

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**E-TİCARET FİRMALARINDA KARGO TOPLAMA
OPERASYONLARININ MEKANSAL ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU: ESENYURT, İSTANBUL ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatma Reyhan SARIKAYA

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2025

**E-TİCARET FİRMALARINDA KARGO TOPLAMA
OPERASYONLARININ MEKANSAL ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU: ESENYURT, İSTANBUL ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fatma Reyhan SARIKAYA
(501211655)**

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Adalet DERVİŞOĞLU

TEMMUZ 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**SPATIAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF E-COMMERCE
COMPANY'S PARCEL COLLECTION OPERATIONS: THE CASE OF
ESENYURT, ISTANBUL**

M.Sc. THESIS

**Fatma Reyyan SARIKAYA
(501211655)**

Department of Geomatics Engineering

Geomatics Engineering Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Adalet DERVİŞOĞLU

JULY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501211655 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Fatma Reyhan SARIKAYA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “E-TİCARET FİRMALARINDA KARGO TOPLAMA OPERASYONLARININ MEKANSAL ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU: ESENİYURT, İSTANBUL ÖRNEĞİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Adalet DERVİŞOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Fahri KARABULUT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Barış SÜLEYMANOĞLU.....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 30 Mayıs 2025
Savunma Tarihi : 8 Temmuz 2025





Aileme ve sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Yüksek Lisans çalışmam boyunca yönlendirmesini, katkısını ve desteğini hiç esirgemeyen kıymetli danışman hocam ve değerli bilim insanı Doç. Dr. Adalet DERVİŞOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Tez konusu seçiminde bilgi ve yönlendirmeleriyle destek olan HEPSİJET eski Product Manager'ı Samet ANASIZ'a ve tez çalışması boyunca her türlü desteklerini sunan değerli HEPSİBURADA ve HEPSİJET çalışanlarına ve yöneticilerine içten teşekkürlerimi sunarım

Son olarak hiçbir zaman yardım ve dualarını esirgemeyen aileme, Makdis ekibine ve sevgili dostlarıma teşekkür ederim.

Temmuz 2025

Fatma Reyryan SARIKAYA
(Bilgisayar ve Harita Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR.....	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	1
1.2 Tezin Aşamaları.....	2
1.2.1 Pilot Bölge ve Veri Toplama.....	2
1.2.2 Veri Hazırlığı ve Normalizasyon	2
1.2.3 Yoğunluk Analizi ve Heatmap Üretimi	2
1.2.4 ArcGIS ile VRP Modelleme	2
1.2.5 Google OR-Tools ile Gelişmiş VRP Modelleme	2
1.2.6 Sonuçların Görselleştirilmesi ve Değerlendirilmesi	3
1.3 E-Ticaretin Lojistik Üzerindeki Etkisi	3
1.4 Kargo Toplama Sürecinin Lojistik Zincirindeki Yeri	4
1.5 Kentsel Lojistiğin Önemi ve Zorlukları.....	5
1.6 Esenyurt'un Lojistik Açısından Stratejik Konumu	6
1.7 Kullanılan Yöntemlere Kavramsal Bakış	8
1.7.1 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS).....	8
1.7.2 Araç Rotalama Problemi (VRP)	8
1.7.3 Kriterli Karar Verme (ÇKKV)	8
1.7.4 Mesafe Matrisi (Distance Matrix).....	9
2. LİTERATÜR TARAMASI: KENTSEL KARGO TOPLAMA VE ANALİZ	
YAKLAŞIMLARI.....	11
2.1 E-Ticaret Tedarik Zincirinde Kargo Toplama Sürecinin Yeri	11
2.2 Kentsel Lojistikte Karşılaşılan Temel Sorunlar.....	11
2.3 Araç Rotalama Problemi (VRP) ve Uygulama Alanları.....	12
2.4 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile Mekânsal Lojistik Analizi.....	12
2.5 Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV/MCDM) Yöntemlerinin Lojistikte Kullanımı.....	13
2.6 Türkiye'de Kentsel Lojistik ve Kargo Toplama Üzerine Akademik Çalışmalar.....	13
2.7 Dünya Geneline Kargo Toplama ve Kentsel Lojistik Çalışmaları.....	14
3. MATERYAL VE METOD.....	15
3.1 Kernel Yoğunluk Tahmini (Kernel Density Estimation – KDE).....	15
3.2 Network Analizi.....	16
3.2.1 ArcGIS ile Network Analizi Uygulaması	18
3.3 Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem – VRP)	19

3.4 ArcGIS Tabanlı Uygulama.....	21
3.4.1 Verilerin ArcGIS Ortamına Aktarılması	21
3.4.2 Sipariş Verileri ve Yoğunluk Haritası Oluşturulması.....	24
3.4.3 Network Dataset Kurulumu ve VRP Modelleme	25
3.5 Google OR-Tools ile VRP Uygulaması.....	27
3.5.1 Girdi Verilerinin Yapılandırılması.....	29
3.5.1.1 Mesafe matrisi oluşturulması (distance_matrix.py)	29
3.5.1.2 Veri yükleme ve doğrulama (util.py).....	31
3.5.1.3 Şube bazlı VRP çözümü (multi_vrp_solver.py).....	33
3.5.2 Model Parametreleri.....	35
3.5.3 Modelleme Süreci.....	36
4. BULGULAR	37
4.1 Sipariş Yoğunluğu ve Desi Dağılımı Analizi	37
4.1.1 Yoğunluğun En Yüksek Olduğu Alanlar	37
4.1.2 Lojistik Açından Riskli veya Kritik Alanlar.....	38
4.1.3 Stratejik Önemi	38
4.2 ArcGIS Tabanlı VRP Sonuçları.....	38
4.2.1 Başarıyla Toplanan Siparişler Senaryosu	39
4.2.2 Tüm Siparişlerin Dâhil Edildiği Tam Talep Senaryosu.....	41
4.2.3 ArcGIS Sonuçlarını Değerlendirme	43
4.3 Google OR-Tools Tabanlı VRP Sonuçları.....	44
4.4 ArcGIS ve Google Or-Tools Karşılaştırılması	47
4.4.1 Modelleme Süreci ve Kullanıcı Arayüzü	47
4.4.2 Veri Gerçekliği ve Trafik Duyarlılığı	48
4.4.3 Kısıtların Tanımlanabilirliği ve Esneklik	48
4.4.4 Çözüm Kalitesi ve Optimizasyon Başarısı	48
4.4.5 Performans ve Hesaplama Süresi	49
4.4.6 Çıktıların Kullanımı ve Görselleştirme.....	49
SONUÇ	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ	57

KISALTMALAR

API	: Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface)
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CVRP	: Kapasiteli Araç Rotalama Problemi (Capacitated Vehicle Routing Problem)
CSV	: Comma Separated Values (Virgülle Ayrılmış Değerler)
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
E-5 / TEM	: İstanbul'daki ana karayolu arterleri (otoyol isimleri)
JSON	: JavaScript Object Notation (Veri formatı)
KDE	: Kernel Yoğunluk Tahmini (Kernel Density Estimation)
MDVRP	: Çoklu Depolu Araç Rotalama Problemi (Multiple Depot VRP)
OR-Tools	: Google Optimization Tools
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TÜBİSAD	: Türkiye Bilişim Sanayicileri Derneği
VRP	: Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem)
VRPTW	: Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem with Time Windows)



SEMBOLLER

$f(x)$	: X Noktasındaki Tahmini Yoğunluk (KDE Yöntemi)
N	: Veri Noktalarının Sayısı
H	: Bant Genişliği
K	: Çekirdek (Kernel) Fonksiyonu
x_i	: i . Veri Noktasının Konumu
$G = (V, E)$	: Ağı Temsil Eden Grafik
V	: Düğüm Kümesi
E	: Kenar Kümesi
c_{ij}	: i ile j Arasındaki Taşıma Maliyeti
x_{ij}	: i 'den j 'ye Gidiliyorsa 1, Aksi Takdirde 0
Q	: Araç Kapasitesi (Desi)
d_i	: i Numaralı Siparişin Yüğü (Desi)
P	: Rota Kümesi
u_i	: Aracın i . Müşteriyi Ziyaret Ettiğindeki Yüğü Durumu
$S(V, T)$	: V Düğümünden T Süre Biriminde Erişilebilen Düğüm Kümesi
T	: Süre (Saniye Veya Dakika Cinsinden)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Operasyonel Yapı – Şube ve Araç Sayıları.....	22
Çizelge 3.2 : Sipariş Toplama Değerleri.....	22
Çizelge 3.3 : Örnek Sipariş Verileri	22
Çizelge 4.1 : Başarıyla Toplanan Siparişlere Ait Rota Özeti	41
Çizelge 4.2 : Tam Talep Senaryosunda Oluşturulan Araç Rotaları Özeti	43





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : E-Ticaret Lojistiği.....	5
Şekil 1.2 : Esenyurt'un Türkiye ve İstanbul içindeki konumsal yeri.	7
Şekil 3.1 : Esenyurt İlçesinde Sipariş Noktaları ve Şube Konumları.	24
Şekil 3.2 : Proje Mimarisi.	28
Şekil 4.1 : Esenyurt İlçesi Sipariş Desi Yoğunluğu Haritası	37
Şekil 4.2 : Başarıyla Toplanan Siparişler için Oluşturulan Araç Rotaları	39
Şekil 4.3 : Başarıyla Toplanan Siparişler için Oluşturulan Araç Rotaları Detaylı Gösterimi	40
Şekil 4.4 : Tüm Siparişlerin Dâhil Edildiği Tam Talep Senaryosu – Rotalar ve Toplama Noktaları	42
Şekil 4.5 : Tüm Siparişlerin Dâhil Edildiği Tam Talep Senaryosu – Rotalar ve Toplama Noktaları Detaylı Gösterim	42
Şekil 4.6 : Haramidere Şubesine ait 134x134 Matrisinin Bir Kısımını	45
Şekil 4.7 : 7 Haramidere Şubesi İçin Rota Optimizasyonuna Ait Özet Bilgiler (Toplam Talep, Araç Kapasitesi ve Mesafe Matrisi Boyutu).....	45
Şekil 4.8 : Esenyurt Şubesi İçin Rota Optimizasyonuna Ait Özet Bilgiler (Toplam Talep, Araç Kapasitesi ve Mesafe Matrisi Boyutu)	46
Şekil 4.9 : OR-Tools ile Zaman Pencere VRP Çözümüne Ait Sonuç Bilgileri	46
Şekil 4.10 : OR-Tools ile Elde Edilen Rotaların Harita Üzerinde Görselleştirilmesi (Esenyurt ve Haramidere Şubeleri)	47



E-TİCARET FİRMALARINDA KARGO TOPLAMA OPERASYONLARININ MEKANSAL ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU: ESENYURT, İSTANBUL ÖRNEĞİ

ÖZET

Bu çalışma, İstanbul'un nüfus ve sipariş yoğunluğu bakımından öne çıkan Esenyurt ilçesinde yürütülen kargo toplama operasyonlarının mekânsal ve operasyonel açıdan değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Günümüzde e-ticaretin hızlı gelişimiyle birlikte, kentsel lojistik süreçlerin daha verimli, esnek ve veri temelli yapılara dönüştürülmesi gerekliliği artmıştır. Bu doğrultuda, çalışmada Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak siparişlerin konumsal dağılımı analiz edilmiş, Araç Rotalama Problemi (VRP) çözüm modelleriyle toplama rotaları yapılandırılmış ve operasyonel ölçütler üzerinden senaryo bazlı değerlendirmeler yapılmıştır.

Analiz sürecinin ilk aşamasında, sahadan elde edilen sipariş verileri üzerinde Kernel Yoğunluk Tahmini (KDE) yöntemi kullanılarak desiy bazlı sipariş kümelenmeleri ortaya konulmuş ve bu kümeler operasyonel planlamaya temel olacak şekilde görselleştirilmiştir. İkinci aşamada, ArcGIS Pro yazılımının Network Analyst modülü kullanılarak çeşitli operasyonel kısıtlar altında rota planlamaları yapılmıştır. Bu kısıtlar arasında araç kapasitesi, hizmet süresi, mola aralıkları ve çalışma zamanları yer almıştır.

Çalışmanın devamında, açık kaynaklı bir çözümleyici olan Google OR-Tools kütüphanesiyle, aynı veri seti üzerinde alternatif bir rota optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Modelin girdileri, Google Maps Distance Matrix API kullanılarak oluşturulan mesafe matrisi üzerinden hazırlanmış; rota süreleri, hizmet zamanları ve yük dengesi gibi parametreler sistematik biçimde tanımlanmıştır. Python dili kullanılarak geliştirilen bu yapı, kod temelli senaryo üretimi ve esneklik açısından uygulama avantajları sunmuştur.

Çalışma boyunca elde edilen bulgular, operasyonel yük dağılımı, araç kullanım verimliliği ve sistem esnekliği gibi faktörler üzerinden analiz edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar, farklı yazılım altyapılarının güçlü ve sınırlı yönlerini ortaya koymuş; kentsel kargo toplama süreçlerinin iyileştirilmesinde veri tabanlı yaklaşımların sunduğu katkıların daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Bu çerçevede çalışma, mekânsal analizler ve algoritmik modelleme tekniklerinin, kent içi lojistik planlamaya entegre edilebileceği bir karar destek sistemi mantığına dayalı uygulama örneği sunmaktadır.



SPATIAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF E-COMMERCE COMPANY'S PARCEL COLLECTION OPERATIONS: THE CASE OF ESENYURT, ISTANBUL

SUMMARY

The rapid expansion of the e-commerce sector has profoundly reshaped urban logistics by increasing the demand for faster, more efficient, and data-driven solutions. While the last-mile delivery segment has been widely studied and optimized in logistics literature, the earlier stage of the logistics chain — parcel collection from sellers or local warehouses to branch distribution centers — remains underexplored despite its critical impact on overall performance. This thesis investigates the parcel collection operations in Esenyurt, one of Istanbul's most densely populated and commercially active districts, through a comprehensive spatial and operational analysis. By integrating Geographic Information Systems (GIS), Vehicle Routing Problem (VRP) modeling, and Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) techniques, the study aims to provide actionable insights into improving urban parcel logistics.

Esenyurt was selected as the case study due to its strategic logistics importance. It has the highest population among Istanbul's districts and serves as a regional hub for commercial activity and warehousing, with direct access to major transportation corridors such as the E-5 and TEM highways. However, this advantage is tempered by serious logistical challenges including traffic congestion, narrow street networks, high order density, and inconsistently located collection points. These conditions make Esenyurt an ideal testbed for examining how advanced spatial and computational tools can be used to design more efficient cargo collection systems.

The research was conducted using real-world data provided by a leading Turkish e-commerce firm. This data included over 100,000 parcel pickup records with associated geographic coordinates, volumetric weights (in desi), and time stamps. The study focused on November 29, 2024 — the peak operational day in terms of order volume — to simulate the system under maximum pressure and evaluate its limitations and opportunities.

In the first stage of the analysis, the Kernel Density Estimation (KDE) method was employed using ArcGIS Pro to visualize and quantify the spatial clustering of parcel orders. KDE is a widely used statistical technique that transforms point-based spatial data into a continuous surface, revealing the geographic intensity of order demand. By doing so, the study identified critical hotspots where pickup activity was most concentrated. This step not only provided an intuitive visual representation of operational density but also laid the groundwork for informed route planning and resource allocation.

Next, the study leveraged ArcGIS Pro's Network Analyst module to develop optimized vehicle routes based on real street networks, traffic patterns, and logistical constraints. The model incorporated a range of real-world factors, such as vehicle capacity limits, driver working hours, lunch breaks, service times per stop, and maximum route durations. A total of 17 delivery vehicles — 9 from Esenyurt and 8 from Haramidere — were modeled to handle the workload across two branches. The ArcGIS-based VRP solution attempted to assign each parcel pickup to an optimal route, ensuring minimum travel time and balanced load distribution across vehicles.

The third component of the study involved an alternative modeling approach using the open-source Google OR-Tools framework, integrated within a Python environment. In this scenario, distance matrices were generated via the Google Maps Distance Matrix API, offering realistic travel time estimations between parcel locations and branch depots. The distance matrix was preprocessed and cached to improve performance, and various constraints such as vehicle capacity and service time were modeled in detail. This framework offered more flexibility and computational efficiency, allowing for rapid testing of alternative scenarios and larger datasets.

Both ArcGIS and OR-Tools modeling results were evaluated based on multiple performance criteria. These included the number of successfully collected parcels, total route duration, vehicle utilization rates, and unfulfilled orders. In the ArcGIS-based scenario, approximately 66,000 out of 104,000 parcels were successfully collected, while 38,000 remained uncollected due to time or capacity constraints. This outcome highlights the need for better route design, additional resources, or alternative planning strategies. The KDE results supported these findings by pinpointing high-demand areas that could benefit from micro-depot deployment or targeted fleet increases.

To compare the scenarios and select optimal solutions, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) techniques were applied. Instead of relying solely on a single metric such as cost or time, MCDM allowed for a more nuanced evaluation based on a combination of criteria including service coverage, efficiency, flexibility, and feasibility. This method acknowledged the complexity of urban logistics, where decision-makers must trade off between competing objectives and constraints. Through this evaluation, the study demonstrated that hybrid approaches — integrating spatial intelligence with algorithmic optimization — yield more robust and actionable solutions for parcel collection.

One of the key contributions of the study is its demonstration of how spatial data science can be used to support operational planning in e-commerce logistics. The use of GIS for density mapping, network modeling, and service area analysis allowed for a clear visualization of logistical bottlenecks and opportunities. Meanwhile, computational routing with OR-Tools illustrated how scenario planning and algorithmic experimentation can aid in adapting to peak demand and systemic constraints.

This research also fills a gap in both academic and applied literature by focusing on the parcel collection phase of the e-commerce logistics chain. Traditionally

overshadowed by last-mile delivery, parcel collection is equally important for ensuring overall service efficiency. The findings suggest that investment in data infrastructure, spatial analysis capabilities, and optimization tools can significantly improve the performance of this often-overlooked process. Moreover, the methodology developed in this thesis is generalizable to other high-density urban areas facing similar logistical challenges.

