



TOPLU TAŞIMADA YOLCU YOĞUNLUĞUNA DAYALI UYARLANABİLİR ZAMAN PLANLAMASI: TRABZON KAMPÜS HATLARI ÜZERİNE BİR UYGULAMA

Behice Meltem KAYHAN¹, Nurhan DUDAKLI^{2*}, Esra AKTAN³, Edanur KOYUNCU³, Dilara KIRCA³

¹Manisa Celal Bayar University, Faculty of Business, Business Administration, 45140, Manisa, Türkiye

²İzmir Bakırçay University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of International Trade and Business, 35665, İzmir, Türkiye

³Karadeniz Teknikal University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 61080, Trabzon, Türkiye

Özet: Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Kanuni Kampüsü'ne hizmet veren toplu taşıma sisteminde operasyonel verimliliği artırmayı amaçlamakta ve yolcu yoğunluğuna dayalı olarak sefer planlamasının yeniden yapılandırılmasını önermektedir. Trabzon'da kentsel ulaşım verilerinin sistematik biçimde analiz edilmemesi ve sınıflandırılmaması, etkili hizmet tasarımı zorlaştırmaktadır. Bu sorunu ele almak amacıyla, yolcu biniş verileri analiz edilerek, gerçek talebe uygun şekilde sefer sıklığı ve otobüs tahsisini optimize edilmiştir. Özellikle ders saatleri çevresinde yaşanan yoğunluk değişimlerini yansıtacak şekilde, zaman dilimleri K-Means kümeleme algoritması kullanılarak dinamik olarak bölümlendirilmiştir. Her bir tanımlanan küme için gerekli sefer sayısı ve otobüs ihtiyacı hesaplanmıştır. Geleneksel sabit zamanlı planlama yaklaşımlarının aksine, bu yöntem her bir otobüs hattı ve yönünün özgün özelliklerine göre zaman dilimlerini uyarlayarak esnek ve yanıt verebilen bir planlama imkânı sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, önerilen kümeleme tabanlı yaklaşımın, hizmet kalitesinden ödün vermeksizin hem maksimum hem de ortalama otobüs sayısını etkili bir şekilde azalttığını göstermektedir. Bu esnek planlama stratejisi operasyonel verimliliği artırmakta ve benzer kentsel ulaşım bağlamlarına uyarlanabilecek pratik bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Veri Analizi, Sefer Sıklığı Optimizasyonu, Uyarlanabilir Zaman Planlaması, K-Means Kümeleme Algoritması

Adaptive Time Scheduling Based on Passenger Density in Public Transportation: A Case Study on Trabzon Campus Routes

Abstract: This study aims to improve operational efficiency in public transportation services to the Kanuni Campus of Karadeniz Technical University by restructuring trip planning based on passenger density. Currently, the lack of systematic analysis and classification of urban transportation data in Trabzon hinders effective service design. To address this issue, passenger boarding data were analyzed to optimize trip frequency and bus allocation in response to actual demand. The K-Means clustering algorithm was employed to segment time intervals dynamically according to boarding densities, particularly reflecting fluctuations around class hours. For each identified cluster, the required number of trips and buses was calculated. Unlike traditional fixed scheduling approaches, this method enables flexible and responsive planning by adapting time segments to the specific characteristics of each bus line and direction. The results show that the proposed clustering-based approach effectively reduces both the maximum and average number of buses needed while maintaining service quality. This flexible scheduling strategy enhances operational efficiency and offers a practical framework adaptable to other urban transit contexts.

Keywords: Data Analysis, Frequency Optimization, Adaptive Time Scheduling, K-Means Clustering

*Sorumlu yazar (Corresponding author): İzmir Bakırçay University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of International Trade and Business, 35665, İzmir, Türkiye

E mail: nurhan.dudakli@bakircay.edu.tr (N. DUDAKLI)

Behice Meltem KAYHAN <https://orcid.org/0000-0001-6881-2580>

Nurhan DUDAKLI <https://orcid.org/0000-0002-5593-5335>

Esra AKTAN <https://orcid.org/0009-0002-0153-404X>

Edanur KOYUNCU <https://orcid.org/0009-0008-9698-453X>

Dilara KIRCA <https://orcid.org/0009-0008-6900-6730>

Gönderi: 23 Eylül 2025

Kabul: 10 Kasım 2025

Yayınlanma: 15 Ocak 2026

Received: September 23, 2025

Accepted: November 10, 2025

Published: January 15, 2026

Cite as: Kayhan, B. M., Dudaklı, N., Aktan, E., Koyuncu, E., & Kirca, D. (2026). Adaptive time scheduling based on passenger density in public transportation: A case study on Trabzon campus routes. *Black Sea Journal of Engineering Science*, 9(1), xx-xx.

1. Giriş

Kent yaşamının temel yapı taşlarından biri olan toplu taşıma sistemleri, şehir içi ulaşımın sürdürülebilirliğini sağlamakta kritik bir rol oynamaktadır. Artan kentleşme, nüfus yoğunluğu, bireysel araç kullanımının yaygınlaşması ve sınırlı ulaşım kaynakları; trafik

tıkanıklığı, hava kirliliği, gürültü ve yüksek enerji tüketimi gibi sorunların artmasına neden olmaktadır. Bu sorunların çözümünde, entegrasyonu sağlanmış, etkili ve verimli çalışan toplu taşıma sistemlerinin önemi giderek artmaktadır (Ibarra-Rojas vd., 2015; Mirza ve Jain, 2025). Ancak, toplu taşıma sistemlerinin yoğunlukla kamu



kaynakları ile finanse edilmesi, bu hizmetlerin toplumun tüm kesimlerine eşit, verimli ve kaliteli biçimde sunulmasını zorunlu kılmaktadır. Artan seyahat talebini mevcut sınırlı kaynaklarla karşılamak, özellikle metropol bölgelerde oldukça karmaşık bir planlama problemine dönüşmektedir. Her ne kadar farklı ulaşım modları bu problemi hafifletmeye çalışsa da birçok şehirde otobüs taşımacılığı hâlâ toplu taşıma sisteminin ana omurgasını oluşturmaktadır.

Bu bağlamda, özellikle yoğun yolcu potansiyeline sahip üniversite kampüsleri gibi bölgelerde toplu taşıma planlamasının etkinliği hem kullanıcı memnuniyeti hem de operasyonel verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Karadeniz Teknik Üniversitesi Kanuni Kampüsü, Trabzon ilinde yoğun öğrenci ve personel trafiğine sahip önemli bir ulaşım merkezi konumundadır. Bu doğrultuda, kampüse hizmet veren otobüs hatlarında yaşanan başlıca sorunlar arasında; sefer saatlerinin yolcu talebine uygun olmaması, yetersiz araç sayısı ve plansız hizmet sunumu yer almaktadır. Bu durum, kullanıcı memnuniyetinde azalma, artan bekleme süreleri ve toplu taşıma kullanım oranlarında düşüş gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır.

Trabzon'da toplu taşıma verileri düzenli olarak toplanmakta olsa da bu verilerin karar alma süreçlerinde yeterince etkin kullanılmadığı görülmektedir. Bu çalışma, kampüs güzergâhında hizmet veren otobüs hatlarına ait yolcu biniş verilerini analiz ederek, gün içerisindeki farklı zaman dilimlerinde oluşan yolcu yoğunluklarını sınıflandırmayı ve bu sınıflandırmaya uygun bir sefer planlaması modeli geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, veri madenciliği ve makine öğrenmesi tekniklerinden biri olan K-Means kümeleme algoritması kullanılarak talep tabanlı, uyarlanabilir ve esnek bir

planlama yaklaşımı önerilmektedir. Böylece, hem mevcut kaynakların verimli kullanımı sağlanmakta hem de hizmet kalitesinde artış ve kullanıcı memnuniyetinde iyileşme hedeflenmektedir.

1.1. Problemin Tanımı

Planlama süreci, literatürde yaygın olarak Toplu Taşıma Ağı Planlaması (Transit Network Planning – TNP) başlığı altında ele alınmaktadır (Ceder, 2007; Ibarra-Rojas vd., 2015; Gadepalli vd., 2024). Bu süreç; stratejik, taktiksel ve operasyonel düzeylerde birbirleriyle etkileşimli olan aşağıdaki alt bileşenlerden oluşmaktadır ve Şekil 1'de şematik olarak sunulmuştur:

Toplu Taşıma Ağı Tasarımı: Güzergâh yapısı, durak konumları ve terminal yerleşimlerinin belirlenmesidir.

Sefer Sıklığı Belirleme: Günün farklı saatleri ve hafta içi/hafta sonu talep değişiklikleri dikkate alınarak, her hat için optimum sefer sıklığının (örneğin saat başına sefer sayısı) planlanmasıdır.

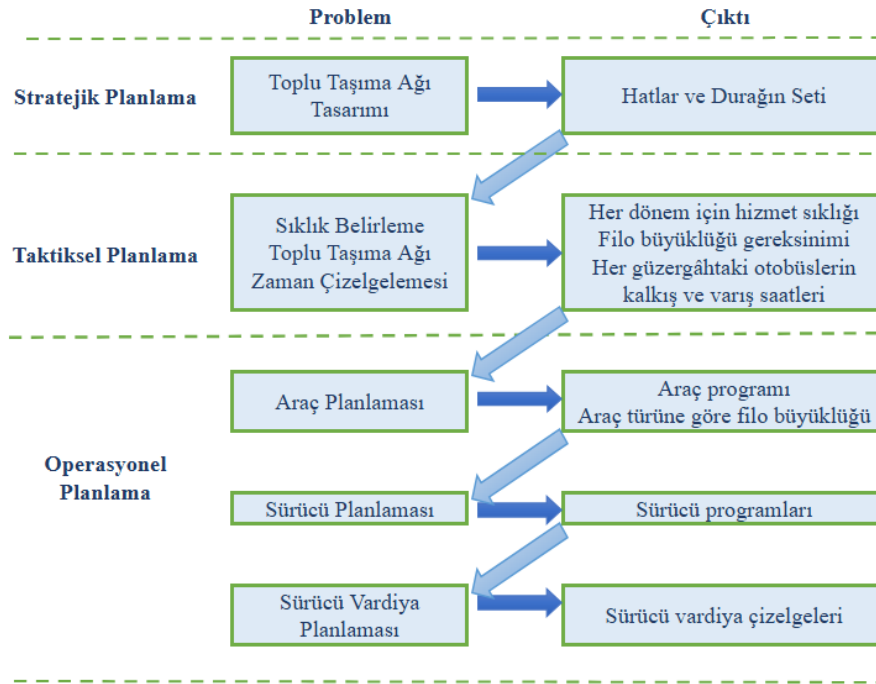
Zaman Çizelgeleme: Araçların duraklara varış ve kalkış saatlerinin belirlenmesini, aktarmaların senkronize edilmesini ve bekleme sürelerinin azaltılmasını hedefler.

Araç Planlaması: Planlanan seferlerin etkin bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için araçların uygun şekilde tahsis edilmesidir.

Sürücü Planlaması: Seferlerin sürücülerle eşleştirilmesi sürecini kapsar; bu aşamada yasal düzenlemelere ve vardiya uygunluklarına dikkat edilir.

Sürücü Vardiya Planlaması: Günlük görevlerin, haftalık veya aylık vardiya çizelgelerine dönüştürülmesini içerir.

Bu bileşenlerin her biri, sistemin genel performansını doğrudan etkileyen ve birbirini tamamlayan adımlardır. Özellikle sefer sıklığı belirleme, yolcu talebini karşılama ve hizmet kalitesini sağlama açısından kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 1. TNP aşamaları arasındaki etkileşim (Ibarra-Rojas vd., 2015).

Şekil 1’de gösterildiği gibi, sefer sıklığı belirleme problemi, Toplu Taşıma Ağı Planlaması (TNP) sürecinin taktik planlama aşamasının kilit bir bileşenidir. Bu aşama, bir toplu taşıma hattı üzerinde belirli bir zaman diliminde (örneğin saatlik veya günlük) çalışacak araç sayısının belirlenmesini kapsar ve yolcu talebini yeterli düzeyde karşılamayı amaçlar (Ceder, 2007; Oliveira vd., 2024). Sefer sıklığı, filo büyüklüğü ihtiyacını doğrudan etkiler; daha yüksek sıklık, daha fazla araç gerektirirken, yetersiz araç sayısı yolcu bekleme sürelerinin artmasına ve dolayısıyla konfor ile memnuniyetin azalmasına yol açar (Mete vd., 2022). Öte yandan, aşırı araç kullanımı ise kaynakların verimsiz kullanımı ve yüksek işletme maliyetleri anlamına gelir (Ceder, 2007; Benli ve Akgün, 2023). Bu dengeyi sağlamak hem hizmet kalitesi hem de operasyonel verimlilik açısından filo büyüklüğünün optimize edilmesini zorunlu kılar.

Toplu taşıma sistemlerinde sefer sıklığı belirleme (Frequency Setting) problemi, sistemin etkinliği ve verimliliği açısından kritik öneme sahip bir karar alanıdır. Bu problem, belirli bir toplu taşıma hattında hangi saatlerde ve hangi sıklıkta sefer düzenlenmesi gerektiğini optimize etmeyi amaçlar. Nihai hedef, hem yolcu memnuniyetini ve konforunu artırmak hem de işletme maliyetlerini minimize etmektir.

