

Araştırma Makalesi

Doğrusal Hedef Programlama Yaklaşımı İle Şehir İçi Toplu Ulaşım Sistemlerinin Modellenmesi

Aysun Sağbaş¹ , Ulviye Polat^{2,*} 

^{1,2} Endüstri Mühendisliği, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye, 59860

¹asagbas@nku.edu.tr, ²upolat@nku.edu.tr

Geliş: 02.12.2022

Kabul: 30.12.2022

DOI: 10.55581/ejeas.1084078

Öz. Son yıllardaki hızlı nüfus artışı ile birlikte, toplu taşımada kullanılan şehir içi otobüslerin sayısının artması nedeniyle; çevre kirliliği, gürültü, yolcu memnuniyetsizliği, maliyet vb. gibi sorunlar da artmaktadır. Bu kapsamda; otobüslerin güzergahı, otobüs sefer sayısı ve sıklığı, yolcu taşıma kapasitesi, bekleme süreleri gibi faktörlerin planlanması büyük önem arz etmektedir. Toplu taşıma ve ulaşım sistemlerinde yapılacak yatırımların ekonomik maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle toplu taşıma ve ulaşım sistemlerinin verimli ve rasyonel planlanması ve sürdürülebilirliği, mevcut kapasitenin optimum kullanılması, karar vericiler için kritik bir konudur. Bu nedenle, çevresel, ekonomik ve toplumsal refah boyutları açısından şehir içi toplu taşıma sistemlerinin optimum planlanması, verimli ve sürdürülebilir olması mutlak bir zorunluluk olarak görülmektedir. Bu çalışmada; doğrusal hedef programlama yaklaşımı uygulanarak, yolcu taleplerini karşılamayı temel alan yeni bir sistem tasarımı geliştirilerek, şehir içi otobüs sefer çizelgeleme optimizasyonu yapılmıştır. Otobüs ulaşım sistemi için; sefer sayısı, sefer sıklığı, yolcu kapasitesi vb. gibi parametreler açısından mevcut durum analiz edilmiş olup, günlük yolcu talebini karşılayan sefer sayısı optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Sonuçta; optimum sefer sayısı ve sefer sıklığı model sonuçları değerlendirilmiş ve elde edilen maddi kazanımların boyutu irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Hat çizelgeleme, Hedef programlama, Optimizasyon, Toplu taşıma

Urban Public Transportation Systems Modeling With Linear Goal Programming Approach

Abstract: With the rapid population growth in recent years, due to the increase in the number of city buses used in public transportation; environmental pollution, noise, passenger dissatisfaction, cost, etc. such problems are also increasing. In this context; it is of great importance to plan factors such as the route of the buses, the number and frequency of bus trips, passenger carrying capacity, and waiting times. Efficient and rational planning and sustainability of public transport and transportation systems, optimum use of the existing capacity are critical issues for decision makers, due to the high economic costs of investments in public transport and transportation systems. Therefore, in terms of environmental, economic and social welfare aspects, it is seen as an absolute necessity for urban public transportation systems to be optimally planned, efficient and sustainable. In this study; by applying a linear goal programming approach, a new system design based on meeting passenger demands was developed and city bus schedule optimization was performed. For the bus transportation system; number of voyages, voyage frequency, passenger capacity, etc. The current situation has been analyzed in terms of such parameters, and an optimization model has been created to meet the daily passenger demand. After all; the optimum number of voyages and voyage frequency model results were evaluated and the size of the financial gains obtained was examined.

Keywords: Goal programming, Line scheduling, Optimization, Public transport

*Sorumlu yazar

E-mail adresi: upolat@nku.edu.tr (U.Polat)

1. Giriş

Dünyada ve ülkemizde artan nüfusa paralel olarak, Çorlu/Tekirdağ bölgesi özelinde de; artan nüfus nedeniyle toplu taşımada kullanılan şehir içi otobüslerin sayısı artmakla birlikte; otobüslerin güzergahı, sefer sayısı ve sıklığı, yolcu taşıma kapasitesi, bekleme süreleri vb. gibi faktörlerin doğru planlanamaması; toplumsal, çevresel ve ekonomik sorunlar açısından çok büyük önem arz etmektedir. Bu sorunlar; fosil yakıtlarla çalışan araçların oluşturduğu çevre kirliliği, gürültü, yolcu memnuniyetsizliği ve maliyet öncelikli sorunlar olarak görülmektedir. Bu kapsamda; verimli ve sürdürülebilir bir toplu taşımanın planlanamaması, seyahat taleplerinin karşılanamaması, toplu taşıma sisteminde rotalamanın doğru yapılamaması, sefer çizelgeleme ve sefer sıklıklarının planlanması konusunda atıl kapasitenin oluşması nedeniyle, toplu taşıma hat çizelgeleme optimizasyonu, çalışmanın yapıldığı bölge özelinde ivedilikle çözüm getirilmesi gereken önemli bir problemdir. Şehir içi toplu taşıma sistemlerinde; yolcu memnuniyetinin yükseltilmesi amacıyla, sefer sayısı ve sefer sıklığının plansız bir şekilde artırılması; otobüs işletme maliyetini (personel, yakıt v.b. gibi) artırmakta ve havaya salınan egzoz gazı emisyonu nedeniyle, toplu taşıma kaynaklı hava kirliliğinin çoğalmasına neden olmaktadır. Sefer sıklığının yolcu kapasitesini karşılayamayacak kadar düşük olması ise; ekonomik ve çevresel açıdan avantajlar oluşturmasına rağmen, yolcuların toplu taşıma sisteminden memnuniyetsiz olması sonucunu doğurmaktadır. Bu nedenle, şehir içi toplu taşıma hat çizelgeleme optimizasyonu, ivedilikle çözüm getirilmesi gereken önemli bir problemdir. Sürdürülebilir bir toplu taşıma ve ulaşım sistemi için günlük (hafta içi ve hafta sonu) sefer sıklıkları çok büyük önem arz etmekte olup, özellikle gün içerisinde maksimum yoğunluğun olduğu saatlerde yapılması gereken seferlerin yolcu taleplerine göre hesaplanması gerekmektedir. Bu nedenle önerilen sistem tasarımı ve geliştirilen modelin işletim maliyetlerinin minimize edilmesi, çevreye duyarlılığın ve şehir içi toplu taşıma kaynaklı toplumsal refahın maksimize edilmesi açısından önemli faydalar sağlayacağı açıktır.

