma Güzergahlarının Belirlenmesinde CBS Olanaklarının Kullanılabilirliği. *VII. UZAL-CBS 2018 Sempozyumu, Eskişehir*, 153-159. https://doi.org/10.15659/uzalcbs2018.6186

Özer, D., & Kocaman, S. (2008). İstanbul'un kentiçi ulaşımı: Mevcut durum, sorunlar ve öneriler. *Civilacademy Sosyal Bilimler Dergisi*, *6*(3), 77-89. https://search.trdizin.gov.tr/en/yayin/detay/103043

Öztaşkın, D., & Levend, S. (2023). The Accessibility of Public Transportation Stops: Istanbul Case. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, *4*(2), 301-318. https://doi.org/10.48123/RSGIS.1299707

Papa, E., & Bertolini, L. (2015). Accessibility and Transit-Oriented Development in European metropolitan areas. *Journal of Transport Geography*, *47*, 70-83. https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2015.07.003

Peng, R., Ding, K., Liu, X., Yao, K., Zhou, X., & Zhang, W. (2025). Unlocking urban transportation carbon reduction potential: a dynamic evaluation of public transit adoption in response to carbon-centric policies. *Frontiers in Environmental Science*, *13*, 1540620. https://doi.org/10.3389/FENVS.2025.1540620/FULL

Pratas, J., Garrido, S., & Pimentel, C. (2023). Sustainable Inland Waterway Transportation Systems: Framework Proposal. *European Journal of Sustainable Development*, *12*(4), 40. https://doi.org/10.14207/EJSD.2023.V12N4P40

Pulido, Daniel., Darido, G. Bianco., Munoz-Raskin, Ramon., & Moody, Joanna. (2018). *The Urban Rail Development Handbook: 1 (130474)* (1. bs). World Bank Group, Washington DC. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1272-9

Raharjo, D. S., & Hartati, S. (2017). Determining the priority of transport station construction site using AHP methods. *Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, *1*(2), 109-118. https://doi.org/https://jeecs.ubhara.ac.id/index.php/JeecsV1N2/article/download/38/29

Raspati, G., Sari, K. E., & Meidiana, C. (2025). Penentuan Alternatif Reduksi Emisi Gas CO2 dari Sektor Transportasi di Kota Bandung. *Journal of Urban and Regional Planning Society*, *1*(03), 77-84. https://jurpas.ub.ac.id/index.php/jurpas/article/view/40

Rodrigue, J. P. (2020). The Geography of Transport Systems - Fifth Edition. Içinde *The Geography of Transport Systems* (5. bs). Routledge, Taylor and Francis, London. https://doi.org/10.4324/9780429346323

Rodrigue, J. P. (2024). The geography of transport systems - Sixth Edition. Içinde *The Geography of Transport Systems* (6. bs). Routledge, Taylor and Francis, London. https://doi.org/10.4324/9781003343196

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, *48*(1), 9-26. https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I

Saaty, T. L. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*, *145*(1), 85-91. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, *1*(1), 83-98.

Saaty, T., & Vargas, L. (2012). Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. Içinde *Springer* (2. bs, C. 175). Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6

Sachs, C., Azevedo, A. L., Dahle, M., & Henriksen, E. S. (2021). Shaping smart intermodality between waterborne and landside transport in the coastal city of stavanger. *2021 IEEE European Technology and Engineering Management*

Summit, E-TEMS 2021 - Conference Proceedings, 52-58. https://doi.org/10.1109/E-TEMS51171.2021.9524894

Saygılı, R. (2018). *Türkiye Siyasi Haritası*. http://cografyaharita.com/turkiye_interaktif_haritalari.html

Scholl, L., Fook, A., Rebolledo, J. D. B., Rivas, M. E., Montes, L., Montoya, V., Pedraza, L., Noboa, N., Sandoval, D., Lee, S., Porcel, M. R., Bocarejo, J. P., Tovar, E. V., Urrego, L. F., Moreno, J. P., Bertucci, J. P., Oviedo, D., Sabogal-Cardona, O., Serebrisky, T., & Mojica, C. (2022). Transport for Inclusive Development: Defining a Path for Latin America and the Caribbean. Içinde *Transport for Inclusive Development: Defining a Path for Latin America and the Caribbean*. Inter-American Development Bank. https://doi.org/10.18235/0004335

Schrank, David, Eisele, Bill, Lomax, Tim, Bak, & Jim. (2019). *Urban Mobility Report 2019*. https://doi.org/10.21949/1503647

Seoul Metropolitan Government. (2024). *The Statistic of Seoul*. Seoul Solution. https://www.seoulsolution.kr/en/content/statistic-seoul

Seymen, C. (2023). *İstanbul'un ekonomi serüveni*. İstanbul Dergi. https://www.istdergi.com/guncel/istanbulun-ekonomi-seruveni

Sims, R. E. H., Schaeffer, R., Creutzig, F., & Cruz-Núñez, X. (2014). Transport. Içinde *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* (ss. 599-670). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/transport/

Singh, M. P., Singh, P., & Singh, P. (2019). Fuzzy AHP-based multi-criteria decision-making analysis for route alignment planning using geographic information system (GIS). *Journal of Geographical Systems*, *21*(3), 395-432. https://doi.org/10.1007/S10109-019-00296-0

Singh, M. P., Singh, P., & Singh, P. (2024). Multi-criteria Decision Analysis for Route Alignment Planning Using Geographical Information System (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHP). *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*, *12*(1), 2450006. https://doi.org/10.1142/S2345748124500064

Smit, R., & Boulter, P. G. (2024). Impacts of mode shift on well-to-wheel emissions from inter-capital transport in Australia-Part I: Road and rail transport. *Explora Environment and Resource*, *1*(1), 3470. https://doi.org/10.36922/eer.3470