Sefer sıklığı belirleme süreci, genellikle talep tahmini, rota optimizasyonu ve kaynak tahsisi gibi alt problemlerin çözümünü gerektirir. Bu bağlamda, yolcu talebi, araç kapasitesi, işletme maliyetleri ve kullanıcı memnuniyeti gibi çok boyutlu parametreler dikkate alınarak bir denge kurulmalıdır. Sefer sıklığının yetersiz olması yolcuların bekleme sürelerini uzatırken, aşırı sıklık ise kaynakların verimsiz kullanımına ve yüksek işletme maliyetlerine yol açar. Bu bağlamda, sefer sıklığını belirlerken iki temel boyut ön plana çıkar:

- Yolcu odaklı performans: Bekleme sürelerinin azaltılması, taşıma kapasitesinin yeterliliği ve seyahat süresinin optimize edilmesi.
- İşletme odaklı etkinlik: Maliyetlerin azaltılması, kaynakların verimli kullanımı ve çevresel etkilerin minimize edilmesi.

Sıklık belirleme problemi, genellikle bu iki boyutun çatışan hedefleri nedeniyle çok ölçütlü bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilir. Ulaşım sistemlerinin dinamik yapısı ve talebin zamana ve mekâna göre değişkenliği, bu problemi daha da karmaşık hale getirmekte ve bilimsel, yenilikçi yöntemlerin kullanımını zorunlu kılmaktadır.

1.2. Literatür Taraması

Toplu taşıma sistemlerinin planlanmasına yönelik akademik çalışmalar incelendiğinde, sefer sıklığı belirleme problemi üzerine birçok farklı çözüm yaklaşımının geliştirildiği görülmektedir. Bu çalışmalar genel olarak üç temel yaklaşım altında sınıflandırılmaktadır.

Birinci yaklaşım olan matematiksel programlama yöntemleri kapsamında sefer sıklığı optimizasyonuna yönelik çalışmalar, matematiksel modeller ve kestirimsel

analizlerle desteklenmektedir (Caetano vd, 2025b). Bu çalışmalarda, talep verileri üzerinden otobüs sefer sayısı belirlenerek kapasite ve hizmet kalitesi arasındaki denge sağlanmaya çalışılmaktadır. Gadepalli vd. (2024), paratransit ve kamu taşımacılığını entegre eden tam sayılı doğrusal programlama (ILP) modeliyle seyahat süresi ve maliyetleri azaltmayı hedeflemiştir. Benli ve Akgün (2023), gerçek ağ karakteristiklerine dayalı çok amaçlı karışık tam sayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) modeli geliştirerek sefer sıklığı ve rota tasarımını birlikte optimize etmiştir. Gkiotsalitis vd. (2022), belirsiz yolcu talebi altında kaynak kullanımı ve bekleme maliyetlerini minimize eden bir MILP modeli sunmuştur. Tian vd. (2021), ortak hat yoğunluklarını dikkate alan üç seviyeli bir model geliştirmiştir. Bertsimas vd. (2020), fiyatlandırma ve sefer sıklığı kararlarını entegre ederek çok modlu sistemlerde bekleme süresini azaltmaya yönelik bir model önermiştir. Ibarra-Rojas vd. (2019), zaman çizelgeleme ve yolcu rotası atamalarını entegre eden bir senkronizasyon modeli geliştirmiştir. Verbas ve Mahmassani (2015) ise hat yapısı ve durak frekansı arasındaki ilişkiyi inceleyen modeller sunmuştur.

İkinci yaklaşım olan meta-sezgisel yöntemler çerçevesinde; Oliveira vd. (2024), biased random-key genetic algorithm (BRKGA) algoritmasını gerçek bir uygulama sahasında kullanarak %10’un üzerinde performans iyileştirmesi sağlamıştır. Aksoy ve Alver (2024), tamamen elektrikli otobüsler için iki seviyeli bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Durán-Micco ve Vansteenwegen (2022), memetik algoritma ile şehir içi yoğunlukları dengelemeyi amaçlamış; Vlachopanagiotis vd. (2021) ise genetik algoritma (GA) yaklaşımı ile kullanıcı ve işletme maliyetleri arasında Pareto optimal çözümler üretmiştir.

Üçüncü grup olan alternatif ve yenilikçi yaklaşımlar kapsamında; Mutlu vd. (2021), salgın riskini seyahat maliyeti olarak tanımlamış ve risk azaltımına yönelik iki seviyeli bir model önermiştir. Kim vd. (2019) ise modlar arası eşitlik ve sürdürülebilir ulaşım hedeflerini dikkate alan kapsamlı bir model geliştirmiştir. Bu çalışmalar, sefer sıklığı belirleme probleminin çözümüne yönelik farklı bakış açıları sunmakta ve hem akademik hem de uygulamalı katkılar sağlamaktadır.

Yapılan kapsamlı literatür taramasında, sefer sıklığı belirleme ve ağ tasarımı problemleri üzerine birçok çalışma incelenmiştir. Bu çalışmaların büyük bir bölümünün, toplu taşıma sistemlerinin etkinliğini artırmayı ve işletme maliyetlerini en aza indirmeyi amaçladığı görülmüştür. Literatürdeki araştırmaların odak noktası genellikle maliyet optimizasyonu, kaynak kullanımının iyileştirilmesi ve yolcu memnuniyetinin artırılmasıdır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda otobüs sefer sıklığının belirlenmesi yalnızca ekonomik ve sosyal faktörlerle değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da ele alınmaya başlanmıştır (Caetano vd., 2025a). Çözüm yöntemleri incelendiğinde, metasezgisel yöntemlerin yaygın bir şekilde kullanıldığı dikkat

çekmektedir. Bu yöntemler, karmaşık problemlerin çözümünde etkili olmakla birlikte, daha çok optimizasyon tabanlı yaklaşımlar üzerine yoğunlaşmaktadır.

Ancak literatür taramasında, sefer sıklığı belirleme ve ağ tasarımı gibi problemlerin çözümünde veri analizi ve kümeleme algoritmalarına dayalı yaklaşımların yeterince ele alınmadığı tespit edilmiştir. Çoğu çalışmada, mevcut verilerin detaylı bir şekilde analiz edilmesi yerine, genelleştirilmiş varsayımlar ve teorik modeller üzerinden çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Oysaki yolcu hareketliliği gibi dinamik ve zamana bağlı bir problemin çözümünde, gerçek verilerin analizi büyük bir öneme sahiptir. Özellikle kümeleme algoritmaları gibi veri odaklı yöntemler, farklı zaman dilimlerinde oluşan yolcu yoğunluklarını doğru bir şekilde sınıflandırarak sefer planlamasına yönelik daha etkili çözümler sunabilir. Ancak bu tür yaklaşımların literatürde yeterince kullanılmadığı veya bu konuya gereken önemin verilmediği görülmektedir. Önceki çalışmalarda da kümeleme yöntemleri farklı bağlamlarda uygulanmış, ancak bu çalışmalarda amaçlar çeşitlilik göstermiştir. Alçura (2024), toplu taşıma hizmetlerinin engelli bireyler açısından değerlendirilmesi için kullanıcı profillerini gruplarken; Wei vd (2025), Wuhan metrosunda yolcu davranışlarını analiz ederek kültürel alanların konumlandırılması üzerine karar destek sağlamıştır.

Toplu taşımada veri odaklı karar verme süreçleri giderek önem kazanmaktadır. Büyük veri analitiği, farklı kaynaklardan elde edilen verilerin anlamlı bilgiye dönüştürülmesini ve operasyonel verimliliğin artırılmasını sağlamaktadır (Urbano vd., 2025). Ayrıca, son yıllarda makine öğrenmesi ve pekiştirmeli öğrenme gibi yapay zekâ tabanlı yöntemler de otobüs güzergâhlarının planlanmasında etkin biçimde kullanılmaktadır (Su ve Yang, 2025). Bu çalışmada ise, yolcu yoğunluklarına dayalı veri analitiği ile zaman aralıkları belirlenmiş ve uygun otobüs planlaması yapılmıştır.

Bu çalışmada, söz konusu problem veri analitiği temelli bir yaklaşımla ele alınmakta; özellikle K-means kümeleme algoritması kullanılarak farklı zaman dilimlerindeki yolcu yoğunlukları gruplandırılmakta ve talebe duyarlı sefer sıklıkları optimize edilmektedir. Bu sayede hem yolcu memnuniyeti artırılmakta hem de mevcut kaynakların daha verimli kullanılması sağlanmaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu yöntemin farklı ulaşım modlarına (örneğin, tren veya tramvay hatları) uygulanabilirliği ve veri analitiği yöntemlerinin farklı coğrafi bölgelerdeki ulaşım sistemlerine uyarlanabilirliği incelenebilir. Ayrıca, gerçek zamanlı veri akışıyla çalışan bir karar destek sisteminin geliştirilmesi, literatüre ve sektöre önemli bir katkı sağlayabilir.

2. Materyal ve Yöntem

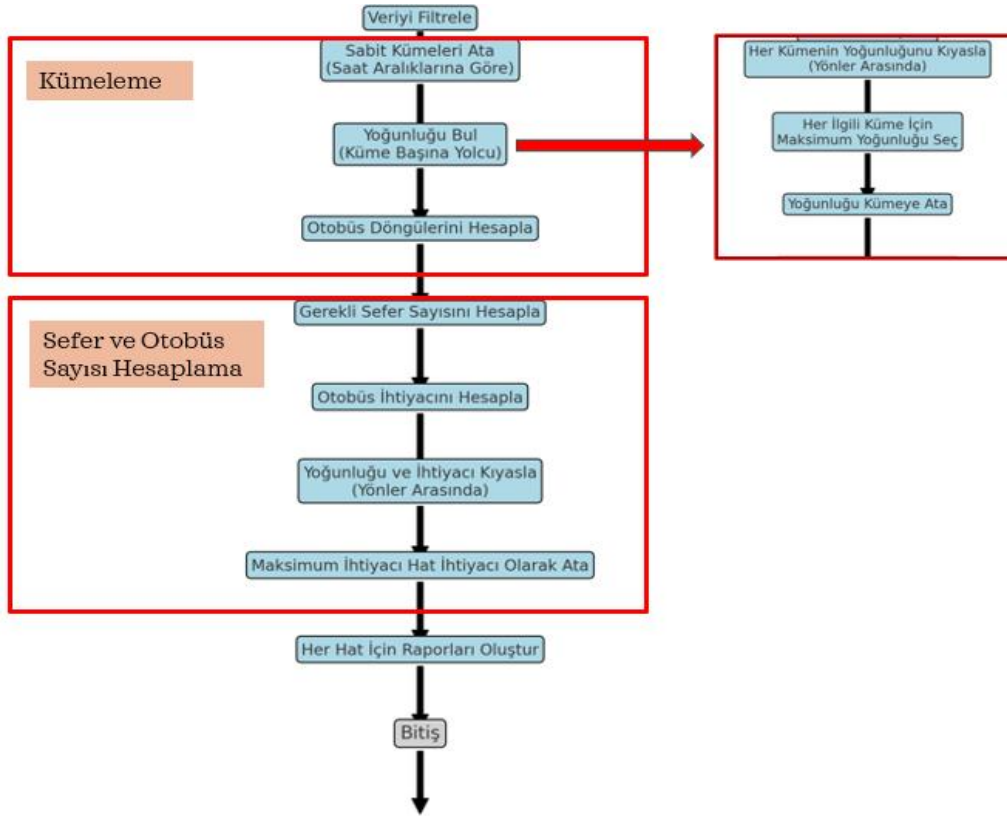
2.1. Önerilen Yaklaşım

Otomatik ücret toplama sistemlerinin kullanımının artmasıyla birlikte, araç içi işlem verileri toplu taşıma sistemlerinin optimizasyonu için değerli bir kaynak hâline gelmiştir. Pelletier vd. (2011) gibi çalışmalar, akıllı kart verilerinin seyahat kalıplarını analiz etme ve toplu taşıma operasyonlarını iyileştirme potansiyeline dikkat çekmektedir. Veri madenciliği teknikleri, yolcu davranışlarını belirlemek gibi eyleme dönüştürülebilir içgörüler elde etmede oldukça etkili olmuştur (Ma vd., 2013). Bu gelişmeler üzerine inşa edilen Carrel vd. (2015) çalışmasında; biniş saatleri, istasyonlar, ücret türleri ve toplu taşıma hatları gibi ayrıntıları içeren yüksek çözünürlüklü bir yolcu izleme sistemi geliştirilmiştir. Bu teknolojilerden faydalanarak, bu çalışmada yolcu biniş yoğunluklarını ve seyahat kalıplarını analiz etmek, sefer sıklığı ve otobüs optimize etmek amacıyla veri madenciliği yöntemleri kullanılmıştır.

Önerilen yaklaşım, uygulaması kolay ve az veri gerektiren pratik bir çözüm sunmakta, bu yönüyle özellikle kaynakları sınırlı olan sistemler için ideal bir alternatif oluşturmaktadır. Uyumlu çerçevesi sayesinde karayolu ve raylı sistemler dâhil olmak üzere farklı ulaşım modlarında da kullanılabilir. Kümeleme algoritmaları, talep analizi ve kaynak tahsisini bir araya getiren bu bütüncül yaklaşım, toplu taşıma sistemlerinin verimliliğini ve hizmet kalitesini artırmayı hedeflemektedir. Bu yaklaşım, toplu taşıma planlamasında karşılaşılan iki temel soruna çözüm getirmektedir:

1. Gün içinde değişen, hat bazlı yolcu talep desenlerini anlamak,
2. Gerçek veriler kullanarak sefer sıklığı ve filo büyüklüğünü belirlemek.