In conclusion, this thesis presents a practical and interdisciplinary framework for optimizing urban parcel collection operations. By combining real-world data, spatial analytics, route optimization, and multi-criteria evaluation, it offers both a theoretical and practical contribution to the field of urban logistics. The case study of Esenyurt serves not only as a local solution model but also as a scalable template for logistics planners working in complex urban settings. The integration of Geographic Information Systems, algorithmic routing tools, and decision-support methodologies lays the foundation for smarter, more responsive, and more sustainable logistics planning in the age of e-commerce.



1 GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

E-ticaret sektörü, son on yılda dijital dönüşümün de etkisiyle, özellikle büyük şehirler başta olmak üzere, küresel ölçekte tüketici alışkanlıklarında köklü değişimlere yol açmış; bu durum, lojistik sistemlerin yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmıştır. Sipariş hacmindeki artış, aynı gün teslimata yönelik artan beklentiler ve karmaşık kentsel yapılar, özellikle ürünlerin satıcıdan alınıp dağıtım merkezine ulaştırıldığı kargo toplama sürecinin stratejik ve operasyonel düzeyde yeniden ele alınmasını gerektirmiştir.

Bu bağlamda, bu çalışmanın temel amacı; İstanbul'un nüfus ve sipariş yoğunluğu en yüksek ilçelerinden biri olan Esenyurt ilçesi örneğinde, kargo toplama operasyonlarının mekânsal ve operasyonel verimliliğini analiz etmek ve bu analiz doğrultusunda, sürdürülebilirliği artıran, maliyet etkinliği sağlayan ve zaman açısından optimize edilmiş çözüm önerileri geliştirmektir.

Çalışma, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak siparişlerin konumsal dağılımını analiz etmekte; Araç Rotalama Problemi (VRP) çözüm modelleriyle kargo toplama rotalarının optimizasyonunu gerçekleştirmekte ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerini kullanarak operasyonel başarı ölçütlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. Böylelikle, hem mevcut operasyonel yapının kapsamlı bir analizini sunmakta hem de iyileştirme potansiyeli taşıyan alanları nesnel ve veri temelli bir yaklaşımla ortaya koymaktadır.

Kapsam bakımından bu araştırma, sahadan elde edilen sipariş ve dağıtım noktalarına ilişkin verilerin analizine dayanmaktadır. Çalışma; rota süresi, araç kapasitesi kullanımı, sipariş yoğunluğu, trafik yoğunluğu ve yol erişilebilirliği gibi çeşitli kriterleri içeren çok katmanlı bir değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır. Esenyurt ilçesi özelinde yürütülen bu çalışma, yalnızca yerel düzeyde operasyonel verimliliğe katkı sağlamayı değil, aynı zamanda benzer lojistik koşullara sahip diğer büyükşehirlerde uygulanabilir ve genellenebilir bir model önerisi geliştirmeyi de amaçlamaktadır.

1.2 Tezin Aşamaları

Bu tez kapsamında, e-ticaret lojistik süreçlerinde yer alan kargo toplama operasyonlarının mekânsal ve operasyonel olarak analiz edilmesi ve optimize edilmesi amaçlanmıştır. Aşağıda, çalışmanın aşamaları sistematik olarak özetlenmiştir:

1.2.1 Pilot Bölge ve Veri Toplama

Çalışmanın ilk aşamasında, analiz yapılacak pilot bölge belirlenmiş, bu bölgeye ait sipariş, araç ve müşteri verileri toplanmıştır. Ayrıca zaman dilimi seçilerek veri periyodu netleştirilmiştir.

1.2.2 Veri Hazırlığı ve Normalizasyon

Toplanan veriler teknik olarak düzenlenmiş, eksik veri dışı noktalar temizlenmiş ve analiz araçlarıyla uyumlu hale getirilmiştir. Bu aşamada veri türleri standartlaştırılarak GIS ortamına uygun forma dönüştürülmüştür.

1.2.3 Yoğunluk Analizi ve Heatmap Üretimi

Sipariş verilerinin mekânsal yoğunlukları Kernel Yoğunluk Tahmini (KDE) yöntemiyle analiz edilmiştir. Elde edilen yoğunluklar ArcGIS yazılımı ile görselleştirilerek sıcaklık haritaları (heatmap) oluşturulmuştur. Bu analiz, lojistik yoğunlukların bölgesel dağılımını anlamada kritik bir rol oynamıştır.

1.2.4 ArcGIS ile VRP Modelleme

ArcGIS Network Analyst modülü kullanılarak depo ve sipariş noktaları arasındaki güzergâhlar oluşturulmuş, Vehicle Routing Problem (VRP) modeli tanımlanmıştır. Bu model, sabit güzergâhlı çözüm önerisi sunmuştur.

1.2.5 Google OR-Tools ile Gelişmiş VRP Modelleme

İkinci bir optimizasyon yöntemi olarak Python diliyle, Google OR-Tools kütüphanesi kullanılarak daha esnek ve kontrol edilebilir bir VRP modeli geliştirilmiştir. Bu süreç üç alt adımdan oluşmaktadır:

- API Token & Distance Matrix Oluşturulması: Google Maps API kullanılarak trafik verisi içeren mesafe matrisi üretilmiştir.
- Matematiksel Model Tanımı: RoutingIndexManager, RoutingModel gibi yapılarla taşıma ağı kurulmuş, maliyet ve kısıtlar modele dahil edilmiştir.
- Çözüm Stratejisi ve Sonuç Analizi: Optimizasyon algoritmalarıyla rota çözümü elde edilmiş; toplam maliyet, yük dengesi ve zaman gibi çıktılar yorumlanmıştır.

1.2.6 Sonuçların Görselleştirilmesi ve Değerlendirilmesi

Elde edilen çıktılar görselleştirilmiş, hem ArcGIS hem de Google OR-Tools sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Optimum çözüm önerileri, işletmeye katkı sağlayacak şekilde yorumlanmıştır.

1.3 E-Ticaretin Lojistik Üzerindeki Etkisi

Dijitalleşmenin hızla yaygınlaşması, tüketicideki dönüşüm ve teknolojik altyapıların gelişimiyle birlikte e-ticaret sektörü, küresel ölçekte önemli bir büyüme ivmesi kazanmıştır. 2023 itibarıyla dünya genelinde e-ticaret satışlarının 6 trilyon Amerikan dolarını aşması, bu sektörün lojistik altyapılar üzerindeki baskısını da önemli ölçüde artırmıştır (Statista, 2023). Türkiye özelinde ise aynı yıl, toplam perakende hacminin %20'sinden fazlası çevrim içi platformlar üzerinden gerçekleştirilmiş olup, bu durum e-ticaretin ulusal düzeydeki ekonomik ve lojistik etkilerini gözler önüne sermektedir (TÜBİSAD, 2023).

E-ticaret sektöründeki hızlı büyüme ile birlikte, lojistik operasyonların yapısı da değişmiş; geleneksel B2B (işletmeden işletmeye) dağıtım modellerinin yerini, daha dağınık ve yoğun noktalara erişim gerektiren B2C (işletmeden tüketiciye) teslimat modelleri almaya başlamıştır. Bunun sonucu olarak; dağıtım sistemlerinin esnekliği, teslimat hızı, maliyet yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik gibi kriterler, lojistik sağlayıcılar açısından kritik başarı faktörleri hâline gelmiştir (Allen ve diğ, 2018).

E-ticaret lojistiği sadece son teslimat (last-mile delivery) aşamasında değil, aynı zamanda ilk aşama olan kargo toplama aşamasında da kapsamlı bir organizasyonel yeniden yapılanmayı zorunlu kılmaktadır. Artan sipariş hacmi, mikro-depolama

sistemlerinin yükseliş ve tüketicilerin kısa sürede teslimat beklentileri, özellikle büyük şehirlerde kargo toplama operasyonlarını daha da karmaşık ve yönetilmesi güç bir hale getirmiştir (Anand ve diğ, 2015).

Dolayısıyla, e-ticaret lojistiği, günümüzde yalnızca taşımacılık faaliyetleri ile sınırlı kalmayıp; veri analitiği, rota optimizasyonu, mekânsal karar destek sistemleri ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri gibi unsurların bütüncül biçimde ele alınmasını gerektiren çok boyutlu bir yapıya evrilmiştir.

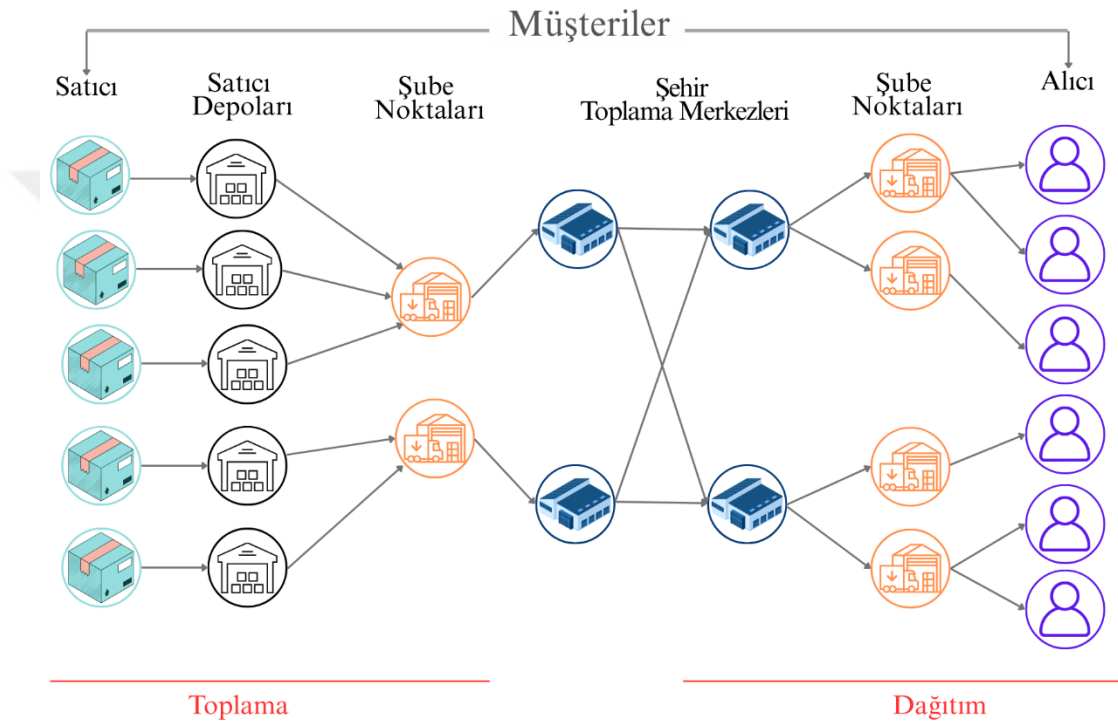
1.4 Kargo Toplama Sürecinin Lojistik Zincirindeki Yeri

E-ticaret lojistiği, birçok alt bileşeni barındıran çok aşamalı bir tedarik zincir yapısına sahiptir. Siparişin çevrim içi platform üzerinden alınmasından ürünün son kullanıcıya ulaştırılmasına kadar geçen süreç; ürün hazırlama, depolama, kargo toplama, ayırıştırma, dağıtım ve iade gibi aşamayı kapsamaktadır. Bu aşamaların her biri, genel hizmet kalitesi, müşteri memnuniyeti ve işletme verimliliği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Ancak literatürde, e-ticaret lojistiği bağlamında sıklıkla son teslimat (last-mile delivery) aşamasına odaklanılırken, ilk fiziksel hareket noktası olan kargo toplama aşaması çoğu zaman ihmal edilmektedir (Gonzalez ve diğ, 2012).

Oysa kargo toplama süreci, dağıtım zincirinin performansını belirleyen en temel halkalardan biridir. Bu aşama, ürünlerin satıcıdan ya da mikro depolardan alınarak lojistik merkezlere veya dağıtım şubelerine ulaştırılmasını kapsamaktadır. Toplama işleminin etkinliği, teslimat süreleri, rota maliyetleri ve araç kapasitesi kullanım oranları üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle kentsel alanlarda bu sürecin optimize edilmesi, yalnızca lojistik maliyetlerin azaltılması açısından değil, aynı zamanda trafik yoğunluğunun ve çevresel etkilerin minimize edilmesi gibi sosyal boyutlar bakımından da büyük önem taşımaktadır (Lin ve diğ, 2016).

Modern lojistik uygulamalarında kargo toplama sürecinin yönetimi, artık sadece manuel planlama yöntemleri ile değil; veri temelli, konuma duyarlı ve esnek planlama araçları ile gerçekleştirilmektedir. Toplama aşamasında yaşanacak gecikmeler veya düzensizlikler, tedarik zincirinin diğer halkalarına da olumsuz yansımakta; teslimat sürelerinde gecikmelere, ek maliyetlerin ortaya çıkmasına ve operasyonel baskıların artmasına yol açmaktadır (Anand ve diğ,2015).

Kargo toplama sürecinin lojistik zinciri içindeki bu kritik rolü, e-ticaret lojistik zincirinin bütünsel yapısında açıkça görülebilir. Şekil 1’de bu yapının temel aşamaları şematik olarak gösterilmektedir. Görselde de görüleceği üzere, süreç, çevrim içi siparişin alınması ile başlayıp, ürünlerin toplama noktalarından alınarak dağıtım şubelerine taşınması ve son kullanıcıya teslim edilmesi aşamalarıyla devam etmektedir. Bu zincirde toplama aşamasında meydana gelen aksaklıklar, sonraki tüm adımlarda zincirleme gecikmelere ve verimlilik kayıplarına yol açabilmektedir.



Şekil 1.1 : E-Ticaret Lojistiği.

Dolayısıyla, kargo toplama süreci lojistik taşıma faaliyetlerin yalnızca fiziksel taşıma aşamasının başlangıcı olmakla kalmayıp, aynı zamanda bütünsel performansın temel belirleyicisi konumundadır. Bu nedenle, kentsel lojistik sistemlerinin planlanmasında bu aşamanın daha kapsamlı analiz edilmesi, modellenmesi ve iyileştirme önerileriyle ele alınması gerekmektedir.

1.5 Kentsel Lojistiğin Önemi ve Zorlukları

Kentsel lojistik, yoğun nüfuslu ve karmaşık yapıli şehirlerde mal ve hizmet akışının yönetilmesi sürecidir. Günümüzde bu kavram, sadece taşıma ve dağıtım faaliyetlerinin organize edilmesiyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda şehir planlaması, çevresel

sürdürülebilirlik, toplumsal etkiler ve dijital sistemlerle entegrasyon gibi çok boyutlu unsurları da kapsamaktadır. Özellikle e-ticaretin yaygınlaşmasıyla birlikte artan sipariş hacmi, geleneksel lojistik modellerin yeniden değerlendirilmesini ve uyarlanmasını zorunlu kılmıştır (Dablanc, 2007).

Kentsel lojistik sistemlerinin stratejik önemi, şehirlerdeki yaşam kalitesini doğrudan etkilemelerinden kaynaklanır. Trafik yoğunluğu, yüksek yakıt tüketimi, karbon emisyonları, gürültü kirliliği ve yol altyapısının aşırı kullanımı gibi unsurlar, verimsiz kentsel lojistik operasyonların temel sorunları arasında yer almaktadır (Lin ve diğ., 2016). Bu tür olumsuzluklar, bir yandan lojistik işletmeleri açısından operasyonel maliyetlerin artırmasına neden olurken, diğer yandan kent sakinlerinin yaşam konforunu olumsuz yönde etkilemektedir.

Ayrıca, kentsel alanlarda uygulanan ulaşım kısıtlamaları, park yeri sınırlamaları, yoğun araç trafiği ve zaman sınırlı teslimat pencereleri, lojistik planlamayı daha da karmaşık bir hale getirmektedir. Özellikle büyük hacimli taşıma araçlarının dar sokaklarda manevra yapma zorluğu, teslimat sürelerinin uzamasına ve filo verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır. Bu gibi operasyonel kısıtlamalar, lojistik firmalarını daha küçük boyutlu araçların kullanımı, mikro dağıtım merkezlerinin kurulması ve alternatif taşıma modellerinin geliştirilmesi gibi yenilikçi çözümler üretmesine arayışına yönlendirmiştir (Macharis ve Bernardini, 2015).

Ayrıca, günümüzde kentsel lojistik sistemlerine ilişkin kararlar yalnızca ekonomik ölçütler temelinde değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal etkiler gözetilerek alınmaktadır. Bu bağlamda, veri destekli planlama araçlarının, coğrafi bilgi sistemlerinin ve çok kriterli değerlendirme yöntemlerinin entegrasyonu giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

1.6 Esenyurt'un Lojistik Açıdan Stratejik Konumu

İstanbul'un batı yakasında konumlanan Esenyurt ilçesi, son on yılda gerek demografik yapısı gerekse ekonomik dinamikleri açısından dikkat çekici bir dönüşüm süreci yaşamıştır. Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) 2023 verilerine göre Esenyurt, 1 milyonun üzerinde nüfusuyla İstanbul'un en kalabalık ilçesi konumundadır. Bu durum, bölgenin hem barınma hem de ticarî hareketlilik açısından yoğun bir cazibe merkezi hâline gelmesine neden olmuştur. Esenyurt'un yoğun konutlaşması, bölgesel

ticaret merkezlerinin varlığı, artan e-ticaret hacmi ve çeşitli depolama tesislerine ev sahipliği yapması, onu lojistik planlamada kritik bir alan haline getirmektedir.

Esenyurt, İstanbul'un TEM ve E-5 gibi iki ana arterine olan yakınlığı sayesinde şehir içi ve şehir dışı ulaşım açısından avantajlı bir konuma sahiptir. Bu yollar aracılığıyla, hem Avrupa yakasındaki diğer yoğun bölgelerle hem de çevre illerle lojistik bağlantılar kolayca sağlanabilmektedir. Bu nedenle Esenyurt, mikro dağıtım şubeleri, kargo aktarma merkezleri ve bölgesel depo yatırımları için tercih edilen başlıca alanlardan biri olmuştur.

Aşağıda sunulan görselde (Şekil 2.1), Türkiye genelinden başlayarak İstanbul'a ve oradan da İstanbul içerisindeki Esenyurt ilçesine uzanan mekânsal yönelim şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.2 : Esenyurt'un Türkiye ve İstanbul İçindeki Konumsal Yeri.

