

# SÜRDÜRÜLEBİLİR ULAŞIM PLANLAMASI İÇİN ŞEHİR İÇİ OTOBÜS HATLARINDA SEFER ÇİZELGELEME OPTİMİZASYONU

Ulviye POLAT\*<sup>ID</sup>  
Aysun SAĞBAŞ\*<sup>ID</sup>  
Melike Selen DERMENCI\*\*<sup>ID</sup>

Alınma: 30.12.2020; düzeltme:22.09.2022; kabul: 23.09.2022

**Öz:** Ülkemizde ve dünyada nüfusun sürekli artması ile birlikte, toplu taşıma ve ulaşım sistemlerinin planlanması ve bu süreçte yaşanan sorunların çözümü; çevresel duyarlılık, ekonomik ve toplumsal fayda açısından çok büyük önem arz etmektedir. Şehir içi toplu taşıma sistemlerinde sefer sıklıklarının ve sayılarının optimum seviyesinin belirlenmesi; maliyet, çevresel etki ve toplumsal refah ekseninde toplu taşımanın en önemli sorunlarından olup, şehirde yaşayan tüm bireyler için kritik bir konudur. Bu çalışmada; şehir içi toplu taşıma (otobüs) sistemlerinin verimli ve sürdürülebilir olarak planlanması amacıyla; Tekirdağ/Çorlu Belediyesi toplu taşıma ulaşım sistemlerinin günlük sefer sayılarının, sefer sıklıklarının ve yolcu taşıma kapasitelerinin mevcut durumu incelenerek sefer sayısı optimizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla ulaşım yönetim sistemi verileri kullanılmış ve günlük sefer sayısı optimizasyonu için doğrusal hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Model, LINGO paket programı yardımıyla çözümlenerek, gün bazında optimum sefer sayısı belirlenmiştir. Çalışmada seçilen pilot otobüs hattı için detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Mevcut durum sistem tasarımı ve optimum sistem tasarımı sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş olup fayda maliyet analizi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Şehir içi ulaşım sistemi, Otobüs sefer çizelgeleme, Optimizasyon, Çok amaçlı karar verme

## Bus Trip Number Scheduling Optimization on Domestic Bus Lines For Sustainable Transportation Planning

**Abstract:** With the continuous increase in the population in our country and in the world, planning of public transportation and transportation systems and solving the problems experienced in this process is of great importance in order to provide environmental awareness, economic and social benefit. The issue of determining the optimum level of trip frequencies and number of trips in urban public transport systems is one of the most important problems and is a critical issue for all individuals living in the city. In this study; in order to plan urban public transport (bus) systems efficiently and sustainably; by examining the current situation number of daily trips, trip frequencies and passenger transport capacities of Tekirdağ / Çorlu Municipality public transportation systems, the number of trips has been optimized. For this purpose, a linear goal programming model was developed for the optimization of the number of daily trips. The model was solved with the help of the LINGO package program and the optimum number of trips per day was determined. In the study; detailed analyzes were carried out for the selected pilot bus line. The current state system design and optimum system design results were evaluated comparatively, and cost-benefit analysis was performed.

**Keywords:** Urban bus transportation systems, Scheduling, Optimization, Multi objective decision making

\* Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 59860, Çorlu, Tekirdağ

\*\* BSH Ev Aletleri San. Ve Tic. A.Ş. , Çerkezköy, Tekirdağ  
İletişim Yazarı: Ulviye POLAT (upolat@nku.edu.tr)

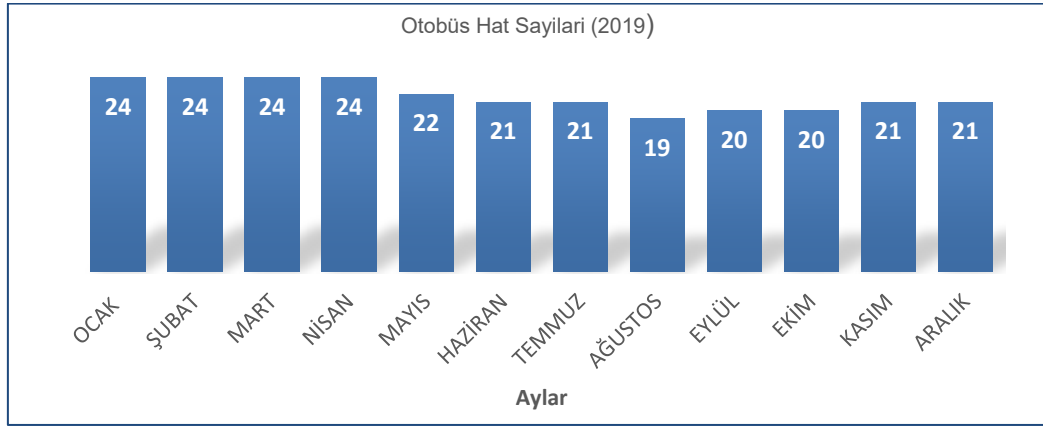
## 1. GİRİŞ

Sürdürülebilir ulaşım, bir toplumun hareketlilik ihtiyaçlarını çevreye en az zarar verecek şekilde ve gelecek nesillerin hareketlilik ihtiyaçlarına zarar vermeyecek şekilde destekleme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Hareketlilik arttıkça karbon ayakizi de artmaktadır. Bu yüzden her alan gibi ulaşımın da sürdürülebilir hale getirilmesi, küresel ısınmayla mücadelede büyük önem arz etmektedir. En yüksek karbon salınımına sahip sektörlerden biri olan ulaşım sektörünün, yıllık karbon salınımının (toplam küresel karbon salınımı) yaklaşık %14'ünü oluşturduğu göz önüne alındığında karbon emisyonlarını azaltmanın önemi ve gerekliliği açıktır. İklim krizinde kentlerin etkisinin yaklaşık %70 olduğu gerçeğinden hareketle, sürdürülebilir ulaşım planlamasının, küresel ısınma kaynaklı iklim krizinin etkilerini azaltma konusunda çok önemli olduğu söylenebilir.

Sürdürülebilir toplu taşıma ve ulaşım sistemi için, günlük sefer sayılarının ve sıklıklarının optimize edilmesi ekonomik, toplumsal ve çevresel açıdan büyük önem arz etmektedir. Özellikle gün içerisinde yolcu yoğunluğunun yüksek olduğu saatlerde yapılması gereken seferlerin yolcu taleplerine göre hesaplanması, kritik bir konudur. Yapılan çalışmada; şehir içi otobüs sefer sayılarının yolcu taleplerine göre optimize edilmesi amacıyla “doğrusal en iyileme” prensibi çerçevesinde bir “hat çizelgeleme modeli” geliştirilmiş ve günlük sefer sayıları, Tekirdağ Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Hizmetleri TEKULAŞ Araç Takip ve Koordinasyon Merkezi (Merkez) verilerine göre yeniden hesaplanmıştır. Çalışmanın kapsamı; toplu ulaşım sistemi alt yapısından elde edilen verilerin, doğrusal hedef programlama ekseninde oluşturulan “sefer sayısı optimizasyon modeli” ile analiz edilmesi ve günlük otobüs sefer sayılarının optimum değerinin belirlenerek, toplu taşıma sisteminin sürdürülebilirliği konusunda yol haritasının oluşturulmasıdır.