Yaklaşım, benzer talep desenlerini kümeleme algoritmaları ile gruplandırarak, zaman bazlı planlama ve kaynak tahsisinde daha hassas kararlar alınmasını sağlar. Geleneksel kümeleme uygulamaları genellikle konum temelli olup yüksek talep bölgelerini belirleme, güzergâh optimizasyonu ve taşıma kapasitesi planlaması gibi konulara odaklanmaktadır (Charris vd., 2019; Xie vd., 2020; Chen ve Shan, 2021; Lee vd., 2022; Pei vd., 2022; Bagheri vd., 2024). Buna karşın bu çalışma, zaman temelli talep desenlerine odaklanarak yenilikçi bir bakış açısı sunmaktadır. Bu yöntem, zaman temelli biniş verilerini dikkate alarak yolcuları konum yerine biniş saatlerine göre sınıflandırmaktadır. Şekil 2’de gösterilen akış diyagramı, toplu taşıma hatlarında talebe duyarlı sefer sıklığı ve otobüs ihtiyacının belirlenmesine yönelik geliştirilen veri analiz sürecini göstermektedir. Süreç iki ana aşamadan oluşmaktadır: kümeleme ve sefer ile otobüs sayısı hesaplama.



Şekil 2. Önerilen yaklaşımın akış diyagramı.

İlk aşamada, yolcu yoğunluklarının zamansal olarak sınıflandırılması amacıyla kümeleme işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada, veriler filtrelenebilir ve belirli saat aralıklarına göre sabit kümeler atanır. Ardından her bir zaman dilimi için yolcu yoğunluğu (yani, otobüs başına düşen yolcu sayısı) hesaplanır. Yoğunluk değerleri, farklı yönlerdeki (gidiş-dönüş) seferler arasında karşılaştırılır ve her küme için maksimum yoğunluk seçilerek kümeye atanır. Bu sayede, yön bağımsız ancak maksimum talebe duyarlı kümeler elde edilir.

İkinci aşama olan sefer ve otobüs sayısı hesaplaması bölümünde, her bir küme için gerekli sefer sayısı ve otobüs ihtiyacı belirlenir. Yoğunluk ve ihtiyaç değerleri yönler arasında karşılaştırılarak maksimum değerler esas alınır. Böylece her bir hattın ihtiyaç duyduğu en yüksek otobüs sayısı, hat ihtiyacı olarak belirlenmiş olur. Son adımda, her bir hat için detaylı raporlar oluşturularak süreç tamamlanır.

Bu yöntem, yolcu yoğunluğuna göre zaman aralıklarını veri destekli bir şekilde sınıflandırmakta ve otobüs tahsisini talep odaklı optimize etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu yönüyle hem hizmet kalitesi hem de kaynak verimliliği açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Bu şekilde günü, yolcu talebindeki dalgalanmalara göre zaman dilimlerine dinamik olarak bölen sistem, filo büyüklüğü ve sefer sıklığının zaman bazında optimize edilmesini sağlar. Bu çalışmada, büyük veri setleriyle çalışmada etkili ve kümeleri iyi ayırma kapasitesine sahip olması nedeniyle K-Means algoritması tercih edilmiştir. Yolcu yoğunluklarına dayalı zaman

aralıkları oluşturularak sistemin gerçek talebe daha duyarlı hâle gelmesi ve operasyonel verimliliğin artması hedeflenmiştir.

2.1.1. K-Means ile kümeleme süreci

Makine öğrenmesi tabanlı kümeleme algoritmaları, veri madenciliği alanında verileri benzer özelliklerine göre gruplandırarak, gizli örüntülerin ortaya çıkarılmasını sağlar. Şehir içi toplu taşıma verilerinin K-Means algoritması ile kümeleme analizi, karar vericilere daha doğru öngörüler sunarak ulaşım stratejilerinin iyileştirilmesine katkı sağlar.

Kümeleme analizinde temel amaç, bir veri grubunun içinde homojen alt gruplar (kümeler) olup olmadığını ve bu kümelerin hangi özelliklere sahip olduğunu belirlemektir (Tekin, 2018). Diğer veri analiz yöntemlerinde sınıflar önceden tanımlanmışken, kümeleme analizinde bu sınıflar verinin kendisinden elde edilir (Hajizadeh ve Shahrabi, 2010). Ayrıca, kümeleme yönlendirilmemiş (unsupervised) bir veri madenciliği yöntemi olup, öngörülen bir hedef değişken olmaksızın veri yapısını bütünsel olarak keşfetmeyi amaçlar (Aggelis ve Christodoulakis, 2005).

K-Means algoritması, denetimsiz öğrenme algoritmaları arasında en yaygın ve sade olanlardan biridir. Belirli bir küme sayısı (k) önceden belirlenir ve algoritma bu k sayıda merkezi belirleyerek kümeleri oluşturur. Temel işlem adımları şu şekilde özetlenebilir:

1. Başlangıçta k adet merkez noktası (centroid) rastgele seçilir.
2. Her veri noktası, kendisine en yakın merkeze atanır.
3. Kümeler oluştuktan sonra, her bir kümenin yeni

merkez noktası hesaplanır.

4. Bu işlem, merkezler artık yer değiştirmeyene kadar tekrar edilir.

Algoritmanın amacı, her veri noktasını en yakın merkeze atayarak toplam hata kareleri toplamını (sum of squared errors) minimize etmektir. Bu sayede, veriler içindeki benzer zaman dilimleri belirlenerek yolcu yoğunlukları kümelenmiş olur.

2.1.2. Gerekli sefer ve otobüs sayısının hesaplanması

K-Means algoritması ile elde edilen her bir küme için yolcu yoğunlukları hesaplandıktan sonra, bu yoğunluklara karşılık gelen gerekli sefer sayısı ve gerekli otobüs sayısı, Tablo 1'de tanımlanan ve kısaltmaları sunulan parametre ve değişkenler kullanılarak, aşağıdaki eşitlikler aracılığıyla hesaplanmaktadır (eşitlikler 1-3):

$$GS = KY/OK \quad (1)$$

$$OD = (KS * 60)/SS \quad (2)$$

$$GO = GS/OD \quad (3)$$

Tablo 1. Sefer planlamasında kullanılan parametre ve değişkenler

Kısaltma	Açıklama
GS	Gerekli Sefer Sayısı
KY	Kümedeki Toplam Binen Yolcu Sayısı
OK	Otobüs Kapasitesi (kişi)
GO	Gerekli Otobüs Sayısı
OD	Otobüs Döngüsü Sayısı (belirli bir zaman aralığı içinde)
KS	Küme Süresi (saat cinsinden)
SS	Sefer Süresi (dakika cinsinden, gidiş + geliş)

Bu formüller, her bir zaman kümesi için yolcu yoğunluğuna uygun araç planlamasının yapılmasına olanak sağlar. İlk olarak, kümeye binen yolcu sayısı (KY, kişi) ile otobüs kapasitesi (OK, kişi) oranlanarak gerekli sefer sayısı (GS) eşitlik 1 ile hesaplanır. Ardından, kümenin süresi olan küme süresi (KS, saat) ile 60 çarpılarak sefer süresine (SS, dakika) bölünmek suretiyle otobüs döngü sayısı (OD) eşitlik 2 ile bulunur. Bu, bir otobüsün söz konusu zaman diliminde kaç defa sefer yapabileceğini gösterir. Son olarak, toplam gerekli sefer sayısı (GS), otobüs döngü sayısına (OD) bölünerek, gerekli otobüs sayısı (GO) eşitlik 3 ile hesaplanır. Bu hesaplama yöntemi, zamana bağlı yolcu yoğunluklarını dikkate alarak dinamik bir sefer ve araç planlaması yapılmasına olanak tanır; böylece hem hizmet kalitesi artırılır hem de kaynak kullanım verimliliği desteklenmiş olur.

2.2. Uygulama

Bu çalışmada, Karadeniz Teknik Üniversitesi Kanuni Kampüsü sınırları içerisinde faaliyet gösteren otobüs hatlarına ilişkin mevcut ulaşım problemlerinin sistematik BSJ Eng Sci / Behice Meltem KAYHAN vd.

bir biçimde analiz edilmesi ve bu problemlerin çözümüne yönelik veriye dayalı bir yaklaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Uygulama süreci aşağıdaki dört temel adımdan oluşmaktadır:

1.*Veri toplama ve temizleme:* Kampüs içi otobüs hatlarına ilişkin ham verilerin elde edilmesi, hatalı veya eksik verilerin ayıklanması ve analiz için uygun formata dönüştürülmesi.

2.*Kümeleme analizine hazırlık:* Zaman serisi haline getirilmiş verilerin uygun kümeleme parametreleriyle analiz edilebilmesi için ön kontrollerin ve küme sayısı belirlenmesinin yapılması.

3.*K-means kümeleme algoritması ile analiz:* Biniş zamanlarına dayalı olarak yolcu yoğunluğunun farklı zaman dilimlerine ayrılması ve kümelenmesi.

4.*Yoğunluk hesaplama ve sefer ve otobüs sayısını belirleme:* Her bir kümede oluşan talep düzeylerinin ölçülmesi, sefer ve araç ihtiyacının belirlenmesi ve mevcut sistemle karşılaştırmalı analizlerin yapılması.

Kampüs içi otobüs taşımacılığı, öğrenci ve personel gibi büyük bir kullanıcı kitlesine hizmet vermesi nedeniyle yüksek talep dalgalanmalarına maruz kalmakta ve bu durum zaman zaman yetersiz kapasite, düzensiz sefer sıklığı ve düşük yolcu memnuniyeti gibi sorunlara yol açmaktadır. Mevcut sistemde sefer planlamalarının çoğunlukla sabit zaman çizelgeleri üzerinden yapılması ve yoğunluk verilerinin analiz edilmeden sadece kayıt altına alınması, kaynak kullanımında verimsizliklere neden olmaktadır. Türkiye'de yapılan benzer uygulamalarda da toplu taşıma verileri kullanılarak otobüs hatlarının düzenlenmesine yönelik çözümler geliştirilmiştir (Çeçen ve Tosun, 2024). Ancak bu çalışmalarda talep segmentasyonu ve zaman dilimi bazlı optimizasyon konuları sınırlı düzeyde ele alınmıştır.

Bu çalışmada, söz konusu sistemin iyileştirilmesi amacıyla nicel verilere dayalı bir analiz süreci uygulanmış ve kampüs içi otobüs ulaşım ağına ilişkin gerçek biniş verileri üzerinden çıkarımsal sonuçlara ulaşılmıştır. Uygulama süreci boyunca, her adım dikkatlice yürütülmüş ve karar vericilere yol gösterecek veriler elde edilmiştir.

İlk aşamada, TULAŞ (Trabzon Ulaşım A.Ş.) tarafından sağlanan ham veriler toplanmış, bu veriler üzerinde çeşitli ön işleme adımları uygulanarak analiz için uygun bir yapıya dönüştürülmüştür. Bu kapsamda, hatalı veya eksik veri girişleri temizlenmiş, zaman biçimleri standartlaştırılmış ve veriler tarihsel sıralamaya göre organize edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm veriler anonimleştirilmiş olup, herhangi bir kişisel bilgi içermemektedir.

İkinci aşamada, elde edilen verilerin kümelenmeye uygun hale getirilmesi amacıyla analiz öncesi hazırlıklar yapılmış, özellikle kümeleme algoritmasında kullanılacak parametrelerin (küme sayısı gibi) belirlenmesi için çeşitli metrikler üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte her hat için yolcu talebinin gün içerisindeki değişimini temsil edecek en uygun küme sayısı saptanmıştır.

Üçüncü aşamada ise, K-means kümeleme algoritması uygulanarak biniş zamanlarına dayalı olarak farklı yoğunluk bölgeleri belirlenmiştir. Bu algoritma sayesinde gün içerisindeki farklı saat dilimlerinde ortaya çıkan yolcu yoğunluğu paternleri sistematik olarak gruplandırılmıştır. Böylece hangi zaman aralıklarında daha fazla sefer gerektiği, hangi saatlerde kapasite kullanımının düşük olduğu gibi bilgiler ortaya konmuştur.

Son olarak, her bir küme için yoğunluk değerleri hesaplanmış; otobüs kapasitesi, sefer süresi ve araç sayısı gibi değişkenler göz önünde bulundurularak önerilen sefer planları geliştirilmiştir. Bulgular grafiksel olarak görselleştirilmiş ve mevcut sistemle karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, veri temelli karar alma süreçlerinin kampüs içi ulaşım sistemlerinde ne denli etkili olabileceğini ortaya koymuş ve sefer sıklığının dinamik talep yaplarına göre yeniden düzenlenebileceğini göstermiştir.

2.2.1. Veri toplama ve temizleme

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Trabzon Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı Trabzon Ulaşım A.Ş. (TULAS) tarafından sağlanan kampüs içi otobüs hatlarına ait sefer

raporu ile sefer ve durak bazlı biniş raporlarından oluşmaktadır (Bkz. Şekil 3 ve Şekil 4). Veri gizliliğine dikkat edilerek, elde edilen tüm veriler kişisel bilgilerden arındırılmış ve yalnızca toplu istatistiksel analizler amacıyla kullanılmıştır.