Yapılan çalışmada; Çorlu (Tekirdağ) ilçesinde toplu taşıma (otobüs) ulaşım sistemi için, belirlenen performans göstergeleri çerçevesinde; çizelgeleme ve optimizasyon modelinin oluşturulması amacıyla, mevcut durumda tüm otobüs hatları için veriler incelenmiş olup, yolcu memnuniyetinin en az olduğu hat, uygulamanın gerçekleştirileceği hat olarak seçilmiştir.

Belirlenen hat için; seyahat süreleri, ortalama bekleme zamanları, otobüslerin ortalama yolculuk süreleri, otobüs doluluk oranları, yolcuların otobüslere homojen dağılımları, kullanılan toplam otobüs sayısı, otobüsün trafiğe çıkış hızı, ayakta yolcu sayısı, seyahat sürecinde harcanan yakıt ve hava kirliliği etkisi vb. gibi performans ölçütleri incelenmiştir. Bu kapsamda belediyenin akıllı kart sisteminden alınan saatlik, günlük, aylık ve yıllık olarak elde edilen geçmiş verileri ve anket sonuçları irdelenmiştir. Çalışmada; şehir içi toplu taşıma sistemlerinde, sefer sıklıklarının belirlenmesi, sefer sayılarının optimum seviyesinin tespiti ve bu seferlerin hangi zaman dilimlerinde ve hangi kapasitede gerçekleşmesi gerektiğinin maliyet, çevresel etki ve toplumsal refah ekseninde belirlenmesi amaçlanmıştır. Doğrusal hedef programlama

kullanılarak geliştirilen sistem tasarımı ve modelleme yaklaşımında; şehir içi ulaşım için ayrılan bütçenin minimum kalması sağlanırken, mevcut hizmet kalitesinde ve yolcu-yükleme verileri ile en uygun sefer sıklığına ve optimum yolcu kapasitesine ulaşılması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada; verimli ve rasyonel bir sefer çizelgeleme sistemi ile yolcu konforu ile servis maliyeti arasında bir denge kurulması sağlanmıştır. Bu doğrultuda, toplu taşıma işletim maliyetini minimize eden ve yolcu memnuniyetini maksimum yapan bir sistem tasarımı amacıyla doğrusal hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modeli "Lingo" yazılımı yardımıyla çözümlenerek, elde edilen sonuçlar, mevcut durum verileri ile karşılaştırılabilir olarak irdelenmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği 1 ve 7 numaralı otobüs hatları pilot hat olarak seçilmiş olup; "TEKULAŞ Araç Takip ve Koordinasyon Merkezi" verileri çerçevesinde geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modelinde fayda/maliyet analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında; 2019 yılında 12 ay ve resmi tatil günleri haricinde, 12 ay için hafta içi ve hafta sonu olmak üzere tüm günler için yapılan detaylı analizlerde; gerçekleştirilen seferlerin yaklaşık % 95' inde mevcut sefer sayılarının model sefer sayısından daha fazla ya da eşit olduğu belirlenmiştir. Mevcut sistem (2019 yılı) ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki farkın; ekonomik fayda (daha az yakıt tüketimi, daha az bakım maliyeti, daha az personel (sürücü) maliyeti ve çevresel fayda (trafikte rahatlama ile birlikte çevreye verilen zararın minimuma indirilmesi) sağladığı görülmüştür.

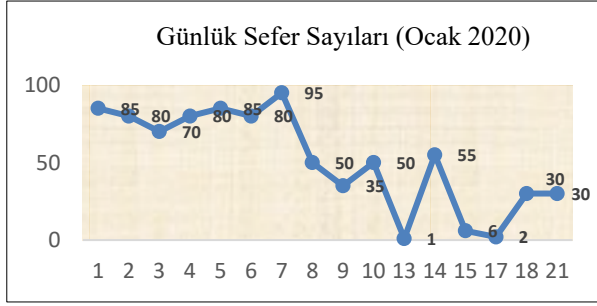
2. Literatür Özeti

Şehir içi toplu taşıma ulaşım sisteminin verimliliği, rasyonel planlanması ve sürdürülebilirliği konusunda detaylı bir bilimsel yazın taraması yapılmış olup matematiksel ve sezgisel modellerin kullanıldığı çok sayıda araştırma aşağıda özetlenmiştir. Yapılan çalışmaların önemli bir bölümünde [1, 2, 3] çok kriterli karar destek sistemleri, uzman sistemler ve sezgisel algoritmalar uygulanarak, güzergahlar boyunca yüksek hizmet kalitesiyle yolcuların seyahat sürelerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Toplu taşıma sistemlerinde sefer aralıklarının belirlenmesinde kullanılan yaklaşım ve hesaplamalar [1, 2, 3, 4, 5] konforsuzluk düzeyi kapsamında ayakta seyahat eden yolcular ile ilişkilendirilirken, bazı çalışmalarda ise [2, 3, 6] filo büyüklüğü kısıtı konularak toplam seyahat sürelerini minimum yapan modeller geliştirilmiş olup, yolcuların en kısa güzergahı tercih etmesi sebebiyle toplu taşıma atama problemlerinin çözümü ele alınarak parametreler incelenmiştir. Bazı çalışmalarda da; duraklarda bekleme süreleri sabit olarak alınmıştır [7,4]. Literatür incelendiğinde; yolcu sayılarının tahminlerinde istatistiksel yöntemler ya da var olan akıllı sistemlerdeki yolcu sayıları göz önünde bulundurularak çalışmalar yapıldığı görülmüştür. İncelenen çalışmalar Tablo 1'de gösterilmektedir.

3. Mevcut Durum Analizi

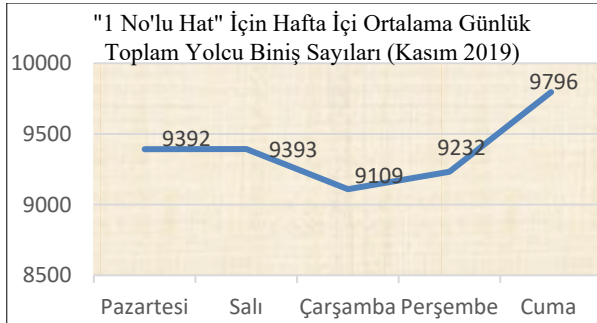
Çalışma kapsamında, Çorlu Belediyesi "TEKULAŞ Araç Takip ve Koordinasyon Merkezi" tarafından sağlanan veriler ekseninde, Çorlu Belediyesi'nin 2019 yılında ortalama 22 hat ile hizmet verdiği görülmüştür. Elde edilen verilere göre; 2020 yılı Ocak ayına ait hatlar bazında günlük sefer sayıları, Şekil

1’de gösterilmiş olup, pilot hat olarak seçilen 1 ve 7 numaralı hatlar için sırasıyla günlük ortalama 85 ve 95 otobüs seferi düzenlendiği belirlenmiştir.

