

Araştırma Makalesi

Kampüs içi ring seferi gerçekleştirecek servis filosunun tamsayılı bir programlama modeli ile optimizasyonu

Ömer ALGORABI^{1,*}, Yusuf Sait TÜRKAN¹, Amir FOROUMANDI²

¹ Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

² Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

*Correspondence: omer.algorabi@iuc.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1330207

Özet: Bu çalışmada, İstanbul'daki bir üniversitenin ana kampüsünde gerçekleştirilen ring seferlerinin en ekonomik şekilde gerçekleştirilebilmesi adına bir matematiksel model geliştirilmiş, farklı araç kısıtları ve maliyetleri gözeticilerle tanımlı seferlere atamalar yapılmıştır. Bu amaçla tanımlı saatlerde ve güzergahlardaki taşıma talebinin eksiksiz sağlanmasına yönelik en uygun otobüs filosunun seçilmesi ve filodaki araçların ataması gerçekleştirilmiştir. Tam sayılı bir programlama modeli ile optimum çözüm aranan problemde, tüm taleplerin karşılandığı minimum maliyetli bir çözüm elde edilmiştir. Ele alınan problemde, otobüs filosunun seçilmesi ve çizelgelemesi için deterministik bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Minimum otobüs kiralama maliyetini veren çözümü elde etmek için bir ticari çözücü kullanılmıştır. Ticari çözücü ile elde edilen sonuçlara göre; üniversite yönetiminin ring seferlerine olan talebi karşılayabilmesi için toplamda 13 araç kiralaması gerekmektedir. Mevcut üniversite stratejisine göre %26'lık bir iyileştirme sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Üniversite otobüs çizelgeleme, tamsayılı programlama, toplu taşımada optimizasyon

Optimization of the service fleet to carry out in campus ring travel with an integer programming model

Abstract: In this study, a mathematical model was developed in order to carry out the ring services in the main campus of a university in Istanbul in the most economical way, and assignments were made to defined services by considering different vehicle constraints and costs. For this purpose, the most suitable bus fleet was selected and the vehicles in the fleet were assigned in order to meet the transportation demand at the defined times and on the routes. In the problem for which an optimum solution is sought with an integer programming model, a solution with minimum cost has been obtained where all demands are met. In the considered problem, a deterministic optimization model is proposed for the selection and scheduling fleet of buses. A commercial solver is used to obtain the solution that gives the minimum bus rental cost. Based on the results obtained by the commercial solver, to meet the demand for ring services, the university administration needs to rent a total of 13 vehicles. An improvement of 26% was achieved compared to the current university strategy

Keywords: University bus scheduling, integer programming, optimization in public transport

1. Giriş

Günümüz küresel sosyoekonomik ve sosyokültürel yapıları dikkate alındığında ulaşım sistemleri modern toplumlarda günlük yaşamın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Yolcu taşımacılığında ulaşım sistemleri toplu ulaşım, şehirlerarası ulaşım, havalimanı, turizm, öğrenci, personel taşımacılığı gibi farklı birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemler yaşam kalitesi üzerinde önemli bir role sahiptir, zaman, konfor, stres, para. Özellikle metropol şehirlerde ulaşımın can damarı olduğu sıklıkla söylenir (Peker ve Eliyi, 2022).

Otobüsler, dünya genelinde toplu ulaşımın ana araçlarından biridir. Otobüslerin olmaması, mevcut otobüs tiplerindeki kısıtlamalar, sürekli trafik ve çok geniş kapsama alanları dahil olmak üzere birçok faktör otobüs ulaşım sistemlerini etkiler. Sonuç olarak, istenen sonuca ulaşmak için üst düzey özelleşmiş bir matematiksel modele ihtiyaç duyulmaktadır (Osman ve Al-Sanousi, 2015).

Çizelgeleme, verimli bir ulaşım sistemi oluşturmada önemli bir konudur. Bu tür sistemler genellikle günlük bazda yetersiz çalıştırılır ve bu da çoğu zaman muazzam maliyet aşımına yol açar. Otobüs ulaşım sistemlerinde çizelgeleme, sistemin etkinliğinin ve doğruluğunun belirlenmesini sağladığı için en önemli fonksiyondur. Günümüzde kaynaklar sınırlıdır ve otobüs ulaşım sistemlerini işletmek maliyetlidir (Osman ve Al-Sanousi, 2015).

Okul servis otobüsü çizelgeleme problemi, öğrencilerin ve çalışanların ulaşımı için okul otobüsü filosunun yönetiminde önemli bir sorundur; her öğrenci ve çalışan, bu öğrencilerin ve çalışanların her birinin talebini karşılamak için verimli bir şekilde yönlendirilmesi gereken belirli bir otobüse atanmalıdır. Özellikle günümüzde servis otobüslerinin kiralama maliyetlerinin arttığı düşünüldüğünde; problemin minimum kiralama maliyetiyle optimize edilmesi oldukça önemlidir. Bu kapsamda öğrenci ve çalışanların servis taleplerini karşılayacak servis filosunun optimizasyon ihtiyacı günümüzde sıklıkla karşılaşılan bir problemidir.

Bu çalışmada, İstanbul'daki bir üniversitenin kampüsündeki servis çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Dört farklı güzergah bulunan kampüste, en yoğun saatlerdeki yolcu talebini karşılayacak en ekonomik servis filosunun belirlenmesine yönelik bir çizelgeleme gerçekleştirilmiştir. Problem, tamsayı programlama ile modellenmiş ve ticari bir çözücü kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışmada giriş kısmından sonra literatür inceleme sonucunda ele alınan problem ile ilgili yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü kısımda problemin matematiksel gösterimi verilmiş ve dördüncü bölümde elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Son bölüm olan sonuç kısmında ise çalışmanın genel bir değerlendirmesi ve geleceğe yönelik önerilere yer verilmiştir.