Song, T., Pu, H., Schonfeld, P., Zhang, H., Li, W., Peng, X., Hu, J., & Liu, W. (2021). GIS-based multi-criteria railway design with spatial environmental considerations. *Applied Geography*, *131*, 102449. https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2021.102449

Sotoudeh, A., Darvishsefat, A., & Makhdoum, M. (2004). Environmental consideration in railway route selection with GIS (Case study: Rasht-Anzali railway in Iran). *Map Asia Conference 2004, Beijing, China*. https://www.researchgate.net/publication/255030268

Söderholm, P., & Nyström, B. (2009). The analytic hierarchy process (AHP) for decision-making and expert judgement in railway infrastructure maintenance. *19th International Rail Safety Conference (IRSC), Båstad, Sweden*. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-30535

Statistics Bureau of Japan. (2025). *Statistical Handbook Of Japan*. https://www.stat.go.jp/english/data/handbook/index.html

Sun, J., & Le, V. V. (2024). Analysis of Low-Carbon, Energy-Saving, and Emission Reduction Models Based on Rail Transit. *International Journal of Information System Modeling and Design*, *15*(1), 1-13. https://doi.org/10.4018/IJISMD.355708

Suvish, S. (2025). An AHP-GIS based approach for optimal metro route planning In Tiruchirapalli City, Tamilnadu. *Journal of Geomatics*, *19*(1), 85-92. https://doi.org/10.58825/JOG.2025.19.1.201

Szatmári, M. (2021). Proposal AHP method for Increasing the Security Level in the Railway Station. *Transportation Research Procedia, 55,* 1681-1688. https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2021.07.159

Şengüler, B., & Duran, Z. (2023). A Case Study of Tramline Analysis with Transit-Oriented Development Approach: Bursa T2 Tramline. *International journal of environment and geoinformatics*, *10*(2), 33-39. https://doi.org/10.30897/IJEGEO.1256911

Taş, M., Özlemiş, Ş. N., Hamurcu, M., & Eren, T. (2017). Analitik Hiyerarşi Prosesi ve Hedef Programlama Karma Modeli Kullanılarak Monoray Projelerinin Seçimi. *Harran University Journal of Engineering*, *2*, 24-34.

Tekeli, İ. (2010). İstanbul ve Ankara için Kent içi Ulaşım Tarihi Yazıları. Içinde Ö. Taner (Ed.), *Tarih Vakfı Yurt Yayınları* (9. bs, C. 1). Tarih Vakfı Yurt Yayınları, İlhan Tekeli Toplu Eserler-9. https://www.academia.edu/33770945

Temizer, O. (2021). *İstanbul Boğazını Geçen Raylı Sistem Projelerinin AHP İle Önceliklendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

TÜİK. (2024a). *Motorlu Kara Taşıtları, Ocak 2024*. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2024-53453

TÜİK. (2024b). *Nüfus İstatistikleri Portalı*. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). https://nip.tuik.gov.tr/?value=IlGostergeKartlari

TÜİK. (2025a). *Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları, 2024*. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2024-53783

TÜİK. (2025b). *İl Gösterge Kartları*. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). https://biruni.tuik.gov.tr/ilgosterge/?locale=tr

TÜİK. (2025c). *TÜİK Motorlu Kara Taşıtları, Temmuz 2025*. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Temmuz-2025-54043

UIC. (2023). *2023 Global Rail Sustainability Report*.

UITP. (2023). *Global Urban Mobility Indicators 2023 - Publication*. International Association of Public Transport (UITP). https://www.uitp.org/publications/global-urban-mobility-indicators-2023/

UITP. (2024). *Global Metro Figures 2024*. International Association of Public Transport (UITP). https://www.uitp.org/publications/global-metro-figures-2024/

UITP. (2025). *Decarbonising Mobility The Rise Of Electric Buses In The Mena Landscape May*.

United Nations. (2018a). *The Sustainable Development Goals Report 2018*. United Nations (UN) Digital Library System. https://digitallibrary.un.org/record/1633352/files/28126e52-ar.pdf

United Nations. (2018b). *World Urbanization Prospects: The 2018 revision*. United Nations (UN). https://population.un.org/wup/

Urhan, Ö. M., & Salihoğlu, T. (2021). Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi Hafif Raylı Sistem (HRS) Güzergâh Problemi Çözümüne Yönelik Çok Kriterli-CBS Destekli Yaklaşım: Gebze-Darıca HRS Örneği. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, *3*(2), 67-88. https://dergipark.org.tr/tr/pub/tucbis

Valipour Malakshah, M. R., & Amini, Z. (2026). Intersection importance assessment for an operationally resilient urban traffic network: A multi-criteria decision-making-based framework. *Reliability Engineering & System Safety*, *266*, 111661. https://doi.org/10.1016/J.RESS.2025.111661

Vecchio, G., Tiznado-Aitken, I., & Hurtubia, R. (2020). Transport and equity in Latin America: a critical review of socially oriented accessibility assessments. *Transport Reviews*, *40*(3), 354-381. https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1711828

Verma, A., Dhingra, S. L., & Asce, M. (2005). Optimal Urban Rail Transit Corridor Identification within Integrated Framework Using Geographical Information System. *Journal of Urban Planning and Development*, *131*(2), 98-106. https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94882005131:298

Volodin, A., Gudkova, N., Astafiev, A., Alferov, V., & Majerčák, J. (2020). Impact of carrying capacity on the functioning of the railway network. *MATEC Web of Conferences 2020, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2020)*, *329*(01015), 8. https://doi.org/10.1051/MATECCONF/202032901015

Vuchic, V. R. (2007). Urban Transit Systems And Technology. Içinde *Urban Transit Systems and Technology* (1st bs, 3. Vehicle). John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. https://doi.org/10.1002/9780470168066

WHO. (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines*. World Health Organization (WHO). https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content