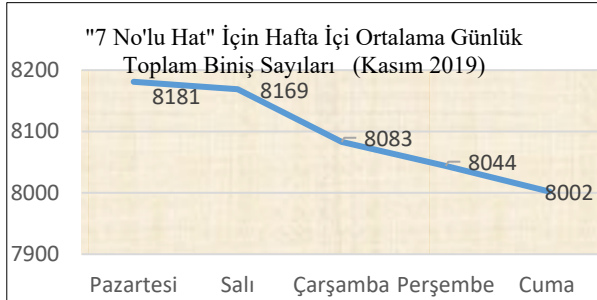


Şekil 1. Hat Bazında Günlük Sefer Sayıları (Ocak 2020)

Veri analizi gerçekleştirilen 1 numaralı hat için hafta içi ortalama yolcu biniş sayıları Şekil 2’de ve 7 numaralı hat için hafta içi ortalama yolcu biniş sayıları Şekil 3’te gösterilmektedir.



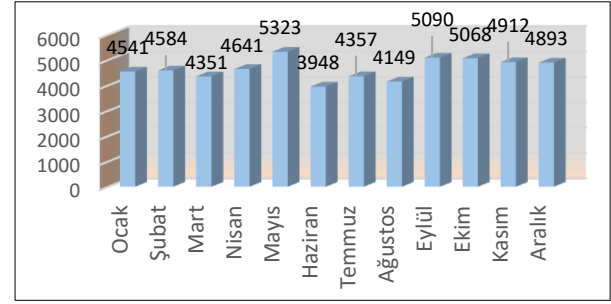
Şekil 2. Pilot Olarak Seçilen "1 Numaralı Hat" İçin Günlük Ortalama Yolcu Binış Sayıları (Kasım 2019)



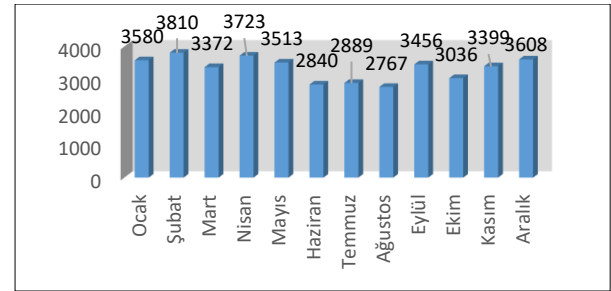
Şekil 3. Pilot Olarak Seçilen "7 Numaralı Hat" İçin Günlük Ortalama Yolcu Binış Sayıları (Kasım 2019)

Pilot olarak seçilen 1 numaralı otobüs hattına ait 2019 yılı Kasım ayı için hafta sonu ortalama yolcu binış sayılarının, Cumartesi günü için 8543 yolcu ve Pazar günü için 7114 yolcu olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. İncelenen 7 numaralı otobüs hattına ait 2019 yılı Kasım ayı için hafta sonu ortalama

yolcu binış sayılarının, Cumartesi günü için 5770 yolcu ve Pazar günü için 4747 yolcu olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. İncelenen 1 ve 7 numaralı otobüs hattı için 2019 yılı aylık yolcu binış sayıları Şekil 4 ve Şekil 5’te gösterilmiştir.

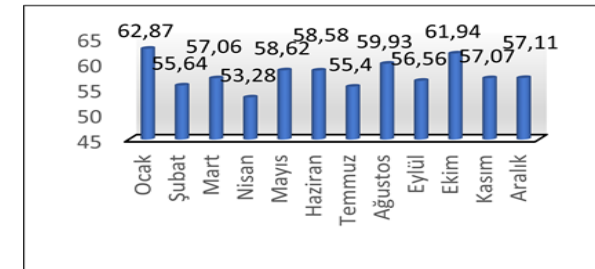


Şekil 4. İncelenen "1 Numaralı" Otobüs Hattı İçin 2019 Yılı Aylık Yolcu Binış Sayıları



Şekil 5. İncelenen "7 Numaralı" Otobüs Hattı İçin 2019 Yılı Aylık Yolcu Binış Sayıları

Şekil 4 incelendiğinde 1 numaralı hat için en yüksek yolcu binış sayısının 5323 değeri ile Mayıs ayında gerçekleştiği görülmektedir. En düşük yolcu binış sayısı ise 3948 değeri ile Haziran ayında gerçekleşmiştir. 1 numaralı hat için ait aylık ortalama yolcu sayısı 4655 olarak belirlenmiştir. Şekil 5 incelendiğinde 7 numaralı hat için en yüksek yolcu binış sayısının 3810 değeri ile Şubat ayında gerçekleştiği görülmektedir. En düşük yolcu binış sayısı ise 2840 değeri ile Haziran ayında gerçekleşmiştir. 7 numaralı hat için ait aylık ortalama yolcu sayısının 3333 olduğu görülmüştür. İncelenen 1 ve 7 numaralı hat için 2019 yılı aylık ortalama sefer süreleri sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilmiştir.

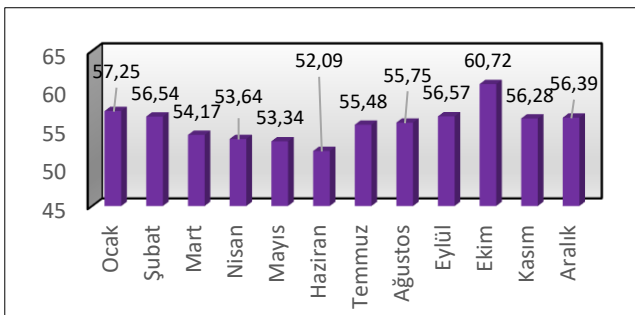


Şekil 6. İncelenen "1 Numaralı" Hat İçin 2019 Yılı Aylık Ortalama Sefer Süreleri (dk)

Tablo 1 Şehir İçi Toplu Taşıma Ulaşım Sisteminin Modellenmesi Konusunda Yapılan Çalışmalar