2. Literatür inceleme

Toplu taşımada optimizasyon problemleri genel olarak, atama, rotalama, çizelgeleme olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır. Yolcu taşımalarına yönelik problemlerde atama problemleri önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu problemlerde maksimum yolcu kapasitesini elde etme, minimum maliyet, minimum karbon salınımı gibi tekil amaçlar olabildiği gibi birden çok amaca yönelik filo optimizasyonu çalışmaları da literatürde yer almaktadır. Literatürde atama-rotalama çalışmalarının ilk örneği olarak gezgin satıcı problemi örnek gösterilmektedir. Dantzig vd. (1954), gezgin satıcı problemini tanımlamış ve doğrusal programlama ile probleme çözüm aramıştır. Filo optimizasyonu çalışmaları da atama problemleri içinde ele alınan bir konudur. Uçak filosu, gemi filosu ve otobüs filolarına yönelik farklı atama-rotalama-çizelgeleme üzerinde çalışmalar bulunmaktadır. Toplu taşıma sistemleri ile ilgili olarak literatürdeki çalışmalar, operasyon türlerine (toplu taşıma gerçekleştiren otobüsler, servis otobüsleri gibi) ve filo atama problemlerine (tek tip filo ataması problemi, çoklu filo ataması problemi gibi) göre değişkenlik göstermektedir (Chang ve Schonfeld, 1991a, 1991b, 1991c; Ker vd., 1995). Otobüs filo atama-belirleme problemlerinde otobüslerin rotaları, kalkış saatleri sabit olabildiği gibi bazı problemlerde esnek değerler de söz konusu olabilmektedir. Bu kapsamda belirlenmiş saat çizelgesi ve rotası için optimum filonun belirlenmesi çalışmaları (Chang, 1990; Chang ve Schonfeld, 1991a) dışında esnek rotalar ve saatlerin olduğu çalışmalar da (Becker ve Teal, 2011; Fu ve Ishkhanov, 2004; Diana vd., 2009; Horn, 2002; Jung ve Jayakrishnan, 2011; Kim ve Haghani, 2011; Luo ve Schonfeld, 2011a, 2011b; Quadrioglio vd., 2008; Quadrioglio ve Hall, 2006; Quadrioglio ve Li, 2009) araştırmacıların ilgisini çekmiş ve üzerinde çalışılmıştır. Bununla birlikte ilk yıllarda yapılan çalışmalarda genel olarak az kısıt ve çok varsayımla problemlere çözüm aranırken sonraki yıllarda meta sezgisel metotlardan

yararlanılan çalışmalarda varsayımlar azaltılarak çok daha geniş çözüm uzayı içerisinde uygun çözümler aranmaya başlanmıştır. Araç tiplerinin aynı olmadığı, araç ve taşıma kısıtlarının azaltıldığı bu problemlerde özellikle genetik algoritma, karınca koloni optimizasyonu, tabu arama, sürü zekası gibi çok sayıda sezgisel ve meta sezgisel metotlardan yararlanılan çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Chen vd., 2012; Ciaffi vd., 2012; Euchı ve Mraihi, 2012; Kim ve Schonfeld, 2012; Kuan vd., 2006; Schittekat vd., 2013).

Toplu taşıma sistemlerinde önerilen otobüs ve rota çizelgeleme modellerinin farklı uygulama alanlarında optimizasyon çalışmaları vardır. Chen vd. (2015) çalışmalarında, okul otobüsü çizelgeleme problemini ele almışlardır. Bao vd. (2018) çalışmalarında, otobüs servisinin optimizasyonu ile ilgili Çin'in Nanjing Lukou Uluslararası Havaalanında bir uygulama yapmışlardır. Sağlık sektörü için de servis optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Beaudry vd. (2010) çalışmalarında, Almanya'daki bir hastanede, hastaların dinamik ulaşımı problemini ele almışlardır. Bir başka çalışmada ise acil durumlarda hasta nakil talepleri için bir ambulans filosunun yönetimi ile ilgili çalışma yapılmıştır (Kergosien, Gendreau, Ruiz ve Soriano, 2014). Özellikle günümüzde çalışanların ulaşımı için servis otobüsleri gittikçe artmaktadır. Wanigasooriya ve Fernando (2013) çalışmalarında, çalışan taşımacılığında çoklu araç yolcu tahsisi ve güzergah optimizasyonu problemini ele almışlardır.