Elde edilen veri setleri, her bir otobüs hattı için gidiş ve dönüş yönlerini ayrı ayrı içermektedir. Bu durum, analiz öncesinde verilerin yön bazında ayrıştırılmasını ve organize edilmesini gerekli kılmıştır. Gidiş ve dönüş yönlerine ait veriler birbirinden ayrılarak, her biri bağımsız bir veri kümesi olarak ele alınmış ve her yön için yoğunluk analizleri ayrı ayrı yürütülmüştür. Bu sayede, sefer planlaması yapılırken yönsel farklılıklar göz önünde bulundurulmuştur. Ancak tüm veriler doğrudan analiz edilebilir formatta sunulmamıştır. Özellikle otobüslerin geliş zamanlarına ilişkin bilgiler, hücre içeriği yerine yorum (not) olarak eklenmiştir. Bu nedenle geliş zamanları, her bir hücre için manuel olarak okunmuş, yorum kutularından çıkarılarak normal veri hücrelerine aktarılmış ve analiz edilebilir hale getirilmiştir. Öte yandan, biniş zamanları doğrudan hücre içeriklerinde bulunduğu için bu veriler daha kolay işlenebilmiştir.

26_11_2024 SALI GÜNÜ [203-C] AKÇAABAT MERSİN SAHİL KTÜ HATTI SEFER RAPORU

Sıra	Hat	Planlanan Zaman	Planlanan Araç	Çalışan Araç	Hat Tespit Zamanı	Fark (Sn)	Mesafe(M)	İlk Durak	Hat Tespit Lokasyon(%)	Hat Açma Zamanı	Sefer Sonu	Sefer Sonu Lokasyon(%)	Zaman	Sefer Sonu Lokasyon(%)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20
1	203-C-G	06:10:00		[216] 61 AEP 338	06:11:39	01:39	807.53		1	06:11:19	Sefer Bitiş	06:53:08	100																					
2	203-C-G	06:50:00		[232] 61 AGA 705	06:50:57	00:57	119.11		0	06:47:57	Sefer Bitiş	07:47:40	100																					
3	203-C-G	07:30:00		[220] 61 AFR 936	07:31:10	01:10	37.04		0	07:30:40	Sefer Bitiş	08:31:56	100																					
4	203-C-G	08:10:00		[183] 61 ACK 378	08:10:13	00:13	64.22		0	08:07:58	Sefer Bitiş	09:09:46	100																					
5	203-C-G	08:50:00		[221] 61 AFU 493	08:51:57	01:57	58.07		0	08:51:09	Sefer Bitiş	09:50:00	100																					
6	203-C-G	09:30:00		[216] 61 AEP 338	09:30:14	00:14	34.03		0	09:27:09	Sefer Bitiş	10:35:09	100																					
7	203-C-G	10:10:00		[232] 61 AGA 705	10:10:43	00:43	148.2		1	10:09:03	Sefer Bitiş	11:03:32	100																					
8	203-C-G	10:50:00		[220] 61 AFR 936	10:53:00	03:00	30.72		0	10:49:28	Sefer Bitiş	12:02:16	100																					
9	203-C-G	11:30:00		[183] 61 ACK 378	11:30:13	00:13	43.05		0	11:22:14	Sefer Bitiş	12:31:04	100																					
10	203-C-G	11:55:00		[221] 61 AFU 493	11:55:54	00:54	55.54		0	11:53:11	Sefer Bitiş	12:55:59	100																					
11	203-C-G	12:30:00		[216] 61 AEP 338	12:30:43	00:43	38.62		0	11:24:32	Sefer Bitiş	13:36:33	100																					
12	203-C-G	13:10:00		[232] 61 AGA 705	13:16:15	06:15	1532.72		5	13:09:06	Sefer Bitiş	14:16:45	99																					
13	203-C-G	13:50:00		[220] 61 AFR 936	13:50:11	00:11	108.27		0	13:49:06	Sefer Bitiş	14:46:10	100																					
14	203-C-G	14:30:00		[183] 61 ACK 378	14:30:51	00:51	158.53		1	14:29:56	Sefer Bitiş	15:41:59	100																					
15	203-C-G	14:55:00		[221] 61 AFU 493	14:58:52	03:52	42.58		0	14:56:37	Sefer Bitiş	16:05:16	100																					
16	203-C-G	15:30:00		[216] 61 AEP 338	15:31:19	01:19	139		1	15:32:48	Sefer Bitiş	16:48:19	100																					
17	203-C-G	16:10:00		[232] 61 AGA 705	16:10:30	00:30	150		1	16:06:18	Sefer Bitiş	17:23:39	100																					
18	203-C-G	16:50:00		[220] 61 AFR 936	16:50:17	00:17	31.52		0	16:48:57	Sefer Bitiş	18:11:59	100																					
19	203-C-G	17:10:00		[179] 61 ACK 237	17:11:24	01:24	104.71		0	17:09:53	Sefer Bitiş	18:17:34	100																					
20	203-C-G	17:50:00		[177] 61 ACK 227	17:50:16	00:16	105.06		0	17:49:01	Sefer Bitiş	18:59:42	100																					
21	203-C-G	18:30:00		[227] 61 AGA 682	18:30:24	00:24	58.25		0	18:29:14	Sefer Bitiş	19:26:57	100																					
22	203-C-G	19:45:00		[220] 61 AFR 936	19:45:16	00:16	160		1	19:44:26	Hat Kapama	20:32:50	97																					
23	203-C-G	20:15:00		[129] 61 ACK 237	20:15:26	00:26	65.69		0	20:12:02	Hat Kapama	21:04:12	94																					

Şekil 3. Örnek sefer raporu.

[203-C - G] için 25.11.2024 00:00:00 - 29.11.2024 23:59:59 ARASI																																						
SEFER VE DURAK BAZLI BİNİŞ RAPORU																																						
Sıra	Hat	Sefer	Süresi	Araç/Söfor	Toplam	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21	D22	D23	D24	D25	D26	D27	D28	D29	D30			
1	203-C - G	06:10:00	00:41:29	[61 AEP 338] HASAN TOKUL ((546)234 24 54)	16	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	203-C - G	06:50:00	00:56:43	[61 AGA 705] EREN TUĞLU ((541) 776 79 78)	71	4	0	0	4	4	0	4	7	1	1	1	0	5	2	0	2	7	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	2	0		
3	203-C - G	07:30:00	01:00:46	[61 AFR 936] COŞKUN AKGÜN ((536)250 34 66)	60	4	0	2	3	0	0	3	1	1	0	0	0	2	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2		
4	203-C - G	08:10:00	00:59:33	[61 ACK 378] CELİL KOSER ((531)331 26 77)	67	0	0	0	7	5	1	5	7	2	3	1	2	2	2	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	3	3	3	2	2		
5	203-C - G	08:50:00	00:58:03	[61 AFU 493] TURAN ARMUTCI ((537)337 91 97)	63	0	0	0	5	2	0	0	1	2	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
6	203-C - G	09:30:00	01:05:25	[61 AEP 338] HASAN TOKUL ((546)234 24 54)	83	0	0	0	4	4	0	0	7	10	0	0	0	5	5	1	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	2	5	6	2	2	2		
7	203-C - G	10:10:00	00:52:49	[61 AGA 705] EREN TUĞLU ((541) 776 79 78)	25	0	0	0	0	3	4	0	0	2	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
8	203-C - G	10:50:00	01:09:16	[61 AFR 936] COŞKUN AKGÜN ((536)250 34 66)	71	3	0	1	1	5	0	0	0	1	7	0	0	3	0	5	2	0	2	1	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0		
9	203-C - G	11:30:00	01:00:51	[61 ACK 378] CELİL KOSER ((531)331 26 77)	64	0	0	1	3	1	0	0	3	0	2	0	22	1	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	5	0	0		
10	203-C - G	11:55:00	01:00:03	[61 AFU 493] TURAN ARMUTCI ((537)337 91 97)	47	5	1	3	3	2	3	0	2	0	6	0	0	3	2	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	1		
11	203-C - G	12:30:00	01:05:50	[61 AEP 338] AHMET İNCEHASAN ((532)490 50 17)	70	0	0	0	2	1	0	0	0	2	1	22	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6	1	0		
12	203-C - G	13:10:00	01:00:30	[61 AGA 705] KADİR ŞENER ((545)875 59 50)	76	4	3	8	5	1	0	0	1	5	11	1	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0		
13	203-C - G	13:50:00	00:55:59	[61 AFR 936] İBRAHİM TOPAL ((536)944 12 10)	38	0	0	0	2	1	10	2	0	3	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
14	203-C - G	14:30:00	01:11:08	[61 ACK 378] KEMAN ERMİŞ ((532)805 94 85)	67	0	0	5	7	4	5	0	0	0	0	16	1	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	
15	203-C - G	14:55:00	01:06:24	[61 AFU 493] TURAN ARMUTCI ((537)337 91 97)	69	0	0	1	8	5	9	0	0	1	2	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
16	203-C - G	15:30:00	01:17:00	[61 AEP 338] AHMET İNCEHASAN ((532)490 50 17)	89	0	0	2	1	5	4	1	0	0	1	36	0	0	0	7	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	
17	203-C - G	16:10:00	01:13:09	[61 AGA 705] KADİR ŞENER ((545)875 59 50)	92	0	0	0	10	5	9	1	0	1	2	19	0	1	0	8	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	0	0	4	0
18	203-C - G	16:50:00	01:21:42	[61 AFR 936] İBRAHİM TOPAL ((536)944 12 10)	120	0	0	9	21	4	3	4	0	1	5	20	0	0	1	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	
19	203-C - G	17:10:00	01:06:10	[61 ACK 237] CANER KÖROĞLU ((535)560 13 77)	58	5	4	4	4	5	5	7	0	3	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
20	203-C - G	17:50:00	01:09:26	[61 ACK 227] Mehmet OCAK ((538)259 04 00)	65	0	0	3	4	4	7	8	0	3	2	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	2	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
21	203-C - G	18:30:00	00:56:33	[61 AGA 682] NURİ BAHAĞIR ((530)644 70 61)	41	0	0	1	7	1	0	0	0	0	10	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	203-C - G	19:45:00	00:47:34	[61 AFR 936] İBRAHİM TOPAL ((536)944 12 10)	42	0	0	0	1	0	0	0	0	0	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	203-C - G	20:15:00	00:49:06	[61 ACK 237] CANER KÖROĞLU ((535)560 13 77)	32	4	1	5	0	0	0	0	0	2	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Kampüs içinden geçen beş otobüs hattı (120, 203-A, 203-C, 277-A ve 118) arasında, yalnızca 120, 203-A, 203-C ve 277-A hatlarına ait veriler düzenli, eksiksiz ve analiz edilebilir nitelikte bulunmuştur. 118 numaralı hat ise bariz eksiklikler ve tutarsızlıklar (ör. boş hücreler, yanlış saat formatları vb.) içerdiğinden çalışmaya dahil edilmemiştir.

Veriler elde edildikten sonra, analiz için uygun hâle getirilmesi amacıyla kapsamlı bir düzenleme ve temizleme süreci yürütülmüştür. İlk aşamada, biniş ve geliş zamanı verilerinin farklı formatlarda bulunması nedeniyle birleştirme ve standardizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Biniş zamanları doğrudan hücre içeriklerinde yer aldığı için bu verilere Excel ortamında kolaylıkla erişilebilmiştir. Ancak geliş zamanları, veri setinde hücre yorumları (notlar) biçiminde kaydedildiğinden, her biri manuel olarak incelenmiş ve ilgili hücre içeriklerine aktarılmıştır. Böylece tüm zaman verileri, hücrel olarak erişilebilir ve analiz edilebilir tek bir formatta birleştirilmiştir.

Bu işlemin ardından, veri setindeki tüm zaman bilgilerinin biçimsel olarak standartlaştırılması sağlanmıştır. Bu kapsamda, saat verileri ortak bir formatta (saat:dakika) olacak şekilde yeniden biçimlendirilmiş ve zaman ifadelerinde bütünlük

sağlanmıştır.

Verilerin biçimsel ve içeriksel uyumu sağlandıktan sonra analiz öncesi kapsamlı bir ön işleme sürecine geçilmiştir. İlk olarak, tüm biniş ve geliş zamanı verileri belirli zaman aralıklarına bölünerek analiz edilebilir periyotlara ayrılmıştır. Bu adım, özellikle zaman serisi tabanlı analizlerde, periyot içi yolcu yoğunluklarının belirlenebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Devamında, her bir hat ve durak için gün boyunca gerçekleşen biniş sayıları hesaplanmış ve veriler Excel ortamında uygun gruplamalarla organize edilmiştir. Gerekli durumlarda, aynı durakta aynı zaman diliminde gerçekleşen çoklu binişler birleştirilerek, tek bir zaman dilimi içerisinde ifade edilmiştir. Bu uygulama, yoğunlukların kümelenmesi aşamasında zaman ekseninde daha net ve anlamlı bir yapı elde edilmesini sağlamıştır (Bkz. Tablo 2 – Durak Bazlı Çoklu Binişler). Tüm veriler anlamlı zaman kümelerine ayrıldıktan sonra, K-Means algoritmasının uygulanabilmesi için gerekli olan sayısal vektör yapısına dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sürecinde, her bir zaman dilimi için toplam biniş sayısı temel alınarak vektörler oluşturulmuş ve bu vektörler, her biri belirli bir zaman dilimini temsil edecek şekilde yapılandırılmıştır.