Yazar	Yıl	Kullanılan Metodoloji	İncelenen Parametreler	Amaç	Elde Edilen Sonuç
[8]	1972	İki seviyeli türeve dayalı model kullanılmıştır.	Sefer sıklıkları, Toplam süre, Yolcu sayısı	Güzergah sistemlerini yeniden tasarlayarak sefer sıklığı optimizasyonu yapılması	Modelin uygulanması ile toplam ulaşım süresi azalırken hizmet kalitesinin artacağı belirtilmiştir.
[9]	1981	Doğrusal olmayan bir optimizasyon ve çözüm algoritması kullanılmıştır.	Filo büyüklüğü, Ödenekler, Ücret, Bekleme süresi	Kısa sürede maksimum yolcu taşınması	Parametreler doğrultusunda istenilen sefer aralık değerlerine ulaşılmıştır.
[10]	1995	Tamsayı Programlama kullanılmıştır.	Sefer saatleri, Yolcu sayısı	Seferleri planlayarak trafik sıkışıklığını ve otobüslerin aşırı kalabalık olmasının engellenmesi	Sefer aralıkları optimizasyonu ile otobüsler hatlara daha verimli bir şekilde dağıtılmıştır.
[11]	1995	Sezgisel tabanlı bir model kullanılmıştır.	Doluluk oranı, Otobüs kapasitesi, Sefer sıklık değerleri	Otobüs hatlarının yeniden tasarımının gerçekleştirilmesi	Gerçekleştirilen uygulama ile modelin otobüs hattı tasarımı gerçekleştirmede faydalı olduğu görülmüştür.
[12]	2002	0-1 Tamsayı Programlama yöntemi kullanılmıştır.	Otobüs sefer sayısı, Yolcu talebi	Sefer sıklıklarının ve aralık değerlerinin verimli olarak belirlenmesi	Çalışma sonucunda gün, saat ve lokasyona göre toplu taşıma taleplerini eşleştirmenin mümkün olduğu belirtilmiştir.
[13]	2008	Hedef Programlama yöntemi kullanılmıştır.	Sürücü başına haftalık toplam iş, Sürücü başına haftalık izin	Araç, filo, tarife ve çizelgeleme problemlerini açıklayacak bir formülasyon elde edilmesi	Modelin uygulanması ile tarife problemlerinde oldukça yararlı olduğu ortaya konmuştur.
[14]	2008	Genetik Algoritma yöntemi kullanılmıştır.	Yolcu sayısı, Süre, Sıklık değerleri, İşletme maliyeti	Sefer çizelgesinin optimize edilerek işletme kalitesinin artırılması	Algoritmanın uygulanması ile toplam maliyetin azaldığı görülmüştür.
[15]	2008	Doğrusal Hedef Programlama yöntemi kullanılmıştır.	Araç sayısı, Araç tipi, Toplam sefer süresi, Sefer sıklık değeri	Otobüs hatları için optimum sefer sıklık değerinin bulunması	Doğrusal Hedef Programlama yönteminin bu problem için etkin çözüm sunduğu gösterilmiştir.
[16]	2010	Doğrusal Hedef Programlama yöntemi kullanılmıştır.	Sefer sıklığı, Otobüs filo büyüklüğü, Otobüs kapasitesi, Hat sefer süresi, Talep	Otobüs sefer sayılarını düzenleyerek sabahları otobüs kaynaklı oluşan trafiğin azaltılması	Uygulanan model ile sefer sayıları azaltılmış bu doğrultuda trafik ve toplam maliyette azalmıştır.
[17]	2012	Sezgisel Tabu Araştırması ve Hooke-Jeeves algoritması kullanılmıştır.	Seyahat maliyeti, Kapasite, Sefer aralık değeri	Toplu taşıma rotalarına en uygun otobüs kapasitesinin bu ve sefer aralıklarının düzenlenmesi	Uygulama, farklı büyüklükteki otobüslerin farklı rotalar ile eşleştirilmesinde modelin kullanılabilirliği ortaya konmuştur.
[18]	2012	Doğrusal Hedef Programlama yöntemi kullanılmıştır.	Sefer sayıları, Yolcu sayıları	Değişen yolcu talebi karşısında optimum sefer sıklığının belirlenmesi	Doğrusal Hedef Programlama yönteminin ulaşım mühendisliği açısından da kullanışlı bir yöntem olduğu ortaya konmuştur.

[19]	2013	Genetik Algoritma kullanılmıştır.	Yolcu ve işletme maliyeti, Filo sayısı, Seyahat süresi	Talebin belirsiz olduğu durumlarda optimum sefer sıklığının belirlenmesi	Çalışma sonucunda toplu taşıma maliyetlerinin azaldığı belirlenmiştir.
[20]	2014	Tamsayı Doğrusal Programlama kullanılmıştır.	Otobüs sefer saatleri	Belirli bir hat içerisindeki otobüslerin arasındaki zaman aralığını belirlenmesi	Model 13 hatlı bir sistemde denenmiş ve geçerliliği ortaya konmuştur.
[21]	2015	Dinamik Programlama yöntemi kullanılmıştır.	Otobüs varış süresi, Otobüs sefer aralığı, Yolcu bekleme süresi	Otobüslerin sefer aralığının maksimize ederek karın artırılması ve yolcu bekleme süresinin azaltılması	Önerilen sisteminin daha az bekleme süresi ve esneklik sağladığı görülmüştür.
[22]	2017	Doğrusal Hedef Programlama yöntemi kullanılmaktadır.	Sefer sayısı, Yolcu sayısı	Sefer sayılarını düzenleyip optimize edilmesi	Yöntem ile sefer sayıları optimize edilmiş, kar miktarının arttığı görülmüştür.
[23]	2017	Genetik Algoritma yöntemi uygulanmıştır.	Yolcu bekleme süresi, Sefer sıklığı	Otobüs rotaları ve sefer sıklıklarının optimize edilmesi	Otobüs kapasite ve rotaları göz önüne alınarak sefer sıklıklarının optimize edilebildiği ortaya konmuştur.
[3]	2018	Sezgisel Armoni Araştırması uygulanmıştır.	İşletme ve kullanıcı maliyeti, Talep miktarı	Kentiçi otobüs ağına sefer sıklıklarının optimize edilmesi	AA tabanlı bir modelin sefer sıklığı optimizasyonunda etkin olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.
[24]	2021	IVU.Plan programı ile optimizasyon uygulanmıştır.	Yol ağları, hatları, İşletme verileri ve çalışma kuralları	Sefer süre ve sayılarının belirlenmesi	Sefer sayılarının azaldığı ve verimlilik artışı görülmüştür.
[25]	2022	Yapay Sinir Ağları ve Destek Vektör Regresyonu uygulanmıştır.	Yolcu, durma süresi, Duraklar arasındaki süre, Hava durumu	Duraklar arasındaki sürenin hesaplanması	Yapay Sinir Ağları daha doğru tahmin sonuçları sağlamıştır.