Literatürde, servis otobüsü ve rota çizelgeleme ile ilgili yapılmış çalışmalarda farklı amaçlarla problemlerin ele alındığı görülmüştür. Minocha ve Tripathi (2014) çalışmalarında, Hindistan'daki bir okulda kullanılacak otobüslerin sayısını ve otobüslerin katedeceği mesafeyi minimize etmeye çalışmışlardır. Bu problemdeki amaç toplam maliyetin minimize edilmesidir. Molenbruch vd. (2017) çalışmalarında, Belçika'da hasta naklinin gerçek hayattaki bir uygulamasını ele almışlar ve toplam seyahat süresini minimize etmeye çalışmışlardır. Bir başka çalışmada ise zaman bolluğu ile verilen servis hizmetinin zaman tutarlılığını sağlamak için zamandaki sapmalar minimize edilmeye çalışılmıştır (Feillet vd., 2014). Osman ve Al-Sanousi, (2015) çalışmalarında ise sadece araç sabit maliyetlerini dikkate alarak amaç fonksiyonlarını belirlemişlerdir. Bazı çalışmalar bir hedefi kullanma eğilimindeyken, bazıları bir amaçtan fazlasını içermektedir. Bir çalışmada (Caceres vd., 2017) maliyet ve zaman perspektiflerinden çoklu amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Çalışmadaki amaç fonksiyonu, otobüs sayısının, seyahat sürelerinin ve seyahat mesafelerinin minimize edilmesidir. Melachrinoudis vd. (2007) çalışmalarında, hasta/hastane alanında toplam seyahat maliyetinin, varış süresindeki gecikme ve müşterilerin toplam rahatsızlık süreleri olarak kullanılan seyahat süresinin minimize edilmesi gibi çok amaçlı fonksiyonlar kullanılmıştır. de Souza Lima vd. (2017) çalışmalarında ise Melachrinoudis vd., (2007) ile hemen hemen aynı amaç fonksiyonlarını paylaşmış, aynı zamanda diğer yayınlarda rastlanmayan, sürücüler arasındaki rota iş yükünü dengelemeyi amaçlamıştır.

Servis otobüsü çizelgeleme problemini ele alan yazarlar problem boyutunun büyüklüğüne göre çözüm yöntemlerine başvurmuşlardır. Yalçındağ (2020) çalışmasında, uluslararası bir şirketin çalışanlarının ulaşım araçlarının yönetim süreci, matematiksel modelleme tekniği ile ele almış ve optimal çözüm için ticari bir çözücü kullanmıştır. Bir başka çalışmada ticari çözücü, hastaların acil olmayan nakli ile ilgili olarak gerçek dünyadaki bir sağlık hizmeti uygulamasından kaynaklanan çok depolu bir rota planlama problem için kullanılmıştır (Detti vd., 2017). Problem boyutu büyüdükçe çözüm süresi uzayacağından, bazı çalışmalarda sezgisel ve metasezgisel yaklaşımlardan yararlanılmıştır. Wanigasooriya ve Fernando (2013) çalışmalarında, çalışan taşımacılığı için çok amaçlı yolcu tahsisi ve rota optimizasyonu problem genetik algoritma kullanılarak ele alınmıştır. Spada vd. (2005) çalışmalarında ise ulaşım talebinin bilindiği ve otobüs seferlerinin önceden planlanabildiği okul otobüsü rotalama ve çizelgeleme problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için benzetim tavlama metasezgisel algoritması önerilmiş ve otobüs sisteminin hizmet düzeyi ve ders başlamadan önce çocukların otobüs içinde ve okulda zaman kayıplarını en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Bir başka çalışmada da, hastaların bakım üniteleri arasında ulaşım sorununu çözmek için bir tabu arama algoritması kullanılmıştır (Kergosien vd., 2008). Çalışmadaki amaç fonksiyonu toplam maliyetin minimize edilmesidir. Literatürde problemin çözümü için daha çok melez yöntemlerin geliştirildiği görülmüştür. Ünsal ve Yiğit (2018), yapay zeka ve kümeleme tekniklerini birlikte kullanarak okul otobüsü rotalama probleminin optimizasyonu için bir yöntem geliştirmişlerdir. Genetik algoritma kullanılarak her servis aracı için en uygun rotanın belirlenmesi amaçlanmıştır. Aynı problem için, Minocha ve Tripathi (2014) çalışmalarında, genetik algoritma ve yerel arama'yı birleştirerek melez bir metasezgisel kullanmışlardır. Schittekat vd. (2013)

çalışmalarında ise bu problem için bir karışık tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Ardından, problemin büyük örneklerini çözmek için değişken komşuluk azaltma (VND) yöntemini ve ağırlıklı bir algoritmayı kullanmışlardır. Bir başka çalışmada da karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) ve değişken komşuluk araması (VNS) uygulanarak melez bir yöntem geliştirilmiştir (Euchi ve Mraih, 2012).

Son yıllarda okul servis filosunun optimizasyonu alanlarında yapılan çalışmaların bazıları Tablo 1’de verilmiştir. Her problem kendi özel amaç ve kısıtlara sahip olduğundan, problemi optimum değere yaklaşır farklı metodolojilerin uygulandığı görülmüştür.

Tablo 1. Okul servis otobüsü çizelgeleme çalışmaları

Yazar	Yıl	Problem	Yöntem
Bögl vd.	2015	Okul otobüsü rotalama ve çizelgeleme probleminin optimizasyonu	Sezgisel çözüm
Chen vd.	2015	Otobüs sayısı ve toplam seyahat mesafesinin optimizasyonu	Tavlama benzetimi ile yerel arama
Sarubbi vd.	2016	Otobüs durak sayısının optimizasyonu	Sezgisel çözüm
Ünsal ve Yiğit	2018	Okul servisi rotalama probleminin optimizasyonu	K-ortalamlar, genetik algoritma
Sánchez-Ansola vd.	2020	Okul servisi rotalama probleminin optimizasyonu	Bulanık optimizasyon
Shang vd.	2021	öğrenci otobüsü ataması ve otobüs rotalamasının optimizasyonunu	Artırılmış Lagrange gevşeme tekniği, döngüsel blok koordinat iniş yöntemi
Köksal Ahmed vd.	2022	okul otobüsü mesafe ve ulaşım zamanı optimizasyonu	Pekiştirmeli öğrenme, genetik algoritma