Esenyurt ilçesinin stratejik konumuna rağmen bölgedeki yoğun yapılaşma, dar sokak yapısı, trafik yoğunluğu ve düzensiz toplama noktaları; kargo toplama süreçlerinde rotaların verimsizleşmesine, araçların tam kapasite kullanılamamasına ve zamansal gecikmelere neden olmaktadır (Allen ve diğ, 2018). Bu nedenle Esenyurt, bir yandan lojistik faaliyetler için fırsatlar sunarken, diğer yandan kentsel lojistik planlamanın zorluklarını doğrudan gözlemleme imkânı tanıyan ideal bir çalışma alanı olarak değerlendirilmektedir.

Bu bağlamda, bu çalışmada Esenyurt ilçesinin seçilmiş olması rastlantısal değildir. İlçe yüksek sipariş hacmi, yoğun nüfus yapısı, karmaşık ulaşım ağı ve çok sayıda toplama noktasına ev sahipliği yapması sayesinde, gerçek dünya koşullarının

akademik analizle bütünleştirilmesine olanak tanıyan nitelikli bir çalışma ortamı sunmaktadır.

1.7 Kullanılan Yöntemlere Kavramsal Bakış

Bu çalışmada kullanılan yöntemler, kentsel lojistik sistemlerinin karmaşıklığını ve çok katmanlı yapısını analiz etmeye uygun, veri tabanlı ve karar odaklı araçlardan oluşmaktadır. Özellikle CBS, Araç Rotalama Problemi (VRP) ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, hem mekânsal hem de operasyonel düzeyde derinlemesine analiz yapabilme kapasitesi sunmaktadır. Aşağıda, bu üç temel yaklaşımın çalışmadaki rolü özetlenmektedir.

1.7.1 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

CBS, konumsal verilerin toplanması, yönetilmesi, analiz edilmesi ve görselleştirilmesine olanak sağlayan dijital bir teknolojidir. Şehir lojistiği bağlamında CBS, toplama ve dağıtım noktalarının konumsal dağılımını anlamak, rota bağlantılarını modellemek ve sipariş yoğunluklarını görselleştirmek açısından kritik öneme sahiptir (Rodrigue ve diğ., 2017). Bu çalışmada CBS, özellikle sipariş kümelenmelerini belirlemek, erişilebilirlik analizi yapmak ve alternatif senaryoları mekânsal olarak karşılaştırmak için kullanılmıştır.

1.7.2 Araç Rotalama Problemi (VRP)

VRP, belirli bir başlangıç noktasından çıkan araçların, bir dizi noktaya en uygun sırayla uğramasını sağlayacak rotaların belirlenmesini amaçlayan klasik bir optimizasyon problemidir. Kentsel e-ticaret lojistiğinde VRP, rota sürelerini kısaltmak, yakıt tüketimini azaltmak ve araçların kapasitesini daha verimli kullanmak için tercih edilmektedir (Anand ve diğ., 2015). Bu çalışma kapsamında VRP modeli; sipariş hacmi, araç kapasitesi, trafik yoğunluğu ve zaman kısıtları gibi faktörleri dikkate alarak optimize edilmiştir.

1.7.3 Kriterli Karar Verme (ÇKKV)

ÇKKV, birden fazla karar kriterinin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini mümkün kılan sistematik bir karar verme yaklaşımıdır. Kentsel lojistik gibi karmaşık sistemlerde yalnızca maliyet ya da mesafe gibi tek boyutlu değerlendirmeler yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle araç doluluk oranı, hizmet süresi, rota uzunluğu ve sipariş

hacmi gibi birden fazla kriterin birlikte analiz edilmesi gereklidir (Macharis ve Bernardini, 2015). Bu çalışmada ÇKKV yöntemleri, farklı senaryoların karşılaştırılmasında karar destek aracı olarak kullanılmıştır.

1.7.4 Mesafe Matriksi (Distance Matrix)

Mesafe matrisi (distance matrix), belirli bir kümedeki nesneler arasındaki mesafeleri gösteren simetrik veya asimetrik $n \times n$ boyutlu bir matristir. Bu yapı, graf teorisi, ağ analizi, makine öğrenmesi, biyoinformatik, optimizasyon ve özellikle rota planlama gibi pek çok alanda temel veri biçimi olarak kullanılır. Matriste her bir hücre d_{ij} , i ve j nesneleri (veya düğümleri) arasındaki mesafeyi, süreyi, maliyeti veya benzeri bir metrik değeri ifade eder.

Mesafe matrisi, farklı mesafe ölçümleriyle oluşturulabilir. Örneğin:

- Öklidyen mesafe (Euclidean distance): Fiziksel uzaklıklar için,
- Manhattan mesafesi: Şehir blok yapısına sahip alanlarda,
- Zaman/süre temelli mesafeler: Trafik ve ulaşım analizlerinde,
- Maliyet bazlı mesafeler: Lojistik ve üretim uygulamalarında tercih edilir.

Yönsüz bir ağda mesafe matrisi genellikle simetriktir ($d_{ij} = d_{ji}$). Ancak yönlü ağlarda veya trafik gibi dinamik sistemlerde bu simetri bozulabilir ve matris asimetrik hale gelir.

Mesafe matrisleri, özellikle araç rotalama problemi (VRP), gezgin satıcı problemi (TSP) ve kümeleme algoritmaları (clustering) gibi uygulamalarda karar değişkenlerinin maliyetini belirlemede merkezi bir rol oynar. Optimizasyon algoritmaları, çözüm üretme sürecinde bu matrisi kullanarak toplam maliyetin/sürenin minimize edilmesini hedefler.



2 LİTERATÜR TARAMASI: KENTSEL KARGO TOPLAMA VE ANALİZ YAKLAŞIMLARI

2.1 E-Ticaret Tedarik Zincirinde Kargo Toplama Sürecinin Yeri

E-ticaret tedarik zinciri, siparişin müşteriye ulaşmasına kadar geçen çok aşamalı ve çok aktörlü bir süreci kapsamaktadır. Bu süreçte, siparişin alındığı noktadan şube veya dağıtım merkezine taşınmasıyla başlayan kargo toplama aşaması, tüm sistemin zamanlaması ve operasyonel verimliliği üzerinde belirleyici bir role sahiptir.

Bu alanda yapılan çalışmalarda, kargo toplama süreçlerinin dağıtım operasyonlarına olan etkisi özellikle son yıllarda dikkat çekmektedir. Örneğin, Yılmaz ve diğ. (2021) tarafından bir kargo şirketinde yapılan süreç iyileştirme çalışmasında, siparişlerin alınmasından dağıtım merkezine ulaşmasına kadar olan sürecin zaman ve maliyet açısından analizi yapılmış, rotalama kararlarının bu sürecin performansını doğrudan etkilediği ortaya konulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, İstanbul Esenyurt örneği üzerinden kargo toplama sürecinin mekânsal ve operasyonel verimliliğinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Çalışma, toplama işleminin stratejik önemini vurgulayarak, bu aşamanın tedarik zincirinin sonraki süreçleri üzerindeki etkilerini sayısal verilerle ortaya koymaktadır.

2.2 Kentsel Lojistikte Karşılaşılan Temel Sorunlar

Kentsel lojistik, yoğun yerleşim alanları, trafik sıkışıklığı, çevresel kısıtlar ve dağıtım beklentilerinin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan çeşitli zorluklarla şekillenmektedir. Özellikle büyük şehirlerde; erişim problemleri, park alanı yetersizlikleri, düzensiz sipariş dağılımı, filo kapasitesinin yetersizliği ve çevresel baskılar, lojistik sistemlerin etkinliğini önemli ölçüde azaltmaktadır (Dablanc, 2007).

Bu bağlamda Aydınoglu ve diğ. (2021), COVID-19 sürecinde kargo şirketleri için uygun tesis yer seçimi problemini analiz etmiş; değişen talepler, hareket kısıtları ve mekânsal faktörlerin kentsel lojistikteki etkilerini ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmada

karar alma süreçlerine belirsizliklerin dahil edilmesi, karmaşık ve dinamik karar ortamlarının anlaşılmasına katkı sağlamıştır.

Esenyurt gibi yüksek yoğunluklu kentsel bölgelerde söz konusu sınırlamalar daha yoğun gözlemlendiğinden, bu çalışmada sahaya dayalı veriler kullanılarak bu zorluklar kapsamlı bir şekilde analiz edilmiş ve ölçülebilir parametrelere dönüştürülmüştür.

2.3 Araç Rotalama Problemi (VRP) ve Uygulama Alanları

Araç Rotalama Problemi (VRP), özellikle şehir içi dağıtım planlamasında maliyetlerin minimize edilmesi, hizmet sürelerinin kısaltılması ve kaynak kullanımının optimize edilmesi amacıyla yaygın bir şekilde uygulanmaktadır (Anand ve diğ, 2015). Araç Rotalama Problemi'nin (VRP) farklı versiyonları olan Kapasiteli VRP (CVRP), Zaman Pencere VRP (VRPTW), Dinamik VRP (DVRP) ve İki-Etaplı VRP (2E-VRP) gibi modeller, kentsel lojistikte esnek ve etkin çözüm alternatifleri sunmaktadır.

Atmaca (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, bir kargo şirketinde VRP uygulaması ele alınmış ve toplam mesafenin %25 azaltılabileceği gösterilmiştir. Benzer şekilde, Gonzalez-Feliu ve diğ. (2012), Fransa'nın Lyon kentinde iki aşamalı dağıtım sistemi ile (2E-VRP) trafik ve karbon emisyonlarını düşürmeyi hedeflemiştir.

Bu çalışmada da, Esenyurt'taki sahaya özgü verilerle hem klasik hem optimize VRP çözümleri üretilmiş, mevcut planlamaların potansiyel verimlilik eksiklikleri ortaya konmuştur.

2.4 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile Mekânsal Lojistik Analizi

CBS, kentsel lojistikte mekânsal erişilebilirlik, yoğunluk, kapsama alanı ve güzergâh analizi gibi konularda etkili bir karar destek aracı olarak kullanılmaktadır (Rodrigue ve diğ, 2017). Özellikle çok noktalı sipariş yapılarında konumsal kümelenmeleri analiz etmek ve erişim optimizasyonu sağlamak açısından vazgeçilmezdir.

Topal (2022), çok modlu taşımacılık güzergâhlarının CBS destekli optimizasyonunu incelemiş ve güzergâh kararlarının konumsal verilere olan bağımlılığını ortaya koymuştur. Bediroğlu (2022) ise açık kaynak CBS araçları kullanarak kentsel kargo istasyonlarının yerleştirilmesi problemini optimizasyon yöntemleriyle entegre etmiştir.

Esenyurt örneğinde, bu çalışmada CBS yardımıyla sipariş yoğunlukları Kernel Yoğunluk Tahmini (KDE) yöntemiyle analiz edilmiş, servis alanları ve rota uygunluğu ArcGIS platformu üzerinde modellenmiştir.

2.5 Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV/MCDM) Yöntemlerinin Lojistikte Kullanımı

Kentsel lojistik sistemlerinde karar verme süreçleri genellikle birden fazla değişkenin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Araç rotalarının verimliliği yalnızca mesafe ile değil; sipariş hacmi, araç doluluğu, trafik yoğunluğu, hizmet süresi gibi çok sayıda ölçüte bağlıdır. Bu nedenle, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, bu tür çok boyutlu karar problemlerinde etkin ve sistematik çözümler sunmaktadır (Macharis ve Bernardini, 2015).

Bennani ve diğ. (2022), Kazablanka'da belirsizlik ortamında kargo dağıtım merkezlerinin yer seçimini bulanık ÇKKV yöntemleriyle (F-SWARA, F-ENTROPY, F-VIKOR) değerlendirmiştir. Çalışma, kentsel lojistikte belirsizliklerin karar sürecine etkisini ele alması açısından dikkat çekicidir. Ayrıca Alvarez Gallo ve Maheut (2023), MCDM yöntemlerinin 10 yıllık kentsel lojistik uygulamalarını sistematik olarak incelemiş ve bu alanda en yaygın kullanılan teknikleri ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada da, Esenyurt bölgesine yönelik uygulanan senaryolar, farklı ölçütler (rota süresi, doluluk, talep seviyesi vb.) çerçevesinde karşılaştırılmış ve önerilen çözümler ÇKKV yaklaşımı doğrultusunda değerlendirilerek karar verme sürecine analitik bir katkı sağlanmıştır.

2.6 Türkiye’de Kentsel Lojistik ve Kargo Toplama Üzerine Akademik Çalışmalar

Türkiye’de kentsel lojistik sistemleri üzerine yapılan akademik çalışmalar, ağırlıklı olarak büyükşehirlerdeki dağıtım süreçleri, tesis yeri seçimi ve filo verimliliği konularına odaklanmaktadır. Bu çalışmalarda yoğunlukla sahaya dayalı veriler kullanılarak, CBS ve Araç Rotalama Problemi (VRP) gibi analitik ve optimizasyon temelli tekniklerle çözüm önerileri geliştirilmiştir.

Şevket Bediroğlu (2022), açık kaynak CBS araçlarıyla kentsel dağıtım ağlarını optimize etmiş ve istasyon noktalarının uygunluğunu değerlendirmiştir. Benzer

şekilde, Aydınoglu ve diğ. (2021), çalışmalarında COVID-19 dönemi özelinde İstanbul'da lojistik tesis yer seçimi analizi gerçekleştirmişlerdir. Ediz Atmaca (2016) ise doğrudan bir kargo şirketinde VRP çözümlemesi yaparak sahada %25'e varan verimlilik potansiyeli göstermiştir.

Bu çalışma, literatürdeki bu tür saha temelli örnekleri esas alarak Esenyurt özelinde CBS + VRP + ÇKKV entegrasyonu ile daha kapsamlı bir analiz sunmayı hedeflemektedir.

2.7 Dünya Geneline Kargo Toplama ve Kentsel Lojistik Çalışmaları

Uluslararası literatürde kentsel kargo toplama sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, farklı ülkelerde uygulanan modellerin karşılaştırmalı analizlerini içermektedir. Bu çalışmalar, kentsel yapı özellikleri, teknolojik altyapı düzeyi, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri ve politika farklılıkları doğrultusunda çeşitli yöntemsel yaklaşımlar ortaya koymuştur.

Zichong Lyu ve diğ. (2023), Yeni Zelanda'da gerçekleştirdikleri çalışmada kentsel dağıtım ve toplama süreçlerini kümeleme, ayrık olay simülasyonu ve CBS ile entegre biçimde analiz etmişlerdir. Ayrıca Jeong ve Song (2025) tarafından Seul'de metro hattı ile entegre edilmiş bir yer altı taşımacılık ağı üzerinden geliştirilen VRP modeli, geleneksel yüzey lojistik sistemlerinden daha çevreci ve verimli alternatifler sunmuştur.

Bu bağlamda, bu tez çalışması da İstanbul'un kentsel yapısına uygun olarak hem CBS destekli analizleri hem de senaryo tabanlı optimizasyonları bir araya getirerek Türkiye'deki literatüre yeni bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

3 MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, İstanbul'un Esenyurt ilçesinde yürütülen kargo toplama operasyonları, mekânsal analiz ve rota optimizasyonu teknikleriyle değerlendirilmiştir. Analiz süreci iki aşamalı olarak yapılandırılmıştır. İlk aşamada, ArcGIS Pro yazılımı kullanılarak sipariş verilerinin mekânsal dağılımı Kernel Yoğunluk Tahmini (KDE) yöntemi ile görselleştirilmiş, ardından CBS tabanlı ağ (network) analizi ile Araç Rotalama Problemi (VRP) çözümü gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada ise, daha esnek ve büyük veri kümeleri üzerinde çalışabilen açık kaynaklı Google OR-Tools kütüphanesi kullanılarak VRP modeli yeniden yapılandırılmıştır. Python 3.9 sürümünde geliştirilen bu uygulama, Cursor IDE üzerinde, yapay zekâ destekli kod tamamlama ve hata ayıklama araçlarıyla birlikte geliştirilmiştir. Uygulama sürecinde çözüm modülleri bağımsız ve sürdürülebilir olacak şekilde tasarlanmıştır. Geliştirilen sistemin tüm kaynak kodlarına aşağıdaki GitHub bağlantısı üzerinden erişilebilir:

https://github.com/reyyansarikaya/master_vrp

3.1 Kernel Yoğunluk Tahmini (Kernel Density Estimation – KDE)

Kernel Yoğunluk Tahmini (KDE), noktasal verilerin mekânsal dağılımını sürekli ve kesintisiz bir yüzey olarak modellemeyi amaçlayan istatistiksel temelli bir mekânsal analiz yöntemidir. Bu yöntem, belirli bir coğrafi alandaki yoğunluk örüntülerinin görselleştirilmesi ve mekânsal karar süreçlerinin desteklenmesi açısından önemli bir araçtır. Özellikle şehir planlaması, suç analizi, sağlık coğrafyası ve lojistik gibi disiplinlerde; yoğunluk haritalarının (heatmap) oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan temel analiz araçlarından biri olarak öne çıkmaktadır (Bailey ve Gatrell, 1995; Longley ve diğ., 2015).

KDE analizinde, her bir veri noktası çevresine simetrik bir çekirdek fonksiyonu (genellikle Gauss dağılımı) uygulanmakta ve bu fonksiyon, belirli bir bant genişliği

(bandwidth) kapsamında çevresindeki alanlara ağırlık atamaktadır. Bant genişliği, analiz edilen yoğunluk yüzeyinin düzlüğünü ya da ayrıntı düzeyini belirleyen temel parametrelerden biridir. Daha küçük bir bant genişliği, lokal yoğunluk farklılıklarının vurgulanmasını sağlarken; daha büyük bant genişlikleri, genel mekânsal eğilimlerin ön plana çıkmasına neden olmaktadır (Silverman, 1986).

Matematiksel olarak, KDE yöntemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$f(x) = (1/nh) * \sum K((x - x_i)/h) \quad (3.1)$$

Burada:

- $f(x)$: x noktasındaki tahmini yoğunluk
- n : veri noktalarının sayısı
- h : bant genişliği
- K : çekirdek fonksiyonu (örneğin Gauss, Epanechnikov)
- x_i : her bir veri noktası konumu

CBS tabanlı KDE analizlerinde genellikle raster formatta sonuç üretilir. Bu raster yüzeyin her bir hücresindeki değer, o hücrenin çevresindeki veri yoğunluğunun tahmini bir ifadesidir. Analizin çıktısı, renk skalası ile ifade edilen yoğunluk haritaları (heatmaps) şeklinde sunulur ve görsel analizlerde büyük kolaylık sağlar.