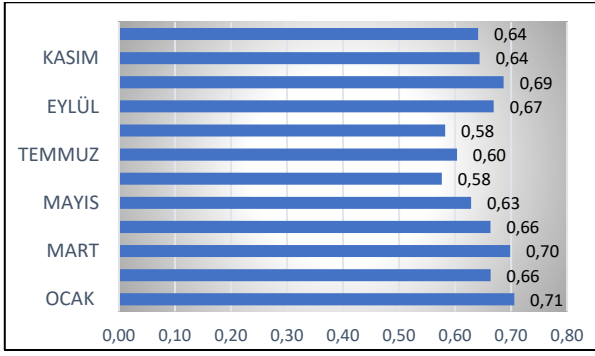


Şekil 7. İncelenen "7 Numaralı" Hat İçin 2019 Yılı Aylık Ortalama Sefer Süreleri (dk)

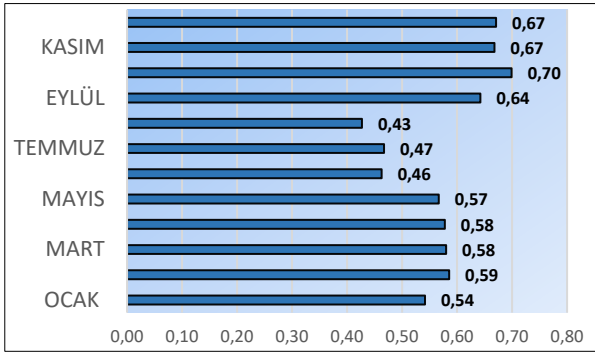
Şekil 6 incelendiğinde 1 numaralı hat için en düşük ortalama sefer süresinin Nisan ayında gerçekleştiği (53.28 dk), en yüksek ortalama sefer süresinin ise Ekim ayında gerçekleştiği (61.94 dk) görülmektedir. 1 numaralı hat sefer süreleri ortalaması 57.83 dk olarak elde edilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde 7 numaralı hat için en düşük ortalama sefer

süresinin Haziran ayında gerçekleştiği (52.09 dk), en yüksek ortalama sefer süresinin ise Ekim ayında gerçekleştiği (60.72 dk) görülmekte olup, hat sefer süreleri ortalaması 55.94 dk olarak elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca 1 numaralı hat için araç kapasitesi değerleri ve yolcu biniş sayıları verisi incelenerek; aylık sefer doluluk oranları (%) hesaplanmıştır (Şekil 8).

Şekil 8'de gösterildiği gibi en yüksek doluluk oranı ortalama değeri Ocak (0.71) ayında elde edilmiştir. En düşük doluluk oranı değeri ise Haziran ve Ağustos aylarında (0.58) gerçekleşmiştir. İncelenen 7 numaralı hat için aylık ortalama doluluk oranları hesaplanmış ve şekil 9'da verilmiştir. 7 numaralı hat için yıllık ortalama kapasite kullanım oranı değeri 0.57 olarak bulunmuştur. Şekil 9'da görüldüğü gibi en yüksek doluluk oranı ortalama değeri Ekim (0.70) ayında elde edilmiştir. En düşük doluluk oranı değeri ise Ağustos ayında (0.43) gerçekleşmiştir.



Şekil 8. İncelenen “1 Numaralı” Hat İçin 2019 Yılı Aylık Doluluk Oranları (%)



Şekil 9. İncelenen “7 Numaralı” Hat İçin 2019 Yılı Aylık Doluluk Oranları

4. Yöntem

Yapılan çalışmada; Çorlu Belediyesi şehir içi toplu taşıma sefer sayılarının optimum planlanması ve çizelgelenmesi amacıyla, günlük seferler incelenmiş olup, sistem veriminin artırılması ve atıl kapasitenin minimize edilmesi planlanmıştır. Bu amaçla; pilot olarak seçilen 1 numaralı otobüs hattı için doğrusal hedef programlama yaklaşımı uygulanarak sefer sayısı optimizasyon modeli geliştirilmiş ve maliyet eksensiz kazanımlar açısından ay ve yıl bazında detaylı analizler yapılmıştır. Pilot olarak seçilen 1 numaralı hat için günlük sefer sayılarının değişken olduğu tespit edildiğinden, 1 saatlik aralıklarla çalışma dilimleri içerisinde otobüs kapasiteleri, hat sefer süreleri ve yolcu talepleri incelenerek hesaplanan optimum sefer sayıları sonrasında; optimum sefer sayıları belirlenmiş ve elde edilebilecek yakıt, bakım ve personel maliyeti eksensiz maddi kazanımlar hesaplanmıştır. Yolcu talebi ile araç arzı arasında uygun eşleşme yapıldığında, kullanılan araç sayısını minimize edecek ve mevcut yolcu talebine cevap verebilecek doğrusal hedef programlama yaklaşımı kullanılarak, bir sefer çizelgeleme modeli geliştirilmiştir.

Çok amaçlı programlama modellerinden olan doğrusal hedef programlama, birden çok optimizasyon amacı için, spesifik sayısal bir hedef belirlenmesini ve hedeflerden istenmeyen sapmaları minimum yapan çözümü araştırmayı amaçlamaktadır. Bir doğrusal programlama modelinde yer alan kısıtlayıcılar ve amaç fonksiyonları, hedef programlama modelinin sadece kısıtlayıcı kümesini oluşturur. Doğrusal hedef programlama modelinde, amaç fonksiyonları için ulaşılmak istenen hedeflerin belirlenmesi gerekir. Hedefleri belirlen amaç fonksiyonları bir eşitlik halinde kısıtlayıcı

kümesine eklenir. Bu işlem, her bir hedef fonksiyonu için sapma değişkenlerinin tanımlanmasını gerektirir. Sapma değişkenleri, hedef fonksiyonlarının hedeflerden ne kadar uzaklaştığının ölçülmesini sağlar. Sapma değişkenleri, negatif ve pozitif sapma olarak iki kısımda ele alınır [26].