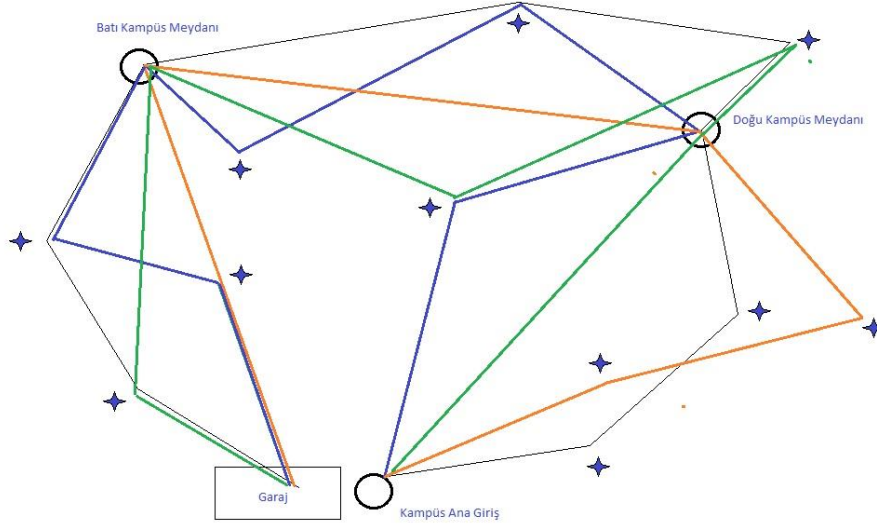
Bu makale çalışmasında, Türkiye’deki bir üniversitenin servis filosunun çizelgelemesi problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem için bir tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Bir gerçek hayat probleminin çözümünü içeren bu çalışmanın, okul servis optimizasyonu alanında literatüre katkı sağlayacaktır.

3. Kampüs servis filosunun tamsayılı bir model ile optimizasyonu

Bu çalışmada, İstanbul’daki bir üniversite kampüsünde otobüs filosunun seçilmesi ve çizelgelemesi problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem için deterministik bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Çalışmanın amacı, üniversite kampüsünde saat 06.00-10.30 arasındaki yoğun ring seferlerinde (pik saatlerde) olan talebin karşılanmasıdır. Talebi karşılayacak kadar farklı kapasitelere sahip dört tipteki otobüs-minibüsten seçilerek optimum maliyet elde edilmiştir.

3.1. Problemin tanımı

Bir üniversite kampüsünde tanımlanmış saatlerde, mavi, turuncu, siyah ve yeşil olmak üzere tanımlanmış dört farklı güzergah için ring seferleri yapılmaktadır. Her bir seferin sefer çizelgesinde tanımlı bir saati ve rotası bulunmakla birlikte tüm rotalar kampüs girişinde başlamakta ve girişin hemen yanındaki garajda son bulmaktadır. Üniversite bu hizmet için dört farklı tipteki otobüs-minibüsten oluşan filoya sahip bir firmayla yıllık anlaşma yapmıştır. Buna göre firma günlük tanımlı sefer saatlerini (çizelge sabittir) gerçekleştirecek bir filo (şoförlü) hizmeti verecektir. Üniversite kampüs içi güzergahları Şekil 1’deki gibidir.



Şekil 1. Üniversite kampüs içi güzergahlar

Üniversite her ay sonu bir sonraki ay için ihtiyaç duyduğu filoyu firmaya bildirecek ve bu filo ile ring seferleri gerçekleştirilecektir. Bir günde aynı otobüs en fazla 6 saat çalıştırılabilmektedir (anlaşma şartı olarak). Dört farklı tipteki otobüsün aylık kiralama maliyetleri ve kapasiteleri değişiklik göstermektedir. Seferlerde farklı saatler için farklı kapasite kısıtları bulunmaktadır. Talepler değerleri için altı aylık geçmiş verilerden yararlanılmıştır. Bu talepler, incelenen verilerin beklenen değeri hesaplanarak bulunmuştur. Üniversite taşıma taleplerini karşılarken bu işi en ekonomik bir filo ile gerçekleştirmek istemektedir. Bu çalışmada, minimum maliyetli filoyu tespit edebilecek çözüm aranmaktadır.

Ele alınan problemde, sefer saatlerine olan yolcu talepleri Tablo 2’de, hizmet sunacak firmanın sahip olduğu minibüs, midibüs ve otobüslere ait bilgiler Tablo 3’teki gibidir. Tablo 2’de de görüleceği üzere ring seferi hizmeti sunan şirketin dört farklı tipte toplam 20 aracı bulunmaktadır. Bu araçlardan minibüslerde ayakta yolcu alınmazken diğer araç tiplerinde ayakta yolcu alınabilmektedir. Kampüs ana girişinde farklı saatler için farklı yolcu talepleri geçmiş verilerden yararlanılarak oluşturulmuştur. Üniversite taşıma taleplerini karşılarken bu işi en ekonomik bir filo ile gerçekleştirmek istemektedir. Bu çalışmada, minimum maliyetli filoyu tespit edebilecek çözüm aranmaktadır.