Tablo 2. Durak bazlı çoklu binişler

Biniş Saati	Durak	Biniş Saati (Dakika)	Biniş Saati	Durak	Biniş Saati (Dakika)
06:12:24	D4	372	06:53:08	D69	413
06:13:44	D6	373	06:53:08	D69	413
06:17:48	D10	377	06:53:08	D69	413
06:17:48	D10	377	06:53:08	D69	413
06:20:18	D14	380	06:50:00	D1	410
06:22:22	D17	382	06:50:00	D1	410
06:26:08	D21	386	06:50:00	D1	410
06:26:37	D22	386	06:50:00	D1	410
06:36:01	D34	396	06:53:37	D4	413
06:37:00	D36	397	06:53:37	D4	413
06:40:15	D42	400	06:53:37	D4	413

Oluşturulan bu veri yapısı, çalışmanın sonraki aşamasında gerçekleştirilecek kümeleme analizinin temel girdisini oluşturmuştur. Özetle, ham veriler; her bir duraktan yapılan binişlerin tarih, saat ve kişi sayısı bilgilerini içermektedir. Bu verilerin analizde kullanılabilir hâle getirilmesi için şu temel ön işleme adımları uygulanmıştır:

- Verilerin temin edilmesi (TULAŞ üzerinden),
- Eksik ve biçimsel olarak hatalı verilerin tespiti,
- Hücrelere yorum olarak eklenen geliş zamanlarının manuel olarak veri hücrelerine taşınması,
- Tüm zaman verilerinin saat:dakika biçiminde standardize edilmesi,
- Zamanların kronolojik olarak sıralanması,
- Aynı anda gerçekleşen binişlerin birleştirilmesi,
- Son olarak, her zaman dilimi için toplam biniş sayısına

dayalı sayısal vektörlerin oluşturulması.

Bu sürecin sonunda elde edilen temiz ve standart veri seti, veri madenciliği tekniklerinin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesini mümkün kılmıştır.

2.2.2. Kümeleme analizi – ön hazırlık

Bu çalışmada, veri kümesinin kümeleme analizine hazırlanması süreci, görsel programlama ortamı sunan Orange Data Mining (Orange Data Mining, 2025) yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Orange, makine öğrenmesi, istatistiksel analiz ve veri görselleştirme işlemlerini kolaylaştıran açık kaynaklı bir araç olup; özellikle kümeleme algoritmalarının çıktılarının etkileşimli biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda, biniş zamanlarını içeren veri seti Orange arayüzüne aktarılmış ve K-Means kümeleme algoritması uygulanmak üzere

yapılandırılmıştır.

K-Means algoritması, veri noktalarını birbirine olan benzerliklerine göre k adet kümeye ayırmayı amaçlayan bir denetimsiz makine öğrenmesi yöntemidir. Ancak, algoritmanın etkili ve anlamlı sonuçlar verebilmesi için

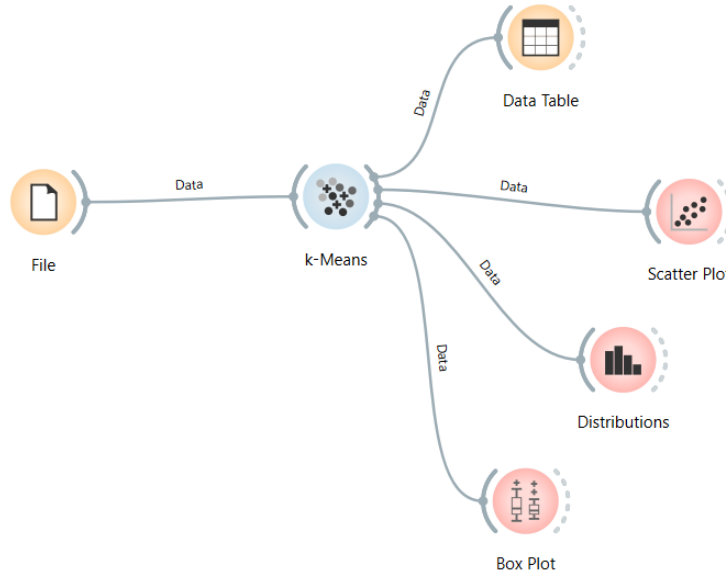
en uygun küme sayısının (k) doğru biçimde belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada uygun küme sayısının belirlenmesi için Silüet Skoru (Silhouette Score) metriği kullanılmıştır.

Tablo 3. Silüet skoruna göre kümeleme kalitesinin yorumlanması (Rousseeuw, 1987)

Silüet Skoru Aralığı	Kümeleme Kalitesi	Açıklama
0.71 – 1.00	Çok iyi	Net olarak ayrılmış kümeler
0.51 – 0.70	İyi	Belirgin kümelenme yapısı
0.26 – 0.50	Orta	Kabul edilebilir düzeyde kümelenme
0.00 – 0.25	Zayıf	Belirsiz ya da örtüşen kümeler
< 0.00	Hatalı kümelenme	Veri noktaları yanlış kümelere atanmış olabilir

Silüet skoru, her bir veri noktasının kendi kümesi içindeki diğer noktalara olan ortalama uzaklığı ile en yakın farklı kümedeki noktalara olan ortalama uzaklık arasındaki farkı ölçer. Skor, -1 ile 1 arasında bir değer alır; 1'e yaklaştıkça veri noktasının doğru kümeye atandığına, 0'a yaklaştıkça sınırda olduğuna, -1'e yaklaştıkça ise yanlış kümeye yerleştirildiğine işaret eder. Bu metrik hem bireysel veri noktaları hem de tüm kümeleme işlemi için genel bir uygunluk ölçütü olarak kullanılır. Farklı küme sayıları için elde edilen silüet skorları analiz edilerek en yüksek ortalama değeri

sağlayan k sayısı, analizde kullanılmak üzere seçilmiştir. Böylece, kümelerin homojenliği ve ayrışabilirliği en iyi şekilde sağlanmaya çalışılmıştır. Silüet değerlerinin yorumlanmasına ilişkin bilgiler Tablo 3'te özetlenmiştir. Bu çalışmada, Orange arayüzü kullanılarak gerçekleştirilen kümeleme analizinde, küme sayısı (k) 2 ile 10 arasında olacak şekilde sistematik testler yürütülmüştür. Her bir küme sayısı için ortalama Silüet Skoru hesaplanmış ve bu skorlar karşılaştırılarak veri setine en uygun küme sayısı belirlenmiştir.



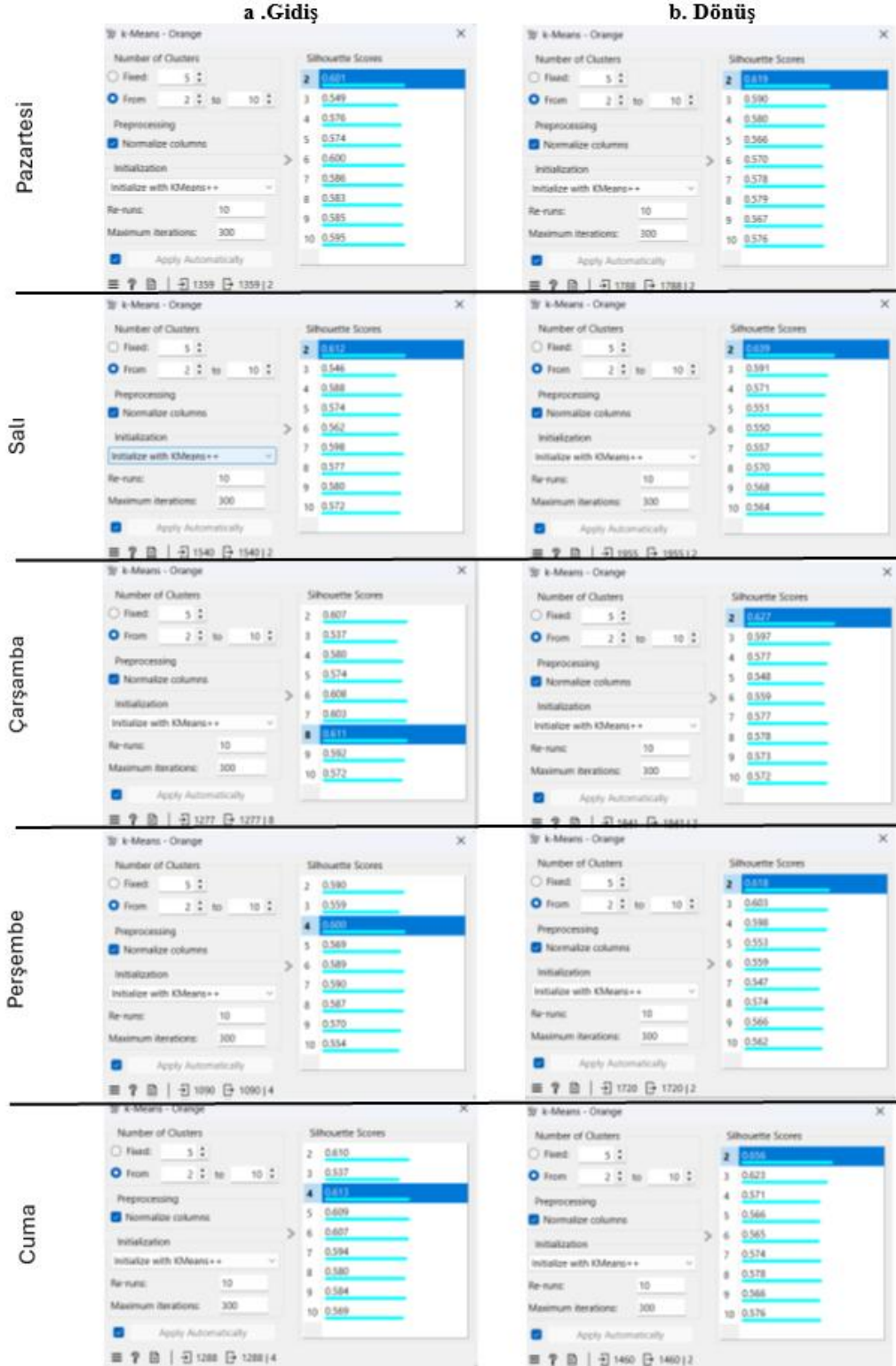
Şekil 5. Orange üzerinde oluşturulan veri akış şeması ile K-Means algoritması sonrası elde edilen kümeleme sonuçlarını gösteren sistem diyagramı.

Bu süreç, K-Means algoritmasının veri üzerinde maksimum verimlilikle çalışmasını sağlamayı hedeflemiştir. Silüet skorlarının analizi, bazı küme sayılarına ait yapıların veriye uygun olmadığını, buna karşın daha düşük k değerlerinde daha yüksek skorlarla daha başarılı kümelenmeler elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu değerlendirme, yalnızca sayısal değil; aynı zamanda yapısal ve sezgisel uygunluk açısından da kümelerin geçerliliğini desteklemektedir. Tüm bu işlem

adımları, Orange platformunda oluşturulan veri akış şeması üzerinden görsel olarak modellenmiş ve Şekil 5'te sunulmuştur. Bu şema, analiz sürecinin işleyişini ve K-Means algoritması sonrası elde edilen küme yapılarının nasıl oluştuğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Her otobüs hattı ve her analiz günü için; gidiş ve dönüş yönleri ayrı ayrı ele alınarak yürütülen bu analiz sayesinde, yönsel yolcu davranışları detaylı şekilde çözümlenmiş ve talebin hangi zaman dilimlerinde

yoğunlaştığı yüksek doğrulukla ortaya konmuştur. Gerçekleştirilen analiz süreci, yalnızca sayısal sonuçlar üretmeyi değil, aynı zamanda bu sonuçların grafiksel olarak anlaşılabilirliğini artırmayı da amaçlamıştır. Bu yönüyle, elde edilen çıktıların sonraki aşamalarda yapılacak yoğunluk hesaplamaları ve sefer planlaması çalışmaları için sağlam bir temel oluşturduğu söylenebilir. Şekil 6, 203-A numaralı otobüs hattına ait gidiş ve dönüş yönlerinde pazartesi cumaya kadar

yapılan kümeleme analizlerinin Silüet Skoru çıktılarının Orange arayüzündeki görünümünü sunmaktadır. Her bir gün için küme sayısı 2 ile 10 arasında test edilmiş ve ilgili veri setine en uygun küme sayısı, ortalama silüet skorlarına göre belirlenmiştir. Elde edilen silüet skorları, Rousseeuw (1987) tarafından önerilen yorum aralıklarına göre değerlendirilmiş ve kümelenmenin kalitesi "başarılı" olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 6. 203A hattına ait gidiş (a) ve dönüş (b) yönlerinde Pazartesi-Cuma için elde edilen silüet skorları.

Kümeleme analizinde dikkat çeken bir durum, aynı gün içerisinde gidiş ve dönüş yönlerinde önerilen optimum küme sayılarının farklılık göstermesidir. Örneğin, çarşamba günü gidiş yönünde 8 kümeli yapı, perşembe ve cuma günlerinde ise 4 kümeli yapı en yüksek ortalama skoru vermiştir. Bu nedenle analizlerde bu küme sayıları esas alınmıştır. Ancak dönüş yönü verilerinde farklı bir küme sayısı önerilmiş olsa da zaman dilimlerinin yönler arasında karşılaştırılabilir olması amacıyla dönüş yönü de aynı sayıda kümeyle analiz edilmiştir.

Bu yaklaşım sayesinde, hem çift yönlü yoğunluk analizleri daha sağlıklı yapılabilmüş hem de sefer planlamasında yönsele denge korunmuştur. Şekildeki veriler, kümeleme kalitesinin nasıl değiştiğini görsel olarak yansıtmakta ve hangi günlerde hangi küme sayısının tercih edildiğini sezgisel olarak desteklemektedir.