Kargo lojistiği bağlamında, KDE özellikle sipariş noktalarının veya ürün toplama yoğunluğunun coğrafi dağılımını tespit etmekte kullanılır. Böylece, toplama veya teslimat hizmetlerinin ne şekilde yoğunlaştığı anlaşılabilir ve daha sonra uygulanacak network analizi ya da araç rotalama modelleri için temel teşkil edebilir (Yomralıoğlu, 2000).

KDE yöntemi, ham mekânsal veri kümelerinden anlamlı mekânsal eğilimler ortaya çıkarmada sezgisel ancak güçlü bir analiz aracıdır. Bu yöntem, yoğunluk merkezlerinin, kümelenme bölgelerinin ve coğrafi dengesizliklerin önceden tespit edilmesine olanak tanıyarak karar destek süreçlerine önemli katkılar sağlar.

3.2 Network Analizi

CBS tabanlı network analizi, çizgi (line) geometriye sahip mekânsal nesneler arasında bağlantı, yön ve maliyet gibi özniteliklere dayanarak en uygun yolların belirlenmesini

sağlayan bir analiz türüdür. Bu analizde kullanılan “ağ (network)” yapısı; bir noktadan diğerine erişim sağlayan, belirli kurallara ve yapıya göre düzenlenmiş kenar (edge) ve kavşak (junction) bileşenlerinden oluşur. Ayrıca ağın dönüş kurallarını belirlemek üzere turn (dönüş) bileşeni de tanımlanabilir. Bu yapı sayesinde, hem fiziksel (karayolu, demiryolu) hem de sanal (idari sınırlar) hatların mekânsal ilişkileri analiz edilebilir (Yılmaz ve diğ, 2019).

Ağ analizinin temel amacı, bağlantılar arasındaki hareketin en verimli ve uygun şekilde gerçekleşmesini sağlamaktır. Bu bağlamda analizler, ulaşımaya yönelik karar verme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmakta olup; şehir planlaması, lojistik optimizasyon, ulaşılabilirlik ölçümü ve yer seçimi gibi birçok alanda etkili çözümler sunmaktadır.

Network analizleri genellikle yönlü, ağırlıklı ve bağlantılı bir graf ($G = V, E$) yapısı üzerinde yürütülür. Burada V , düğümler kümesini (örneğin adres noktaları, kavşaklar), E ise, kenarlar kümesini (örneğin yollar) ifade eder. Her kenar e \in E , bir ağırlık ya da maliyet değeriyle (zaman, mesafe vb.) tanımlanır. Ağ analizlerinde en çok karşılaşılan problemlerden biri en kısa yol (shortest path) problemidir. Bu problem, kaynak düğümden hedef düğüme minimum maliyetle ulaşan yolun bulunmasını amaçlar ve matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$\min \sum_{(i,j \in P)} c_{ij} \quad (3.2)$$

Burada P , kaynak ve hedef düğüm arasındaki yol kümesini; c_{ij} , i ile j arasındaki geçiş maliyetini temsil eder. Bu tür problemler, genellikle Dijkstra, A^* ve Bellman-Ford gibi algoritmalarla çözülür.

Bir diğer önemli network analizi ise servis alanı (service area) analizidir. Bu analiz, belirli bir başlangıç noktasından belirli bir maliyet (örneğin süre) sınırına kadar ulaşılabilen alanların belirlenmesi için kullanılır. Bu analiz, aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$S(v, T) = \{u \in V \mid \text{Cost}(v, u) \leq T\} \quad (3.3)$$

Burada $S(v, T)$, v düğümünden T süre biriminde ulaşılacak tüm düğümleri gösterir. Bu analiz özellikle mekânsal erişim eşitsizliklerinin ortaya konmasında ve hizmet dağılımının planlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

CBS tabanlı ağ analizlerinde kullanılan veri yapısı, analizlerin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Yılmaz ve diğ. (2019)'a göre ağ bileşenleri genel olarak şu üç temel birimden oluşur:

- Kenar (Edge): Yolları temsil eden çizgi geometrileridir.
- Kavşak (Junction): Kenarların kesişim veya birleşim noktalarıdır.
- Dönüş (Turn): Kenar-kavşak geçişlerindeki yönelimleri kontrol eden bileşendir (örneğin U dönüşü yasağı).

Bunun yanı sıra, ağlar üzerinde hiyerarşik sınıflamalar yapılarak yol tiplerine sınıf değerleri atanabilir (ör. sokak, cadde, bulvar, otoyol). Bu sınıflandırma, yol seçiminde önceliklendirme yapılmasına olanak sağlar (Kesik ve diğ, 2015). Ayrıca analiz öncesinde impedans (engelleme/direnç) değeri belirlenir. Bu değer zaman, maliyet, yakıt tüketimi gibi ölçütler üzerinden modellenenebilir.

Ağ analizi uygulamaları arasında en yaygın olanlar şunlardır:

- En kısa/uzun yol hesaplaması
- Servis alanı belirleme
- En yakın tesis tespiti
- Arz-talep dağılım analizi
- Rota optimizasyonu ve yer seçimi
- Uygunluk/maliyet matrislerinin hesaplanması

Sonuç olarak network analizi, sadece fiziksel yol yapılarının değil aynı zamanda bu yapılar arasındaki ilişkilerin modellenmesini sağlayan kapsamlı bir analiz biçimidir. Uygulama alanları, kargo dağıtımı, kamu hizmetleri erişimi, acil müdahale planlaması gibi birçok sektörü kapsamaktadır.

3.2.1 ArcGIS ile Network Analizi Uygulaması

ArcGIS Pro, CBS tabanlı analizlerde en yaygın kullanılan yazılımlardan biri olup, bünyesinde bulunan Network Analyst eklentisi sayesinde çizgisel veri tabanlı ağ analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Network Analyst modülü, gerçek dünyadaki ulaşım ağlarını dijital ortamda modelleyerek çeşitli analizlerin gerçekleştirilmesini mümkün kılar. Bu analizler arasında en kısa yol belirleme, servis

alanı oluşturma, en yakın tesis belirleme, maliyet matrisleri oluşturma ve araç rotalama problemlerinin çözümü bulunmaktadır (Esri, 2023).

Network analizinin gerçekleştirilmesi için öncelikle bir ağ veri seti (network dataset) oluşturulur. Bu veri seti, yolların yön bilgisi, sınıflandırması, seyahat süresi veya mesafesi gibi parametrelerle birlikte geometrik ve özniteliksel olarak modellenmiş yol verilerinden oluşur. Ağ üzerindeki analizler, tanımlanan bu özniteliklere göre yürütülür ve kullanıcı tarafından belirlenen maliyet türüne (örneğin zaman veya mesafe) göre optimize edilir.

ArcGIS Pro ile yapılan analizlerde en çok tercih edilen fonksiyonlardan biri servis alanı (service area) analizidir. Bu analiz, belirli bir başlangıç noktasından belli bir süre veya mesafe içerisinde erişilebilecek alanları tanımlamak için kullanılır. Örneğin bir sağlık kuruluşunun 10 dakikalık erişim alanı ya da bir dağıtım merkezinin 5 km'lik servis bölgesi bu yöntemle haritalanabilir. Bu analiz, erişilebilirlik ölçümü, kamu hizmetlerinin planlanması ve lojistik kaynak dağıtımında önemli karar destek unsurlarındandır.

Bir diğer önemli işlev ise Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem – VRP) çözümüdür. Bu fonksiyon, önceden tanımlanmış sipariş noktaları, şube lokasyonları ve araç parametreleri doğrultusunda, rotaların optimizasyonunu sağlar. Kullanıcı; araç kapasitesi, maksimum rota süresi, mola saatleri ve hizmet süresi gibi operasyonel kısıtları tanımlar. Sistem, bu girdilere uygun şekilde araçların hangi noktalara, hangi sırayla ve hangi güzergâhtan ulaşacağını hesaplayarak rota atamaları yapar.

ArcGIS'in VRP çözüm motoru, arka planda sezgisel algoritmalar (örneğin Tabu Search, Insertion Heuristics) ve ardından gelen iyileştirme (post-optimization) döngüleriyle çalışır (Zografos ve Androustopoulos, 2008). Bu sayede kullanıcı dostu arayüz üzerinden, detaylı ve gerçekçi senaryoların analiz edilmesi mümkün olur. Ancak ağın her senaryoda yeniden oluşturulması, büyük veri setlerinde çözüm süresinin uzun olması ve dinamik trafik verilerinin doğrudan işlenememesi gibi sınırlılıkları da bulunmaktadır.

3.3 Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem – VRP)

Araç Rotalama Problemi (VRP), bir merkezden (depo, şube vb.) başlayarak bir dizi müşteriye hizmet veren araçların rotalarının en uygun şekilde belirlenmesini

amaçlayan kombinatoriyel optimizasyon problemidir. İlk kez Dantzig ve Ramser (1959) tarafından tanımlanan bu problem, özellikle lojistik, kargo dağıtımı, kamu hizmetleri ve taşımacılık planlamasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

VRP'nin temel amacı, mevcut kaynakları (araçlar) en verimli şekilde kullanarak toplam taşıma maliyetini (genellikle mesafe veya süre) minimize etmek ve aynı zamanda müşteri taleplerini karşılamaktır. Bu nedenle VRP, hem mekânsal optimizasyon hem de zaman/maliyet kısıtları ile ilgili çok boyutlu bir karar problemidir.

VRP aşağıdaki şekilde matematiksel olarak modellenabilir:

$$\min \sum_{(i,j) \in P} c_{ij}$$

Kısıtlar:

1. Her müşteri yalnızca bir araç tarafından ziyaret edilir:

$$\sum x_{ij} = 1 \quad \forall i \in C$$

2. Her araç kendi rotasına depodan başlar ve oraya döner:

$$\sum x_{0j} = k, \quad \sum x_{i0} = k$$

3. Araç kapasitesi aşılmaz:

$$\sum d_i x_{ij} \leq Q \quad \forall j$$

4. Alt turların engellenmesi (Subtour Elimination – MTZ yaklaşımı):

$$u_i - u_j + Q x_{ij} \leq Q - d_j \quad \forall i \neq j, i, j \in C$$

Burada:

- N: tüm düğümler kümesi (müşteriler + depo)
- C: müşteri kümesi
- c_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki taşıma maliyeti
- x_{ij} : i'den j'ye gidilirse 1, aksi halde 0
- Q: araç kapasitesi
- d_i : i müşterisinin talebi
- u_i : aracın müşteri i'yi ziyaret ettiğinde taşıdığı yük

VRP literatüründe pek çok varyant mevcuttur. En yaygın olanları şunlardır:

- CVRP (Capacitated VRP)
- VRPTW (Time Windows)
- MDVRP (Multiple Depot VRP)
- VRPPD (Pickup and Delivery)
- DVRP (Dynamic VRP)

VRP problemleri, NP-zor sınıfına girer ve bu nedenle büyük örneklerde kesin çözüm yöntemleri yerine yaklaşık algoritmalar tercih edilir (Toth ve Vigo, 2014; Laporte, 2009).

Meta-sezgisel algoritmalar (örneğin Tabu Search, Genetic Algorithms, Ant Colony Optimization), özellikle gerçek dünya senaryolarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Golden ve diğ, 2008).

CBS tabanlı VRP analizleri, çözümlerin coğrafi bağlamda görselleştirilmesine olanak tanıyarak karar destek süreçlerine katkı sağlar (Zografos ve Androustopoulos, 2008).

3.4 ArcGIS Tabanlı Uygulama

3.4.1 Verilerin ArcGIS Ortamına Aktarılması

Araç Rotalama Problemi (VRP) çözümüne yönelik ilk uygulama süreci, CBS tabanlı bir platform olan ArcGIS Pro yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu süreç, veri hazırlama, ağ yapısının kurulumu ve analiz altyapısının oluşturulmasını kapsamaktadır. Modelleme çalışmaları üç temel veri bileşeni üzerine kurulmuştur: sipariş noktaları, şube (depo) konumları ve filo bilgileri, ve yol ağı verisi.

Bu çalışmada kullanılan tüm saha verileri, Türkiye'nin lider e-ticaret firmalarından biri ile yürütülen iş birliği kapsamında temin edilmiştir. Veri seti, günlük operasyon süreçlerinde gerçek kullanıcı siparişlerine dayanmaktadır ve doğrudan saha uygulamalarını yansıtmaktadır. Analiz, sistemin en yoğun günü olan 29 Kasım 2024 tarihine ait operasyonel verilere odaklanmıştır. Söz konusu gün, hem sipariş hacmi hem de operasyonel yük açısından örnekleme zirve noktasını temsil etmekte ve sistem üzerindeki maksimum baskıyı yansıtmaktadır.

Modelleme sürecinde her şubeye ait araç sayısı ve araç kapasite limitleri de sistematik şekilde tanımlanmıştır. Aşağıda sunulan tablo, operasyonel filonun genel yapısını özetlemektedir:

Çizelge 3.1 : Operasyonel Yapı – Şube ve Araç Sayıları.

Şubeler	Araçlar	Araç Kapasitesi
Esenyurt	9	15.000
Haramidere	8	15.000

Bunun yanı sıra, ArcGIS üzerinde tanımlı VRP çözüm modelinin çıktılarının değerlendirilmesine temel oluşturacak performans verileri de önceden yapılandırılmıştır. Aşağıdaki çizelge, başarılı ve başarısız sipariş toplama durumlarına ilişkin veriler sunulmaktadır.

Çizelge 3.2 : Sipariş Toplama Değerleri.

Metrikler	Değer
Toplanan Kargolar	65.993
Toplanamayan Siparişler	38.515

Analiz sürecinde kullanılan sipariş veri setine ait örnek bir kesit aşağıda sunulmuştur. Bu çizelge, her sipariş noktasının temel özelliklerini (barkod, adres, koordinat, desi, vb.) özetlemektedir.

Çizelge 3.3 : Örnek Sipariş Verileri.

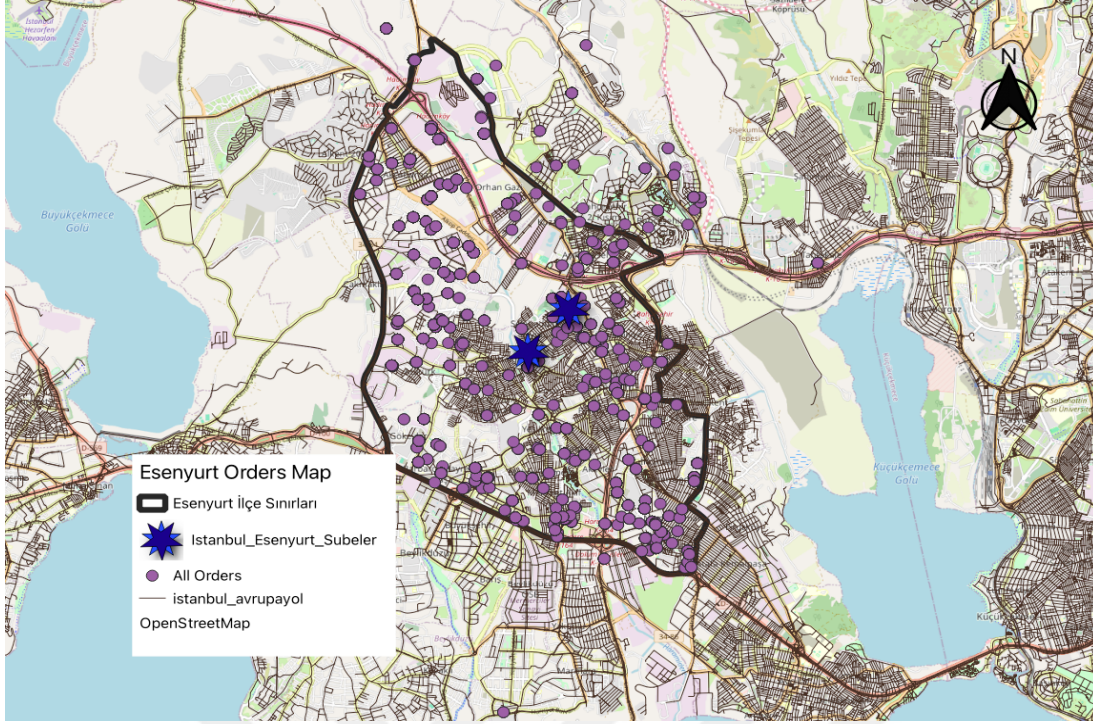
İşlem Günü	Adres ID	Adres	Desi	Enlem	Boylam
2021-11-29 13:43:19.4 71	31938970 10	Orne Mah. Uğur Mumcu Cad.i No:17/1 DAF Kiti Kam Esenyurt / İSTANBU L	4.0	40.995862292 99129	28.69358409836 712

Çizelge 3.3 (devamı) : Örnek Sipariş Verileri.

İşlem Günü	Adres ID	Adres	Desi	Enlem	Boylam
2021-11- 29 12:57:31.4 82	38962788 4	Bershka Depo Ömerli Mahallesi Hadımköy İstanbul Caddesi Sertrans Depo	10.0	41.1797697684 4255	28.01525516616 56
2021-11- 29 15:21:03.0 08	18986710 8	Bağlar mah. Osmangaz i cad. no:35/B Biçerler Plaza ism : Motto İstanbul	4.0	41.026846	28.962173

Saha verileri ArcGIS ortamına .csv ve .shp formatlarında entegre edilmiştir. Sipariş verileri, her bir gönderi noktasının coğrafi koordinatlarını, hacimsel yük değerini (desi), gönderim zamanını ve gönderici bilgilerini içermektedir. Bu veri seti üzerinden yapılan mekânsal analizler, Esenyurt ilçesi içerisinde kargo yoğunluğunun hangi bölgelerde toplandığını ortaya koymuştur.

Aşağıda yer alan haritada (Şekil 3.1), Esenyurt ilçesi sınırları içerisinde yer alan e-ticaret sipariş noktaları ile bu siparişlerin toplanmasında görevli iki ana şube olan Esenyurt ve Haramidere şubelerinin coğrafi konumları görselleştirilmiştir. Harita üzerinde noktasal verilerin mekânsal dağılımı incelendiğinde, bazı semtlerde siparişlerin belirli bölgelerde yoğunlaştığı ve kümелendiği açıkça gözlemlenmektedir. Bu mekânsal yoğunlaşma örüntüleri, ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilecek olan Kernel Yoğunluk Tahmini (KDE) analizleri ve Araç Rotalama Problemi (VRP) çerçevesinde yapılacak rota optimizasyonları için kritik bir ön analiz zemini sunmakta; sipariş yoğunluğunun hangi bölgelerde odaklandığını belirleyerek kaynak planlaması, şube konumlandırması ve operasyonel verimlilik açısından stratejik kararlar alınmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 3.1 : Esenyurt İlçesinde Sipariş Noktaları ve Şube Konumları.