Yalçıner, S., Çete, M., & Eğercioğlu, Y. (2013). The effects of urban rail transportation projects on urban areas: Case study of Izmir. *2 nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE 2013, Epoka*

University, Tirana, Albania, 1, 1040-1051. https://www.academia.edu/54899502

Yayla, N. (2023). *İstanbul'un Ulaşım ve Trafik Sorunu Üzerine Bazı Düşünce ve Öneriler*. İTÜ Vakfı Yayınları. https://www.ituvakif.org.tr/istanbul-un-ulasim-ve-trafik-sorunu

Yildirim, V., & Bediroglu, S. (2019). A geographic information system-based model for economical and eco-friendly high-speed railway route determination using analytic hierarchy process and least-cost-path analysis. *Expert Systems, 36*(3), e12376. https://doi.org/10.1111/EXSY.12376

Yücel, N., & Taşabat, S. E. (2019). The Selection of Railway System Projects with Multi Creteria Decision Making Methods: A Case Study for Istanbul. *Procedia Computer Science, 158*, 382-393. https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2019.09.066

Zargarzadeh, M. (2025). Sustainable Neighborhoods - Active Modes And Health, PhD Thesis in Doctoral Program in Spatial Planning [Universidade de Coimbra, Department of Civil Engineering of the Faculty of Science and Technology, Coimbra]. Içinde *Sustainable Neighborhoods - Active Modes And Health*. https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/120054

Zaroujtaghi, A., Mansourihanis, O., Tayarani, M., Mansouri, F., Hemmati, M., & Soltani, A. (2025). A Systematic Review of GIS Evolution in Transportation Planning: Towards AI Integration. *Future Transportation 2025*, *5*(3), 97. https://doi.org/10.3390/FUTURETRANSP5030097

Zhang, F., Wang, X. Di, & Sheng, F. S. (2014). Research on High-Speed Railway Line Selection Based on Analytic Hierarchy Process. *Applied Mechanics and Materials, 577*, 1061-1064. https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.577.1061

Zhang, H. (2022). Analysis of the Low-Carbon, Environmental-Friendly, Energy-Saving, and Emission-Reduction Evaluation Model of Urban Rail Transit Based on the Spatiotemporal Distribution of Passenger Flow. *Scientific Programming, 2022*(1), 8995448. https://doi.org/10.1155/2022/8995448

Zhao, L., & Shen, L. (2019). The impacts of rail transit on future urban land use development: A case study in Wuhan, China. *Transport Policy, 81*, 396-405. https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2018.05.004

Zhao, Y., Xu, J., & Yin, J. (2021). Urban rail transit line and station planning optimization based on GIS : - Take Haikou city as an example. *2021 International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit, ICEERT 2021, Lanzhou, China*, 240-247. https://doi.org/10.1109/ICEERT53919.2021.00053

Zheng, Q., Lyu, H. M., Zhou, A., & Shen, S. L. (2021). Risk assessment of geohazards along Cheng-Kun railway using fuzzy AHP incorporated into GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 12*(1), 1508-1531. https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1933614

A
UZMAN DEĞERLENDİRMESİ

- Kritelerin ikili karşılaştırmasında kullanılan Saaty'nin tercih ölçeği cetveli

Önem Derecesi	**Tanım**	**Açıklama**
1	Eşit Önemli	Her iki kriter karar açısından eşit öneme sahiptir.
3	Biraz Daha Önemli	Bir kriter diğerine göre az bir üstünlüğe sahiptir.
5	Güçlü Önemli	Bir kriter diğerine göre belirgin biçimde daha önemlidir.
7	Çok Güçlü Önemli	Bir kriter diğerine göre büyük ölçüde baskındır.
9	Aşırı Derecede Önemli	Bir kriterin diğerine göre üstünlüğü mutlak düzeydedir.
2, 4, 6, 8	Ara Değerler	Ara önem derecelerini ifade eder; iki yakın düzey arasında tercih belirtmek için kullanılır.

- Tüm kriterler birbirileri ile ikili karşılaştırılarak önem dereceleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Kriter A	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriter B
İleri ◄																		► Geri

A ile B'nin eşit öneme sahip olduğu durumlarda 1,

A'nın B'den daha önemli olduğu durumlarda ileri bölgesinde,

B'nin A'dan daha önemli olduğu durumlarda geri bölgesinde değerlendirilmiştir.

UZMAN DEĞERLENDİRME TABLOSU — 7 ANA KRİTER														
K(i) Kod	Kriter i (Satır)	K(j) Kod	Kriter j (Sütun)	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	Geo. Ort.	Ortak Değer
K1	Teknik ve Mühendislik Faktörleri	K2	Arazi ve Çevresel Faktörler	4	2	2	4	3	2	4	2	4	3	2,8619	3
K1	Teknik ve Mühendislik Faktörleri	K3	Sosyal ve Demografik Faktörler	5	4	3	4	4	5	4	3	4	3	3,8367	4
K1	Teknik ve Mühendislik Faktörleri	K4	Ulaşım ve Entegrasyon	4	3	2	4	3	2	3	2	4	2	2,7808	3
K1	Teknik ve Mühendislik Faktörleri	K5	Ekonomik Faktörler	3	3	2	2	2	1	2	1	2	1	1,7617	2
K1	Teknik ve Mühendislik Faktörleri	K6	Operasyon ve Hizmet Kalitesi	4	3	3	3	3	4	2	2	2	4	2,8958	3
K1	Teknik ve Mühendislik Faktörleri	K7	Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	6	5	6	5	4	5	5	4	6	4	4,9391	5
K2	Arazi ve Çevresel Faktörler	K3	Sosyal ve Demografik Faktörler	3	4	2	3	4	3	2	3	4	2	2,8958	3
K2	Arazi ve Çevresel Faktörler	K4	Ulaşım ve Entegrasyon	1/2	1	1/2	1/3	1	1/2	1/2	1/3	1	1/3	0,5451	1/2
K2	Arazi ve Çevresel Faktörler	K5	Ekonomik Faktörler	2	3	2	2	3	1	2	1	3	1	1,8346	2
K2	Arazi ve Çevresel Faktörler	K6	Operasyon ve Hizmet Kalitesi	2	3	2	1	3	2	1	2	3	1	1,8346	2
K2	Arazi ve Çevresel Faktörler	K7	Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	3	4	4	3	3	2	3	2	4	2	2,8958	3
K3	Sosyal ve Demografik Faktörler	K4	Ulaşım ve Entegrasyon	1/3	1/4	1/2	1/4	1/2	1/3	1/4	1/2	1/2	1/4	0,3494	1/3
K3	Sosyal ve Demografik Faktörler	K5	Ekonomik Faktörler	1/2	1/3	1/2	1/3	1	1	1/3	1	1/2	1/3	0,5234	1/2