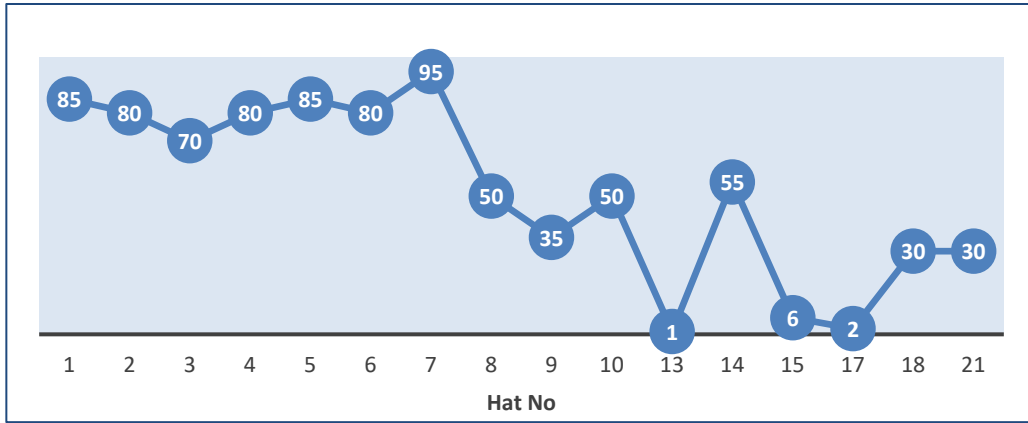
Değişen yolcu talebi çerçevesinde, gün bazında otobüs hat çizelgeleme modelinin geliştirilmesi kapsamında yapılan çalışmada; verimli ve rasyonel bir sefer çizelgeleme sistemi ile servis maliyeti arasında bir denge kurulması amaçlanmıştır. Yolcu talebi ile araç arzı senkronizasyonunu sağlayan, kullanılan araç sayısını minimize eden ve mevcut yolcu talebini karşılayan bir sefer çizelgeleme modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen modelde, her otobüs hattı için; sefer süreleri, günlük yolcu sayıları, her otobüs hattının yol uzunluğu ve otobüs taşıma kapasitesi verileri kullanılmıştır. Yapılan analizlerde; yolculuk kapasiteleri, hat güzergah süreleri ve hat güzergahlarının mesafeleri temel parametreler olarak ele alınmıştır. Çalışma kapsamında Merkez tarafından iletilen veriler çerçevesinde; 2019 yılı verileri kapsamında mevcut durum analizi gerçekleştirilmiş olup, doğrusal hedef programlama modeli oluşturulmuştur. Model LINGO optimizasyon programı ile çözümlenerek, günlük optimum sefer sayıları elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında TEKULAŞ tarafından sağlanan veriler çerçevesinde; Çorlu Belediyesi'nin mevcut durum (2019 yılı) için otobüs hat sayıları Şekil 1'de gösterilmiş olup, 2019 yılında ortalama 22 hat ile hizmet verildiği belirlenmiştir. Otobüs hatları bazında günlük sefer sayıları ise (Ocak, 2020), Şekil 2'de gösterilmiştir.



**Şekil 1:**

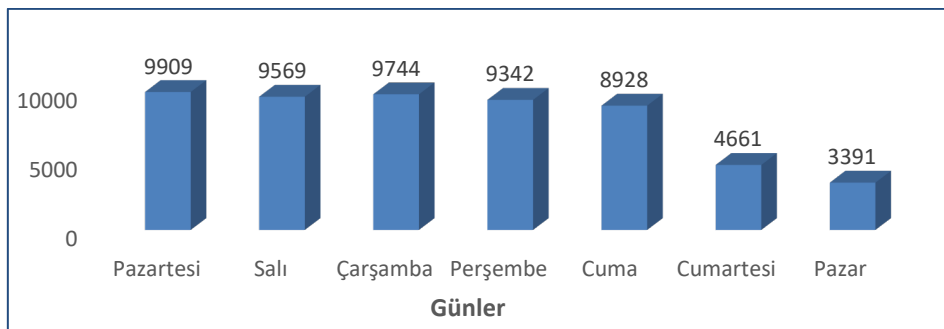
*Aylık otobüs hat sayıları (2019 yılı)*



**Şekil 2:**

*Hat bazında günlük sefer sayıları (Ocak, 2020)*

Şekil 2 incelendiğinde, en yüksek sefer sayılarının 1 ve 5 numaralı hatlar (85 sefer), 2, 4 ve 6 no'lu hatlar (80 sefer) ve 7 numaralı hat (95 sefer) bazında gerçekleştiği görülmektedir. Mevcut durum analizi ve yolcu memnuniyet anketleri birlikte değerlendirildiğinde; 6 no'lu otobüs hattı "pilot" olarak seçilmiş olup, veri analizi gerçekleştirilen 6 no'lu hatta ait, hafta içi ve hafta sonu ortalama yolcu biniş sayıları Şekil 3'de sunulmuştur.



**Şekil 3:**

*Ortalama günlük toplam yolcu biniş sayıları (6 no'lu hat, Kasım 2019)*

Şekil 3 incelendiğinde; yolcu biniş yoğunluğunun en fazla olduğu gün, Pazartesi günü (9909 yolcu) ve en az olduğu gün Pazar günü (3391 yolcu) olduğu görülmektedir.

Çalışma kapsamında 6 no'lu hat için; geliştirilen optimizasyon modelinden elde edilen sefer sayılarının, mevcut durum (2019 yılı) sefer sayıları ile karşılaştırmalı analizleri yapılmış ve maddi kazanımları değerlendirilmiştir. Toplu taşıma ve ulaşım sistemlerinin planlanması ve sürdürülebilirliği konusunda çözüm önerileri oluşturulmuştur.

Geliştirilen model ile işletim maliyetleri minimize edilerek ve yenilenemez enerji kaynaklarının kullanımı azaltılarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı oluşturması açısından fayda sağlayacağı öngörülmektedir. İlave olarak, sefer sayılarının optimize edilmesi sonucunda; kişi başına düşen egzoz gazı salınımında ve gürültü kirliliğinde azalma görülecektir.

Çalışmanın ikinci bölümünde toplu ulaşım sistemleri optimizasyonu ile ilgili detaylı literatür araştırması, üçüncü bölümde çalışmada kullanılan metodoloji, dördüncü bölümde geliştirilen model sonuçları, beşinci bölümde ise sonuçlar ve ileride yapılacak çalışmalar ile ilgili öneriler aktarılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür incelendiğinde; toplu taşıma ulaşım sisteminin planlanması ve sürdürülebilirliği konusunda yapılan matematiksel ve sezgisel modellerin kullanıldığı çok sayıda araştırmaya rastlanmıştır. Silman ve diğ. (1972), yaptıkları çalışmada otobüs güzergahlarını ve frekanslarını belirlemek amacı ile bir model önermişlerdir. Maliyet ve yolcu rahatlığı gibi kriterleri içeren modelin gerçek bir sistem üzerinde uygulanması sonucunda, elde edilen fayda ortaya konmuştur. Furt ve Wilson (1971), otobüs kapasitelerinin daha verimli bir şekilde kullanılmasına olanak sağlayacak şekilde güzergahların planlanmasına yönelik bir algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritma ile beraber hizmet kalitesinin arttığı ve planlanan güzergahın ulaşım ağı için olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Baaj ve Mahmassani (1995), bir ulaşım sisteminin önemli performans göstergelerinden biri olan talep karşılama yüzdesini arttırmak için algoritma ortaya koymuşlardır. Algoritmanın gerçek veriler kullanılarak test edilmesi ile elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Oudheusden ve Zhu (1995), toplu taşıma sistemlerinin organize edilmesi aşamasındaki en büyük engellerden biri olan trafik ortamındaki belirsiz koşulların neden olduğu sorunları analiz ederek, bu sorunları çözmek için bir tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Bangkok'ta uygulamaya konulan modelin toplu taşıma ağına yarattığı olumlu değişimlerin topluma sunulan hizmette iyileştirme sağladığı görülmüştür. Ceder (2002), yaptığı çalışmada ulaşım sistemlerinde hem zaman çizelgeleme işlemlerinin hem de kaynak planlamasının en yüksek verim ile yapılabilmesi üzerinde durmuştur. Bu işlemlerin zaman alıcı olmasının getirdiği olumsuz etkiyi yok etmek için ise teknolojinin kullanılması gerektiğini vurgulayarak, tamamen otomatik veya insan-bilgisayar ortak çalışmaların kullanılmasının uygun olduğunu göstermiştir. Önerilen teknolojik sistemin kullanılması ile arz ve talep arasındaki dengenin daha iyi bir şekilde karşılanmasının mümkün olacağını belirtmiştir. Mesquitai ve diğ. (2008), sürdürülebilir bir ulaşım sistemi oluşturmak için dengeli bir kaynak dağılımının gerektiğini belirterek, bir tamsayılı matematiksel model ortaya koymuşlardır. Çözümü hedef programlama ile gerçekleştirilen kaynak dağıtım problemi Portekizli bir firmanın gerçek verileri üzerinde uygulanmıştır. Çalışma sonucunda araçların, kişilerin ve güzergahların dağılımının eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesinin ulaşım sisteminin verimi üzerinde büyük bir etkisi olduğu görülmüştür. Sun ve diğ. (2008), çalışmalarında genetik algoritma kullanarak ulaşımındaki maliyetleri en aza indirecek bir model sunmuşlardır. Belirli kısıtlar çerçevesinde oluşturulan modellerdeki kaynakların optimum koşulları sağlayacak şekilde dağıtılmasının ve etkin bir zaman çizelgesinin oluşturulmasının, hem işletmecilerin hem yolcuların maliyetlerini azaltacağını göstermiştir. Uludağ (2010), tez çalışmasında doğrusal hedef programlama ile otobüs sefer sıklıklarını belirlerken, bulanık doğrusal programlama ile de