3.4.2 Sipariş Verileri ve Yoğunluk Haritası Oluşturulması

VRP analizinin doğru bir şekilde modellenebilmesi için sipariş noktalarının mekânsal dağılımının anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, sipariş verileri yalnızca sayısal olarak değil, aynı zamanda konumsal bağlamda da analiz edilmiştir. Siparişlerin yoğunlaştığı bölgelerin tespiti, hem rota planlamasının hem de kaynak tahsisinin mekânsal olarak yönlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu amaçla ArcGIS Pro ortamında Kernel Yoğunluk Tahmini (Kernel Density Estimation - KDE) yöntemi kullanılarak bir yoğunluk haritası (heatmap) üretilmiştir.

Sipariş noktalarına ait veriler .csv formatında hazırlanmış ve her kayıt için aşağıdaki bilgiler yer almıştır:

- Barkod numarası
- Gönderici adresi
- Hacimsel yük (desi)
- Coğrafi koordinatlar (enlem ve boylam)
- Gönderim tarihi

Bu veri kümesi ArcGIS Pro ortamına aktarılmış ve “XY Table to Point” aracı kullanılarak mekânsal nokta verisi (point feature class) oluşturulmuştur.

Yoğunluk analizinin temelinde, KDE yöntemi yer almaktadır. KDE, her bir noktanın çevresine simetrik bir çekirdek fonksiyonu (genellikle Gauss) uygular ve bu sayede sürekli bir yoğunluk yüzeyi üretir. Analiz şu şekilde yapılandırılmıştır:

- Input Layer: Sipariş Noktaları
- Population Field: Desi (hacimsel yük)
- Output Cell Size: 50 metre (varsayım)
- Search Radius (Bandwidth): 1000 metre (yoğunluk analizine göre test edilmiştir)

Bu ayarlar doğrultusunda üretilen raster yüzey, sipariş yoğunluğu bakımından sıcak noktaları ortaya çıkarmış ve renk gradyan skalası ile görsel açıdan anlamlı bir temsil sunmuştur.

Oluşturulan yoğunluk haritası, VRP modellemesi öncesinde, yüksek yoğunluklu kümelenme alanlarının belirlenmesi açısından kritik bir ön analiz niteliği taşımaktadır. Aynı zamanda bu analiz, hangi bölgelerde ek depo ihtiyacı, ilave araç tahsisi ya da farklı rota yapılarının gerekeceği konusunda karar vericilere sezgisel bir yol haritası sunmaktadır.

3.4.3 Network Dataset Kurulumu ve VRP Modelleme

Kargo toplama operasyonlarının gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için, yalnızca sipariş noktaları ve şube konumlarının değil, aynı zamanda mevcut yol ağı yapısının da analiz sistemine entegre edilmesi gerekmektedir.

Bu bağlamda, İstanbul’un Avrupa Yakası’na ait çizgisel yol verisi kullanılarak ArcGIS Pro ortamında network dataset (ağ veri seti) oluşturulmuştur. Oluşturulan bu topolojik ağ, hem servis alanı analizlerinde hem de araç rotalama probleminin çözümünde temel yapıyı oluşturmuştur.

Çalışmada kullanılan yol verisi .shp formatında olup, her bir yol segmenti için aşağıdaki öznitelikleri içermektedir:

- Yol adı
- Yol sınıfı (otoyol, cadde, tali yol, vs.)

- Yön bilgisi (tek yön/çift yön)
- Geometrik uzunluk (metre cinsinden)
- Bağlantı düğüm ID'leri

modelinde yön bilgisi aktif hâle getirilmiş, dönüş kısıtları tanımlanmış ve yol sınıflarına göre ağırlıklandırmalar yapılmıştır.

Network Dataset Parametreleri

- Travel Mode: Driving Time (varsayılan olarak zaman bazlı modelleme kullanılmıştır)
- Cost Attribute: Time (varsayılan hız değerine göre)
- Hierarchy: Yol sınıflarına göre rota önceliği (örneğin otoyol > cadde > sokak)
- Restrictions: Tek yön, U dönüşü yasağı vb.

Network dataset oluşturulduktan sonra, ArcGIS Network Analyst eklentisi kullanılarak Vehicle Routing Problem (VRP) çözüm aracı yapılandırılmıştır. Modelleme sürecinde tanımlanan temel bileşenler aşağıdaki gibidir:

- Depolar (Depots): Esenyurt ve Haramidere şubeleri
- Sipariş Noktaları (Orders): 104.508 adet nokta
- Araçlar (Routes): Her şube için tanımlı araçlar (toplam 17)
- Breaks: Araç başına 12:00–13:00 arasında 1 saatlik mola
- Time Windows: 08:00–18:00 (günlük çalışma süresi)

Kısıtlar ve Optimizasyon Ayarları

- Araç kapasitesi: 15.000 desi
- Sipariş başı hizmet süresi: 120 saniye
- Maksimum rota süresi: 36.000 saniye (10 saat)
- Maksimum mesafe: Opsiyonel olarak 100 km sınırı (varsayımsal)

ArcGIS, bu tanımlamalar doğrultusunda her araca hangi siparişlerin atanacağı ve bu siparişlerin hangi sırayla, hangi güzergâhtan toplanacağına ilişkin optimizasyon hesaplamalarını yapmaktadır. Modelin çözüm motoru, arka planda Tabu Search,

Insertion Heuristics ve Improvement Phases gibi sezgisel algoritmalara dayanmaktadır (Zografos ve Androustopoulos, 2008).

Çözümleme sonucunda her araç için ayrı rota, seyahat süresi, servis süresi ve yük miktarı gibi çıktı değerleri oluşturulmuştur.

3.5 Google OR-Tools ile VRP Uygulaması

ArcGIS tabanlı analizlerin ardından, çalışmanın ikinci aşamasında daha esnek ve hızlı senaryo üretme kapasitesine sahip açık kaynaklı bir platform olan Google OR-Tools kullanılarak rota optimizasyonu yeniden yapılandırılmıştır. Bu uygulama sayesinde, daha büyük veri kümeleri üzerinde testler gerçekleştirilmiş ve çözüm süreçlerinin performansı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

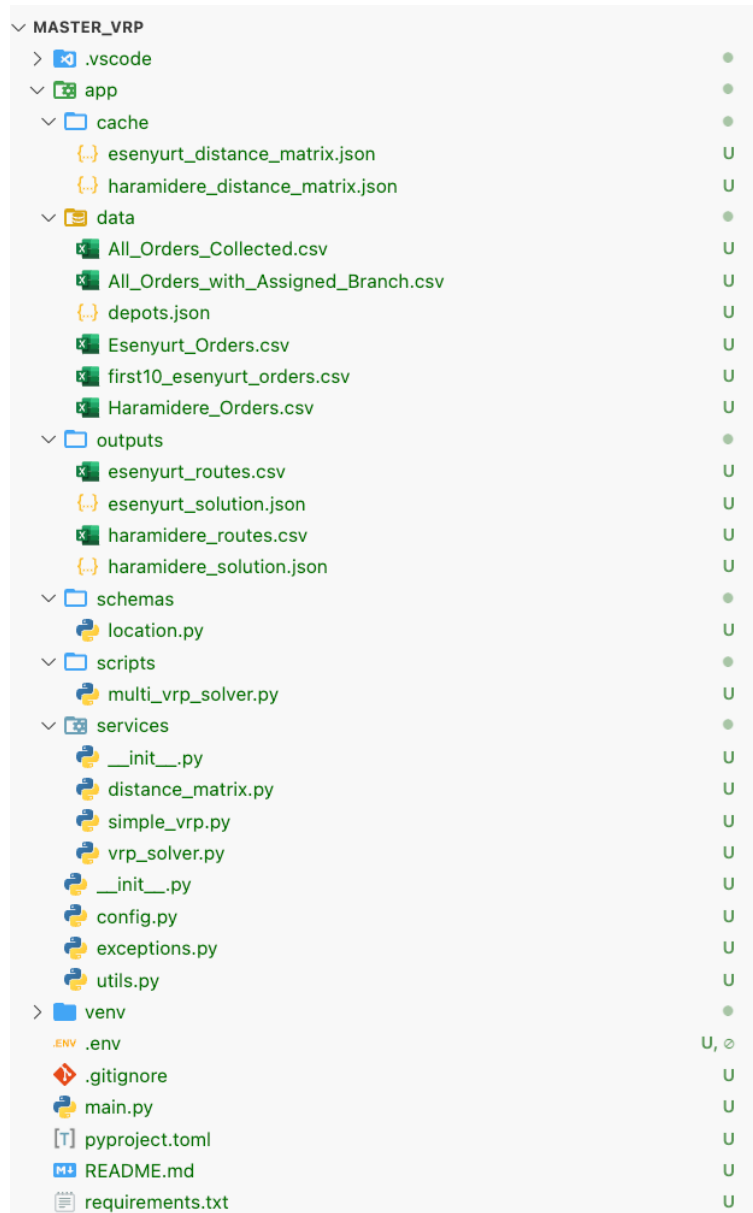
Google OR-Tools, Google tarafından geliştirilen ve özellikle kombinatoriyel optimizasyon problemleri için tasarlanmış, Python ile entegre biçimde çalışan açık kaynaklı bir kütüphanedir. Bu çalışmada OR-Tools'un Vehicle Routing Problem (VRP) çözüm altyapısı kullanılmıştır.

Geliştirilen Python tabanlı uygulama, veri girişinden nihai çözüm çıktısına kadar olan tüm iş akışını otomatikleştiren, yüksek derecede modüler ve ölçeklenebilir bir mimariyle yapılandırılmıştır. Aşağıda sunulan (Şekil 3.2), klasör yapısında da görülebileceği üzere, sistem temel olarak app ana dizini altında organize edilmiş ve her bir alt klasör belirli bir işlevsel bileşeni temsil edecek şekilde yapılandırılmıştır. data klasörü, çözümlemeye temel teşkil eden sipariş verileri, şube bilgileri ve tümleştirilmiş veri setlerini (CSV ve JSON formatlarında) barındırırken; cache klasörü, mesafe matrislerinin daha hızlı erişim ve tekrar kullanılabilirlik amacıyla önceden hesaplanmış JSON formatındaki sürümlerini içermektedir.

Çözüm algoritmalarının yer aldığı services modülü, hem basit hem de gelişmiş araç rotalama algoritmalarını (örneğin simple_vrp.py ve vrp_solver.py) barındırmakta, ayrıca mesafe matrisi üretimi (distance_matrix.py), yapılandırma (config.py), hata yönetimi (exceptions.py) ve yardımcı fonksiyonlar (utils.py) gibi işlevsel bileşenleri de içermektedir. scripts klasöründe, çoklu senaryo çözümlerini yöneten multi_vrp_solver.py betiği yer almakta olup, farklı veri kümeleri için ayrı ayrı çözüm çıktıları üretmeyi mümkün kılmaktadır. Bunun yanında, schemas dizininde yer alan

location.py dosyası, veri doğrulama ve tip tanımlamaları açısından önemli bir rol üstlenmektedir.

Modelin çıktıları ise outputs klasöründe depolanmakta olup; hem rota bazlı çözümler (*_routes.csv) hem de algoritma tarafından üretilen nihai çözüm verileri (*_solution.json) açıkça erişilebilir biçimde organize edilmiştir. Bu mimari yapı, sadece uygulamanın yeniden üretilebilirliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda farklı senaryolara kolayca uyarlanabilmesine, yeni veri setleriyle hızlı bir şekilde test edilebilmesine ve entegrasyon süreçlerinin kolaylaştırılmasına olanak tanımaktadır. Bu yönüyle çalışma, yazılım mühendisliği açısından da iyi bir pratik örnek sunmaktadır.



Şekil 3.3 : Proje Mimarisi.

3.5.1 Girdi Verilerinin Yapılandırılması

Modelde kullanılan sipariş noktaları ve şube (depo) konumları, ArcGIS sürecinde olduğu gibi burada da aynı veri seti üzerinden hazırlanmıştır. Ancak OR-Tools ortamı vektörel geometri yerine mesafe matrisi (distance matrix) ile çalıştığı için, veriler bu formata dönüştürülmüştür.

Bu kapsamda, sipariş noktalarının ve şube konumlarının karşılıklı mesafeleri, Google Maps Distance Matrix API aracılığıyla elde edilmiştir. API üzerinden alınan bu mesafeler, her nokta çifti arasındaki gerçek yol mesafesi (metre) ve tahmini seyahat süresi (saniye) bilgilerini içermektedir. Mesafe matrisi oluşturulurken şu yapı kullanılmıştır:

- Boyut: $N \times N$ (tüm sipariş ve şube noktaları için)
- Değer tipi: Zaman (saniye) ve/veya mesafe (metre)
- Format: NumPy dizisi veya JSON $\rightarrow$ Python OR-Tools girdi formatına dönüştürülerek kullanıldı.

3.5.1.1 Mesafe matrisi oluşturulması (distance_matrix.py)

Google Maps Distance Matrix API kullanılarak, sipariş noktaları ile depo arasındaki gerçek yol verisine dayalı mesafe matrisi oluşturulmuştur. API'nin 100 hücrelik sınırını aşmamak adına, hem başlangıç (origin) hem de varış (destination) noktaları belirli parçalara bölünmüştür (chunk_list fonksiyonu). Her istek sonucunda gelen duration (saniye cinsinden süre) değerleri, build_distance_matrix fonksiyonu ile 2 boyutlu bir matrise yerleştirilmiştir. Bu matris, sistemde her şube için ayrı ayrı JSON olarak önbelleğe alınmaktadır. Aşağıda bu aşamın pseudo kodları yer almaktadır:

Fonksiyon: load_or_build_distance_matrix(locations, branch_name)

Amaç: Verilen konumlar arası mesafe matrisi daha önce hesaplandıysa önbellekten yüklemek; aksi takdirde yeniden hesaplayıp saklamak.

Girdi: locations $\rightarrow$ string formatında konum listesi

branch_name $\rightarrow$ şube adı (önbellek dosya ismi için)

1. cache_path $\leftarrow$ "{branch_name}_distance_matrix.json" dosya yolu
2. Eğer cache_path dosyası mevcutsa:

2.1 JSON dosyasını aç ve oku

2.2 Mesafe matrisini döndür

3. Aksi halde:

3.1 build_distance_matrix(locations, locations) ile mesafe matrisi oluştur

3.2 Matrisi JSON formatında cache_path dosyasına kaydet

3.3 Matrisi döndür

Fonksiyon: chunk_list(lst, chunk_size)

Amaç: Listeyi belirli boyutlarda parçalara ayırmak.

Girdi: lst → bölünecek liste

chunk_size → her parçanın maksimum eleman sayısı

Çıktı: Parçalanmış alt liste listesi

1. Boş bir liste oluştur

2. $i = 0$ 'dan lst uzunluğu kadar adım adım ilerle:

2.1 $lst[i : i + chunk_size]$ dilimini ekle

3. Sonuç listesi döndürülür

Fonksiyon: build_distance_matrix(origins, destinations)

Amaç: Google Maps Distance Matrix API kullanılarak tam mesafe matrisinin hesaplanması

Girdi: origins → başlangıç noktaları listesi

destinations → varış noktaları listesi

Çıktı: full_matrix → 2D tam mesafe matrisi (saniye cinsinden süre)

1. MAX_ELEMENTS ← 100 (API kısıtı)

2. $chunk_size \leftarrow \sqrt{MAX_ELEMENTS}$
3. origins ve destinations listelerini $chunk_size$ 'a göre parçalara ayır
4. $full_matrix \leftarrow |origins| \times |destinations|$ boyutunda 0 ile başlatılan matris
5. Her origin_chunk için:
 - 5.1 Her destination_chunk için:
 - a. $departure_time \leftarrow$ mevcut zaman (epoch)
 - b. API parametreleri oluştur (mode=driving, units=metric, traffic_model=best_guess)
 - c. GET isteği gönder
 - d. HTTP cevabı kontrol et:
 - Eğer başarısızsa hata fırlat
 - e. Response JSON parse edilir
 - f. Her element için:
 - i. Eğer $element.status \neq OK \rightarrow$ hata fırlat
 - ii. $full_matrix[global_origin_idx][global_dest_idx] \leftarrow element.duration.value$
 - g. API rate limit'e yakalanmamak için 1 saniye bekle
6. $full_matrix$ döndürülür

3.5.1.2 Veri yükleme ve doğrulama (util.py)

Bu modül, sistemde kullanılacak sipariş verilerinin CSV'den, depo verilerinin JSON'dan okunmasını sağlar. Veri yüklenirken gerekli dönüşümler yapılmakta, boş ya da hatalı satırlar atlanmakta ve her kayıt özel veri sınıflarına (WarehouseOrder, Depot) dönüştürülmektedir. Ayrıca `setup_logger()` fonksiyonu ile işlem takibi için zaman damgalı bir logger aktif hale getirilmiştir. Bu aşamın pseudo kodları:

Fonksiyon: `setup_logger(name)`

Amaç: Konsola log yazmak üzere yapılandırılmış bir logger nesnesi oluşturur.

Girdi: `name` $\rightarrow$ logger adı (varsayılan: "master_vrp")

Çıktı: logger $\rightarrow$ yapılandırılmış logger nesnesi

1. Yeni bir logger oluştur (veya mevcut olanı getir)
2. Logger seviyesi INFO olarak ayarlanır
3. Eğer daha önce handler eklenmemişse:
 - 3.1 Konsol çıktısı için StreamHandler ekle
 - 3.2 Format: [saat] [seviye] mesaj
 - 3.3 Format uygulanarak handler logger'a eklenir
4. Logger nesnesi döndürülür

Fonksiyon: load_depots(filepath)

Amaç: JSON dosyasından depolama noktası (depot) verilerini okuyup doğrular.