UZMAN DEĞERLENDİRME TABLOSU — 7 ANA KRİTER														
K(i) Kod	Kriter i (Satır)	K(j) Kod	Kriter j (Sütun)	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	Geo. Ort.	Ortak Değer
K3	Sosyal ve Demografik Faktörler	K6	Operasyon ve Hizmet Kalitesi	1/2	1/3	1	1/3	1	1/2	1/3	1	1	1/3	0,5610	1/2
K3	Sosyal ve Demografik Faktörler	K7	Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	2	1	3	2	2	1	2	3	3	1	1,8346	2
K4	Ulaşım ve Entegrasyon	K5	Ekonomik Faktörler	1	2	2	3	2	3	2	2	2	1	1,8882	2
K4	Ulaşım ve Entegrasyon	K6	Operasyon ve Hizmet Kalitesi	1	2	2	3	2	2	3	2	2	1	1,8882	2
K4	Ulaşım ve Entegrasyon	K7	Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	4	4	5	5	4	4	4	3	4	3	3,9487	4
K5	Ekonomik Faktörler	K6	Operasyon ve Hizmet Kalitesi	2	3	3	4	2	4	4	3	3	2	2,8958	3
K5	Ekonomik Faktörler	K7	Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	2	3	4	4	2	4	3	3	3	2	2,8958	3
K6	Operasyon ve Hizmet Kalitesi	K7	Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	1	2	2	1	1	3	3	2	3	2	1,8346	2

TUTARLILIK ANALİZİ — ANA KRİTERLER (n=7, RI=1.32)													
Uzman	**Vurgu Alanı**	**λ_max**	**CI**	**RI**	**CR**	**Sonuç**	**K1 Teknik**	**K2 Arazi**	**K3 Sosyal**	**K4 Ulaşım**	**K5 Ekonomik**	**K6 Operasyon**	**K7 Kentsel**
U1	*K1(Teknik) güçlü*	7,3734	0,0622	1,32	0,0471	✓ Tutarlı	0,3945	0,1420	0,0602	0,1479	0,1193	0,0851	0,0510
U2	*K2 (Arazi) güçlü*	7,3123	0,052	1,32	0,0394	✓ Tutarlı	0,3114	0,2115	0,0463	0,1778	0,1217	0,0839	0,0475
U3	*K7(Kentsel) güçlü*	7,1984	0,0331	1,32	0,0251	✓ Tutarlı	0,2862	0,1619	0,0894	0,2037	0,1407	0,0796	0,0385
U4	*K4(Ulaşım) güçlü*	7,7548	0,1258	1,32	0,0953	✓ Tutarlı	0,3344	0,1203	0,0527	0,2289	0,1384	0,0796	0,0455
U5	*K1(Teknik) çok güçlü*	7,301	0,0502	1,32	0,038	✓ Tutarlı	0,3166	0,2011	0,0811	0,1690	0,1030	0,0722	0,0569
U6	*K2 (Arazi) çok güçlü*	7,5354	0,0892	1,32	0,0676	✓ Tutarlı	0,2839	0,1411	0,0634	0,2223	0,1532	0,0860	0,0499
U7	*K4+K6 güçlü*	7,5724	0,0954	1,32	0,0723	✓ Tutarlı	0,3135	0,1246	0,0578	0,2129	0,1457	0,1022	0,0433
U8	*K3(Sosyal) güçlü*	7,4237	0,0706	1,32	0,0535	✓ Tutarlı	0,2452	0,1411	0,0989	0,2132	0,1584	0,0896	0,0537
U9	*K2+K7 güçlü*	7,54	0,09	1,32	0,0682	✓ Tutarlı	0,3317	0,1940	0,0751	0,1565	0,1232	0,0815	0,0378
U10	*K4+K5 dengeli*	7,2941	0,049	1,32	0,0371	✓ Tutarlı	0,2801	0,1111	0,0579	0,1885	0,1779	0,1197	0,0650
	SONUÇ	**7,3166**	**0,0528**	**1,32**	**0,04**	✓ Tutarlı	**0,3217**	**0,1532**	**0,0644**	**0,1946**	**0,1332**	**0,0866**	**0,0463**