Tablo 2. Sefer saatleri ve hat tiplerine göre yolcu talepleri

Sefer saatleri	Siyah hat (sefer süresi 30 dk) yolcu sayısı	Mavi hat (sefer süresi 15 dk) yolcu sayısı	Turuncu hat (sefer süresi 15 dk) yolcu sayısı	Yeşil hat (sefer süresi 20 dk) yolcu sayısı
06:00	7	2	2	3
06:15	14			11
06:30	27	10	6	25
06:45	40			38
07:00	50	21	16	41
07:15	51	24	18	43
07:30	52	26	20	41
07:45	55	32	24	41
08:00	57	33	28	43

Tablo 2 (devamı). Sefer saatleri ve hat tiplerine göre yolcu talepleri

08:15	60	35	30	47
08:30	59	43	33	40
08:45	60	38	30	41
09:00	150	40	24	45
09:15	52	30	19	41
09:30	54	24	13	34
09:45	50	22		25
10:00	45	20	25	18
10:15	43			15
10:30	46	22	20	14

Tablo 3. Araç bilgileri

Araç tipi	Maksimum yolcu sayısı	Ayakta yolcu durumu	Aylık bir araç kiralama ücreti	Kiralanabilecek maksimum araç
Minibüs	20	Ayakta yolcu yok	10 bin TL	7
Midibüs	30	Ayakta yolcu var	15 bin TL	6
Midibüs	41	Ayakta yolcu var	18 bin TL	4
Otobüs	60	Ayakta yolcu var	25 bin TL	3

3.2. Varsayımlar

- 1) Seferde olan otobüs sefer süresi sonunda kampüs girişinde yer alan otoparkta beklemeye geçmekte, sonrasında herhangi bir rotada herhangi bir saate atanabilmektedir.
- 2) Aynı hat ve sefer saatine talebi karşılamak için birden fazla araç atanabilir.
- 3) Servis otobüsü için olan talep deterministiktir.
- 4) Seferde olan bir otobüsün seferi tam olarak tanımlanan sürede tamamlayacağı öngörülmektedir.
- 5) Bir günde aynı otobüs en fazla altı saat çalıştırılabilmektedir.

3.3. Deterministik tamsayılı programlama modeli

Özel ulaşım sistemlerinde filo çizelgeleme ve otobüs seçimi için deterministik bir optimizasyon modeli sunulmuştur. Önerilen model, tamsayılı programlamaya dayanmaktadır. Model en yoğun (pik) saatlerdeki yolcu talebini karşılayacak en ekonomik servis filosunun belirlenebilmesi için otobüslerin en doğru şekilde çizelgenmesini amaçlamaktadır. En yoğun saatlerdeki talebin karşılanması durumunda, diğer saatlerdeki (yoğun olmayan saatler) talepler zaten karşılanabilecektir. Bu nedenle çalışmada sadece vurgulu saatler dikkate alınarak problemin büyüklüğü-karmaşası da azaltılmıştır. Problemin notasyonları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Matematiksel model notasyonları

Sembol	Tanım
I	Otobüs kümesi
J	Hat kümesi
T	Sefer saati kümesi
i	Otobüs indisi, $i=1,2,\dots,I$
j	Hat indisi, $j=1,2,\dots,J$
t, h	Sefer saati indisi, $t,h=1,2,\dots,T$
K_i	i . otobüsün kapasitesi
D_{tj}	t . sefer saatinde j . hat için olan talep
P_j	j . hattın sefer süresi
F_{tj}, F_{hj}	j . hat için t . ve h . seferlerin hareket saatleri
A_i	i . otobüsü kiralama maliyeti
Q_{thj}	1 $F_{tj} \leq F_{hj} \leq F_{tj} + P_j$, j . hat için sefer t ve sefer h arasında çakışma varsa, 0 aksi takdirde
V	Bir otobüsün günlük maksimum çalıştırılma saati

Tablo 5'te matematiksel modelin karar değişkenleri ve Denklem (1)-(7)'de modelin amaç fonksiyonu ile kısıtları verilmiştir.

Tablo 5. Matematiksel modelin karar değişkenleri

$Y_i =$	$\begin{cases} 1 & \text{eğer } i \text{ otobüsü kiralanırsa} \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases}$
$x_{ijt} =$	$\begin{cases} 1 & \text{eğer } i \text{ otobüsü } j. \text{ hattın } t. \text{ seferine atanırsa} \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases}$

$$\text{Min } \sum_{i=1}^I A_i Y_i \quad (1)$$

öyle ki;

$$\sum_{i=1}^I x_{ijt} K_i \geq D_{jt} \quad \forall j \in J \text{ ve } t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ijt} P_j \leq V \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ijt} Q_{jth} \leq 1 \quad \forall i \in I \text{ ve } h \in T \quad (4)$$

$$x_{ijt} \leq Y_i \quad \forall i \in I, j \in J \text{ ve } t \in T \quad (5)$$

$$Y_i = \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$x_{ijt} = \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \text{ ve } t \in T \quad (7)$$

Denklem 1’de matematiksel modelin amaç fonksiyonu verilmiştir. Ele alınan problemin amacı toplam otobüs kiralama maliyetinin minimize edilmesidir. Her hat ve sefer saatlerine olan talebin karşılanması, Denklem 2 ile ifade edilmiştir. Denklem 3 ile bir otobüsün maksimum çalıştırılabilir saat kısıtı sağlanmıştır. Denklem 4, aynı otobüse atanan tüm seferlerin hiçbir çizelgeleme çakışması olmamasını sağlar. Denklem 5, otobüsüne sefer atandığında o otobüsün kiralanmasını garanti eder. Denklem 6 ve 7 karar değişkenlerinin ikili değişkenler olmasını sağlayan kısıtlardır.

4. Bulgular

Otobüs ring seferleri çizelgelemesi problemi için oluşturulan matematiksel model, GAMS’te karşık tamsayı programlama çözücüyle çözülmüştür. Problemin modelini çözmek için kullanılan sistem, 64-bit Windows 10 Professional ve Intel(R) Core(TM)i7-8750H CPU 4.00 GHz işlemci, 16GB RAM ve 1TB sabit sürücüye sahip bir Dell PC'dir.