2.2.3. Kümeleme ve yoğunluk hesaplama

Kümeleme analizinin tamamlanmasının ardından, her bir zaman kümesi için yolcu yoğunluğu değerlendirilmiştir. Bu aşamada, her kümeye ait başlangıç ve bitiş zaman aralıkları belirlenmiş, bu zaman dilimlerinde gerçekleşen

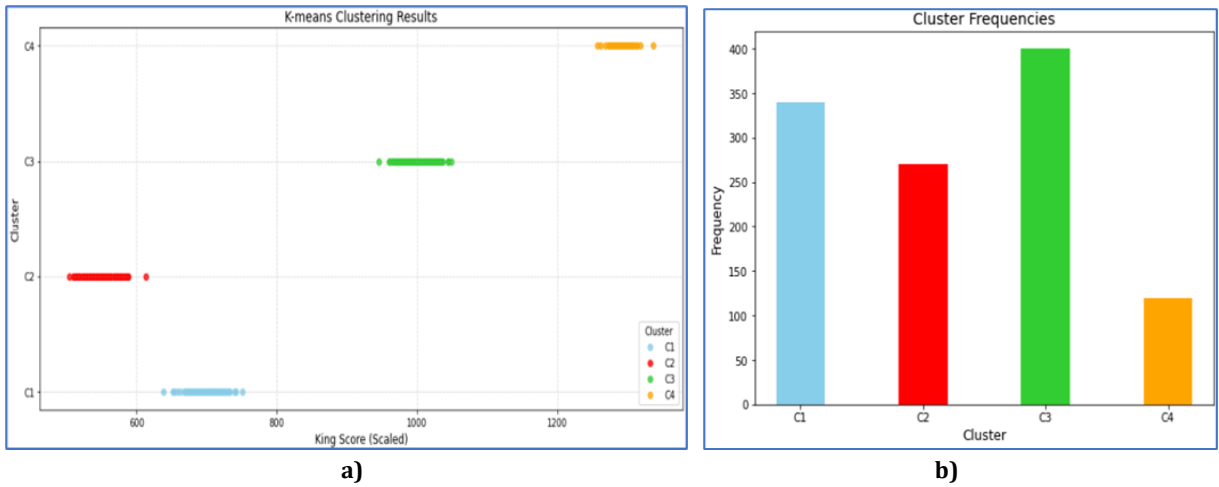
toplam biniş sayıları hesaplanmıştır. Böylece, gün içerisindeki yolcu hareketliliği zamansal kümeler temelinde sistematik biçimde analiz edilmiş ve talep desenleri ortaya konmuştur.

Yolcu yoğunluğu analizleri yalnızca sayısal hesaplamalarla sınırlı kalmamış, aynı zamanda çeşitli grafiksel görselleştirmelerle desteklenmiştir. Her bir otobüs hattı ve analiz günü için, gidiş ve dönüş yönleri ayrı ayrı değerlendirilerek aşağıdaki görselleştirme türleri kullanılmıştır:

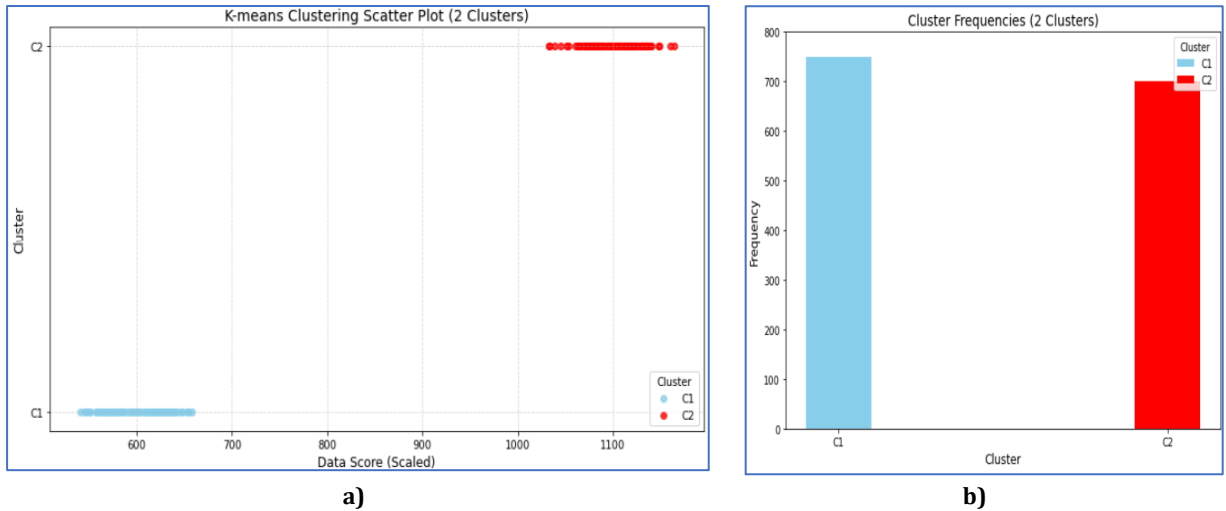
(a) Zamansal Küme Dağılımı Grafiği: Yolcu biniş saatlerine göre kümelerin hangi zaman dilimlerinde yoğunlaştığını sezgisel olarak ortaya koyar.

(b) Küme Frekans Grafiği: Her bir kümede yer alan toplam yolcu sayısını karşılaştırmalı olarak göstererek, talep farklılıklarının görsel analizini mümkün kılar.

Bu grafiksel sunumlar, kümeleme çıktılarının sadece yapısal olarak değil, aynı zamanda sezgisel olarak da kolayca anlaşılmasını sağlamıştır. Elde edilen örüntüler, yoğunluk analizinin derinleştirilmesine katkı sunmuş ve yorumlama sürecini kolaylaştırmıştır.



Şekil 7. 203A hattı Cuma-gidiş yönü (a) küme dağılımı ve (b) küme frekansı grafiği.



Şekil 8. 203A hattı Cuma-dönüş yönü, (a) küme dağılımı ve (b) küme frekansı grafiği.

Şekil 7 ve 8, 203-A hattının cuma günü için gerçekleştirilen kümeleme analizine ait grafikler sunulmaktadır. Görseller sırasıyla hem gidiş yönü hem de dönüş yönü için elde edilen küme dağılımı ve frekans verilerini kapsamaktadır. Gidiş yönü için yolcu sayısı 88 ile 400 arasında değişen 4 zaman aralığı; yönü için yolcu sayısı 694 ve 735 olan iki zaman aralığı belirlenmiştir. Aynı yöntem, çalışmada incelenen tüm hatlar ve hafta içi günleri için tekrar edilerek kapsamlı bir analiz çerçevesi oluşturulmuştur. Bu analizler, ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek sefer sayısı ve otobüs ihtiyacı hesaplamaları için sağlam bir temel teşkil etmektedir.

2.2.4. Sefer ve otobüs sayısı hesaplama

Kümeleme işlemleri sonucunda her bir otobüs hattı için elde edilen zaman kümeleri, yolculukların gün içerisindeki yoğunluklarına göre gruplandırılmış; bu sayede her küme için başlangıç ve bitiş saatleri, toplam yolcu sayısı ve süre bilgileri belirlenmiştir. Analiz kapsamında oluşturulan bu kümeler, hat adı, gün, küme numarası, küme zaman aralığı, toplam yolcu sayısı, otobüs kapasitesi (12 m ve 18 m), sefer süresi ve küme süresi gibi bilgileri içeren kapsamlı bir tabloda birleştirilmiştir.

Bu veriler temel alınarak her bir küme için sırasıyla gerekli sefer sayısı, otobüs döngüsü ve gerekli otobüs sayısı hesaplanmıştır. Öncelikle, eşitlik 1 kullanılarak toplam yolcu sayısının otobüs kapasitesine oranı üzerinden gereken sefer sayısı elde edilmiştir. Ardından, eşitlik 2 aracılığıyla küme süresinin bir otobüsün çift yönlü sefer süresine bölünmesiyle otobüs döngüsü hesaplanmıştır. Son olarak, eşitlik 3 yardımıyla, gereken sefer sayısının otobüs döngüsüne oranı üzerinden gerekli otobüs sayısı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar sayesinde, her bir hattın gün içerisindeki farklı zaman dilimlerinde (kümelerde) yolcu talebini karşılamak için kaç sefer yapılması gerektiği, bu seferlerin hangi sayıda otobüsle gerçekleştirileceği ve her otobüsün aynı küme süresi içinde kaç kez sefer yapabileceği belirlenmiştir. Örnek olarak Tablo 4'te 203-A hattına ait zaman kümelerine göre yolcu sayısı, sefer sayısı ve gerekli otobüs sayısı gidiş ve dönüş yönleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Her bir küme için yapılan hesaplamalarda gidiş ve dönüş yönleri ayrı ayrı ele alınmış ve her yön için gerekli otobüs sayısı ayrı olarak belirlenmiştir. Ancak toplu taşıma hizmetinin aksamadan sürdürülebilmesi ve yolcu talebinin eksiksiz karşılanabilmesi amacıyla, her bir zaman dilimi için nihai otobüs ihtiyacı, gidiş ve dönüş yönlerinden hangisinde daha fazla otobüse ihtiyaç duyuluyorsa o değer esas alınarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, her bir zaman aralığında yolcu talebinin tam olarak karşılanmasını sağlamış; böylece filo planlamasında minimum sayıda otobüsle maksimum kapsama hedeflenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Trabzon kampüsü içi toplu taşıma sistemine ait otobüs hatlarında zaman-temelli yolcu yoğunluklarının belirlenmesi ve buna bağlı olarak otobüs planlamasının optimize edilmesi amacıyla kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Uygulanan analiz süreci sonucunda, her hat için gün içerisindeki yolculuklar K-Means algoritması ile kümelenecek ve bu kümeler temelinde yolcu yoğunlukları hesaplanmıştır. Kümelenen zaman dilimleri kullanılarak her bir küme için gereken sefer sayısı, otobüs döngüsü ve gerekli otobüs sayısı sırasıyla eşitlik 1-3 doğrultusunda hesaplanmıştır.

Analiz edilen dört hattan biri olan 203A hattı örnek olarak ele alınmış ve bu hatta ait sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur. Tablo, hat günlerine göre belirlenen zaman kümelerini, bu kümelerdeki toplam yolcu sayılarını, otobüs kapasitesi 12 metre baz alınarak gerekli görülen sefer ve otobüs sayılarını özetlemektedir. Bu bulgular doğrultusunda, örneğin pazartesi günü 06:20–12:30 saat aralığında 828 yolcu taşındığı ve bu yolculuklar için 8 sefer ile 4 otobüse ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Benzer biçimde haftanın farklı günlerinde ve farklı zaman dilimlerinde değişen yolcu talepleri doğrultusunda gereken kaynak miktarları ayrıntılı şekilde hesaplanmıştır.

Elde edilen bu çıktılar doğrultusunda, yolcu talebine uygun olarak yeni bir sefer planlaması önerilmiş ve günlük çizelgeler yeniden yapılandırılmıştır. Tablo 6, 203A hattı için haftanın her günü sabah 06:20'den itibaren başlayan ve akşam saatlerine kadar devam eden seferlerin saatlerini içermektedir. Yeni çizelge, yoğun saatlerde daha sık seferler önererek talebi karşılamayı amaçlamaktadır.

Bu bulgular, mevcut ulaşım sisteminin verimli çalışması adına kritik bir planlama zemini oluşturmakta; zaman-temelli yoğunluk analizi sayesinde hem fazla hem de yetersiz otobüs kullanımının önüne geçilmesine olanak tanımaktadır. Diğer üç hat için yapılan detaylı hesaplamalar ve önerilen çizelgeler, çalışmanın Ekler bölümünde sunulmuştur. Böylece, tüm kampüsü içi otobüs hatları için yön, gün ve saat bazında kapsamlı bir filo ve sefer planlaması önerisi geliştirilmiştir.

3.1. Mevcut Uygulama ile Kümeleme Temelli Planlamanın Karşılaştırılması

TULAŞ tarafından şehir genelinde sunulan toplu taşıma hizmetleri, geniş bir ağ yapısına sahip olmasına rağmen, mevcut durumda topladığı yolculuk verileri analiz edilmemekte ve bu verilere dayalı herhangi bir sınıflandırma yapılmamaktadır. Bu eksiklik, sefer planlamalarının talep odaklı biçimde optimize edilmesini engellemekte ve kaynak kullanımında verimsizliklere yol açmaktadır. Halihazırda uygulanan planlamalarda, yolcu yoğunluğu ve saatlik talep değişimleri dikkate alınmadan, sabit ve standart sefer çizelgeleri kullanılmaktadır. Bu durum, yoğun zaman dilimlerinde yetersiz hizmet sunulmasına, düşük talep dönemlerinde ise gereksiz kaynak kullanımına neden olmaktadır.