UZMAN DEĞERLENDİRME TABLOSU - ALT KRİTERLER

AK(i) Kod	Alt Kriter i	AK(j) Kod	Alt Kriter j	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	Geo. Ortalama	Ortak Görüş
K1.1	Hat Uzunluğu	**K1.2**	Hattın Eğim Durumu	1/4	1/3	1/2	1/3	1/4	1/3	1/4	1/2	1/3	1/2	0,3453	1/3
K1.1	Hat Uzunluğu	**K1.3**	İşletme Hızı	2	2	2	1	2	2	2	2	3	2	1,9433	2
K1.2	Hattın Eğim Durumu	**K1.3**	İşletme Hızı	4	3	3	3	5	4	4	3	4	4	3,6457	3
K2.1	Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları	**K2.2**	Jeolojik Faktörler	1/5	1/5	1/6	1/5	1/5	1/4	1/5	1/5	1/6	1/5	0,1972	1/5
K2.1	Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları	**K2.3**	Doğal Afet Riski	1/4	1/4	1/3	1/4	1/5	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	0,2590	1/4
K2.1	Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları	**K2.4**	Mevcut Altyapı ile Çakışma	3	3	3	2	2	3	2	3	3	3	2,6564	3
K2.2	Jeolojik Faktörler	**K2.3**	Doğal Afet Riski	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2,0828	2
K2.2	Jeolojik Faktörler	**K2.4**	Mevcut Altyapı ile Çakışma	5	5	5	5	4	5	6	5	5	4	4,8697	5
K2.3	Doğal Afet Riski	**K2.4**	Mevcut Altyapı ile Çakışma	4	4	4	4	3	4	5	3	4	4	3,8616	4
K3.1	Nüfus Yoğunluğu	**K3.2**	Konut Alanlarına Yakınlık	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1/2	1/2	0,5146	1/2
K3.1	Nüfus Yoğunluğu	**K3.3**	Kamu ve Eğitim Kurumlarına Yakınlık	1/3	1/4	1/2	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1/3	1/3	0,3512	1/3
K3.1	Nüfus Yoğunluğu	**K3.4**	Ticari ve Sosyal Tesislere Yakınlık	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1/2	1	1/2	1/3	0,5515	1/2

UZMAN DEĞERLENDİRME TABLOSU - ALT KRİTERLER

AK(i) Kod	Alt Kriter i	AK(j) Kod	Alt Kriter j	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	Geo. Ortalama	Ortak Görüş
K3.2	Konut Alanlarına Yakınlık	**K3.3**	Kamu ve Eğitim Kurumlarına Yakınlık	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2,0828	2
K3.2	Konut Alanlarına Yakınlık	**K3.4**	Ticari ve Sosyal Tesislere Yakınlık	3	3	2	3	3	2	3	3	3	3	2,7663	3
K3.3	Kamu ve Eğitim Kurumlarına Yakınlık	**K3.4**	Ticari ve Sosyal Tesislere Yakınlık	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2,0828	2
K4.1	Toplu Taşıma Entegrasyonu	**K4.2**	Mevcut ve Planlanan Raylı Sistemlerle Entegrasyon	1/4	1/3	1/2	1/4	1/3	1/3	1/4	1/2	1/3	1/2	0,3453	1/3
K5.1	Yatırım Maliyeti (Yapım, Araç)	**K5.2**	İşletme ve Bakım Maliyetleri	4	3	3	3	2	4	3	2	3	4	3,0157	3
K6.1	Sefer Sıklığı	**K6.2**	Yolcu Talebi ve Taşıma Kapasitesi	1/3	1/4	1/3	1/4	1/3	1/2	1/4	1/2	1/3	1/4	0,3222	1/3
K7.1	İmar Durumu	**K7.2**	Kentsel Gelişim Bölgeleri	3	2	4	3	3	2	3	3	2	4	2,8137	3

TUTARLILIK ANALİZİ — ALT KRİTERLER

Uzman	n	λmax	CI	RI	CR	Sonuç
K1 — Teknik ve Mühendislik Faktörleri (n=3 RI=0.58)						
U1	3	3,0536	0,0268	0,58	0,0462	✓ Tutarlı
U2	3	3,0536	0,0268	0,58	0,0462	✓ Tutarlı
U3	3	3,0092	0,0046	0,58	0,0079	✓ Tutarlı
U4	3	3	0	0,58	0	✓ Tutarlı
U5	3	3,0246	0,0123	0,58	0,0212	✓ Tutarlı
U6	3	3,0183	0,0091	0,58	0,0158	✓ Tutarlı
U7	3	3,0536	0,0268	0,58	0,0462	✓ Tutarlı
U8	3	3,0092	0,0046	0,58	0,0079	✓ Tutarlı
U9	3	3,0735	0,0368	0,58	0,0634	✓ Tutarlı
U10	3	3	0	0,58	0	✓ Tutarlı

Uzman	n	λmax	CI	RI	CR	Sonuç
K2 — Arazi ve Çevresel Faktörler (n=4 RI=0.9)						
U1	4	4,1815	0,0605	0,9	0,0672	✓ Tutarlı
U2	4	4,2519	0,084	0,9	0,0933	✓ Tutarlı
U3	4	4,1601	0,0534	0,9	0,0593	✓ Tutarlı
U4	4	4,0883	0,0294	0,9	0,0327	✓ Tutarlı
U5	4	4,1865	0,0622	0,9	0,0691	✓ Tutarlı
U6	4	4,1697	0,0566	0,9	0,0628	✓ Tutarlı
U7	4	4,0605	0,0202	0,9	0,0224	✓ Tutarlı
U8	4	4,216	0,072	0,9	0,08	✓ Tutarlı
U9	4	4,2008	0,0669	0,9	0,0744	✓ Tutarlı
U10	4	4,1857	0,0619	0,9	0,0688	✓ Tutarlı

Uzman	n	λmax	CI	RI	CR	Sonuç
K3 — Sosyal ve Demografik Faktörler (n=4 RI=0.9)						
U1	4	4,1638	0,0546	0,9	0,0607	✓ Tutarlı
U2	4	4,205	0,0683	0,9	0,0759	✓ Tutarlı
U3	4	4,1213	0,0404	0,9	0,0449	✓ Tutarlı
U4	4	4,0709	0,0236	0,9	0,0262	✓ Tutarlı
U5	4	4,2148	0,0716	0,9	0,0796	✓ Tutarlı
U6	4	4,1171	0,039	0,9	0,0434	✓ Tutarlı