durakların bulunması gereken konumlarını belirlemeye çalışmıştır. Modelin uygulanması sonucunda elde edilen optimum koşulların sağlanması ile hem yolcular açısından bir çok avantajın hem de ekonomik kazançların sağlanacağı görülmüştür. Yua ve diğ. (2011), ulaşım ağında oluşan maliyetlerin minimum seviyeye indirilmesini öngören bir model üzerinde çalışmışlardır. Çin'in Dalian kentinden alınan bilgiler doğrultusunda oluşturulan model Paralel Genetik Algoritma (PGA) ile çözülmüş ve toplu taşıma sistemlerinden elde edilen faydayı arttırabileceği görülmüştür. Berrebi ve diğ. (2012), yaptıkları çalışmada bir güzergah üzerindeki yolcuların bekleme sürelerini simülasyon çalışması ile göstermekte ve bu süreyi azaltmak için bir tutma mekanizması önermektedirler. Tutma mekanizmasının uygulanması ile birlikte otobüslerin hareket zamanları arasındaki denge sağlanmış ve oluşabilecek otobüs yığınları engellenmiştir. Sonuçlar yolcu memnuniyeti açısından incelendiğinde ise belirli bir rota üzerinde hareket eden kişilerin daha sorunsuz ve kısa zaman içerisinde istedikleri noktaya ulaşabildiği görülmüştür. Deri (2012), ulaşım sistemlerinin verimli bir şekilde çalışabilmesinin temel gerekliliklerinden olan optimum sefer sıklıklarını belirlemek için gerçek veriler üzerinde çalışmış ve doğrusal hedef programlama tekniğini kullanmıştır. Çalışma sonucunda bulunan sefer değerlerinin, otobüs hatlarının kapasitelerini daha doğru bir şekilde planlamaya yardımcı olduğu görülmüştür. Ruisanchez ve diğ. (2012), bir ulaşım ağında bulunan her bir rotanın optimum sefer sıklığını belirlemek amacı ile kullanılan Tabu Araması (TS) ve Hooke-Jeeves algoritmalarından hangisinin daha etkili sonuçlar verdiğini gözlemlemek üzere bir araştırma yapmışlardır. Otobüs kapasitelerinin ve maliyetlerin dikkate alındığı algoritmaların gerçek bir durum üzerinde denenmesi ile Tabu Araması algoritmasının sefer sıklığını belirleme üzerinde daha etkin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Huang ve diğ. (2013), talebin belirsiz olduğu koşullarda sefer sayılarının verimli bir şekilde organize edilmesi için bir programlama modeli sunmuş ve çözümünü Genetik Algoritma yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Çin'de bir otobüs hattı üzerinde gerçekleştirilen uygulamada kullanılan yöntemin maliyeti azaltmaya ve yolcu memnuniyetini arttırmaya yardımcı olduğu görülmüştür. Martinez ve diğ. (2014), çalışmalarında toplu taşıma hatlarına ait zaman çizelgelerini optimize etmek için bir karma tamsayı doğrusal programlama modeli ortaya koymuşlardır. Gerçek bir durumdan elde edilen verilerin modele uyarlanması ile önerilen formülasyonun sistemin etkinliğini arttırmaya yardımcı olduğu sonucuna varılmıştır. Xiaofeng ve diğ. (2015), toplu taşıma sistemlerinin kapasitelerini daha doğru kullanarak sorunsuz bir ulaşım hizmeti sunmaları önündeki engellerden biri olan belirsiz sefer aralıklarını düzenlemek amacı ile otobüs kalkış frekansı programlama modeli geliştirmişlerdir. Sunulan model Çin'in Wuhan kentinde uygulanmış ve sonuçlar verimliliği arttırdığını göstermiştir. Chakroborty (2017), yetersiz planlamanın ve belirsiz koşulların neden olduğu yüksek yolcu bekleme sürelerini en aza indirebilmek için otobüs güzergahları ve güzergah üzerinde olması gereken en doğru sefer sayısını belirlemek üzerinde durmuştur. Çalışmanın devamında Genetik Algoritma kullanımı ile yolcu bekleme süresinin en aza indirilmesi hedeflenmiş ve bu doğrultuda algoritma içinde otobüs kapasiteleri, otobüs sefer sıklıkları gibi kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Demirkollu (2017), bir ulaşım ağının çalışabileceği en yüksek verimle çalışması için ulaşım ağındaki sefer sayılarını doğrusal hedef programlama kullanarak tekrar belirlemiştir. Ceylan ve Özcan (2018), otobüs hatlarının optimum sefer sıklık değerlerinde çalışabilmesi için bir optimizasyon modeli ortaya koymuşlardır. Modelin uygulanması ile birlikte hem işletmecilerin hem de kullanıcıların elde edeceği yararlar görülmüş ve modelin uygulanabilirliği test edilmiştir. Baysal (2019), otobüsler arası yapılan aktarma işleminin hem yolcular tarafından daha konforlu bir şekilde gerçekleştirilebilmesi hem de işletmelerin kapasitelerini en doğru şekilde kullanabilmesi için, otobüslerin zaman çizelgelerini düzenlemek üzerine çalışmıştır. GAMS programının kullanıldığı çalışmada otobüs seferlerinin yeniden düzenlenmesi ile ulaşım sisteminin verimliliğinin arttığı görülmüştür.