Modelin karar değişkeni “Çorlu Belediye’sine ait şehir içi otobüs hatları için sefer sayıları” olarak belirlenmiştir. Model amaç fonksiyonu “hedef kısıtlara ait pozitif sapma değişkenleri toplamının minimize edilmesi” şeklinde eşit öncelikli olarak oluşturulmuştur. Modelin hedef kısıtları iki adet olup; “günlük yolcu talep değerine bağlı olan kapasite kısıtı ve günlük çalışma süresine bağlı süre hedef kısıtı” olarak belirlenmiştir. Modelin sistem kısıtları belirlenirken “her hattın otobüs sefer sürelerini, her otobüs hattının aldığı yol uzunluğunu ve otobüs taşıma kapasitesinin o hattaki yolcu talebini karşılaması” bir başka değişle; pilot otobüs hattı olarak seçilen hat için “otobüs filosunun belirlenecek olan sefer sayısı değerlerinde çalışarak, o hatlardaki yolcuların tamamına hizmet edebilmesi” model sistem kısıtı olarak alınmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen “doğrusal hedef programlama modeli” “Lingo” bilgisayar programı kullanılarak çözülmüş olup, mevcut yolcu talebini karşılayan optimum sefer sayıları bulunmuştur. Geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modelinde; pilot olarak seçilen 1 numaralı otobüs hattı için; otobüs sefer süreleri, otobüs hattının aldığı yol uzunluğu ve otobüs taşıma kapasitesinin hattaki yolcu talebinin karşılanması parametreleri temel alınmıştır.

5. Bulgular

Çalışma kapsamında incelenen 1 ve 7 numaralı hatlar için geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modeli, mevcut durum analizinde elde edilen veriler ekseninde; en yoğun sefer sayısının gerçekleştiği hafta içi ve hafta sonu günleri için örneklem alınarak oluşturulmuş ve optimum sefer çizelgeleme gerçekleştirilmiştir (Tablo 2 ve Tablo 3).

Tablo 2 incelendiğinde 1 numaralı otobüs hattına ait aylık ortalama yolcu sayısının 4655 olduğu görülmektedir. Veriler analiz edildiğinde 1 numaralı hat için sefer süreleri ortalaması 57.83 dk olarak elde edilmiştir. Örneklem alınan seferlerin araç kapasite ortalaması 71 yolcudur. Örneklem alınan tarihlerde yapılan seferlerin ortalama sayısı 81 iken modele göre 76 olarak ortalama değer bulunmuştur.

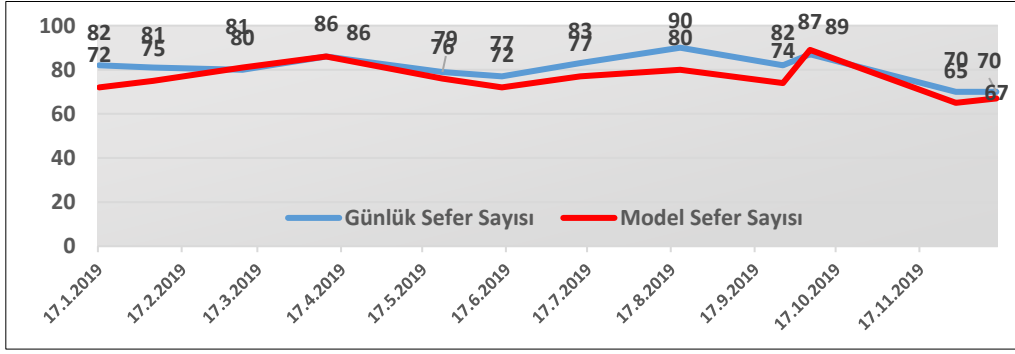
Tablo 3 incelendiğinde 7 numaralı hat için aylık ortalama yolcu sayısının 3333 olduğu görülmektedir. Veriler analiz edildiğinde 7 numaralı hat sefer süreleri ortalaması 55.94 dk olarak elde edilmiştir. Örneklem alınan seferlerin araç kapasite ortalaması 71 yolcudur. Örneklem alınan tarihlerde yapılan seferlerin ortalama sayısı 64 iken, modele göre ortalama sefer sayısı 58 olarak bulunmuştur. Şekil 10’da incelenen 1 numaralı hat için, mevcut durum ve geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modelinden elde edilen sefer sayılarının değişimleri gösterilmektedir. Ekim (2019) ayında pazartesi günü alınan örneklem ve Mart (2019) ayında pazartesi günü alınan örneklemde mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasında, %1.25 ve %2.3 değişim hesaplanmış olup, mevcut duruma göre sefer sayısının artırılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Nisan (2020) ayı için alınan örneklemde mevcut durum ve model sefer sayıları birbirine eşit olarak bulunmuştur.

Tablo 2 İncelenen “1 Numaralı” Hat İçin Örneklem Alınarak Gerçekleştirilen Sefer Analizleri

Örneklem Tarihi	Örneklem Günü	Ortalama Araç Kapasitesi	Yolcu Sayısı (adet)	Ortalama Sefer Süresi (dk)	Günlük Ortalama Yolcu Sayısı(adet)	Günlük Ortalama Sefer Süresi (dk)	Mevcut Durum Günlük Sefer Sayısı (adet)	Model günlük Sefer Sayısı(Adet)	Değişim (%)
17.01.2019	Perşembe	67	4826	59.79	4541	62.87	82	72	12.2(-)
6.02.2019	Çarşamba	67	4671	61.74	4584	55.64	81	75	7.4(-)
11.03.2019	Pazartesi	65	5302	57.25	4351	57.06	80	81	1.25(+)
11.04.2019	Perşembe	68	4650	49.41	4641	53.28	86	86	0
24.05.2019	Cuma	69	4507	56.64	5323	58.62	79	76	3.80(-)
15.06.2019	Cumartesi	70	4187	57.75	3948	58.58	77	72	6.49(-)
14.07.2019	Pazar	70	3456	53.6	4357	55.4	83	77	7.22(-)
20.08.2019	Salı	67	5327	57.01	4149	59.93	90	80	11.11(-)
27.09.2019	Cuma	73	5088	53.19	5090	56.56	82	74	9.75(-)
7.10.2019	Pazartesi	74	5465	56.36	5068	61.94	87	89	2.3(+)
30.11.2019	Cumartesi	79	4833	58.38	4912	57.07	70	65	7.14(-)
15.12.2019	Pazar	76	4115	57.7	4893	57.11	70	67	4.29(-)

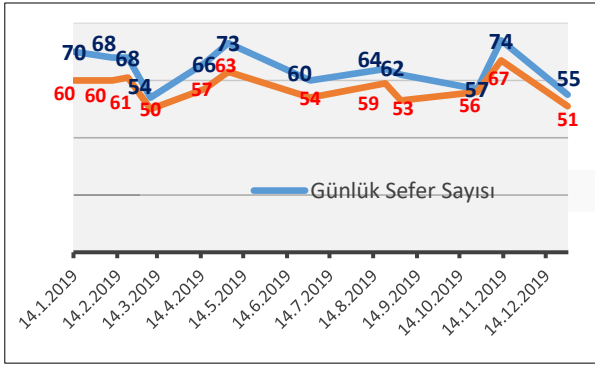
Tablo 3 İncelenen “7 Numaralı” Hat İçin Örneklem Alınarak Gerçekleştirilen Sefer Analizleri