TUTARLILIK ANALİZİ — ALT KRİTERLER

Uzman	n	λmax	CI	RI	CR	Sonuç
U7	4	4,2583	0,0861	0,9	0,0957	✓ Tutarlı
U8	4	4,205	0,0683	0,9	0,0759	✓ Tutarlı
U9	4	4,1638	0,0546	0,9	0,0607	✓ Tutarlı
U10	4	4,2583	0,0861	0,9	0,0957	✓ Tutarlı

Uzman	n	λmax	CI	RI	CR	Sonuç
K4 — Ulaşım ve Entegrasyon (n=2 RI=0)						
U1	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U2	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U3	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U4	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U5	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U6	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U7	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U8	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U9	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U10	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı

Uzman	n	λmax	CI	RI	CR	Sonuç
K5 — Ekonomik Faktörler (n=2 RI=0)						
U1	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U2	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U3	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U4	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U5	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U6	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U7	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U8	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U9	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı
U10	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı

Uzman	n	λmax	CI	RI	CR	Sonuç
K6 — Operasyon ve Hizmet Kalitesi (n=2 RI=0)						
U1	2	2	0	0	0	✓ Tutarlı

TUTARLILIK ANALİZİ — ALT KRİTERLER						
Uzman	**n**	**λmax**	**CI**	**RI**	**CR**	**Sonuç**
U2	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U3	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U4	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U5	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U6	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U7	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U8	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U9	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U10	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**

Uzman	**n**	**λmax**	**CI**	**RI**	**CR**	**Sonuç**
K7 — Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu (n=2 RI=0)						
U1	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U2	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U3	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U4	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U5	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U6	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U7	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U8	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U9	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**
U10	2	2	0	0	0	**✓ Tutarlı**

- Uzmanların meslek ve tecrübe dağılımları

Meslek	**Kişi Sayısı**
İnşaat mühendisi	2
Harita mühendisi	2
Ulaştırma Mühendisi	3
Jeoloji mühendisi	1
Şehir ve Bölge Plancısı	1
Proje Yöneticisi	1

Tecrübe (yıl)	**Kişi Sayısı**
20+	1
16-20	3
11-15	3
6-10	2
1-5	1

B
AHP ANALİZİ HESAPLAMALARI

- Ana kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi

Ana Kriterler	Teknik ve Mühendislik Faktörleri	Arazi ve Çevresel Faktörler	Sosyal ve Demografik Faktörler	Ulaşım ve Entegrasyon	Ekonomik Faktörler	Operasyon ve Hizmet Kalitesi	Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu
Teknik ve Mühendislik Faktörleri	1	3	4	3	2	3	5
Arazi ve Çevresel Faktörler	1/3	1	3	1/2	2	2	3
Sosyal ve Demografik Faktörler	1/4	1/3	1	1/3	1/2	1/2	2
Ulaşım ve Entegrasyon	1/3	2	3	1	2	2	4
Ekonomik Faktörler	1/2	1/2	2	1/2	1	3	3
Operasyon ve Hizmet Kalitesi	1/3	1/2	2	1/2	1/3	1	2
Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	1/5	1/3	1/2	1/4	1/3	1/2	1
TOPLAM	2,95	7,67	15,50	6,08	8,17	12,00	20,00

- Ana kriterlerin ikili karşılaştırma matrisinden üretilen normalize matrisi ve kriterlerin ağırlık değerleri hesabı

Ana Kriterler	Teknik ve Mühendislik Faktörleri	Arazi ve Çevresel Faktörler	Sosyal ve Demografik Faktörler	Ulaşım ve Entegrasyon	Ekonomik Faktörler	Operasyon ve Hizmet Kalitesi	Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	TOPLAM	AĞIRLIK
Teknik ve Mühendislik Faktörleri	0,34	0,39	0,26	0,49	0,24	0,25	0,25	2,23	0,318
Arazi ve Çevresel Faktörler	0,11	0,13	0,19	0,08	0,24	0,17	0,15	1,08	0,154
Sosyal ve Demografik Faktörler	0,08	0,04	0,06	0,05	0,06	0,04	0,10	0,45	0,064
Ulaşım ve Entegrasyon	0,11	0,26	0,19	0,16	0,24	0,17	0,20	1,34	0,192
Ekonomik Faktörler	0,17	0,07	0,13	0,08	0,12	0,25	0,15	0,97	0,138
Operasyon ve Hizmet Kalitesi	0,11	0,07	0,13	0,08	0,04	0,08	0,10	0,61	0,088
Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	0,07	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,32	0,045
TOPLAM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	1,000

- Tutarlılık oranı hesaplamaları

Ana Kriterler	Teknik ve Mühendislik Faktörleri	Arazi ve Çevresel Faktörler	Sosyal ve Demografik Faktörler	Ulaşım ve Entegrasyon	Ekonomik Faktörler	Operasyon ve Hizmet Kalitesi	Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	Öncelik Değeri
Teknik ve Mühendislik Faktörleri	0,32	0,46	0,26	0,58	0,28	0,26	0,23	2,38
Arazi ve Çevresel Faktörler	0,11	0,15	0,19	0,10	0,28	0,18	0,14	1,14
Sosyal ve Demografik Faktörler	0,08	0,05	0,06	0,06	0,07	0,04	0,09	0,46
Ulaşım ve Entegrasyon	0,11	0,31	0,19	0,19	0,28	0,18	0,18	1,43
Ekonomik Faktörler	0,16	0,08	0,13	0,10	0,14	0,26	0,14	1,00
Operasyon ve Hizmet Kalitesi	0,11	0,08	0,13	0,10	0,05	0,09	0,09	0,63
Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	0,06	0,05	0,03	0,05	0,05	0,04	0,05	0,33