Girdi: filepath → JSON dosyasının yolu

Çıktı: depots → doğrulanmış Depot nesneleri listesi

1. JSON dosyası belirtilen yoldan açılır
2. İçeriği JSON olarak yüklenir
3. Her öge için:
 - Depot sınıfına uygunluk kontrol edilir
 - Uygun olanlar listeye eklenir
4. Eğer dosya bulunamazsa → DepotFileNotFoundError fırlatılır

Fonksiyon: load_warehouse_orders_from_csv(filepath)

Amaç: CSV dosyasından kargo toplama noktası verilerini okuyup WarehouseOrder tipine dönüştürür.

Girdi: filepath → CSV dosyasının yolu

Çıktı: orders → WarehouseOrder nesneleri listesi

1. orders adlı boş liste tanımlanır
2. CSV dosyası UTF-8 formatında açılır
3. Satırlar 'DictReader' ile sözlük yapısında okunur

4. Her satır için:

- Gerekli alanlar (latitude, longitude, order_count, desi değerleri vs.) uygun tipte parse edilir
- Eksik olan `total\_hj\_desi` ve `total\_used\_desi` gibi opsiyonel alanlar sıfırla doldurulur
- Uygun satırdan bir `WarehouseOrder` nesnesi oluşturulur
- Nesne listeye eklenir
- Hatalı satırlar atlanır (continue)

5. Dosya okuma sürecinde hata oluşursa → `WarehouseOrdersLoadError` fırlatılır

6. orders listesi döndürülür

3.5.1.3 Şube bazlı VRP çözümü (multi_vrp_solver.py)

Bu ana modülde yer alan solve_branch_vrp fonksiyonu, her şube için siparişleri filtrelemekte ve VRP çözümünü bağımsız şekilde üretmektedir. Her şube için:

- Sipariş koordinatları alınır
- Desi değerine göre hizmet süresi ve yük talebi listeleri oluşturulur
- Distance matrix Google API'den alınır veya önbellekten yüklenir
- Araç sayısı, kapasitesi, hizmet süresi, mola ve zaman penceresi gibi kısıtlar tanımlanır
- solve_vrp_with_time_windows() fonksiyonu çağrılarak çözüm alınır

Tüm şubeler için çözüm fonksiyonu, run_all_branches() ile çalıştırılır ve her biri bağımsız olarak optimize edilir. Pseudo Kod:

Global Tanımlar:

ORDERS_CSV ← Sipariş verilerinin yer aldığı CSV dosyasının yolu

DEPOTS_JSON ← Depo koordinat bilgilerinin bulunduğu JSON dosyasının yolu

WORK_START ← 08:00 → saniye cinsinden (8×3600)

WORK_END ← 18:00 → saniye cinsinden (17×3600)

LUNCH_BREAK ← (12:00, 13:00) → saniye cinsinden aralık

SERVICE_TIME_PER_DESI $\leftarrow$ 5 saniye

VEHICLE_CAPACITY $\leftarrow$ 15000 desi

BRANCH_VEHICLES $\leftarrow$ {

"Esenyurt": 9 araç,

"Haramidere": 8 araç

}

Fonksiyon: solve_branch_vrp(branch, orders_df, depots)

Amaç: Belirli bir şube için VRP çözümünü başlatmak

Girdi:

branch $\rightarrow$ çözülecek şube adı

orders_df $\rightarrow$ tüm siparişlerin bulunduğu DataFrame

depots $\rightarrow$ şube adlarıyla eşleşen depot nesneleri

1. Şubeye atanmış siparişleri filtrele $\rightarrow$ branch_orders

2. Şubeye ait depo koordinatlarını al $\rightarrow$ depot_coord

3. Siparişlerin koordinatlarını listele $\rightarrow$ order_coords

4. locations $\leftarrow$ depot + order_coords

5. Her sipariş için servis süresi hesapla:

service_time = total_desi $\times$ SERVICE_TIME_PER_DESI

Başlangıç noktası (depo) için servis süresi = 0

6. Her sipariş için talep (yük, desi) listesi oluştur:

İlk değer (depo) = 0

7. Google Maps API kullanarak locations için distance_matrix hesapla

(önbellekten yükle veya yeniden oluştur)

8. 'solve_vrp_with_time_windows()' fonksiyonunu şu parametrelerle çağır:

- distance_matrix

- service_times

- order_demands
- vehicle_count → şubeye özel araç sayısı
- vehicle_capacity → sabit
- depot_index = 0
- time_windows = [WORK_START, WORK_END] × tüm lokasyonlar
- lunch_breaks = [LUNCH_BREAK] × araç sayısı

9. Hesaplanan çözüm `result` olarak döndürülür

Fonksiyon: run_all_branches()

Amaç: Tüm şubeler için VRP çözümlerini ardışık şekilde çalıştırmak

1. Sipariş verilerini ORDERS_CSV dosyasından oku → orders_df
2. Depo verilerini DEPOTS_JSON dosyasından oku → depots
3. depots sözlüğü oluştur: {depot.name: depot}
4. results ← boş sözlük
5. Her bir branch için:
 - a. solve_branch_vrp(branch, orders_df, depots) çağır
 - b. Sonuçları results sözlüğüne ekle
6. results döndürülür

3.5.2 Model Parametreleri

ArcGIS ortamında kullanılan tüm kısıtlar ve parametreler OR-Tools modeli için eşleştirilmiştir:

- Araç kapasitesi: 15.000 desi
- Sipariş başına hizmet süresi: 120 saniye
- Maksimum rota süresi: 36.000 saniye
- Günlük çalışma süresi: 08:00–18:00
- Mola tanımı: Araçlara 12:00–13:00 arası mola penceresi atanmıştır
- Araç sayısı: Esenyurt için 9, Haramidere için 8 araç (toplam 17)

Her araç bir depodan çıkış yaparak görevini tamamlamakta ve aynı noktaya geri dönmektedir. Araç başına yük sınırı ve zaman kısıtları modele CapacityDimension ve TimeDimension olarak tanımlanmıştır.

3.5.3 Modelleme Süreci

Modelin kurulumu ve çözümü aşağıdaki Python temelli adımlar üzerinden yürütülmüştür:

1. RoutingIndexManager ile tüm düğümlerin yöneticisi oluşturuldu
2. RoutingModel ile çözüm altyapısı tanımlandı
3. Mesafe ve süre matrisi üzerinden özel maliyet fonksiyonu yazıldı
4. AddDimensionWithVehicleCapacity ve AddDimension fonksiyonları ile kapasite ve zaman kısıtları tanımlandı
5. Araç başına mola zamanı ve servis süresi parametreleri dahil edildi
6. SearchParameters ile çözüm arama stratejileri belirlendi (örneğin: PATH_CHEAPEST_ARC, GUIDED_LOCAL_SEARCH)
7. Model SolveWithParameters() fonksiyonu ile çözüldü ve çıktı alındı

- Cumhuriyet, Mehterçeşme, ve Pınar, Osmangazi mahalleleri çevresi
- E-5 karayoluna yakın arterler
- Beylikdüzü sınırına yakın batı hattı
- Doğuda TEM bağlantı yolları civarı

Bu bölgeler, yalnızca yüksek sayıda sipariş alınan yerler değil; aynı zamanda desi bazında da yüksek hacimli siparişlerin yığıldığı yerlerdir. Bu durum, filo planlamasında ek araç ihtiyacını doğurabileceği gibi, mevcut araç kapasitesinin aşılmasına da neden olabilecek alanlara işaret etmektedir.

4.1.2 Lojistik Açıdan Riskli veya Kritik Alanlar

Yoğunluk haritasında dikkat çeken bir diğer husus, bazı yüksek yoğunluklu alanların şubelerle (Esenyurt ve Haramidere) olan uzaklığıdır. Özellikle güneybatı ve kuzeybatı eksenindeki sipariş kümeleri, Haramidere Şubesi'ne daha yakın olmakla birlikte, Esenyurt Şubesi'nden gönderilen araçların erişim süresini artırmaktadır. Bu da rota optimizasyonunun yalnızca mesafe değil, desi ve trafik yoğunluğuna göre de şekillenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.1.3 Stratejik Önemi

Bu analizden elde edilen bulgular, sonraki bölümlerde detaylandırılacak olan VRP çözümlerine önceliklendirme sağlamış; araçların şubelere göre daha verimli yönlendirilmesi, yük dengesine göre rota oluşturulması, ve dönüş sürelerinin kısaltılması gibi stratejik kararlara temel oluşturmuştur.

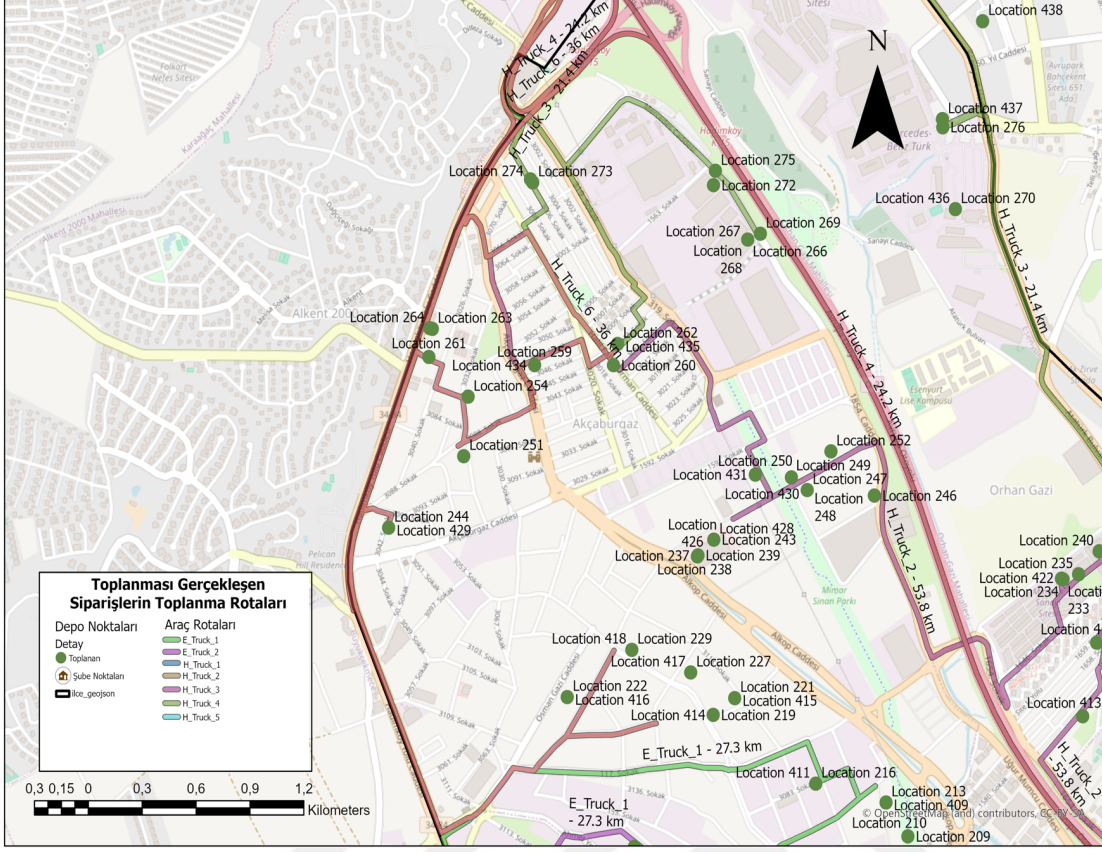
Yoğunluk merkezlerinin tespit edilmesi aynı zamanda:

- Yeni mikro depo lokasyonlarının belirlenmesi
- Dönemsel ek araç planlamaları
- Servis alanı sınırlarının yeniden yapılandırılması

gibi karar destek süreçlerine de veri temelli bir yaklaşım sağlamaktadır.

4.2 ArcGIS Tabanlı VRP Sonuçları

Yoğunluk analizinden elde edilen mekânsal desenlere dayanarak, ArcGIS Pro Network Analyst modülünde uygulanan Araç Rotalama Problemi (VRP) çözümü,



Şekil 4.3 : Başarıyla Toplanan Siparişler için Oluşturulan Araç Rotaları Detaylı Gösterimi.

Yukarıda gösterilen harita (Şekil 4.3), başarıyla toplanan siparişler için oluşturulan araç rotalarının detaylı mekânsal dağılımını göstermektedir. Farklı renklerle belirtilen rotalar, her bir aracın hizmet verdiği alanları açıkça ortaya koymakta; bu sayede sistemin coğrafi yük dağılımı görsel olarak analiz edilebilmektedir.

Harita incelendiğinde, bazı rotaların merkezi bölgelerde daha kısa ve yoğun sipariş noktalarını kapsadığı, bazılarının ise kuzey ve doğu akslarında daha geniş ve uzun mesafeli güzergâhlar izlediği görülmektedir. Bu yapı, sipariş yoğunluğu ile rota uzunluğu arasında dengeli bir dağılım sağlandığını göstermektedir.

Söz konusu operasyonel yapının performansına dair sayısal bilgiler ise Çizelge 4.1’de sunulmaktadır. Bu tablo, her bir aracın başlangıç ve bitiş depolarını, taşıma kapasitesini, zaman kısıtlarını, toplanan sipariş sayısını, operasyon süresini ve seyahat süresini içeren temel verileri bir araya getirmektedir. Böylece, her bir rotanın iş yükü ve verimliliği sayısal olarak değerlendirilebilmekte, görsel analizlerle birlikte sistemin genel performansı daha net bir şekilde ortaya konulmaktadır.

Çizelge 4.1 : Başarıyla Toplanan Siparişlere Ait Rota Özeti.

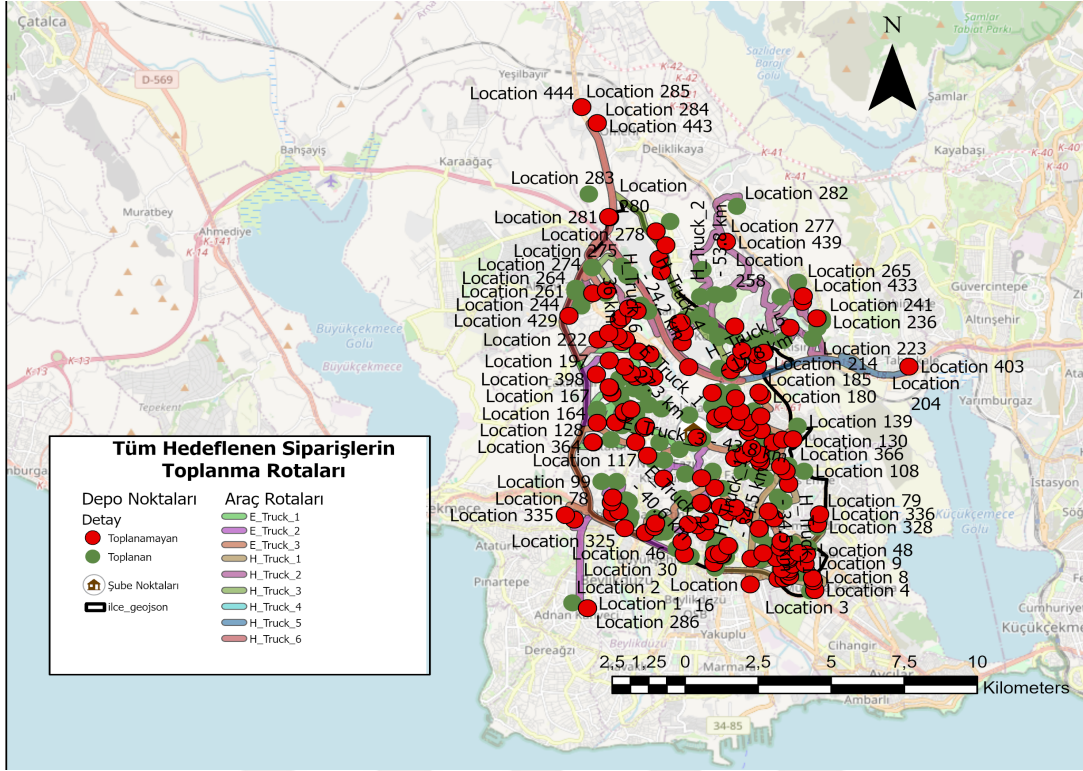
Araç İsimleri	Başlangıç Deposu	Bitiş Depo su	Kapasite (desi)	Toplama Zaman Limiti (dk)	Sipariş Sayısı	Toplam Zaman (dk)	Seyehat Süresi (dk)	Mesad
E_Truc k_1	Esenyurt	Esenyurt	15000	600	70	343,4	251,2	35,18
E_Truc k_2	Esenyurt	Esenyurt	15000	600	79	456,9	335,1	41,98
H_Truc k_1	Harami dere	Haramid ere	15000	600	96	194,8	171,1	30,32
H_Truc k_2	Harami dere	Haramid ere	15000	600	7	63,5	44,6	15,43
H_Truc k_3	Harami dere	Haramid ere	15000	600	23	93,7	79,8	12,08
H_Truc k_4	Harami dere	Haramid ere	15000	600	2	36,4	29,9	14,99
H_Truc k_5	Harami dere	Haramid ere	15000	600	4	68,1	52,2	15,64

4.2.2 Tüm Siparişlerin Dâhil Edildiği Tam Talep Senaryosu

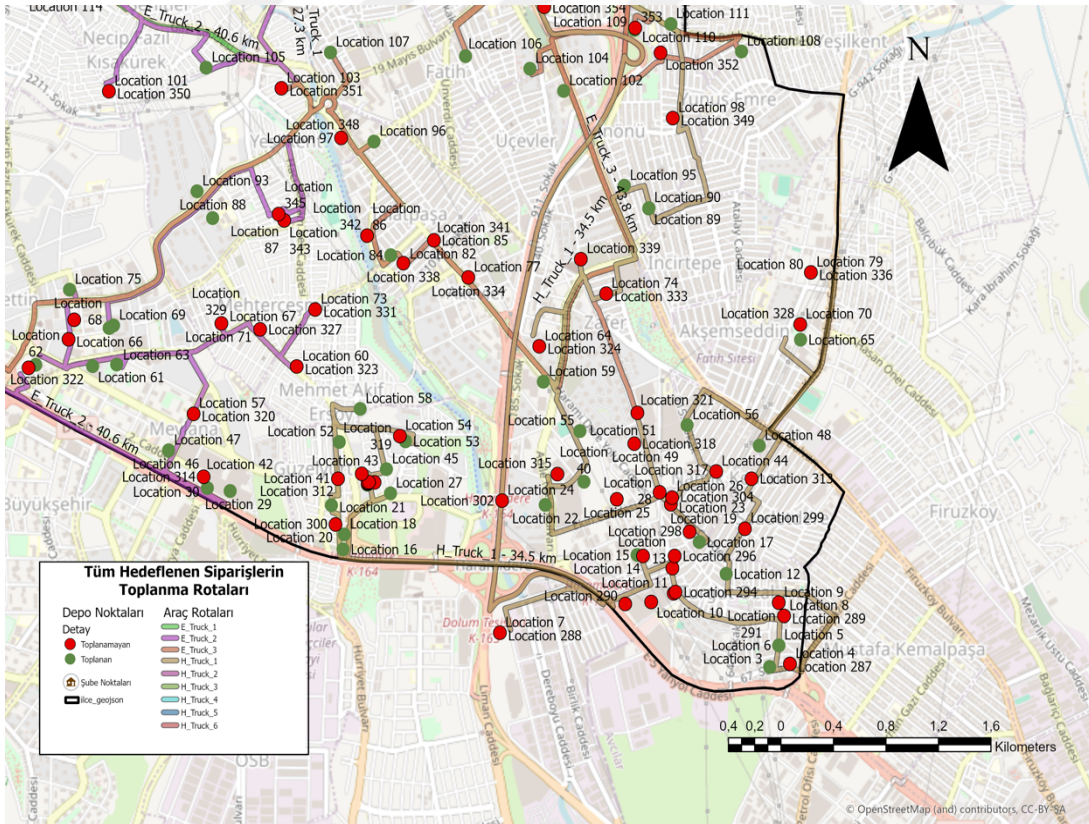
İkinci senaryoda, o gün hedeflenen ancak ilk çözümde kapasite ve rota kısıtları nedeniyle toplanamayan tüm siparişlerin de sisteme dahil edildiği genişletilmiş bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu senaryo, mevcut kaynakların yetersiz kaldığı noktaları belirlemek ve sistemin daha yüksek talep altında nasıl bir performans göstereceğini incelemek amacıyla oluşturulmuştur.