Optimum çözümde elde edilen araç atamaları ve ring seferleri çizelgeleme sonuçları Tablo 6 ve 7’de gösterilmiştir. Sonuçlara göre; üniversite yönetiminin ring seferlerine olan talebi karşılayabilmesi, servis sağlayıcının sahip olduğu yedi minibüsten ikisini, altı küçük midibüsten dördünü, dört büyük midibüsten hepsini ve üç otobüsten yine hepsini kiralaması gerekmektedir. Özet olarak üniversite yönetiminin en ekonomik şekilde yolcu taleplerini karşılamak için toplamda 13 araç kiralaması ve 227 bin TL maliyete katlanması gerekmektedir. Önerilen model çalıştırıldıktan sonra seçilen araç numaraları Tablo 6’da verilmiştir. Problemin çözüm süresi (elapsed time) 11,40 saniyedir.

Tablo 6. Araç atamaları

Atanan araçlar	Kapasite (Kişi sayısı)	Kiralama maliyeti
Araç 5	20	10 bin TL
Araç 7	20	10 bin TL
Araç 8	30	15 bin TL
Araç 9	30	15 bin TL
Araç 11	30	15 bin TL
Araç 12	30	15 bin TL
Araç 14	41	18 bin TL
Araç 15	41	18 bin TL
Araç 16	41	18 bin TL
Araç 17	41	18 bin TL
Araç 18	60	25 bin TL
Araç 19	60	25 bin TL
Araç 20	60	25 bin TL

Matematiksel model çözümünde servis sağlayıcının sahip olduğu 20 araçlık filodan, 13 araç seçildiğinde yolcu taleplerinin optimum şekilde karşılanacağı görülmektedir. Araç atama - çizelgeleme sonuçları ise Tablo 7’deki gibi oluşmuştur.

Tablo 7. Araç çizelgeleme sonuçları

Sefer saatleri	Siyah hat (sefer süresi 30 dk) yolcu sayısı	Mavi hat (sefer süresi 15 dk) yolcu sayısı	Turuncu hat (sefer süresi 15 dk) yolcu sayısı	Yeşil hat (sefer süresi 20 dk) yolcu sayısı
06:00	Araç 14	Araç 5, Araç 9, Araç 12, Araç 15	Araç 8, Araç 19, Araç 20	Araç 7, Araç 11, Araç 17
06:15	Araç 18			Araç 16
06:30	Araç 8	Araç 15	Araç 5	Araç 19
06:45	Araç 14			Araç 17
07:00	Araç 18	Araç 12	Araç 7	Araç 15
07:15	Araç 5, Araç 17	Araç 16	Araç 8	Araç 20
07:30	Araç 19	Araç 11	Araç 12	Araç 14
07:45	Araç 18	Araç 15	Araç 9	Araç 16
08:00	Araç 5, Araç 17	Araç 7, Araç 8	Araç 11	Araç 20
08:15	Araç 9, Araç 14	Araç 15	Araç 12	Araç 19
08:30	Araç 20	Araç 8, Araç 11	Araç 18	Araç 16
08:45	Araç 19	Araç 17	Araç 12	Araç 15
09:00	Araç 7, Araç 8, Araç 16, Araç 18	Araç 14	Araç 11	Araç 5, Araç 9
09:15	Araç 20	Araç 17	Araç 12	Araç 15
09:30	Araç 19	Araç 11	Araç 5	Araç 14
09:45	Araç 18	Araç 9		Araç 15
10:00	Araç 16, Araç 17	Araç 14	Araç 5, Araç 8	Araç 12
10:15	Araç 20			Araç 7
10:30	Araç 8, Araç 12, Araç 14, Araç 18, Araç 19	Araç 15	Araç 5	Araç 9, Araç 11

Tablo 8’de ise mevcut durumdaki üniversite araç kiralama politikası ile optimum sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre;, üniversite, önerilen optimum stratejiyi uygulamasıyla kampüs içi ring seferleri gerçekleştirecek servis filosunun kiralama maliyeti 80 bin TL daha az olacaktır.

	Araç Kiralama Maliyeti	Kiralanacak Araç Sayısı
Mevcut durumdaki üniversite araç kiralama politikası	307 bin TL	20
Tamsayıli programlama modelinin optimum sonuçları	227 bin TL	13

5. Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada, İstanbul'daki bir üniversitenin kampüsündeki otobüs ring seferleri çizelgelemesi problemi ele alınmıştır. Problem, deterministik tamsayı programlama ile formüle edilmiştir. Önerilen modelin formülasyonu bir ticari çözücüde ifade edilmiştir. Ticari çözücü ile elde edilen sonuçlara göre; üniversite yönetiminin ring seferlerine olan talebi karşılayabilmesi için toplamda 13 araç kiralama gerekmektedir. Bu şekilde uygulanacak çözüm ile üniversite otobüs kiralama maliyetlerinde önemli bir tasarruf sağlanabilecektir.