Örneklem Tarihi	Örneklem Günü	Ortalama Araç Kapasitesi	Yolcu Miktarı	Ortalama Sefer Süresi (dk)	Günlük Ortalama Yolcu Sayısı	Günlük Ortalama Sefer Süresi (dk)	Günlük Sefer Sayısı	Model Sefer Sayısı	Değişim (%)
4.01.2019	Pazartesi	75	4355	56.68	3580	57.25	70	60	14.28 (-)
21.02.2019	Perşembe	71	4368	55.76	3810	56.54	68	61	10.29(-)
9.03.2019	Cumartesi	82	2404	53.7	3372	54.17	54	50	7.4(-)
16.04.2019	Salı	73	4091	54.51	3723	53.64	66	57	13.63(-)
3.05.2019	Cuma	73	4702	56.77	3513	53.34	73	63	13.69(-)
30.06.2019	Pazar	71	1986	53.29	2840	52.09	60	54	10(-)
10.02.2019	Çarşamba	75	2993	53	2889	55.48	68	60	11.76(-)
22.08.2019	Perşembe	75	3306	51.86	2767	55.75	64	59	7.24(-)
2.09.2019	Pazartesi	72	3579	58.68	3456	56.57	62	53	14.5 (-)
26.10.2019	Cumartesi	63	2604	54.05	3036	60.72	57	56	1.75(-)
12.11.2019	Salı	61	4045	57.36	3399	56.28	74	67	9.46(-)
29.12.2019	Pazar	60	1871	56.51	3608	56.39	55	51	7.27(-)



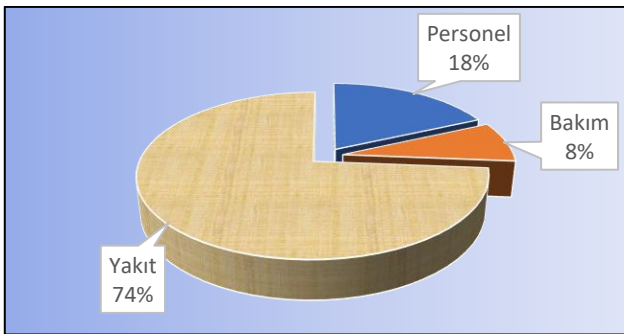
Şekil 10. Mevcut Durum ve Sefer Sayısı Optimizasyon Sayısı Modeli İçin Günlük Ortalama Sefer Sayıları (1 Numaralı Hat)

İncelenen 7 numaralı hat için, örneklem alınan tüm zaman periyotları için mevcut durum ve geliştirilen optimizasyon modeli sefer sayıları Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Mevcut Durum ve Sefer Sayısı Optimizasyon Sayısı Modeli İçin Günlük Ortalama Sefer Sayıları (1 Numaralı Hat)

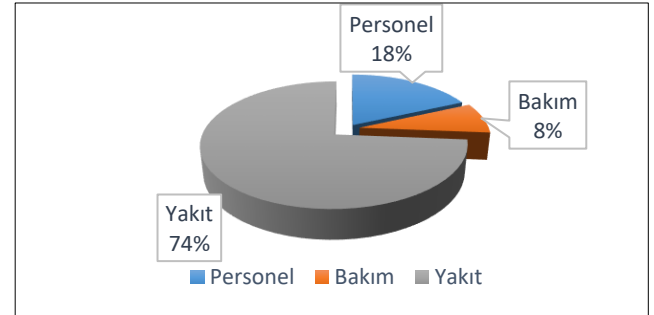
İncelenen 1 numaralı hat için yapılan analizler, yıl bazında geliştirildiğinde; yıllık toplam maliyet kazancı 135452,5 TL olarak öngörülmektedir. İncelenen 1 numaralı hat için, yıllık bazda bakım, personel ve yakıt maliyeti kazançlarının oransal dağılımı incelenmiş olup Şekil 12’de gösterilmektedir.



Şekil 12. İncelenen “1 Numaralı” Hat İçin Yıllık Bazda Bakım, Personel ve Yakıt Maliyeti Kazançlarının Oransal Dağılımı (%)

Yeni sistem tasarımı ile çizelgeleme yapılan 7 numaralı hat için günlük analizler, yıl bazında geliştirildiğinde; yıllık toplam maliyet kazancının 129352,5 TL olacağı

öngörülmektedir. İncelenen 7 numaralı hat için yıllık bazda bakım, personel ve yakıt maliyeti kazançlarının oransal dağılımı incelenmiş olup Şekil 13’de gösterilmektedir.



Şekil 13. İncelenen “7 Numaralı” Hat İçin Yıllık Bazda Bakım, Personel ve Yakıt Maliyeti Kazançlarının Oransal Dağılımı (%)

Çalışmada gerçekleştirilen analizler çerçevesinde; geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modeli ile gün içerisinde yapılan boş seferlerin minimize edilerek, bu kapsamda oluşan maliyetin azaltılması sağlanmış ve sistemin verimi artırılmıştır.

5. Tartışma ve Sonuçlar

Yapılan çalışmada; Çorlu/Tekirdağ bölgesinde, verimli ve sürdürülebilir bir toplu taşıma planlaması gerçekleştirilmiş olup, müşteri talep, beklenti ve memnuniyetlerinin en iyilenmesi için çalışmalar yapılmış ve mevcut durum ve geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modeli çerçevesinde, ekonomik, çevresel ve toplumsal açıdan elde edilen tasarrufun boyutu değerlendirilmiştir. Ayrıca; personel ihtiyacı, hava kirliliği ve özellikle trafik yoğunluğu açısından, şehir içi araçların yaptığı seferlerin direk yada dolaylı olarak etkilemesi bakımından seferlerin optimum seviyede yapılmasının önemli fayda sağladığı belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmada; verimli ve rasyonel bir sefer çizelgeleme sistemi ile yolcu konforu ile servis maliyeti arasında bir denge kurulması sağlanmıştır. Geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modelinde “Tekulaş Araç Takip ve Koordinasyon Merkezi” tarafından sunulan 2019’a ait veriler kullanılmıştır. Geliştirilen model ile gün içerisinde yapılan boş seferlerin minimize edilmesi