Tablo 4. 203-A hattı için zaman kümelerine göre yolcu sayısı, sefer sayısı ve gerekli otobüs sayısı

Hat-Yön-Gün	Küme No	Binen Yolcu sayısı	Küme Başlangıç	Küme Başlangıç Saat	Küme Bitiş	Küme Bitiş Saat	Otobüs Kapasitesi 12m	Küme Süresi	Küme Süresi Dakika	Sefer Süresi (dk)	Gereken Sefer Sayısı 12m	Otobüs Döngü Sayısı	Gereken Otobüs Sayısı 12m
203A-G-Pazartesi	1	629	363	06:00:00	814	13:34:00	104	07:34:00	454,00	138,96	7	3	3
203A-G-Pazartesi	2	730	820	13:40:00	1353	22:33:00	104	08:53:00	533,00	138,96	8	3	3
203A-D-Pazartesi	1	828	383	06:20:00	748	12:28:00	104	06:08:00	368,00	138,96	8	2	4
203A-D-Pazartesi	2	960	749	12:29:00	1260	21:00:00	104	08:31:00	511,00	138,96	10	3	4
203A-G-Salı	1	772	362	06:00:00	816	13:36:00	104	07:36:00	456,00	138,96	8	3	3
203A-G-Salı	2	768	817	13:37:00	1353	22:33:00	104	08:56:00	536,00	138,96	8	3	3
203A-D-Salı	1	927	381	06:20:00	749	12:29:00	104	06:09:00	369,00	138,96	9	2	5
203A-D-Salı	2	1028	757	12:37:00	1273	21:13:00	104	08:36:00	516,00	138,96	10	3	4
203A-G-Çarşamba	1	185	362	06:00:00	524	08:44:00	104	02:44:00	164,00	138,96	2	1	2
203A-G-Çarşamba	2	126	528	08:48:00	651	10:51:00	104	02:03:00	123,00	138,96	2	1	2
203A-G-Çarşamba	3	173	654	10:54:00	754	12:34:00	104	01:40:00	100,00	138,96	2	1	2
203A-G-Çarşamba	4	136	756	12:36:00	852	14:12:00	104	01:36:00	96,00	138,96	2	1	2
203A-G-Çarşamba	5	175	853	14:13:00	944	15:44:00	104	01:31:00	91,00	138,96	2	1	2
203A-G-Çarşamba	6	233	946	15:46:00	1044	17:24:00	104	01:38:00	98,00	138,96	3	1	3
203A-G-Çarşamba	7	178	1047	17:27:00	1180	19:40:00	104	02:13:00	133,00	138,96	2	1	2
203A-G-Çarşamba	8	71	1275	21:15:00	1357	22:37:00	104	01:22:00	82,00	138,96	1	1	1
203A-D-Çarşamba	1	920	382	06:20:00	752	12:32:00	104	06:12:00	372,00	138,96	9	3	3
203A-D-Çarşamba	2	921	756	12:36:00	1259	20:59:00	104	08:23:00	503,00	138,96	9	4	3
203A-G-Perşembe	1	306	363	06:00:00	611	10:11:00	104	04:11:00	251,00	138,96	3	1	3
203A-G-Perşembe	2	370	616	10:16:00	863	14:23:00	104	04:07:00	247,00	138,96	4	1	4
203A-G-Perşembe	3	497	864	14:24:00	1130	18:50:00	104	04:26:00	266,00	138,96	5	1	5
203A-G-Perşembe	4	115	1140	19:00:00	1356	22:36:00	104	03:36:00	216,00	138,96	2	1	2
203A-D-Perşembe	1	885	382	06:20:00	749	12:29:00	104	06:09:00	369,00	138,96	9	2	5
203A-D-Perşembe	2	835	750	12:30:00	1264	21:04:00	104	08:34:00	514,00	138,96	9	3	3
203A-G-Cuma	1	259	364	06:00:00	622	10:22:00	104	04:22:00	262,00	138,96	3	1	3
203A-G-Cuma	2	343	629	10:29:00	867	14:27:00	104	03:58:00	238,00	138,96	4	1	4
203A-G-Cuma	3	400	871	14:31:00	1109	18:29:00	104	03:58:00	238,00	138,96	4	1	4
203A-G-Cuma	4	88	1117	18:37:00	1352	22:32:00	104	03:55:00	235,00	138,96	1	1	1
203A-D-Cuma	2	694	753	12:33:00	1262	21:02:00	104	08:29:00	509,00	138,96	7	3	3

Tablo 5. 203A hattına ait zaman kümeleri, yolcu sayısı ve gerekli sefer/otobüs sayıları

Hat	Saatler	Binen Yolcu Sayısı (Yoğunluk)	Gereken Sefer Sayısı 12m	Gereken Otobüs Sayısı 12m
203A-Pazartesi	06:20-12:30	828	8	4
203A-Pazartesi	12:30-21:00	960	10	4
203A-Salı	06:20-12:30	927	9	5
203A-Salı	12:30-21:10	1028	10	4
203A-Çarşamba	06:00-08:40	185	2	2
203A-Çarşamba	08:40-10:50	126	2	2
203A-Çarşamba	10:50-12:30	173	2	2
203A-Çarşamba	12:30-14:10	136	2	2
203A-Çarşamba	14:10-15:40	175	2	2
203A-Çarşamba	15:40-17:20	233	3	3
203A-Çarşamba	17:20-19:40	178	2	2
203A-Çarşamba	19:40-22:40	71	1	1
203A-Perşembe	06:00-10:10	306	3	3
203A-Perşembe	10:10-14:20	370	4	4
203A-Perşembe	14:20-18:50	497	5	5
203A-Perşembe	18:50-22:40	115	2	2
203A-Cuma	06:00-10:20	259	3	3
203A-Cuma	10:20-14:30	343	4	4
203A-Cuma	14:30-18:30	400	4	4
203A-Cuma	18:30-22:30	88	1	1

Tablo 6. 203A hattı için günlük sefer başlangıç saatleri çizelgesi (Optimizasyon sonrası)

	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
203A Hattı Sefer Başlangıç Saatleri	06:20	06:20	06:00	06:00	06:00
	07:07	07:02	07:20	07:24	07:27
	07:54	07:44	08:40	08:48	08:54
	08:41	08:26	09:45	10:10	10:20
	09:28	09:08	10:50	11:13	11:23
	10:15	09:50	11:40	12:16	12:26
	11:02	10:32	12:30	13:19	13:29
	11:49	11:14	13:20	14:20	14:30
	12:30	11:56	14:10	15:14	15:30
	13:21	12:30	14:55	16:08	16:30
	14:12	13:22	15:40	17:02	17:30
	15:03	14:14	16:14	17:56	18:30
	15:54	15:06	16:48	18:50	
	16:45	15:58	17:20	20:45	
	17:36	16:50	18:30		
	18:27	17:42	19:40		
	19:18	18:34			
	20:09	19:26			
		20:18			

Bu çalışmada önerilen yaklaşımda, dört farklı hatta ait yolculuk verileri K-means algoritması ile kümelenebilir ve her bir zaman dilimi (küme) için yolcu yoğunlukları dikkate alınarak gereken sefer ve otobüs sayıları hesaplanmıştır. Ardından, bu kümelerle uygun şekilde her otobüs hattı için hafta içi her gün özelinde sefer başlangıç saatleri belirlenmiş, böylece zaman dilimine duyarlı sefer planları oluşturulmuştur. Her bir küme için süre bilgisi ve gerekli sefer sayısı kullanılarak otobüslerin kaç dakikada bir hareket etmesi gerektiği belirlenmiştir; bu hesaplamalar

sonucunda küme başlangıç saatine göre eşit aralıklarla seferler planlanmıştır. Bu sayede, günlük sefer çizelgeleri esnek ve talebe duyarlı şekilde düzenlenmiştir. Mevcut uygulamada ise her gün sabit bir sefer programı kullanılmakta ve saatlik talep değişimleri göz ardı edilmektedir. Analiz sonucunda elde edilen yeni planlama sonuçları, mevcut uygulamalarla karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen farklar çeşitli tablolarla sunulmuştur.

Tablo 7. Hat 120 için mevcut ve önerilen sefer ve otobüs planlamasının karşılaştırması

120 Hattı	Günler	Sefer Sayısı 12m	Sefer Sayısı 18m	Maksimum Otobüs Sayısı 12m	Minimum Otobüs Sayısı 12m	Maksimum Otobüs Sayısı 18m	Minimum Otobüs Sayısı 18m
Mevcut Durum	Pazartesi	16	16	3		3	
	Salı	16	16	3		3	
	Çarşamba	16	16	3		3	
	Perşembe	16	16	3		3	
	Cuma	16	16	3		3	
	Haftalık Toplam	80	80	15		15	
Kümeleme Algoritması ile hesapladığımız	Pazartesi	24	17	4	3	3	3
	Salı	20	14	4	3	3	2
	Çarşamba	20	14	4	3	3	2
	Perşembe	19	13	3	3	2	2
	Cuma	19	13	3	2	2	2
	Haftalık Toplam	102	71	18	14	13	11
İyileşme		0,113		0,133			

120 numaralı hatta ilişkin değerlendirme Tablo 7’de verilmiştir. Mevcut uygulamada bu hatta hem 12 metrelik hem de 18 metrelik otobüsler sabit şekilde kullanılmakta olup, her gün 16 sefer ve her iki araç tipi için 3 otobüs tahsis edilmektedir. Yapılan analiz sonucunda, 12 metrelik otobüsler için haftalık toplam sefer sayısı 80’den 102’ye çıkmıştır. Bu artış, bazı saat dilimlerinde mevcut sistemin talebi karşılamada yetersiz kaldığını göstermektedir. Diğer yandan, 18 metrelik otobüsler için

haftalık sefer sayısı 80’den 71’e düşmüş; bu durum daha yüksek kapasiteli araçlarla daha az seferle eşdeğer hizmetin sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Maksimum otobüs sayısı 12 metrelik araçlar için 15’ten 18’e çıkarken, 18 metrelikler için 15’ten 13’e gerilemiştir. Minimum otobüs sayıları ise sırasıyla 14 ve 11 olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, araç tipi seçiminin filo planlaması üzerindeki etkisini ve farklı senaryolara göre optimizasyon ihtiyacını açıkça göstermektedir.

Tablo 8. Hat 203-A için mevcut ve önerilen sefer ve otobüs planlamasının karşılaştırması

203A Hattı	Günler	Sefer Sayısı 12m	Maksimum Otobüs Sayısı 12m	Minimum Otobüs Sayısı 12m
Mevcut Durum	Pazartesi	22	5	
	Salı	22	5	
	Çarşamba	22	5	
	Perşembe	22	5	
	Cuma	22	5	
	Haftalık Toplam	110	25	
Kümeleme Algoritması ile hesapladığımız	Pazartesi	18	4	4
	Salı	19	5	4
	Çarşamba	16	3	1
	Perşembe	14	5	2
	Cuma	12	4	1
	Haftalık Toplam	79	21	12
İyileşme		0,281	0,16	

203A hattına ilişkin karşılaştırmalı analiz Tablo 8’de yer almaktadır. Bu hatta mevcut uygulamada her gün 22 sefer ve 5 otobüs tahsis edilmektedir. Önerilen model kapsamında yapılan planlamada ise, haftalık toplam sefer sayısı %28,1 oranında azaltılarak 110’dan 79’a düşürülmüştür. Ayrıca maksimum otobüs sayısında %16 oranında azalma sağlanmış ve minimum otobüs ihtiyacı, özellikle düşük talep dönemlerinde önemli ölçüde düşmüştür. Bu durum, sabit planlamanın bazı dönemlerde kaynak israfına neden olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, 203C hattına ait

karşılaştırma Tablo 9’da sunulmuştur. Bu hatta da her gün sabit olarak 23 sefer ve 5 otobüs planlanmakta iken, önerilen sistemle yapılan analiz sonucunda günlük sefer sayısının 16 ila 18 arasında değiştiği ve haftalık toplamda %28,7 oranında azalma sağlandığı görülmüştür. Maksimum otobüs sayısında %12, minimum otobüs sayısında ise %36 oranında düşüş kaydedilmiştir. Bu bulgular, değişken ve talep odaklı planlamanın kaynak kullanımında önemli iyileştirmeler sağlayabileceğini göstermektedir. 277A hattı için elde edilen karşılaştırmalı veriler ise Tablo 10’da yer almaktadır. Bu

hatta mevcut durumda her gün sabit şekilde 14 sefer ve 4 otobüs planlanmaktadır. Ancak analizler, bazı günlerde talebin daha yüksek, bazı günlerde ise daha düşük olduğunu göstermektedir. Önerilen planlama doğrultusunda, haftalık toplam sefer sayısı %14,3 oranında azalmış, minimum otobüs ihtiyacı %25 oranında düşürülmüştür. Buna karşılık, bazı günlerde maksimum otobüs ihtiyacında artış gözlemlenmiş, bu da talep dalgalanmalarının sabit planlama ile karşılanamadığını ve esnek planlama gereksinimini vurgulamaktadır.

Tüm bu analizler göstermektedir ki mevcut durumda kullanılan sabit planlama yaklaşımı hem yolcu memnuniyeti hem de işletme verimliliği açısından çeşitli eksiklikler barındırmaktadır. Önerilen veri temelli planlama yöntemi sayesinde, yolcu yoğunluğu dikkate alınarak daha esnek, talebe duyarlı ve kaynak kullanımında daha verimli bir toplu taşıma planlaması yapılabileceği ortaya konmuştur. Modelin uygulanması durumunda hizmet kalitesinin artması ve işletme maliyetlerinde anlamlı düzeyde tasarruf sağlanması mümkün olacaktır.