Öncelik Değeri		Ağırlık		t/c
2,38		0,318		7,484
1,14		0,154		7,366
0,46	/	0,064	=	7,194
1,43		0,192		7,467
1,00		0,138		7,215
0,63		0,088		7,213
0,33		0,045		7,295

λ_{max}	**CI**	**CR**
7,319	0,053	0,04029

- Alt kriterlerin AHP analizi hesaplamaları

Teknik ve Mühendislik Faktörler	Hat Uzunluğu	Hattın eğim durumu	İşletme hızı
Hat Uzunluğu	1	1/3	2
Hattın eğim durumu	3	1	3
İşletme hızı	1/2	1/3	1
TOPLAM	4,50	1,67	6,00

Teknik ve Mühendislik Faktörler	Hat Uzunluğu	Hattın eğim durumu	İşletme hızı	TOPLAM	AĞIRLIK
Hat Uzunluğu	0,22	0,20	0,33	0,76	0,252
Hattın eğim durumu	0,67	0,60	0,50	1,77	0,589
İşletme hızı	0,11	0,20	0,17	0,48	0,159
TOPLAM	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00

Teknik ve Mühendislik Faktörler	Hat Uzunluğu	Hattın eğim durumu	İşletme hızı	Öncelik Değeri
Hat Uzunluğu	0,25	0,20	0,32	0,77
Hattın eğim durumu	0,76	0,59	0,48	1,82
İşletme hızı	0,13	0,20	0,16	0,48

Öncelik Değeri		Ağırlık		t/c
0,77		0,252		3,044
1,82	/	0,589	=	3,094
0,48		0,159		3,023

λ_{max}	**CI**	**CR**
3,054	0,027	0,046

Arazi ve Çevresel Faktörler	Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları	Jeolojik faktörler	Doğal afet riski	Mevcut altyapı ile çakışma durumu
Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları	1	1/5	1/4	3
Jeolojik faktörler	5	1	2	5
Doğal afet riski	4	1/2	1	4
Mevcut altyapı ile çakışma durumu	1/3	1/5	1/4	1
TOPLAM	10,33	1,90	3,50	13,00

Arazi ve Çevresel Faktörler	Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları	Jeolojik faktörler	Doğal afet riski	Mevcut altyapı ile çakışma durumu	TOPLAM	AĞIRLIK
Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları	0,10	0,11	0,07	0,23	0,50	0,126
Jeolojik faktörler	0,48	0,53	0,57	0,38	1,97	0,492
Doğal afet riski	0,39	0,26	0,29	0,31	1,24	0,311
Mevcut altyapı ile çakışma durumu	0,03	0,11	0,07	0,08	0,29	0,071
TOPLAM	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00

Arazi ve Çevresel Faktörler	Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları	Jeolojik faktörler	Doğal afet riski	Mevcut altyapı ile çakışma durumu	Öncelik Değeri
Arkeolojik ve Tarihi Koruma Alanları	0,13	0,10	0,08	0,21	0,52
Jeolojik faktörler	0,63	0,49	0,62	0,36	2,10
Doğal afet riski	0,50	0,25	0,31	0,29	1,35
Mevcut altyapı ile çakışma durumu	0,04	0,10	0,08	0,07	0,29

Öncelik Değeri		Ağırlık		t/c
0,52		0,126		4,097
2,10	/	0,492	=	4,274
1,35		0,311		4,332
0,29		0,071		4,051

λ_{max}	**CI**	**CR**
4,189	0,063	0,070

Sosyal ve Demografik Faktörler	Nüfus yoğunluğu	Konut alanlarına yakınlık	Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	Ticari ve sosyal tesislere yakınlık
Nüfus yoğunluğu	1	1/2	1/3	1/2
Konut alanlarına yakınlık	2	1	2	3
Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	3	1/2	1	2
Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	2	1/3	1/2	1
TOPLAM	8,00	2,33	3,83	6,50

Sosyal ve Demografik Faktörler	Nüfus yoğunluğu	Konut alanlarına yakınlık	Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	TOPLAM	AĞIRLIK
Nüfus yoğunluğu	0,13	0,21	0,09	0,08	0,50	0,126
Konut alanlarına yakınlık	0,25	0,43	0,52	0,46	1,66	0,415
Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	0,38	0,21	0,26	0,31	1,16	0,289
Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	0,25	0,14	0,13	0,15	0,68	0,169
TOPLAM	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00

Sosyal ve Demografik Faktörler	Nüfus yoğunluğu	Konut alanlarına yakınlık	Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	Öncelik Değeri
Nüfus yoğunluğu	0,13	0,21	0,10	0,08	0,51
Konut alanlarına yakınlık	0,25	0,42	0,58	0,51	1,75
Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	0,38	0,21	0,29	0,34	1,21
Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	0,25	0,14	0,14	0,17	0,70

Öncelik Değeri		Ağırlık		t/c
0,51		0,126		4,091
1,75	/	0,415	=	4,221
1,21		0,289		4,191
0,70		0,169		4,159

λ_{max}	**CI**	**CR**
4,166	0,055	0,061

Ulaşım ve Entegrasyon	Toplu Taşıma Entegrasyonu	Mevcut ve Planlanan Raylı Sistemlerle Entegrasyon
Toplu Taşıma Entegrasyonu	1	1/3
Mevcut ve Planlanan Raylı Sistemlerle Entegrasyon	3	1
TOPLAM	4,00	1,33

Ulaşım ve Entegrasyon	Toplu Taşıma Entegrasyonu	Mevcut ve Planlanan Raylı Sistemlerle Entegrasyon	TOPLAM	AĞIRLIK
Toplu Taşıma Entegrasyonu	0,25	0,25	0,50	0,250
Mevcut ve Planlanan Raylı Sistemlerle Entegrasyon	0,75	0,75	1,50	0,750
TOPLAM	1,00	1,00	2,00	1,00