sağlanmış ve bu kapsamda oluşan maliyet minimize edilerek sistemin verimi artırılmıştır. İncelenen 1 numaralı hat için örneklem alınarak gerçekleştirilen sefer analizlerinde sefer sayılarının en fazla % 11.11 azaldığı; 7 numaralı hat için en fazla %14.28 azaldığı sonucu elde edilmiştir. Oluşturulan model ile, daha az yakıt tüketimi, daha az sürücü maliyeti, trafikte rahatlama ile birlikte çevreye verilen zararın minimuma indirilmesi ve bunlarla birlikte belediye bütçesinden daha az maddi kaynak aktarımı nedeniyle işletim maliyetlerinin azaltılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Çalışmada incelenen 1 ve 7 numaralı hatlar için elde edilen kazançların %74'nün yakıt olduğu; böylelikle enerji tasarrufuna katkı sağladığı görülmüştür. Çalışmanın sonucunda; şehir içi otobüs hatlarının sefer sayılarının optimize edilmesi ile; kişi başına düşen egzoz gazı salınımının azalması, gürültü kirliliği ve maliyetlerde azalma sağlanması, yolcu bekleme süreleri minimize edilmesi ve kapasite ve konfor açısından dengeli bir işletme koşulu sağlanması ve yolcu memnuniyetinin artırılmasının mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yazar Katkısı

Bu çalışmada Yazar1, bilimsel yazın araştırması, veri toplama, araştırma tasarımı ve uygulaması ile makalenin oluşturulması; Yazar2, bilimsel yazın araştırması, araştırma tasarımı ve uygulaması ile makalenin oluşturulması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Teşekkür

Çorlu Belediyesi ve TEKULAŞ Araç Takip ve Koordinasyon Merkezi yetkililerine desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Yasal/özel izin alınması gerekliliği bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] Banks, J. H. (1990). Optimal headways for multi-route transit systems. *Journal of Advanced Transportation*, 24, 127–154.
- [2] Ceder, A. (2007). *Public transit and operation- Theory, Modelling and Practice* (1. Edition).UK: Butterworth-Heinemann.
- [3] Ceylan, H., & Özcan, T. (2018). Otobüs ağlarındaki sefer sıklıklarının armoni araştırması algoritması ile optimizasyonu: Mandl test ağı üzerine bir uygulama. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1107-1116.
- [4] Doğan, G., & Özuysal M. (2017). Toplu ulaşımda bekleme süresini etkileyen faktörlerin incelenmesi: güvenilirlik, yolcu bilgilendirme sistemi ve fiziksel koşullar. *İMO Teknik Dergi*, 7927-7954.
- [5] Genç, M.A., Alakaş, H.M., Eren, T., & Hamurcu, M. (2018). Ankara Metrosu M1 hattı hareket saatlerinin çizelgelenmesi: Bir karar destek sistemi uygulaması. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları*, 1(2), 108-128.

- [6] Sazı Murat, Y. ve & Demirkollu, M. (2017). Hedef programlama yöntemi ile otobüs sefer sayılarının tespit edilmesi. *1nd International Turkish World Engineering and Science Congress*, Antalya, 7-10.
- [7] Bağdatlı, M.E.C. (2020). Niğde ili toplu taşıma sistemlerinin yolcu talepleri açısından incelenmesi. *NÖHÜ Müh. Bilim Dergisi*, 9(1), 405-413.
- [8] Silman, L. A., Barzily, Z., & Passy, U. (1974). Planning the route system for urban busses. *Computers & Operations Research*, 1(2), 201-211.
- [9] Furth, P. G., & Wilson, W. H. M. (1981). Setting frequencies on bus routes: Theory and practice. *Transportation Research Record*, 818, 1-7.
- [10] Oudheusden, D. L., & Zhu, W. (1995). Trip frequency scheduling for bus route management in Bangkok. *European Journal of Operational Research*, 83, 439-451.
- [11] Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1995). Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3 (1), 31-50.
- [12] Ceder, A. (2002). Urban transit scheduling: framework, review, and examples. *ASCE Journal of Urban Planning and Development*, 128 (4), 225–244.
- [13] Mesquita, M., Moz, M., Paiais, A., Paixao, J., Pato, M. V., & Respicio, A. (2008). Solving public transit scheduling problems. *Universidade de Lisboa, Lizbon*.
- [14] Sun, C., Zhou, W., & Wang, Y. (2008). Scheduling combination and headway optimization of bus rapid transit. *Systems Engineering And Information Technology*, 8(5), 61-67.
- [15] Alp, S. (2008). Doğrusal hedef programlama yönteminin otobüsle kent içi toplu taşıma sisteminde kullanılması. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1:13, 73-91.
- [16] Uludağ, N. (2010). Bulanık optimizasyon ve doğrusal hedef programlama yaklaşımları ile otobüs hatlarının modellenmesi (Doktora Tezi). *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli*.
- [17] Ruisanchez, F., Dell'Olio, L., & Ibeas, A. (2012). Design of a tabu search algorithm for assigning optimal bus sizes and frequencies in urban transport services. *Journal of Advanced Transportation*, 46, 366-377.
- [18] Deri, A. (2012). Akıllı kart verileri kullanılarak toplu ulaşım yolculuk talebinin belirlenmesi ve sefer çizelgeleme optimizasyonu (Yüksek Lisans Tezi). *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir*.
- [19] Huang, Z., Ren, G., & Liu, H. (2013). Optimizing bus frequencies under uncertain demand: Case study of the transit network in a developing city. *Mathematical Problems in Engineering*.
- [20] Martínez, H., Mauttone, A., & Urquhart, M. E. (2014). Frequency optimization in public transportation systems:

Formulation and metaheuristic approach. European Journal of Operational Research, 236 (1), 27-36.

[21] Berrebi, S. J., Watkins, K. E., & Laval, J. A. (2015). A real-time bus dispatching policy to minimize passenger wait on a high frequency route. Transportation Research Part B, 81, 377-389.

[22] Demirkollu, M. (2017). Hedef programlama yöntemi ile otobüs sefer sayılarının tespit edilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

[23] Chakroborty, P. (2017). Optimal routing and scheduling in transportation: using genetic algorithm to solve difficult

optimization problems, Indian Institute of Technology Transportation.

[24] Aydın, Y. B. (2021). Toplu Taşımada İşletme Planlaması ve Optimizasyonu: Sakarya Uygulaması (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[25] Şahinbaş, K. (2022). Gerçek Hayat Verileriyle Makine Öğrenmesi Algoritmalarına Dayalı Otobüs Durak Süresi Tahmini. Dicle University Journal of Engineering, 13:3, 421-428.

[26] Taha, H. A. (2000). Operational Reserarch an Introduction. Literatür Yayıncılık.