### 3. UYGULANAN METODOLOJİ

Çalışma kapsamında, TEKULAŞ merkezinden sağlanan veriler kullanılmış olup, günlük seferler yeniden incelenerek, sistem veriminin artırılması ve atıl kapasitenin minimize edilmesi planlanmıştır. Bu amaçla; pilot olarak seçilen 6 no'lu otobüs hattı için sefer sayısı optimizasyon modeli geliştirilerek, maliyet eksenli kazanımlar açısından detaylı analizler yapılmış ve belirlenen hat için, saat, gün (hafta içi ve hafta sonu), ay ve yıl bazında değerlendirmeler ve çıkarımlar gerçekleştirilmiştir. Veriler incelendiğinde, günlük sefer sayılarının değişken olduğu tespit edildiğinden, 1 saatlik çalışma dilimleri içerisinde sefer sayısı dağılımları çizelgelenmiştir. 6 no'lu hat için; sefer sayıları “doğrusal hedef programlama” yaklaşımı ile optimize edilerek; gün, ay ve yıl bazında yolcu taşınan tüm günler için, optimum sefer sayıları belirlenmiştir. Böylece hafta içi, hafta sonu ve ay bazında mevcut durum ve geliştirilen optimizasyon modeli sefer sayıları arasında karşılaştırma ve değerlendirme yapılmıştır. 6 no'lu hat için; otobüs kapasiteleri, hat sefer süreleri ve yolcu talepleri incelenerek hesaplanan optimum sefer sayıları sonrasında; yakıt maliyeti eksenli maddi kazanımlar hesaplanmıştır. Bu tespitler doğrultusunda; optimum sefer sayılarının belirlenmesi ile, hem yapılacak olan sefer sayıları optimize edilmiş, hem de maddi kazanımların maksimizasyonu amaçlanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken LINGO bilgisayar programından yararlanılmış olup, doğrusal hedef programlama ilkelerine göre; mevcut yolcu talebini karşılayan optimum sefer sayıları bulunmuştur. Çalışma kapsamında geliştirilen doğrusal hedef programlama modeli ile, günlük sefer sayısı (1 gün içerisinde yapılması gereken en uygun sefer sayısı) hesaplanmıştır. Optimum sefer sayıları hesaplanırken 6 no'lu hattın, gidiş ve dönüş istikametinde (başlangıç durağı ile son durak arasında ve son durak ile başlangıç durağı arasında) elde edilen veriler kullanılmıştır. Günlük sefer sayısı optimizasyon modelinin sistem kısıtlarının belirlenmesinde; 6 no'lu hat için; otobüs sefer sürelerini, otobüs hattının aldığı yol uzunluğunu ve otobüs taşıma kapasitesinin hattaki yolcu talebini karşılaması gerekliliği temel alınmıştır.

Geliştirilen “Sefer Sayısı Optimizasyon Modelinde” kullanılan varsayımlar aşağıda özetlenmiştir:

- Bayram, milli tatil gibi özel günlerde sefer sayılarının az olması nedeniyle, bu günler için model çözümlenmesi gerçekleştirilmemiştir.
- Günlük ortalama sefer süresindeki değişkenliğin yüksek olduğu durumlar için aylık ortalama süreler kullanılmıştır.
- Merkez tarafından iletilen veriler kapsamında hat numaraları ve güzergah verileri kullanılmıştır.
- Ortalama yolculuk sürelerinin bilindiği kabul edilmiştir.
- Her zaman diliminde her hattın sefer sayılarının bilindiği varsayılmıştır.
- Her otobüs hattının sefer başına ortalama yolcu sayıları ve kapasitelerinin bilindiği kabul edilmiştir.
- Günlük ortalama yolcu sayılarının değişmediği kabul edilmiştir.

Geliştirilen modelde, otobüs hatları için günlük en uygun sefer sayısının elde edilmesi amaçlanmıştır. Karar değişkeni, sistem ve hedef kısıtları, amaç fonksiyonu belirlenerek oluşturulan model LINGO optimizasyon programı yardımıyla çözülmüştür. Geliştirilen model içeriği aşağıda yer alan eşitliklerde gösterilmiştir.

$$\text{Min } d_1^+ + d_2^+ \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n K_i X_i - d_1^+ + d_1^- = \sum_{i=1}^n GTDi \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n T_i X_i - d_2^+ + d_2^- = \sum_{i=1}^n GCS_i \quad (3)$$

$$d_1^+, d_1^-, d_2^+, d_2^- \geq 0 \quad (4)$$

Modelde  $X_i$  i. hat için yapılması gereken sefer sayısı,  $K_i$  i. hatta kullanılan günlük ortalama otobüs kapasitesi,  $GTDi = i.$  hat için günlük yolcu talep değeri,  $T_i$  i. hat için ortalama günlük sefer süresi,  $GCS_i = i.$  hat için günlük çalışma süresi,  $d_1^+, d_1^-, d_2^+, d_2^-$  pozitif ve negatif sapma değişkenlerini ifade etmektedir. Modelin karar değişkeni, Çorlu Belediyesi'ne ait şehir içi otobüs hatlarıdır. Model amaç fonksiyonu (1), (2) ve (3) hedef kısıtlarına ait pozitif sapma değişkenleri toplamının minimize edilmesi şeklinde eşit öncelikli olarak oluşturulmuştur. Modelin hedef kısıtları (2) ve (3) eşitliklerinde gösterilmektedir. (2) eşitliğinde günlük yolcu talep değerine bağlı olan kapasite kısıtını, (3) eşitliği ise günlük çalışma süresine bağlı süre hedef kısıtını göstermektedir. Modelin sistem kısıtları belirlenirken, her hattın otobüs sefer sürelerini, her otobüs hattının aldığı yol uzunluğunu ve otobüs taşıma kapasitesinin o hattaki yolcu talebini karşılaması esas alınmıştır. Ayrıca; 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 belirlenmiştir.

#### 4. SEFER SAYISI OPTİMİZASYON MODELİ SONUÇLARI

Yapılan çalışmada; şehir içi otobüs işletim maliyetini minimize eden, yolcu memnuniyetini maksimum yapan bir sistem tasarımı ve şehir içi otobüs planlamasının daha verimli ve sürdürülebilir olarak planlanması konusunda yeni bir model geliştirilerek sefer çizelgeleme optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modelde binen yolcu sayıları; araç plaka bazında sefer başlangıcı ve sefer bitişi olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde TEKULAŞ Merkezi tarafından sunulan 2019'a ait veriler kullanılmış olup, 6 no'lu hat için günlük araç sefer sayıları, yolcu biniş verileri, sefer süreleri, sefer otobüs kapasiteleri verileri kullanılarak doğrusal hedef programlama modeli oluşturulmuştur. Model LINGO optimizasyon programı ile çözümlenerek, günlük optimum sefer sayıları ve sefer sıklıkları elde edilmiştir. Optimizasyon modelinden elde edilen sefer sayılarının, 6 no'lu hat için, 2019 yılı mevcut sistem sefer sayıları ile karşılaştırmalı analizleri yapılmış ve elde edilen maddi kazanımlar belirlenmiştir.

##### 4.1. Aylık Sefer Sayısı Optimizasyon Modeli Sonuçları

Çalışma kapsamında 6 no'lu hat için mevcut durum (2019 yılı) sefer sayısı ve geliştirilen model için hesaplanan sefer sayısı; saatlik, günlük, aylık ve yıllık verilerin detaylı analizi sonucunda elde edilmiştir Ay bazında yapılan analiz sonuçları ve değerlendirmeleri aşağıda verilmiştir.