Problemde dikkate alınan değişkenlere ilave değişkenler eklendiğinde, yeni kısıtlar oluşturulduğunda ya da varsayımların azaltıldığı durumlarda problemin çözüm zorluğu artacak, NP-hard olacak ve sezgisel-meta sezgisellerden yararlanılması gerekecektir. Halihazırda mevcut problem için matematiksel model ile uygulanabilir bir çözüm elde edilebilmiştir. Geleceğe yönelik çalışmalarda daha büyük boyutlu problemler ele alınıp, probleme uygun metasezgisel yöntemlerin geliştirilmesi söz konusu olabilir. Problemin amacına yönelik olarak, gelecek çalışmalarda, otobüs kiralama maliyetleri dışında ulaştırma maliyetleri de amaç fonksiyonuna dahil edilebilir. Optimizasyon çalışmalarında elde edilen sonuçlar ilgili problem için en iyi çözümlerdir. Bununla birlikte problemle direkt ya da dolaylı ilişkili diğer problemler ya da sistemler, tekil ele alınan problemdeki optimum çözümü uygulanamaz kılabilir. Varsayımların azaltılması, stokastik durumların ele alınması veya farklı amaçların eklenmesi, farklı stratejilerin uygulanmasına neden olacaktır. Bu nedenle gelecek çalışmalarda, kampüs otobüs ring seferleri çizelgelemesi, kampüs içindeki diğer ulaştırma problemleri ile birlikte değerlendirilerek daha kapsamlı bir problem üzerinde de uygulama gerçekleştirilebilir. Bu şekilde farklı optimizasyon problemlerinin dikkate alındığı daha kapsamlı çalışmalar hayata geçirilebilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Çalışma herhangi bir destek almamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Bao, D., Gu, J., Di, Z., ve Zhang, T.** (2018). Optimization of airport shuttle bus routes based on travel time reliability. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2018/2369350>
- Beaudry, A., Laporte, G., Melo, T., ve Nickel, S.** (2010). Dynamic transportation of patients in hospitals. *OR spectrum*, 32(1), 77-107. <https://doi.org/10.1007/s00291-008-0135-6>
- Becker, A. J., ve Teal, R. F.** (2011). Next-Generation General Public Demand Responsive Transportation. *Transportation Research Board 90th Annual Meeting Transportation Research Board*, January, (11-4065).
- Bögl, M., Doerner, K. F., & Parragh, S. N.** (2015). The school bus routing and scheduling problem with transfers. *Networks*, 65(2), 180-203. <https://doi.org/10.1002/net.21589>
- Caceres, H., Batta, R., ve He, Q.** (2017). School bus routing with stochastic demand and duration constraints. *Transportation science*, 51(4), 1349-1364. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0721>
- Chang, S. K.** (1990). Analytic optimization of bus systems in heterogeneous environments. University of Maryland, College Park.

Chang, S. K., ve Schonfeld, P. M. (1991a). Optimization models for comparing conventional and subscription bus feeder services. *Transportation Science*, 25(4), 281-298. <https://doi.org/10.1287/trsc.25.4.281>

Chang, S. K., ve Schonfeld, P. M. (1991b). Integration of fixed-and flexible-route bus systems. *Transportation Research Record*, (1308). <https://trid.trb.org/view/364491>

Chang, S. K., ve Schonfeld, P. M. (1991c). Multiple period optimization of bus transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(6), 453-478. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(91\)90038-K](https://doi.org/10.1016/0191-2615(91)90038-K)

Chen, X., Kong, Y., Dang, L., Hou, Y., ve Ye, X. (2015). Exact and metaheuristic approaches for a bi-objective school bus scheduling problem. *PloS one*, 10(7), e0132600. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132600>

Chen, W., Yang, C., Feng, F., ve Chen, Z. (2012). An improved model for headway-based bus service unreliability prevention with vehicle load capacity constraint at bus stops. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/313518>

Ciaffi, F., Cipriani, E., ve Petrelli, M. (2012). Feeder bus network design problem: A new metaheuristic procedure and real size applications. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 798-807. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.796>

Dantzig, G., Fulkerson, R., ve Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the operations research society of America*, 2(4), 393-410. <https://doi.org/10.1287/opre.2.4.393>

de Souza Lima, F. M., Pereira, D. S., da Conceição, S. V., ve de Camargo, R. S. (2017). A multi-objective capacitated rural school bus routing problem with heterogeneous fleet and mixed loads. *4OR*, 15(4), 359-386. <https://doi.org/10.1007/s10288-017-0340-8>

Deti, P., Papalini, F., ve de Lara, G. Z. M. (2017). A multi-depot dial-a-ride problem with heterogeneous vehicles and compatibility constraints in healthcare. *Omega*, 70, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.08.008>

Diana, M., Quadrifoglio, L., ve Pronello, C. (2009). A methodology for comparing distances traveled by performance-equivalent fixed-route and demand responsive transit services. *Transportation planning and technology*, 32(4), 377-399. <https://doi.org/10.1080/03081060903119618>

Euchi, J., ve Mraih, R. (2012). The urban bus routing problem in the Tunisian case by the hybrid artificial ant colony algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.10.002>

Feillet, D., Garaix, T., Lehuédé, F., Péton, O., ve Quadri, D. (2014). A new consistent vehicle routing problem for the transportation of people with disabilities. *Networks*, 63(3), 211-224. <https://doi.org/10.1002/net.21538>

Fu, L., ve Ishkhanov, G. (2004). Fleet size and mix optimization for paratransit services. *Transportation Research Record*, 1884(1), 39-46. <https://doi.org/10.3141/1884-05>

Horn, M. E. (2002). Multi-modal and demand-responsive passenger transport systems: a modelling framework with embedded control systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(2), 167-188. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00043-4)

Jung, J., ve Jayakrishnan, R. (2011). High-coverage point-to-point transit: study of path-based vehicle routing through multiple hubs. *Transportation Research Record*, 2218(1), 78-87. <https://doi.org/10.3141/2218-09>

Ker, K. U. R. T., Kuo, H. F., ve Schonfeld, M. (1995). Optimal mixed bus fleet for urban operations. *Transportation research record*, 1503, 39-48. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1503/1503-006.pdf>

Kergosien, Y., Gendreau, M., Ruiz, A., ve Soriano, P. (2014). Managing a fleet of ambulances to respond to emergency and transfer patient transportation demands. In *Proceedings of the international conference on health care systems engineering* (pp. 303-315). Springer, Cham.