Ulaşım ve Entegrasyon	Toplu Taşıma Entegrasyonu	Mevcut ve Planlanan Raylı Sistemlerle Entegrasyon	Öncelik Değeri
Toplu Taşıma Entegrasyonu	0,25	0,25	0,50
Mevcut ve Planlanan Raylı Sistemlerle Entegrasyon	0,75	0,75	1,50

Öncelik Değeri		Ağırlık		t/c
0,50	/	0,250	=	2,000
1,50		0,750		2,000

λ_{max}	**CI**	**CR**
2,000	0,000	0,00

Ekonomik Faktörler	Yatırım Maliyeti	İşletme ve bakım maliyetleri
Yatırım Maliyeti	1	3
İşletme ve bakım maliyetleri	1/3	1
TOPLAM	1,33	4,00

Ekonomik Faktörler	Yatırım Maliyeti	İşletme ve bakım maliyetleri	TOPLAM	AĞIRLIK
Yatırım Maliyeti	0,75	0,75	1,50	0,750
İşletme ve bakım maliyetleri	0,25	0,25	0,50	0,250
TOPLAM	1,00	1,00	2,00	1,00

Ekonomik Faktörler	Yatırım Maliyeti	İşletme ve bakım maliyetleri	Öncelik Değeri
Yatırım Maliyeti	3/4	3/4	1,50
İşletme ve bakım maliyetleri	0,25	0,25	0,50

Öncelik Değeri		Ağırlık		t/c
1,50	/	0,750	=	2,000
0,50		0,250		2,000

λ_{max}	**CI**	**CR**
2,000	0,000	0,00

Operasyon ve Hizmet Kalitesi	Sefer Sıklığı	Yolcu Talebi ve Taşıma Kapasitesi
Sefer Sıklığı	1	1/3
Yolcu Talebi ve Taşıma Kapasitesi	3	1
TOPLAM	4,00	1,33

Operasyon ve Hizmet Kalitesi	Sefer Sıklığı	Yolcu Talebi ve Taşıma Kapasitesi	TOPLAM	AĞIRLIK
Sefer Sıklığı	0,25	0,25	0,50	0,250
Yolcu Talebi ve Taşıma Kapasitesi	0,75	0,75	1,50	0,750
TOPLAM	1,00	1,00	2,00	1,00

Operasyon ve Hizmet Kalitesi	Sefer Sıklığı	Yolcu Talebi ve Taşıma Kapasitesi	Öncelik Değeri
Sefer Sıklığı	1/4	1/4	0,50
Yolcu Talebi ve Taşıma Kapasitesi	0,75	0,75	1,50

Öncelik Değeri		Ağırlık		t/c	λ_{max}	**CI**	**CR**
0,50	/	0,250	=	2,000			
1,50		0,750		2,000	2,000	0,000	0,00

Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyon	İmar planı	Kentsel gelişim bölgeleri
İmar planı	1	3
Kentsel gelişim bölgeleri	1/3	1
TOPLAM	1,33	4,00

Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyon	İmar planı	Kentsel gelişim bölgeleri	TOPLAM	AĞIRLIK
İmar planı	0,75	0,75	1,50	0,750
Kentsel gelişim bölgeleri	0,25	0,25	0,50	0,250
TOPLAM	1,00	1,00	2,00	1,00

Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyon	İmar planı	Kentsel gelişim bölgeleri	Öncelik Değeri
İmar Planı	3/4	3/4	1,50
Kentsel gelişim bölgeleri	0,25	0,25	0,50

Öncelik Değeri		Ağırlık		t/c			
1,50	/	0,750	=	2,000	λ_{max}	**CI**	**CR**
0,50		0,250		2,000	2,000	0,000	0,00

- Kriterlerin hesap özeti tablosu

Ana Kriterler	**Ağırlık Değeri**	**Alt Kriterler**	**Ağırlık Değeri**	**Genel Ağırlık**
Teknik ve Mühendislik Faktörleri	31,8%	Hat uzunluğu	0,252	8,0%
		Hattın eğim durumu	0,589	18,7%
		İşletme hızı	0,159	5,1%
Arazi ve Çevresel Faktörler	15,4%	Arkeolojik ve tarihi koruma alanları	0,126	1,9%
		Jeolojik faktörler	0,492	7,6%
		Doğal afet riski	0,311	4,8%
		Mevcut altyapı ile çakışma durumu	0,071	1,1%
Sosyal ve Demografik Faktörler	6,4%	Nüfus yoğunluğu	0,126	0,8%
		Konut alanlarına yakınlık	0,415	2,7%
		Kamu ve eğitim kurumlarına yakınlık	0,289	1,9%
		Ticari ve sosyal tesislere yakınlık	0,169	1,1%
Ulaşım ve Entegrasyon	19,2%	Toplu taşıma entegrasyonu	0,250	4,8%
		Mevcut ve planlanan raylı sistemlerle entegrasyon	0,750	14,4%
Ekonomik Faktörler	13,8%	Yatırım maliyeti (Yapım, Araç)	0,750	10,4%
		İşletme ve bakım maliyetleri	0,250	3,5%
Operasyon ve Hizmet Kalitesi	8,8%	Sefer sıklığı	0,250	2,2%
		Yolcu talebi ve taşıma kapasitesi	0,750	6,6%
Kentsel Planlama ve Gelecek Projeksiyonu	4,5%	İmar planı	0,750	3,4%
		Kentsel gelişim bölgeleri	0,250	1,1%
Cr	**0,0403**			

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

Bozkurt FS & Gülgen F (2025). Demiryolu Hat Planlamasında Proje Kriterlerine Dayalı Uygunluk Analizi. *Grad Symposium'25 Mühendislikte Sürdürülebilir Çözümler Sempozyumu*, 15 Mayıs 2025, İstanbul, Türkiye.