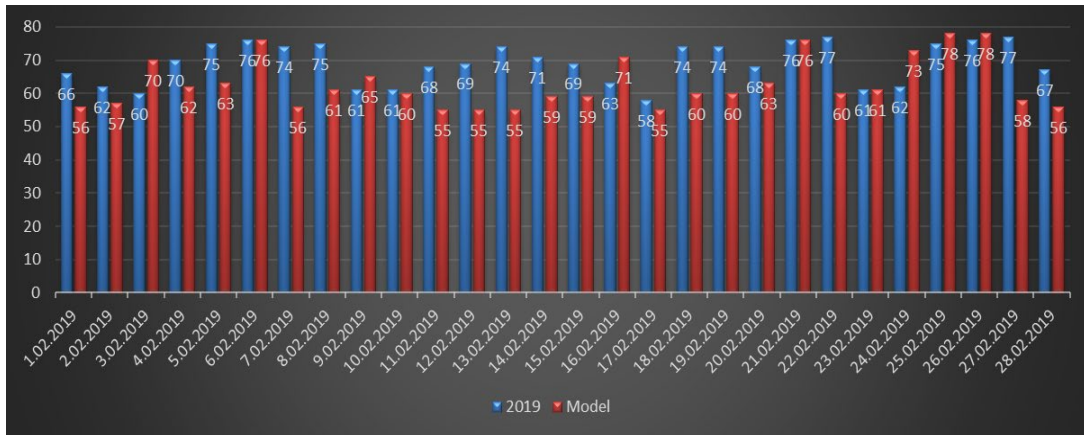
Ocak ayı için mevcut sistem (2019 yılı) ve geliştirilen günlük sefer sayısı optimizasyon model sonuçları şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4:

Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Ocak 2019)

2019 yılı Ocak ayı içerisinde toplam 2137 sefer gerçekleştirilmişken, sefer sayısı optimizasyon modeli sonuçlarına göre, öngörülen toplam sefer sayısı 1864 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Ocak 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin **Pazar günü (%18,75)** ve en düşük değişimin **Salı günü (%7,46)** gerçekleştiği görülmektedir. Şubat 2019 için; mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 5’de gösterilmiştir.

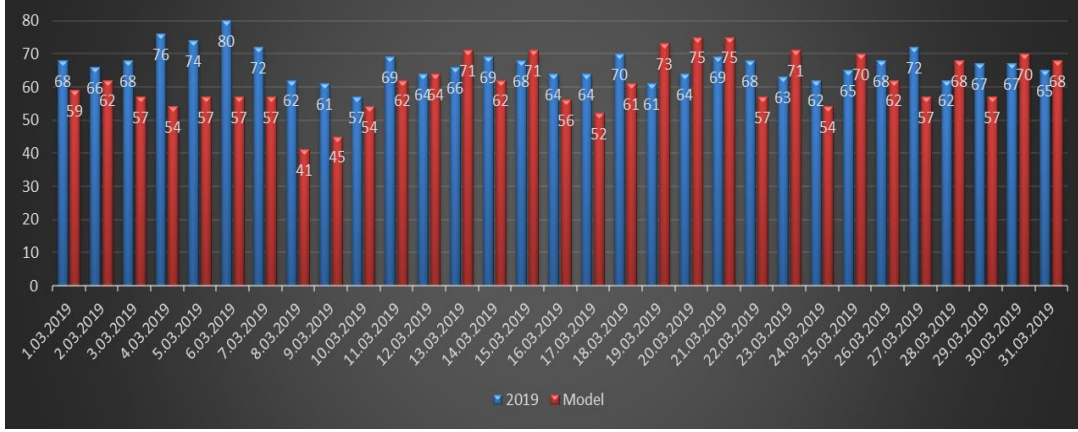


Şekil 5:

Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Şubat 2019)

Şubat 2019 içerisinde toplam 1939 sefer gerçekleştirilmişken, sefer sayısı optimizasyon modeli sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1758 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Şubat 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin, **Cuma günü (%18,05)** ve en düşük değişimin **Cumartesi günü (%4,83)** gerçekleştiği görülmektedir. Mart 2019 için, mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 6’da gösterilmiştir.

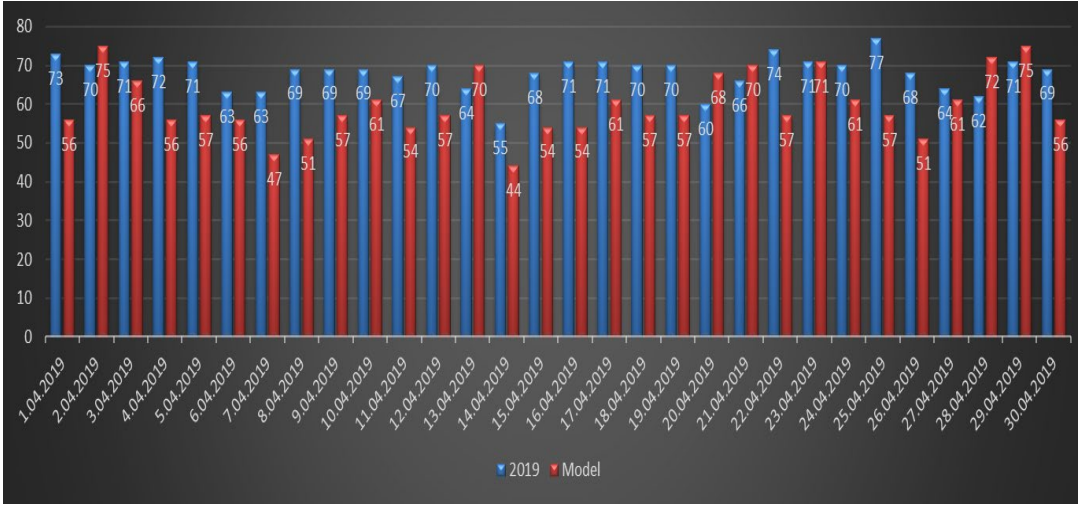




Şekil 6:

Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Mart 2019)

2019 yılı Mart ayı içerisinde toplam 2071 sefer gerçekleştirilmişken, sefer sayısı optimizasyon modeli sonuçlarına göre, öngörülen toplam sefer sayısı 1899 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Mart 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin **Cuma günü (%14,92)** ve en düşük değişimin **Perşembe günü (%2,94)** gerçekleştiği görülmektedir. Nisan 2019 için, mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7:

Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Nisan 2019)

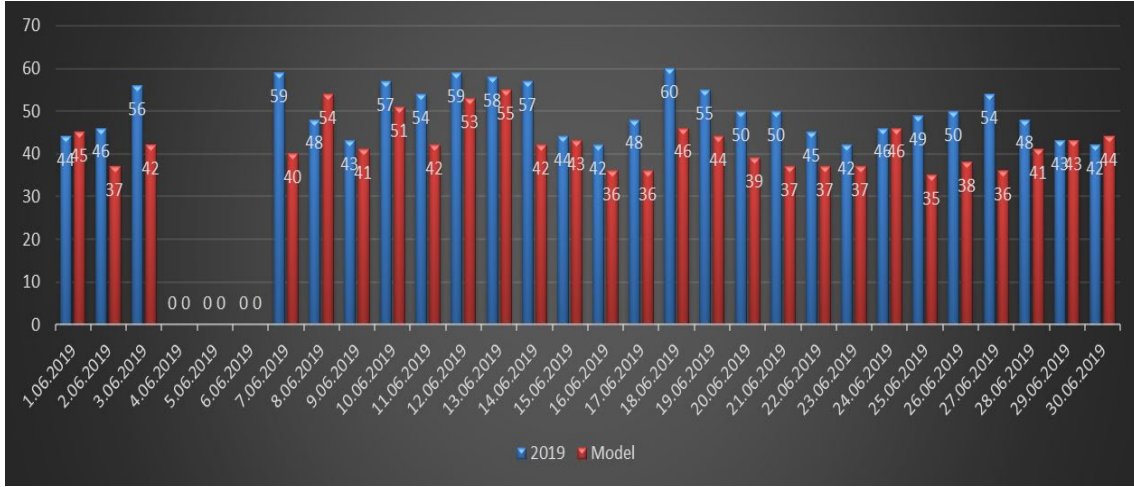
Nisan 2019 içerisinde toplam 2048 sefer gerçekleştirilmişken, model sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1789 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Nisan 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişiminin, **Cuma günü (%20)** ve en düşük değişimin **Cumartesi günü (%1,59)** olduğu gerçekleştiği görülmektedir. Mayıs 2019 için, mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8:

Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Mayıs 2019)

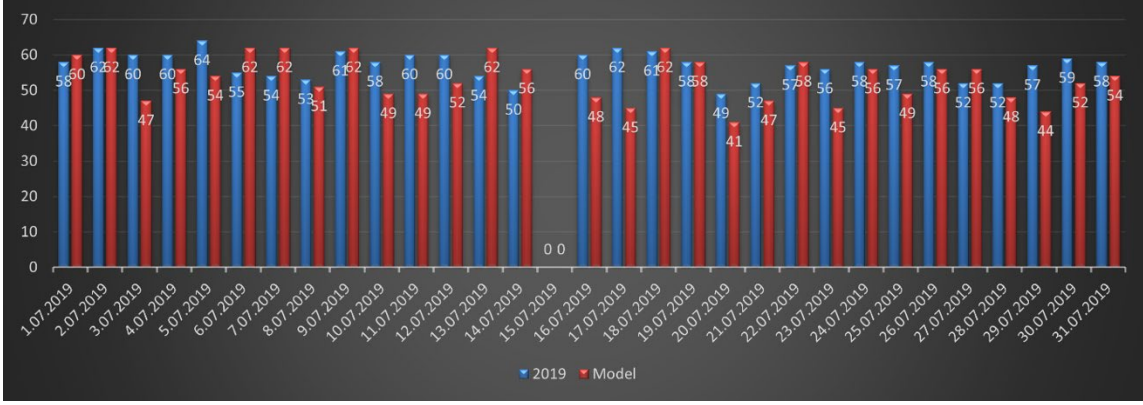
Mayıs 2019 içerisinde toplam 1921 sefer gerçekleştirilmişken, model sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1768 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Mayıs 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin, **Cuma günü (%17,91)** ve en düşük değişimin **Pazar günü (%3,51)** gerçekleştiği görülmektedir. Haziran 2019 için mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9:

Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Haziran 2019)

Haziran 2019 içerisinde toplam 1354 sefer gerçekleştirilmişken, model sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1140 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Haziran 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin, **Cuma günü (%25,92)** ve en düşük değişimin **Cumartesi günü (%0)** gerçekleştiği görülmektedir. Temmuz 2019 için mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 10’da gösterilmiştir.



**Şekil 10:**

*Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Temmuz 2019)*

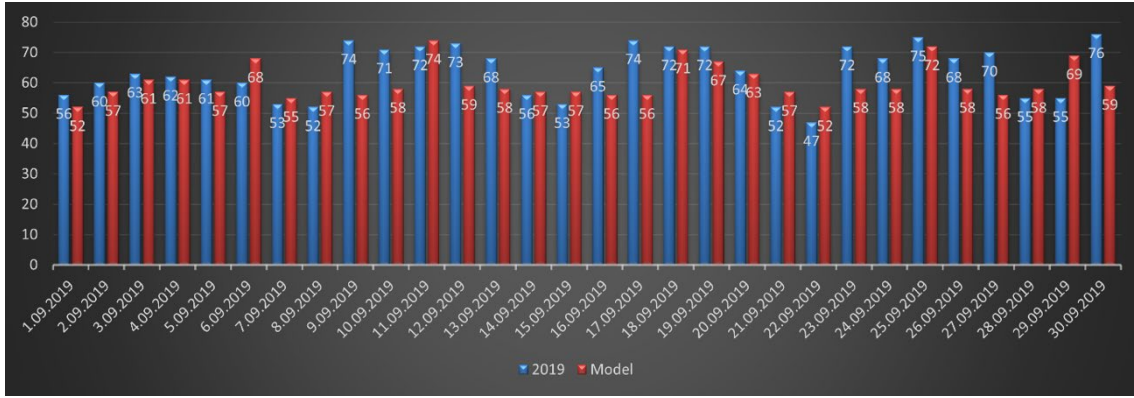
Temmuz 2019 içerisinde toplam 1715 sefer gerçekleştirilmişken, model sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1603 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Temmuz 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin, **Çarşamba günü (%15,25)** ve en düşük değişimin **Pazar günü (%1,92)** gerçekleştiği görülmektedir. Ağustos 2019 için, mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 11’de gösterilmiştir.



**Şekil 11:**

*Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Ağustos 2019)*

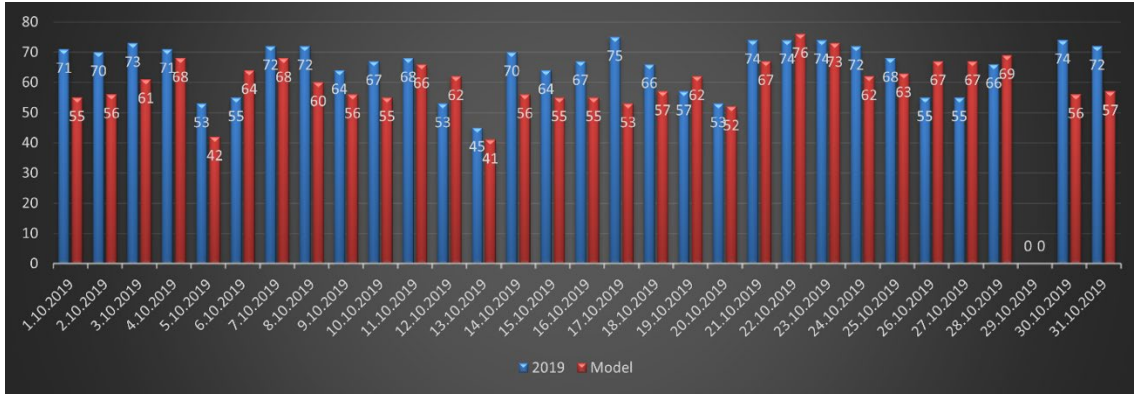
Ağustos 2019 içerisinde toplam 1488 sefer gerçekleştirilmişken, model sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1363 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Ağustos 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin, **Cuma günü (%18,64)** ve en düşük değişimin **Pazar günü (%1,89)** gerçekleştiği görülmektedir. Eylül 2019 için mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 12’de gösterilmiştir.



**Şekil 12:**

*Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Eylül 2019)*

Eylül 2019 içerisinde toplam 1919 sefer gerçekleştirilmişken, model sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1797 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Eylül 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin, **Pazartesi günü (%17,39)** ve en düşük değişimin **Cumartesi günü (%0)** gerçekleştiği görülmektedir. Ekim 2019 için, mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 13’de gösterilmiştir.



**Şekil 13:**

*Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Ekim 2019)*

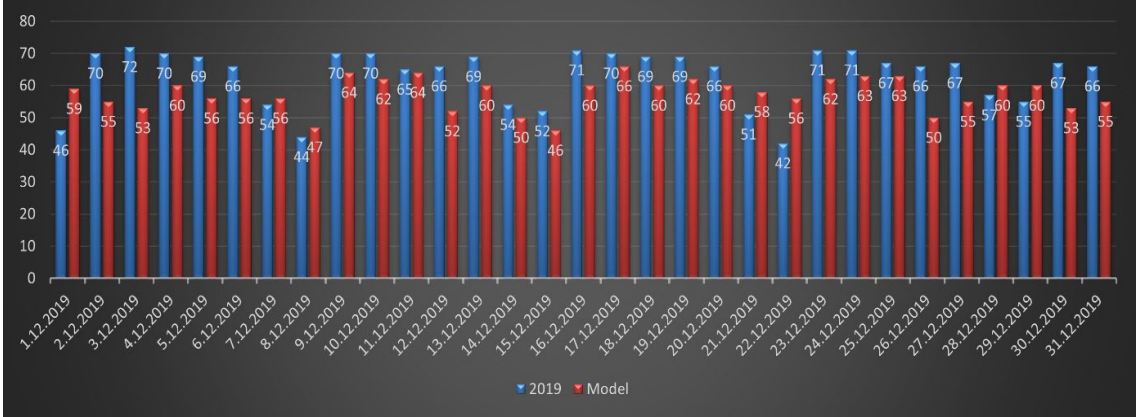
Ekim 2019 içerisinde toplam 1970 sefer gerçekleştirilmişken, sefer sayısı optimizasyon model sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1801 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Ekim 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin, **Perşembe günü (%19,44)** ve en düşük değişimin **Cumartesi günü (%5,45)** gerçekleştiği görülmektedir. Merkez verileri kapsamında gerçekleştirilen analizler sonucunda; Kasım 2019 için, mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 14’de gösterilmiştir.