Aşağıda yer alan harita (Şekil 4.4), bu senaryo kapsamında oluşturulan tüm araç rotalarını ve sipariş noktalarının dağılımını göstermektedir. Görselde kırmızı noktalar daha önce toplanamayan siparişleri, yeşil noktalar ise her iki senaryoda da başarıyla atanan siparişleri temsil etmektedir. Renkli çizgiler farklı araç rotalarını ifade etmektedir.

Bu senaryoya ait detaylı bir görsel çözümleme sunan bir diğer harita (Şekil 4.5), özellikle sipariş kümelenmelerinin yoğun olduğu bölgelerde araç rotalarının dağılımını daha yakından inceleme imkânı sunmaktadır.



Şekil 4.4 : Tüm Siparişlerin Dâhil Edildiği Tam Talep Senaryosu – Rotalar ve Toplama Noktaları.



Şekil 4.5 : Tüm Siparişlerin Dâhil Edildiği Tam Talep Senaryosu – Rotalar ve Toplama Noktaları Detaylı Gösterim.

Bu senaryoda rotalar daha yaygın, daha sık dönüşlü ve rotalar arası örtüşme olasılığı daha yüksek bir yapı sergilemiştir. Bu durum, kentsel lojistik sistemlerinin tam kapasiteyle çalıştırıldığında operasyonel zorlukların arttığını açıkça göstermektedir. Çizelge 4.2 de tam talep senaryosunda oluşturulan araç rotaları özetleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Tam Talep Senaryosunda Oluşturulan Araç Rotaları Özeti.

Araç İsimleri	Başlangıç Deposu	Bitiş Deposu	Kapasite (desi)	Sipariş Sayısı	Toplam Zaman (dk)	Seyahat Süresi (dk)	Mesafe
E_Truck 1	Esenyurt	Esenyurt	15000	72	150,3	141,8	27,3
E_Truck 2	Esenyurt	Esenyurt	15000	50	156,3	138,6	40,5
E_Truck 3	Esenyurt	Esenyurt	15000	79	186,5	151,1	43,8
H_Truck 1	Haramidere	Haramidere	15000	99	199,9	119,2	34,4
H_Truck 2	Haramidere	Haramidere	15000	12	423,4	304,4	53,7
H_Truck 3	Haramidere	Haramidere	15000	7	96,9	56,3	21,3
H_Truck 4	Haramidere	Haramidere	15000	5	52,3	29,9	24,1
H_Truck 5	Haramidere	Haramidere	15000	2	56,4	28,1	15,8
H_Truck 6	Haramidere	Haramidere	15000	8	94,3	76,28	36,0

4.2.3 ArcGIS Sonuçlarını Değerlendirme

Bu çalışma, Esenyurt ilçesindeki kargo toplama operasyonlarını hem mekânsal hem de operasyonel boyutlarıyla inceleyerek, sistem verimliliğini etkileyen temel sorunları ortaya koymuştur. En dikkat çekici sorunlardan biri, araç kapasite kullanımında gözlenen dengesizliktir. Bazı araçlar, yoğun saatlerde tam kapasiteyle çalışırken; bazıları düşük doluluk oranlarıyla faaliyet göstermektedir. Bu durum, rotalarda gecikmelere ve yakıt tüketiminin artmasına neden olmakta, genel sistem verimliliğini olumsuz etkilemektedir. KDE sonuçlarında ortaya konan mekânsal yoğunluk desenleri, bu dengesizliğin coğrafi nedenlerini daha net bir biçimde görselleştirmiştir.

ArcGIS tabanlı VRP çözümlemesinde tanımlanan rota süresi, araç kapasitesi ve hizmet süresi gibi kısıtlar dikkate alınarak yapılan optimizasyon, operasyonel sistemin mevcut koşullar altında nasıl performans gösterdiğini açık biçimde ortaya koymuştur.

Başarıyla toplanabilen siparişler senaryosunda, 17 araç kullanılarak yürütülen geleneksel yöntemle kıyasla, sadece 7 araçla aynı işlemin gerçekleştirilebildiği gözlemlenmiş ve bu sayede yaklaşık %59 oranında araç tasarrufu sağlanmıştır. Ancak bu bulgu, trafik yoğunluğu ve saha koşullarının ortalama değerlere göre modellenmesi temelinde elde edildiğinden, gerçek saha performansında farklılıklar olabileceği unutulmamalıdır.

Modelin ikinci adımı olan tam talep senaryosu ise sistemin maksimum yük altında nasıl davrandığını göstermesi açısından kritik bir analiz sunmuştur. Bu senaryoda, tüm siparişlerin sisteme dahil edilmesi sonucunda rota süreleri, araç yükleri ve yolculuk mesafelerinde önemli artışlar gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle kampanya dönemleri veya sezonluk yoğunlukların yaşandığı periyotlarda sistemin yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Bu tür dönemlerde, gecikmeler, iptal edilen siparişler ve müşteri memnuniyetsizliğinde azalma kaçınılmaz hâle gelmektedir.

Tüm bu bulgular, CBS tabanlı analiz ve optimizasyon tekniklerinin, kentsel kargo toplama süreçlerinde kaynak kullanımını azaltırken operasyonel verimliliği artırma potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Aynı zamanda bu analizler, ek şube veya mikro depo açma ihtiyacı, dinamik filo planlaması ve rota yapılandırmasının yeniden değerlendirilmesi gibi kararları yönlendirecek veri temelli içgörüler sunmaktadır.

4.3 Google OR-Tools Tabanlı VRP Sonuçları

Çalışmanın bu uygulama aşamasında, rota optimizasyon süreci Google tarafından geliştirilen açık kaynaklı bir çözüm platformu olan OR-Tools kullanılarak yeniden yapılandırılmıştır. Bu yaklaşım, modelin hem kod üzerinden esnek biçimde tanımlanmasını mümkün kılmış hem de büyük veri kümeleri üzerinde yüksek işlem performansı sunmuştur. Özellikle Google Maps Distance Matrix API kullanılarak oluşturulan mesafe matrisi sayesinde, sipariş noktaları arasındaki ulaşım süreleri gerçek trafik koşullarına dayanarak elde edilmiş ve bu durum rota modellemesinin doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır.

Bu çalışmada kullanılan mesafe matrisleri, her bir şube (Esenyurt ve Haramidere) için ayrı ayrı oluşturulmuş ve sipariş noktalarının konumlarına göre, sürüş modunda, trafik dikkate alınarak hazırlanmıştır. API ile yapılan çağrılarda her bir sipariş noktasının hem kendisiyle hem de diğer tüm noktalarla olan sürüş süresi saniye cinsinden

hesaplanmış, sonuç olarak kare biçimli (NxN) ve zaman tabanlı bir mesafe matrisi elde edilmiştir. Esenyurt için 185x185, Haramidere için 134x134 boyutundaki bu matrisler, algoritmanın rota optimizasyonunda temel girdi olarak kullanılmıştır. Her matrisin ilk satır ve sütunu, ilgili şubenin depo koordinatına aittir.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
0	465	544	867	766	179	652	760	726	570	583	729	575	427	570	597	632	678	493	450	503	604	651	807	194	640	949	408	639	354	536	597	88	532	415	731	446
453	0	557	866	778	521	665	794	759	759	596	561	788	440	719	630	665	690	505	463	32	616	352	840	487	652	962	421	651	367	374	630	371	211	263	743	338
466	644	0	988	901	535	787	915	881	881	718	626	910	382	841	752	787	521	75	215	681	572	836	962	500	608	622	376	607	195	526	752	384	747	697	601	436
698	846	1020	0	395	635	348	249	187	397	415	666	426	695	357	284	319	725	969	957	866	638	820	126	778	674	1018	775	673	845	566	284	616	787	791	630	476
613	836	914	553	0	550	312	296	365	565	271	865	594	702	525	436	359	871	864	821	874	690	1019	459	693	667	1204	775	668	725	765	436	531	986	890	816	675
171	522	600	888	822	0	725	782	748	592	640	693	596	483	592	618	653	734	549	506	559	660	714	829	304	696	1005	465	695	411	593	618	144	643	526	787	503
480	703	781	308	304	416	0	234	201	283	69	732	312	568	244	134	64	737	730	687	740	556	885	282	559	534	874	641	535	591	631	134	397	853	756	790	542
574	797	875	316	280	510	272	0	161	351	232	826	380	662	311	238	273	838	824	781	834	650	979	217	653	628	1131	735	629	685	725	238	491	947	850	743	636
675	898	976	227	382	612	381	149	0	430	333	774	459	764	391	318	353	939	926	883	936	752	928	164	755	729	1233	837	730	787	674	318	593	895	899	845	584
520	743	821	495	535	457	287	343	310	0	312	772	29	609	93	180	215	778	770	727	780	596	899	391	654	574	914	681	575	632	672	180	438	893	775	830	582
410	633	712	361	256	347	71	232	254	320	0	662	349	499	281	178	101	668	661	618	671	487	816	335	490	465	805	572	466	522	562	178	328	783	687	721	473
583	618	801	937	1023	707	910	999	1004	934	840	0	938	684	934	874	909	935	750	707	638	861	440	921	620	897	893	666	896	611	263	874	615	467	411	988	299
550	773	851	525	564	486	317	373	339	30	341	802	0	638	123	210	245	807	800	757	810	626	916	420	671	604	944	711	605	661	701	210	467	910	792	860	612
369	546	380	728	640	437	527	655	621	620	457	625	649	0	581	491	526	245	324	308	584	227	738	702	403	263	567	139	262	196	525	492	286	765	599	324	435
491	714	792	428	506	428	258	314	281	91	283	743	120	579	0	151	186	749	741	698	751	567	904	362	570	545	885	652	546	603	643	151	408	897	780	801	553
498	721	799	237	382	435	120	163	130	196	143	750	225	586	157	0	35	755	748	705	758	574	904	211	577	552	892	659	553	609	649	0	415	871	841	812	560
521	744	822	260	357	458	85	186	153	219	108	773	248	609	180	107	0	778	771	728	781	595	927	234	600	575	915	682	576	632	672	107	438	890	864	835	583
589	769	549	883	795	660	682	771	776	775	612	848	804	223	736	646	681	0	492	486	807	415	961	857	626	451	388	363	450	374	748	646	510	988	823	224	658
422	600	84	944	856	491	743	832	837	836	674	551	865	321	797	708	743	460	0	186	637	527	705	824	456	581	561	332	562	150	451	708	340	673	653	540	362
386	564	209	792	704	454	591	680	685	684	522	643	713	199	645	556	591	449	194	0	601	375	756	766	420	411	686	180	410	126	542	556	304	759	617	502	453
480	15	583	894	806	548	692	820	787	786	623	584	815	467	746	657	692	718	533	490	0	644	375	868	514	680	988	448	679	394	397	657	398	235	287	771	362
474	678	578	552	464	411	351	479	445	444	281	726	473	198	404	315	350	367	522	506	715	0	870	526	534	36	690	271	35	394	626	315	392	847	731	420	536
172	312	390	700	612	296	499	588	593	592	430	483	621	273	553	464	498	524	339	296	349	450	0	674	209	486	795	255	485	200	382	464	204	564	399	577	293
642	865	943	102	480	579	292	206	131	340	363	770	369	731	301	228	263	829	892	849	902	718	924	0	721	696	1122	803	697	754	670	228	560	891	895	734	580
146	286	364	674	586	270	473	601	567	566	403	456	595	247	526	437	472	498	313	270	323	424	481	648	0	460	769	228	459	174	356	437	178	508	342	551	267
478	702	626	556	468	415	355	483	449	448	285	730	477	246	409	319	354	415	570	555	763	47	884	530	558	0	738	319	1	442	630	319	396	851	755	468	541
807	985	580	900	1015	875	901	996	929	1103	832	790	1024	541	955	866	901	396	524	630	1022	743	944	878	841	779	0	680	778	535	689	866	725	911	914	539	600
422	600	482	782	694	491	581	670	675	674	511	679	703	102	634	545	580	353	425	410	637	278	792	756	456	314	675	0	313	297	579	545	340	796	653	405	489
479	702	627	557	469	416	356	484	450	449	286	731	478	247	410	320	355	416	571	555	764	46	885	531	559	1	739	320	0	443	631	320	397	852	756	469	542
272	449	189	794	706	340	593	721	687	686	523	528	715	195	647	557	592	364	139	149	487	377	641	768	306	413	595	182	412	0	428	557	190	645	503	443	338
629	405	638	730	815	558	708	836	802	795	633	264	830	522	756	672	702	767	587	545	425	693	486	708	666	642	680	497	643	443	0	667	545	340	398	820	171
498	721	799	237	382	435	120	163	130	196	143	750	225	586	157	84	35	755	748	705	758	574	903	211	577	552	892	659	553	609	649	0	415	871	841	812	560
82	378	456	766	678	151	565	693	659	538	495	549	542	339	538	529	564	590	405	362	415	516	570	740	234	552	861	321	551	266	448	529	0	597	431	643	359
319	243	536	846	758	442	645	734	739	770	576	528	774	420	770	610	645	671	485	442	263	596	176	820	355	632	941	401	631	347	341	610	351	0	89	723	306
276	295	493	803	716	400	602	692	697	680	533	505	685	377	680	567	602	628	442	400	315	554	133	778	312	590	898	358	589	304	318	567	309	117	0	680	283
629	807	586	774	686	697	573	662	667	666	504	886	695	261	627	538	573	220	530	523	844	307	999	748	663	343	513	400	342	411	785	538	547	1002	860	0	696
563	397	630	722	813	687	700	828	794	793	631	282	822	514	754	665	700	765	580	537	417	691	420	700	600	634	672	495	635	441	117	665	596	338	329	818	0

Şekil 4.6 : Haramidere Şubesine Ait 134x134 Matrisinin Bir Kısım1.

```

=== Solving for branch: Haramidere ===
[23:36:08] [INFO] 133 orders assigned to Haramidere
[23:36:08] [INFO] Total demand: 91088
[23:36:08] [INFO] Total capacity: 1500000
[INFO] Loaded cached distance matrix for Haramidere
[DEBUG] Matrix shape: 134x134

```

Şekil 4.7 : 7 Haramidere Şubesi İçin Rota Optimizasyonuna Ait Özet Bilgiler (Toplam Talep, Araç Kapasitesi ve Mesafe Matrisi Boyutu)


```
=== Solving for branch: Esenyurt ===  
[23:36:03] [INFO] 201 orders assigned to Esenyurt  
[23:36:03] [INFO] Total demand: 80627  
[23:36:03] [INFO] Total capacity: 1500000  
[INFO] Loaded cached distance matrix for Esenyurt  
[DEBUG] Matrix shape: 202x202
```

Şekil 4.8 : Esenyurt Şubesi İçin Rota Optimizasyonuna Ait Özet Bilgiler. (Toplam Talep, Araç Kapasitesi ve Mesafe Matrisi Boyutu)

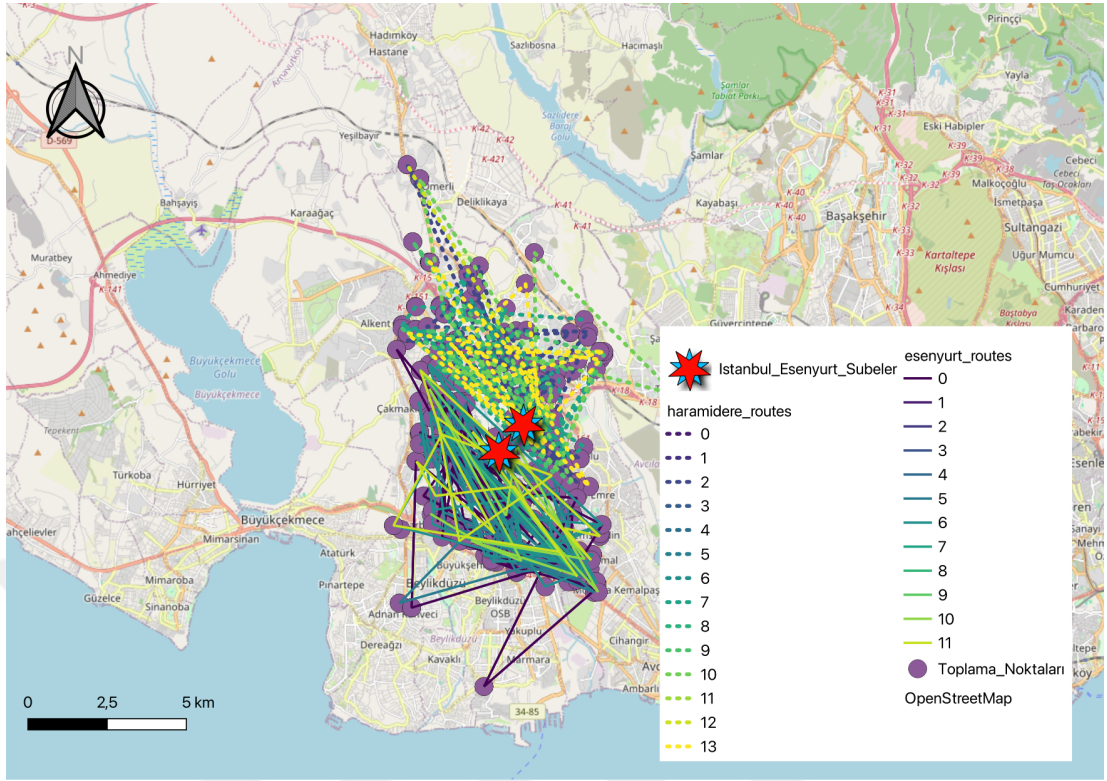
Modelde, ArcGIS ortamında tanımlanan tüm kısıtlar korunarak OR-Tools altyapısına entegre edilmiştir. Her bir araç için kapasite (15.000 desi), hizmet süresi (desi başına 5 saniye, yüksek desilerde bu zaman 10 - 15 saniye), mola aralığı (12:00–13:00) ve çalışma zamanı (08:00–17:00) gibi kısıtlar tanımlanmış ve sisteme dahil edilmiştir. Hem Esenyurt hem de Haramidere şubelerine ait toplam 334 sipariş bu kapsamda değerlendirilmiştir.