Kergosien, Y., Lenté, C., ve Billaut, J. C. (2008A) tabu search algorithm for solving a transportation problem of patients between care units. In International Workshop on Scheduling in Healthcare systems (SCHEALS'08), *Proceedings of the 1st International Conference on Applied Operational Research (ICAOR 2008)*, September, Lecture Notes in Management Science (Vol. 1, pp. 18-31).

Kim, T., ve Haghani, A. (2011). Model and algorithm considering time-varying travel times to solve static multidepot dial-a-ride problem. *Transportation research record*, 2218(1), 68-77. <https://doi.org/10.3141/2218-08>

Kim, M., ve Schonfeld, P. (2012). Conventional, flexible, and variable-type bus services. *Journal of Transportation Engineering*, 138(3), 263. : 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000326

Köksal Ahmed, E., Li, Z., Veeravalli, B., & Ren, S. (2022). Reinforcement learning-enabled genetic algorithm for school bus scheduling. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 26(3), 269-283. <https://doi.org/10.1080/15472450.2020.1852082>

Kuan, S. N., Ong, H. L., ve Ng, K. M. (2006). Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant colony optimization. *Advances in Engineering Software*, 37(6), 351-359. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.10.003>

Luo, Y., ve Schonfeld, P. (2011a). Online rejected-reinsertion heuristics for dynamic multivehicle dial-a-ride problem. *Transportation research record*, 2218(1), 59-67. <https://doi.org/10.3141/2218-07>

Luo, Y., ve Schonfeld, P. (2011b) Performance metamodels for dial-a-ride services with time constraints. *Transportation Research Board 90th Annual Meeting, online, compendium*. MathWorks, 2011. MATLAB R2011b Documentation. <http://www.mathworks.com>.

Melachrinoudis, E., Ilhan, A. B., ve Min, H. (2007). A dial-a-ride problem for client transportation in a health-care organization. *Computers ve Operations Research*, 34(3), 742-759. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.024>

Minocha, B., ve Tripathi, S. (2014). Solving school bus routing problem using hybrid genetic algorithm: a case study. In *Proceedings of the Second International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2012)*, December 28-30, 2012 (pp. 93-103). Springer, New Delhi.

Molenbruch, Y., Braekers, K., Caris, A., ve Berghe, G. V. (2017). Multi-directional local search for a bi-objective dial-a-ride problem in patient transportation. *Computers ve Operations Research*, 77, 58-71. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.07.020>

Osman, M. F. S., ve Al-Sanousi, M. M. (2015). A deterministic IP model for optimizing bus scheduling in a private transportation system. In *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, December, (pp. 244-248). IEEE.

Peker, G., ve ELİİYİ, D. T. (2022). Shuttle bus service routing: A systematic literature review. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 160-172. <https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/68582/1079523>

Quadrifoglio, L., Dessouky, M. M., ve Ordóñez, F. (2008). Mobility allowance shuttle transit (MAST) services: MIP formulation and strengthening with logic constraints. *European Journal of Operational Research*, 185(2), 481-494. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.030>

Quadrifoglio, L., Hall, R. W., ve Dessouky, M. M. (2006). Performance and design of mobility allowance shuttle transit services: bounds on the maximum longitudinal velocity. *Transportation science*, 40(3), 351-363. <https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0137>

Quadrifoglio, L., ve Li, X. (2009). A methodology to derive the critical demand density for designing and operating feeder transit services. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(10), 922-935. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.04.003>

Sarubbi, J. F., Mesquita, C. M., Wanner, E. F., Santos, V. F., & Silva, C. M. (2016, April). A strategy for clustering students minimizing the number of bus stops for solving the school bus routing problem. In *NOMS 2016-2016 IEEE/IFIP network operations and management symposium* (pp. 1175-1180). IEEE. doi: 10.1109/NOMS.2016.7502983.

Schittekat, P., Kinable, J., Sörensen, K., Sevaux, M., Spieksma, F., ve Springael, J. (2013). A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 518-528. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.025>

Shang, P., Yang, L., Zeng, Z., & Tong, L. C. (2021). Solving school bus routing problem with mixed-load allowance for multiple schools. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106916. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106916>

Spada, M., Bierlaire, M., ve Liebling, T. M. (2005). Decision-aiding methodology for the school bus routing and scheduling problem. *Transportation Science*, 39(4), 477-490. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0096>

Ünsal, Ö., ve Yiğit, T. (2018). Yapay zeka ve kümeleme teknikleri kullanılarak geliştirilen yöntem ile okul servisi rotalama probleminin optimizasyonu. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 7-20. <https://doi.org/10.21923/jesd.340220>

Wanigasooriya, J., ve Fernando, T. G. I. (2013). Multi-vehicle passenger allocation and route optimization for employee transportation using genetic algorithms. *International Journal of Computer Applications*, 64(20), 1-9. 10.5120/10747-5712

Yalçındağ, S. (2020). Employee shuttle bus routing problem. *Mugla Journal of Science and Technology*, 6(1), 105-111. <https://doi.org/10.22531/muglajsci.691517>