**Şekil 14:**

*Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Kasım 2019)*

Kasım 2019 içerisinde toplam 1906 sefer gerçekleştirilmişken, model sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1722 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Kasım 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin, **Cuma günü (%17,65)** ve en düşük değişimin **Cumartesi günü (%0)** gerçekleştiği görülmektedir. Aralık 2019 için, mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları hesaplanmış olup, şekil 15’de gösterilmiştir.



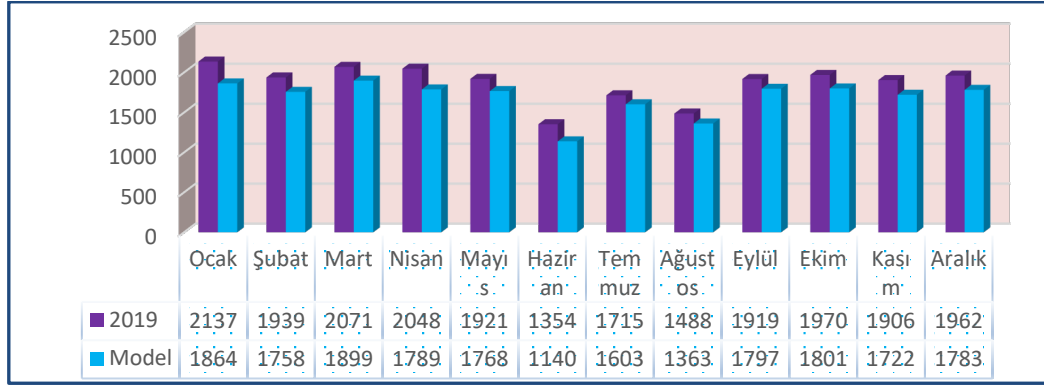
**Şekil 15:**

*Mevcut sistem ve geliştirilen model sonucuna göre sefer sayıları (Aralık 2019)*

Aralık 2019 içerisinde toplam 1962 sefer gerçekleştirilmişken, model sonuçlarına göre öngörülen toplam sefer sayısı 1783 olarak elde edilmiştir. Gün bazında yapılan analizlerde; Aralık 2019 için, mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları arasındaki en büyük değişimin, **Çarşamba günü (%23,53)** ve en düşük değişimin **Cumartesi günü (%3,70)** gerçekleştiği görülmektedir.

#### 4.2. Yıllık Sefer Sayısı Analizi

Çalışma kapsamında; 2019 yılı için ay bazında toplam sefer sayıları ekseninde analizler gerçekleştirilmiş olup, Şekil 16’da gösterilmiştir.



Şekil 16:

Aylık bazda mevcut durum ve geliştirilen model sefer sayıları

Elde edilen sonuçlara göre; ay bazında ortalama sefer sayıları değerlendirildiğinde; önerilen model için sefer sayılarının yılın tüm aylarında mevcut durum sefer sayılarından daha az olduğu görülmektedir. Mevcut duruma göre; 2019 yılında en yüksek sefer sayısı (2137 sefer), Ocak ayında, en az sefer sayısı ise (1354 sefer) Haziran ayında gerçekleşmiştir. Geliştirilen modele göre ise; en yüksek sefer sayısı (1899 sefer), Mart ayında, düşük sefer sayısı ise (1140 sefer) ile Haziran ayında optimize edilmiştir. Model sefer sayılarının mevcut duruma göre ay bazında değişimi Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Model sefer sayılarının mevcut duruma göre (2019 yılı) ay bazında değişimi

Aylar	Değişim (sefer sayısı)	Değişim (%)
Ocak	273	12,77
Şubat	181	9,33
Mart	172	8,31
Nisan	259	12,65
Mayıs	153	7,96
Haziran	214	15,81
Temmuz	112	6,53
Ağustos	125	8,40
Eylül	122	6,36
Ekim	169	8,58
Kasım	184	9,65
Aralık	179	9,12

Mevcut durum ve geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modeli sefer sayılarının yüzde olarak değişimi incelendiğinde; değişimin en yüksek olduğu ay Haziran ayı (%15,8) ve değişimin en düşük olduğu ay ise; Eylül ayı (%6,36) ayı olarak belirlenmiştir.

### 4.3. Yıllık Sefer Sayısı Analizi

Çalışma kapsamında geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modeli sonuçları, fayda-maliyet analizi açısından irdelenmiş olup, elde edilecek maddi kazanımların boyutu değerlendirilmiştir. Model sonuçlarına göre; mevcut sisteme kıyasla, günlük sefer sayılarının azalmasından dolayı elde edilen yeni sefer sayıları için maliyet kazancı (yakıt kazanç miktarı) belirlenmiş olup, 6 no'lu otobüs hattı için aylar bazında yakıt maliyetleri Tablo 2' de sunulmuştur.

**Tablo 2. Ay bazında yakıt maliyetleri kazanımı**

Aylar	Aylık Toplam Sefer Sayısı (2019 yılı)	Aylık Sefer Sayısı ( model)	Yakıt Maliyeti Kazanımı (TL)*
Ocak	2137	1864	14114,1
Şubat	1939	1758	9357,7
Mart	2071	1899	8892,4
Nisan	2048	1789	13390,3
Mayıs	1921	1768	7910,1
Haziran	1354	1140	11063,8
Temmuz	1715	1603	5790,4
Ağustos	1488	1363	6462,5
Eylül	1919	1797	6307,4
Ekim	1970	1801	8737,3
Kasım	1906	1722	9512,8
Aralık	1962	1783	9254,3
	Toplam Yakıt Maliyeti Kazancı		<b>110793,1</b>

\*Sefer başına ortalama yakıt 8,22 TL olarak alınmıştır (1 lt yakıt bedeli 6,29 TL)

Yukarıdaki grafikte de görüldüğü üzere; aylık yakıt maliyeti kazancı incelendiğinde; Ocak, Nisan ve Haziran aylarında yakıt maliyeti tabanlı maddi kazanımların boyutunun diğer aylara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarının yakıt kazancının diğer aylara göre, görece daha az olduğu belirlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada; şehir içi toplu taşıma planlamasında; sefer sıklıklarının belirlenmesi, sefer sayılarının optimum seviyesinin tespiti, bu seferlerin hangi zaman dilimlerinde ve hangi kapasitede gerçekleşmesi gerektiğinin maliyet, çevresel etki ve toplumsal refah ekseninde değerlendirilmiştir. Yolcu talebi ile araç arzı arasında uygun eşleşme yapıldığında, kullanılan araç sayısını minimize edecek ve mevcut yolcu talebine cevap verebilecek bir sefer çizelgeleme modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen sistem tasarımı ve sefer sayısı optimizasyon modeli kullanılarak, şehir içi ulaşım sistemi için ayrılacak bütçenin minimum kalması sağlanırken, uygun hizmet kalitesine ulaşılarak ve yolcu yükleme verileri ile en uygun sefer sıklığına ve optimum yolcu kapasitesine ulaşılması mümkün olmaktadır. Yapılan çalışmanın önerilen sistem tasarımı ile geliştirilen modelin işletme maliyetlerinin minimize edilmesi ve çevreye duyarlılığın, şehir içi toplu taşıma kaynaklı toplumsal refahın maksimize edilmesi açısından önemli faydalar sağlayacağı düşünülmektedir. Şehir içi sefer sayılarının optimize

edilmesi sonucunda; kişi başına düşen egzoz gazı salınımı azalacak, gürültü kirliliği ve ekonomik maliyetlerde azalma görülecektir. Geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modeli, öncelikle seçilen pilot bir hat için uygulanmış olup, simülasyon denemeleri ve gerçek uygulama sonrasında test edilerek tüm Çorlu genelinde yaygınlaştırılarak, uygulanması mümkündür.