Tablo 9. Hat 203-C için mevcut ve önerilen sefer ve otobüs planlamasının karşılaştırması

203C Hattı	Günler	Sefer Sayısı 12m	Maksimum Otobüs Sayısı 12m	Minimum Otobüs Sayısı 12m
Mevcut Durum	Pazartesi	23	5	
	Salı	23	5	
	Çarşamba	23	5	
	Perşembe	23	5	
	Cuma	23	5	
	Haftalık Toplam	115	25	
Kümeleme Algoritması ile hesapladığımız	Pazartesi	16	4	3
	Salı	18	5	3
	Çarşamba	16	5	4
	Perşembe	15	4	3
	Cuma	17	4	3
	Haftalık Toplam	82	22	16
	İyileşme	0,286	0,12	0,36

Tablo 10. Hat 277-A için mevcut ve önerilen sefer ve otobüs planlamasının karşılaştırması

277A Hattı	Günler	Sefer Sayısı 12m	Maksimum Otobüs Sayısı 12m	Minimum Otobüs Sayısı 12m
Mevcut Durum	Pazartesi	14	4	
	Salı	14	4	
	Çarşamba	14	4	
	Perşembe	14	4	
	Cuma	14	4	
	Haftalık Toplam	70	20	
Kümeleme Algoritması ile hesapladığımız	Pazartesi	13	7	3
	Salı	13	7	3
	Çarşamba	10	5	3
	Perşembe	13	7	3
	Cuma	11	6	3
	Haftalık Toplam	60	32	15
	İyileşme	0,143	0,6	

4. Sonuç

Bu çalışma, şehir içi otobüs ulaşımında talebe duyarlı ve veri temelli bir sefer planlama yaklaşımı geliştirerek hem yöntemsel hem de uygulamalı anlamda önemli katkılar sunmaktadır. Yöntemsel olarak, K-means kümeleme algoritması kullanılarak yolculuk verileri zamansal olarak gruplandırılmış ve bu gruplar üzerinden sefer ve otobüs ihtiyacı hesaplamaları yapılmıştır. Böylece, gün içindeki farklı zaman dilimlerinde değişkenlik gösteren yolcu taleplerine karşılık verebilecek dinamik bir planlama modeli oluşturulmuştur.

Uygulama açısından ise çalışma, Trabzon ili kampüs bölgesi örneğinde dört farklı otobüs hattı üzerinde gerçekleştirilmiş ve her bir hat için haftalık sefer planları ile otobüs ihtiyaçları ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Mevcut durumda sabit planlara dayalı olarak sürdürülen sefer uygulamalarının, zaman içinde oluşan yolcu yoğunluklarını yeterince dikkate almadığı, bu nedenle hem kapasite fazlası hem de kapasite yetersizliği gibi sorunların yaşandığı belirlenmiştir. Önerilen model sayesinde, talebe uygun sefer sıklığı belirlenebilmekte, otobüsler daha verimli kullanılmakta ve gereksiz

seferlerin önüne geçilebilmektedir.

Bu yöntemin uygulanmasıyla birlikte, mevcut sabit sefer planlarına göre daha esnek, talep odaklı ve verimli bir planlama yapılabileceği gösterilmiştir. Çalışmada incelenen dört otobüs hattı (120, 203A, 203C, 277A) özelinde gerçekleştirilen analizler, aşağıdaki sonuçları ortaya koymuştur:

•203C hattında, haftalık sefer sayısı %28,7 oranında azaltılmış, maksimum otobüs sayısı %12, minimum otobüs sayısı ise %36 oranında düşürülmüştür.

•203A hattında, haftalık sefer sayısında %28,1, maksimum otobüs sayısında %16 oranında azalma sağlanmış; düşük yoğunluklu saatlerde minimum otobüs ihtiyacında anlamlı düşüşler elde edilmiştir.

•277A hattında, sefer sayısı %14,3, minimum otobüs ihtiyacı %25 oranında azaltılmıştır. Ancak bazı günlerde talep artışı nedeniyle maksimum otobüs ihtiyacı artmıştır.

•120 hattında, 12 metrelik otobüslerle yapılan sefer sayısı artarken, 18 metrelik otobüslerle yapılan sefer sayısı azalmıştır. Bu durum, yüksek kapasiteli araçlarla daha az seferle benzer talebin karşılanabileceğini ortaya koymuştur.

Yapılan analizler göstermektedir ki, yolcu yoğunluğunun yüksek olduğu hat ve zaman dilimlerinde, önerilen kümeleme tabanlı planlama yaklaşımı sayesinde daha yüksek düzeyde iyileştirme oranları elde edilebilmiştir. Bu da modelin özellikle talebin dalgalandığı yoğun bölgelerde uygulanmasının daha fazla verimlilik ve hizmet kalitesi artışı sağladığını ortaya koymaktadır.

Ayrıca çalışma, farklı otobüs tiplerinin (12 m ve 18 m) analiz sürecine dahil edilmesiyle, araç kapasitesinin sefer planlaması üzerindeki etkilerini de ortaya koymuş, filo yönetimi açısından stratejik kararlar alınmasına katkı sağlamıştır. Böylece sadece planlama değil, aynı zamanda araç tipi seçimi açısından da işletme verimliliğini artırmaya yönelik öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmanın teorik katkısı, yolcu yoğunluğuna dayalı zaman serisi analizinin K-Means kümeleme yöntemiyle entegrasyonunu sağlayarak ulaşım planlamasına özgü yeni bir yaklaşım sunmasıdır. Aynı zamanda farklı parametrelerin (sefer süresi, otobüs kapasitesi vb.) matematiksel ifadelerle modellenmesi, transit planlama literatürüne katkı sağlamaktadır.

Pratik katkılar bakımından çalışma, şehir içi ulaşım otoriteleri ve yerel yönetimler için esnek, uyarlanabilir ve talep odaklı bir araç planlama yaklaşımı sunmaktadır. Gerçek verilere dayalı olması ve uygulanabilirliğinin test edilmesi, modelin doğrudan kullanıma uygun olduğunu göstermektedir.

Model, yalnızca Trabzon kampüs hatlarıyla sınırlı değildir. Benzer yapıya sahip diğer üniversite kampüsleri, şehir içi toplu taşıma sistemleri veya belirli bölge/hat odaklı ulaşım ağlarında da uyarlanarak kullanılabilir. Özellikle yoğunluk değişkenliği gösteren bölgelerde, bu modelin verimlilik artışı ve kaynak optimizasyonu sağlaması muhtemeldir.

Sonuç olarak, bu çalışma hem akademik literatüre katkı

sağlayacak yöntemsel bir model geliştirmiş hem de yerel yönetim ve ulaşım otoriteleri için uygulanabilir, esnek ve sürdürülebilir bir toplu taşıma planlama yaklaşımı ortaya koymuştur. Çalışma bulguları, talebe duyarlı ulaşım stratejilerinin benimsenmesi durumunda hem hizmet kalitesinin artacağını hem de işletme maliyetlerinin düşürülebileceğini açıkça ortaya koymaktadır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	B.M.K.	N.D.	E.A.	E.K.	D.K.
K	50	50	0	0	0
T	50	50	0	0	0
Y	50	20	10	10	10
VTI	30	10	30	30	30
VAY	20	20	20	20	20
KT	20	20	20	20	20
YZ	20	20	20	20	20
KI	50	50	0	0	0
GR	30	70	0	0	0
PY	70	30	0	0	0
FA	0	0	0	0	0

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışmada kullanılan veri setini sağlayarak araştırmaya katkı sunan Trabzon Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı Trabzon Ulaşım A.Ş. (TULAŞ)'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Aggelis, V., & Christodoulakis, D. (2005). RFM analysis for decision support in e-banking area. *WSEAS Transactions on Computers*, 4(8), 943–950.
- Aksoy, İ. C., & Alver, Y. (2024). Addressing electric transit network design frequency setting problem with dynamic transit assignment. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 12(1), 2318566.
- Alçura, G. A. (2024). On the road to inclusion: A multifaceted examination of transportation challenges faced by individuals with disabilities. *Sustainability*, 17(1), 81.
- Bagheri, K., Samany, N. N., Toomanian, A., Jelokhani-Niaraki, M., & Hajibabai, L. (2024). A planar graph cluster-routing

- approach for optimizing medical waste collection based on spatial constraint. *Transactions in GIS*.
- Benli, A., & Akgün, İ. (2023). A multi-objective mathematical programming model for transit network design and frequency setting problem. *Mathematics*, 11(21), 4488.
- Bertsimas, D., Ng, Y. S., & Yan, J. (2020). Joint frequency-setting and pricing optimization on multimodal transit networks at scale. *Transportation Science*, 54(3), 839–853.
- Caetano, J. A., Clímaco, F. G. N., Ribeiro, G. M., & Bahiense, L. (2025a). Frequency-setting models: A literature review of costs and sustainability on bus routes. *Public Transport*, 19(1), 1–24.
- Caetano, J. A., Clímaco, F. G. N., Ribeiro, G. M., & Bahiense, L. (2025b). New mathematical modeling to optimize the frequency of bus routes. *IEEE Access*.
- Carrel, A., Lau, P. S., Mishalani, R. G., Sengupta, R., & Walker, J. L. (2015). Quantifying transit travel experiences from the users' perspective with high-resolution smartphone and vehicle location data: Methodologies, validation, and example analyses. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 224–239.
- Ceder, A. (2007). *Public transit planning and operation: Theory, modeling, and practice*. Elsevier/Butterworth-Heinemann.
- Charris, E. L. S., Montoya-Torres, J. R., & Guerrero-Rueda, W. (2019). A decision support system for technician routing with time windows: A case study of a Colombian public utility company. *Academia Revista Latinoamericana de Administración*, 32(2), 138–158.
- Chen, Y., & Shan, T. (2021). Research on flexible public transportation planning based on node importance clustering. In *CICTP 2021* (pp. 1800–1807).
- Çeçen, M. Y., & Tosun, H. B. (2024). Diyarbakır toplu taşıma sisteminde otobüs kullanımının incelenmesi ve iyileştirme önerileri. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(2), 316–322.
- Durán-Micco, J., & Vansteenwegen, P. (2022). Transit network design considering link capacities. *Transport Policy*, 127, 148–157.
- Gadepalli, R., Bansal, P., Tiwari, G., & Bolia, N. (2024). A tactical planning framework to integrate paratransit with formal public transport systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 136, 104438.
- Gkiotsalitis, K., Schmidt, M., & van der Hurk, E. (2022). Subline frequency setting for autonomous minibuses under demand uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 135, 103492.
- Hajizadeh, E., & Shahrabi, J. (2010). Application of data mining techniques in stock markets: A survey. *Journal of Economics and International Finance*, 7, 109–118.
- Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2015). Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 38–75.
- Ibarra-Rojas, O. J., Muñoz, J. C., Giesen, R., & Knapp, P. (2019). Integrating frequency setting, timetabling, and route assignment to synchronize transit lines. *Journal of Advanced Transportation*, 2019(1), 9408595.
- Kim, M., Kho, S. Y., & Kim, D. K. (2019). A transit route network design problem considering equity. *Sustainability*, 11(13), 3527.
- Lee, I., Cho, S. H., Kim, K., Kho, S. Y., & Kim, D. K. (2022). Travel pattern-based bus trip origin-destination estimation using smart card data. *PLOS ONE*, 17(6), e0270346.
- Ma, X., Wu, Y. J., Wang, Y., Chen, F., & Liu, J. (2013). Mining smart card data for transit riders' travel patterns. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 1–12.
- Mete, S., Çelik, E., & Gül, M. (2022). Predicting the time of bus arrival for public transportation by time series models. *Journal of Transportation and Logistics*, 7(2), 541–555.
- Mirza, A. M., & Jain, R. K. (2025). Review of public transportation integration and modeling strategies: Toward seamless urban mobility. *Multidisciplinary Reviews*, 8(1), 2025018.
- Mutlu, M. M., Aksoy, İ. C., & Alver, Y. (2021). COVID-19 transmission risk minimization at public transportation stops using differential evolution algorithm.
- Oliveira, J. L. A., Aquino, A. L., Pinheiro, R. G., & Nogueira, B. (2024). Optimizing public transport system using biased random-key genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 158, 111578.
- Orange Data Mining. (2025, September 9). *Orange Data Mining*. <https://orangedatamining.com/>
- Pei, J., Zhong, K., Li, J., & Yu, Z. (2022). PAC: Partial area clustering for re-adjusting the layout of traffic stations in city's public transport. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(1), 1251–1260.
- Pelletier, M. P., Trépanier, M., & Morency, C. (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 557–568.
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65.
- Su, Y., & Yang, H. (2025). Enhancing feeder bus service coverage with Multi-Agent Reinforcement Learning: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 196, 103997.
- Tekin, B. (2018). Ward, k-ortalamlar ve iki adımlı kümeleme analizi yöntemleri ile finansal göstergeler temelinde hisse senedi tercihi. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21(40), 401–436.
- Tian, Q., Wang, D. Z., & Lin, Y. H. (2021). Service operation design in a transit network with congested common lines. *Transportation Research Part B: Methodological*, 144, 81–102.
- Urbano, V. M., Arena, M., & Azzone, G. (2025). Big data for decision-making in public transport management: A comparison of different data sources. *Research in Transportation Business & Management*, 59, 101298.
- Verbas, İ. Ö., & Mahmassani, H. S. (2015). Exploring trade-offs in frequency allocation in a transit network using bus route patterns: Methodology and application to large-scale urban systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 577–595.
- Vlachopanagiotis, T., Grizos, K., Georgiadis, G., & Politis, I. (2021). Public transportation network design and frequency setting: Pareto optimality through alternating-objective genetic algorithms. *Future Transportation*, 1(2), 248–267.
- Wei, Z., Hu, Y., Chen, Y., & Wang, T. (2025). Optimized design of cultural space in Wuhan Metro: Analysis and reflection based on multi-source data. *Buildings*, 15(13), 2201.
- Xie, Y., Guo, Y., Zhou, T., Mi, Z., Yang, Y., Sadoun, B., & Obaidat, M. S. (2020). A strategy to alleviate rush hour traffics in urban areas based on school-trip commute information. *IEEE Systems Journal*, 15(2), 2630–2641.