Model çıktıları incelendiğinde, OR-Tools'un sunduğu çözümün oldukça verimli olduğu görülmektedir. Esenyurt şubesine ait yaklaşık 80.627 desi talebi 14 araçla optimize şekilde toplanmıştır. Benzer şekilde, Haramidere şubesine ait yaklaşık 91.088 desi talebi de yine 14 araçla toplanabilmektedir. Sisteme tanımlanan toplam kapasitenin çok altında kalınarak elde edilen bu sonuçlar, çözüm modelinin kaynakları etkili biçimde kullandığını ve operasyonel verimlilik sağladığını göstermektedir.

```
🧠 Solving VRP with time windows...  
✅ Çözüm bulundu.  
[00:05:12] [INFO] VRP analysis completed.  
[00:05:12] [INFO] Branch: Esenyurt, Vehicles used: 12  
[00:05:12] [INFO] Saved routes to esenyurt_routes.csv  
[00:05:12] [INFO] Branch: Haramidere, Vehicles used: 14  
[00:05:12] [INFO] Saved routes to haramidere_routes.csv
```

Şekil 4.9 : OR-Tools ile Zaman Pencereli VRP Çözümüne Ait Sonuç Bilgileri.

Rota yapılarında hem zaman hem de kapasite açısından dengeli bir dağılım sağlanmış; her aracın izlediği güzergâh, varış saatleri ve toplama sıralamaları detaylı olarak raporlanmıştır. OR-Tools'un PATH_CHEAPEST_ARC gibi sezgisel stratejileri sayesinde çözüm süresi oldukça kısa tutulmuş, yüksek çözünürlükte rota planları elde edilmiştir.



Şekil 4.10 : OR-Tools ile Elde Edilen Rotaların Harita Üzerinde Görselleştirilmesi. (Esenyurt ve Haramidere Şubeleri)

Sonuç olarak, OR-Tools tabanlı bu modelleme yaklaşımı, sahadaki operasyonel gerçeklikleri göz önünde bulunduran, esnek ve ölçeklenebilir bir çözüm yapısı sunmuştur. Özellikle gerçek trafik sürelerine dayalı mesafe matrisi ve detaylı zaman kısıtlarıyla yapılan bu optimizasyon, klasik yaklaşımlara kıyasla daha düşük araç kullanımı ve daha verimli rota dağılımı sağlamış; toplama sürecini hem ekonomik hem de operasyonel açıdan optimize etmiştir.

4.4 ArcGIS ve Google Or-Tools Karşılaştırılması

4.4.1 Modelleme Süreci ve Kullanıcı Arayüzü

ArcGIS, kullanıcı dostu ve etkileşimli arayüzü sayesinde Araç Rotalama Problemi (VRP) modellemesini oldukça kolaylaştırmıştır. Özellikle coğrafi veri katmanlarıyla doğrudan çalışabilme imkânı, kullanıcıya sahaya yakın bir modelleme ortamı sunmaktadır. Bununla birlikte, modelleme süreci büyük ölçüde grafiksel kullanıcı arayüzüne (GUI) bağlıdır; bu da özelleştirme kabiliyetini sınırlandırmakta ve gelişmiş kısıtların (örneğin özel kurallar, ceza fonksiyonları) uygulanmasını zorlaştırmaktadır.

Öte yandan Google OR-Tools, tamamen kod temelli bir yapı sunmakta olup, kullanıcıya modelin tüm bileşenleri üzerinde detaylı kontrol imkânı sağlamaktadır. Her ne kadar öğrenme eğrisi daha dik olsa da, bu durum özelleştirilmiş maliyet fonksiyonlarının ve karmaşık kısıtların tanımlanabilmesi açısından önemli bir avantaj oluşturmuştur.

4.4.2 Veri Gerçekliği ve Trafik Duyarlılığı

ArcGIS ortamında kullanılan yerleşik yol ağı ve trafik verilerinin güncelliği yetersiz olduğundan, bazı analiz sonuçları gerçek sahadan önemli ölçüde sapma göstermiştir. Özellikle var olmayan veya kapalı yolların analizlerde yer alması ve gerçek zamanlı trafik verisinin modellemeye dahil edilememesi, önerilen rotaların operasyonel anlamda geçersiz hâle gelmesine yol açmıştır.

Google OR-Tools ise dışarıdan sağlanan mesafe veya süre matrisleriyle çalışabildiği için, Google Maps API ya da özel GPS tabanlı veriler üzerinden elde edilen gerçek sürüş süreleri modele dahil edilebilmiştir. Böylece üretilen rotalar, sahada uygulanabilirlik açısından daha yüksek doğrulukla sunulmuştur.

4.4.3 Kısıtların Tanımlanabilirliği ve Esneklik

ArcGIS, kapasite, zaman penceresi ve maksimum rota süresi gibi temel kısıtların grafiksel arayüz üzerinden kolayca tanımlanmasına imkân tanımaktadır. Ancak GUI tabanlı yapısı nedeniyle split delivery (bölünmüş teslimat), çoklu depo, araç türüne özel kısıtlar gibi daha gelişmiş lojistik senaryolar modelde temsil edilememiştir. Gerçek dünyada sıkça karşılaşılan bu tür durumların göz ardı edilmesi, çözüm kalitesini ve modelin doğruluğunu sınırlamıştır.

Google OR-Tools ise tamamen programatik bir yapı sunduğu için, hem standart hem de gelişmiş kısıtlar kolayca entegre edilebilmektedir. Örneğin farklı araç tiplerine özel kapasite tanımlamaları, teslimat süresi sınırlamaları ve ceza katsayıları gibi özel gereksinimler doğrudan modelleme sürecine dahil edilebilmiştir.

4.4.4 Çözüm Kalitesi ve Optimizasyon Başarısı

ArcGIS tarafından oluşturulan çözümler, harita üzerinde düzgün ve anlaşılır rotalar sunmasına rağmen, altyapı verilerinin doğruluğu ve trafik duyarlılığının eksikliği

nedeniyle bazı rotalar sahada uygulanamaz hâle gelmiştir. Ayrıca bazı araçlara aşırı az yük atanması gibi dengesizlikler de gözlemlenmiştir. Model, tüm siparişlerin 9 araç ile toplanabileceği bir çözüm önermiştir.

Google OR-Tools ise zaman ve kapasite kısıtlarını daha hassas biçimde modelleyerek daha dengeli yük dağılımları elde etmiş, toplam rota sürelerini optimize etmiştir. Metaheuristic algoritmalar (örneğin Guided Local Search) sayesinde daha kaliteli çözümler üretilebilmiştir. Bu modelleme sonucunda, aynı sipariş seti için 26 araçlık bir çözüm önerisi sunulmuştur.

4.4.5 Performans ve Hesaplama Süresi

ArcGIS, küçük ve orta ölçekli veri kümelerinde yeterli hızda çözümler üretebilmiş olsa da, büyük veri setlerinde çözüm süresi ciddi şekilde uzamış ve yazılımda performans sorunları gözlemlenmiştir.

Buna karşılık Google OR-Tools, çözüm süresine zaman limiti tanımlayabilme özelliği sayesinde, büyük veri kümelerinde dahi stabil ve hızlı biçimde çözümler üretebilmiştir.

4.4.6 Çıktıların Kullanımı ve Görselleştirme

ArcGIS'in en güçlü yönlerinden biri, çözümlerin doğrudan harita üzerinde görsel olarak sunulabilmesi ve kapsamlı analiz raporlarının arayüz üzerinden kolaylıkla alınabilmesidir. Bu özellik, özellikle karar destek sistemlerinde kullanıcıya büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Google OR-Tools ise yerleşik bir görselleştirme sunmamakta, elde edilen sonuçların GeoJSON veya CSV formatında dışa aktarılıp harici araçlarla işlenmesini gerektirmektedir. Her ne kadar bu durum ek teknik bilgi ihtiyacı doğursa da, görselleştirme sürecinin tam kontrolünü kullanıcıya vererek esnek ve özelleştirilebilir bir yapı sunmaktadır.



SONUÇ

Bu çalışma, İstanbul'un Esenyurt ilçesinde yürütülen kargo toplama operasyonlarını mekânsal ve operasyonel boyutlarıyla ele alarak, sistemdeki verimsizlikleri ortaya çıkarmış ve iyileştirme potansiyelini değerlendirmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), yoğunluk analizi (KDE) ve Araç Rotalama Problemi (VRP) modellemeleri üzerinden yürütülen analizlerde, sipariş kümelenmelerinin hem hacimsel yük (desi) hem de mekânsal yoğunluk açısından belli bölgelerde biriktiği, bazı araçların sistematik olarak kapasitesinin üzerinde veya altında çalıştığı ve bunun rota süresi ile yakıt tüketimi gibi maliyet kalemlerine doğrudan etki ettiği tespit edilmiştir.

CBS tabanlı ArcGIS uygulamasıyla geliştirilen VRP çözüm modeli, geleneksel sistemin ihtiyaç duyduğu 17 araç yerine, aynı işin yalnızca 7 araçla tamamlanabileceğini göstermiş ve bu da yaklaşık %59 oranında bir optimizasyon kazancı sağlamıştır. Saha verilerine dayalı olarak geliştirilen bu model, tanımlı operasyonel kısıtlar (kapasite, süre, mola, hizmet zamanı) altında çalışan sistemin ne ölçüde esnekleştirilebileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, tüm siparişlerin dahil edildiği tam talep senaryosunda, araç sayısı ve rota süreleri belirgin biçimde artmış; bu da sistemin pik dönemlerde ek kaynak ihtiyacı duymaya başladığını göstermiştir.

Çalışmanın son aşamasında Google OR-Tools kütüphanesi ile geliştirilen algoritmik VRP çözüm modeli, rota sürelerinin daha dengeli dağılmasını sağlamış, daha az araçla daha geniş alana hizmet edebilme kapasitesini göstermiştir. OR-Tools'un sunduğu esnek senaryo yönetimi, kod temelli yapılandırma ve yüksek işlem hızı gibi avantajlar, özellikle büyük ölçekli veri kümeleri üzerinde çalışmayı kolaylaştırmıştır. Bununla birlikte, ArcGIS'in sunduğu görselleştirme, erişim analizi ve servis alanı haritaları gibi araçlar, karar verici destek sistemleri açısından hâlen güçlü bir avantaj sunmaktadır.

Tüm bu bulgular ışığında, kentsel lojistik operasyonlarının yalnızca düz rota planlamasıyla değil, aynı zamanda veri yoğunluklarına, hizmet erişimine, araç kapasite dağılımına ve dönemsel değişkenliklere dayalı olarak modellenmesi gerektiği

anlaşılmıştır. Bu çalışma, veri temelli ve mekânsal analiz destekli yaklaşımların şehir lojistiğinde kaynak verimliliğini artırmak, çevresel etkiyi azaltmak ve operasyonel performansı iyileştirmek açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. CBS teknolojileri ile optimizasyon algoritmalarının entegre biçimde kullanılması, gelecekte daha çevik, daha ölçeklenebilir ve daha sürdürülebilir lojistik sistemlerinin inşasında önemli bir yön verici olacaktır.



KAYNAKLAR

- Alvarez Gallo, J., & Maheut, J.** (2023). Multi-criteria decision making in urban freight transport: A systematic review (2012–2022). *Mathematics*, 11(19), 4089. <https://doi.org/10.3390/math11194089>
- Allen, J., Piecyk, M., & Piotrowska, M.** (2018). An analysis of the parcels market and parcel carriers' operations in the UK. University of Westminster.
- Anand, N., van Duin, J. H. R., Quak, H., & Tavasszy, L.** (2015). Relevance of city logistics modelling efforts: A review. *European Transport / Trasporti Europei*, 54, 1–16.
- Atmaca, E.** (2016). Bir kargo şirketinde araç rotalama problemi ve uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4), 875–886.
- Aydınoglu, A. Ç., Ergül, İ., Şişman, S., & Bovkır, R.** (2021). COVID-19 salgın döneminde işletmeler için ulaşım ağında uygun tesis yer seçimi analizi: Kargo örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 256–268.
- Bailey, T. C., & Gatrell, A. C.** (1995). *Interactive Spatial Data Analysis*. Longman Scientific & Technical.
- Bediroğlu, Ş.** (2022). Optimization of urban cargo distribution network and station points with open-source GIS. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(1), 1–9.
- Bennani, A., Kamissoko, D., & Khalis, M.** (2022). Urban distribution center location selection under uncertainty using fuzzy MCDM methods: A case study from Casablanca, Morocco. *Sustainability*, 14(15), 9544. <https://doi.org/10.3390/su14159544>
- Dabanc, L.** (2007). Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(3), 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.05.005>
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H.** (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80–91.
- Daskin, M. S.** (2013). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. Wiley.
- Esri.** (2023). *ArcGIS Pro Network Analyst Extension: Theory and Concepts*.
- Golden, B. L., Raghavan, S., & Wasil, E. A.** (2008). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Springer.
- González-Feliu, J., Ambrosini, C., & Routhier, J.-L.** (2012). New trends on urban goods movement: Modelling and simulation of e-commerce distribution. *European Transport / Trasporti Europei*, 50, Paper No. 5, 1–23.

- Jeong, J., & Song, J.** (2025). Optimizing urban logistics vehicle routing problem with underground transportation. ResearchGate Working Paper. <https://www.researchgate.net/publication/388716075>
- Kesik, F., Yomralıoğlu, T., & Acar, M.** (2015). CBS Tabanlı Ulaşılabilirlik Analizleri. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Yayını.
- Laporte, G.** (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4), 408–416.
- Lin, J., Chen, Q., & Kawamura, K.** (2016). Sustainability analysis of parcel delivery strategies: Courier dispatching and locker boxes. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 84–103. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.05.009>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W.** (2015). *Geographic Information Systems and Science* (4th ed.). Wiley.
- Lyu, Z., Pons, D., Zhang, Y., & Ji, Z.** (2023). Freight operations modelling for urban delivery and pickup with flexible routing: Cluster transport modelling incorporating discrete-event simulation and GIS. *Mathematics*, 11(19), 4089. <https://doi.org/10.3390/math11194089>
- Macharis, C., & Bernardini, A.** (2015). Reviewing the use of multi-criteria decision analysis for the evaluation of transport projects: Time for a multi-actor approach. *Transport Policy*, 37, 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.11.002>
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B.** (2017). *The Geography of Transport Systems* (4th ed.). Routledge.
- Silverman, B. W.** (1986). *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall.
- Statista.** (2023). Retail e-commerce sales worldwide from 2014 to 2027. <https://www.statista.com/statistics/379046/worldwide-retail-e-commerce-sales/>
- Taha, H. A.** (2017). *Operations Research: An Introduction*. Pearson Education.
- Topal, A. H.** (2021). Coğrafi bilgi sistemi tabanlı optimizasyon analizleri için çok türlü taşımacılık güzergâhlarının oluşturulması. *Türkiye Lojistik Dergisi*, 6(1), 35–45.
- Toth, P., & Vigo, D.** (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications* (2nd ed.). SIAM.
- TÜBİSAD.** (2023). Türkiye E-Ticaret Ekosistemi Raporu. Bilişim Sanayicileri Derneği Yayını.
- TÜİK** (2023). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları. Türkiye İstatistik Kurumu.
- Yılmaz, E., Karakaş, A., Ağaçsapan, B., & Çabuk, A.** (2019). CBS Tabanlı Ulaşım Kaynaklı Hava Kirlenici Emisyon Miktarlarının Belirlenmesi. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies*, 1(2), 37–57.

- Yılmaz, S., Arslan, N., & Oturakcı, M.** (2021). Bir kargo şirketi için süreç iyileştirme çalışmaları. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (30), 511–526.
- Yomralıoğlu, T.** (2000). Coğrafi Bilgi Sistemleri: Temel Kavramlar ve Uygulamalar. Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Wikipedia contributors.** (2023). Distance matrix. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Distance_matrix (Erişim tarihi: 23.03.2025)
- Zografos, K. G., & Androutsopoulos, K. N.** (2008). A heuristic algorithm for solving VRPTW in real-world networks. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 716–727.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Fatma Reyhan SARIKAYA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2022, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
- **Lisans** : 2022, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2021-2023 yılları arasında PiriReis Bilişimde Bilgisayar ve Harita Mühendisi olarak çalıştı.
- 2023 yılından bu yana Hepsiburada'da Yazılım Mühendisi olarak çalışmakta.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Sarıkaya, F.R., Dervişoğlu, A., (2025).** Spatial Analysis And Optimization Of E-Commerce Company's Parcel Collection Operations: The Case Of Esenyurt, Istanbul. IGRS 2025, 12-14 Mayıs, 2025, İstanbul, Türkiye.