Geliştirilen sefer sayısı optimizasyon modeli ile, gün içerisinde yapılan boş seferlerin minimize edilmesi mümkün olacak ve bu kapsamda oluşan maliyetin azaltılması sağlanacak ve sistemin verimi artırılmış olacaktır. Bu kapsamda; verimli ve sürdürülebilir bir sefer çizelgeleme sistemi ile yolcu konforu ile servis maliyeti arasında bir denge kurulması sağlanacaktır. İleride yapılacak benzer çalışmalarda; yolcu yoğunluğunda yaşanabilecek belirsizlikleri incelemek amacıyla geliştirilen modelin sonuçlarının simülasyon kullanılarak analiz edilmesi mümkün olabilir. Şehir içi toplu taşıma sistem planlamasında karar vericiler için büyük ölçekli sefer çizelgeleme problemlerinin çözümü genellikle uzun süre almakta ya da bu problemler için deneme yanılma yöntemi uygulanmakta, hatalar ve eksiklikler zaman içinde giderilmeye çalışılmaktadır. Bu çerçevede, gerçekleştirilen sefer çizelgeleme çalışması sonuçları ile, şehir içi toplu taşıma sistemlerinde zaman kaybı ve planlama maliyetlerinin azaltılabileceği de gösterilmiştir. İleride yapılacak benzer çalışmalarda; şehir içi toplu taşıma planlamalarının gerçekleştirilmesinde doğrusal hedef programlama yaklaşımı kullanılabileceği gibi, sezgisel optimizasyon yöntemleri ve bulanık modelleme yaklaşımları da uygulanarak sürecin optimize edilmesi mümkün olabilir. Ayrıca, doğrusal hedef programlama yöntemi kullanılarak, hedef kısıtları, farklı öncelik ve ağırlıklar modele dahil edilerek farklı sistem tasarımları oluşturulması mümkün olabilir. Bunun yanısıra; sistemi etkileyen diğer hedef yada sistem kısıtları eklenerek model geliştirilmesi mümkün olabilir. Çalışmada uygulanan doğrusal hedef programlama yaklaşımının tren, metro v.b. gibi diğer toplu taşıma sistem planlamaları için de uygulanarak, sonuçların analizi ve elde edilecek kazanımların değerlendirilmesi de sağlanabilir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadır.

## YAZAR KATKISI

Ulviye Polat ve Aysun Sağbaşı çalışmanın tüm aşamalarında; Melike Selen Dermenci ‘veri analizi ve yorumlama, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, son kontrol ve tam sorumluluk’ aşamalarında katkı sağlamıştır.

## TEŞEKKÜR

Çorlu Belediyesi ile TEKULAŞ Araç Takip ve Koordinasyon Merkezi’ne katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

1. Alp, S. (2008) Doğrusal hedef programlama yönteminin otobüsle kent içi toplu taşıma sisteminde kullanılması, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1 (13), 73-91.
2. 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. doi.org/10.1016/0968-090X(94)00011-S



3. Banks, J.H. (1990) Optimal headways for multi-route transit systems, *Journal of Advanced Transportation*, 24, 127–154. doi.org/10.1002/atr.5670240205
4. Baysal, I. (2019) Şehir içi otobüs seferlerinin senkronizasyonu için bir model önerisi: Denizli örneği, *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
5. 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. doi.org/10.1016/j.trb.2015.05.012
6. Ceder, A. (2002) Urban transit scheduling: framework, review, and examples, *ASCE Journal of Urban Planning and Development*, 128 (4), 225–244. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2002)128:4(225)
7. Ceder, A. (2007) *Public Transit and Operation. Theory, Modelling and Practice(1.Edition)*, UK: Butterworth-Heinemann.
8. 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.
9. Chakroborty, P. (2017) Optimal routing and scheduling in transportation: using genetic algorithm to solve difficult optimization problems, *Indian Institute of Technology Transportation Engineering*, 33.
10. Chang, S.C., Chung Y.C. (2005) From timetabling to train regulation—a new train operation model, *Information and Software Technology*, 47(9), 575-585. doi.org/10.1016/j.infsof.2004.10.008
11. 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.
12. Deri, A., Özuysal, M., Koçer, U., Çalışkanelli, S.P. (2011) Kentiçi otobüs işletiminde sefer çizelgeleme optimizasyonu, *9. Ulaştırma Kongresi Bildiriler Kitabı*, 233-244.
13. 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.
14. Furth, P.G., Wilson, W.H.M. (1981) Setting frequencies on bus routes: Theory and practice, *Transportation Research Record*, 818, 1-7.
15. Fournier, D. (2016) *Metro Energy Optimization through Rescheduling: Mathematical Models and Heuristic Algorithm Compared to MILP and CMA-ES. Diss*, Inria Saclay Ile de France.
16. 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*. doi: 10.1155/2013/375084, (2013)
17. Kalpakçı, A. (2013) Ara toplu taşıma sistemlerinin şehir içi otobüs hatları ile entegrasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
18. Kittelson ve Assoc, Inc., Parsons Brinckerhoff, Inc., KFH Group, Inc., Texam A&M Transportation Institute, ve Arup (2013) , *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, Transit Cooperative Highway Research Program (TCRP) Report 165, published by Transportation Research Board, Washington.

19. 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. doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.0079
20. Mesquita, M. (2008) *Solving Public Transit Scheduling Problems*, Universidade de Lisboa, Lizbon.
21. Oudheusden, D.L., Zhu, William (1995) Trip frequency scheduling for bus route management in Bangkok, *European Journal of Operational Research*, 83, 439-451. doi.org/10.1016/0377-2217(94)00362-G9
22. Özcan, T. (2018) Kentli toplu taşıma sistemlerinde sefer sıklığı optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
23. Özkaya, M.E. (2006) Doğrusal programlama yaklaşımı ile toplu taşıma sistemlerinin planlanması ve çözümlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
24. 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. doi.org/10.1002/atr.1195
25. Silman, L.A., Barzily, Z., Passy, U. (1974) Planning the route system for urban busses, *Computers & Operations Research*, 1(2), 201-211. doi.org/10.1016/0305-0548(74)90046-X
26. 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. https://doi.org/10.1016/S1570-6672(08)60039-2
27. Uludağ, N. (2010) Bulanık optimizasyon ve doğrusal hedef programlama yaklaşımları ile otobüs hatlarının modellenmesi, *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
28. Vuchic, R.V. (2005) *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*, John Wiley and Sons Inc., New Jersey.
29. Xiaofeng, M., Jianhua, G., Peng, C., Chaozhong, W. (2015) An inexact bus departure frequency model for traffic pollution control, *Transportation Information and Safety (ICTIS)*, 228-234. https://doi.org/10.1109/ICTIS.2015.7232195
30. Yua B., Zhongzhen Y., Suna X., Yaob B., Zenga Q., Jeppesenc E. (2011) Parallel genetic algorithm in bus route headway optimization, *Applied Soft Computing*, 11(8), 5081-5091. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.05.051