



OTOBÜS VE TREN HATTI ARASINDAKİ SENKRONİZASYON MAKSİMİZASYONU İÇİN TAMSAYILI PROGRAMLAMA MODELİ

Elif KAYMAZ^{1*}, Fatih ÇAVDUR²

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-9111-6209>

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-8054-5606>

Anahtar Kelimeler

Ulaşım Planlama,
Zaman Çizelgeleme,
Senkronizasyon,
Tamsayılı
Programlama

Öz

Toplu taşıma sistemlerinde genellikle birden fazla transfer gerçekleştirilerek istenilen konuma ulaşılmaktadır. Transfer gerçekleştirecek iki aracın senkronize olmaması, yolcuların transfer istasyonunda bekleme süresinin artmasına neden olmakta, bu durum toplu taşıma kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte transfer istasyonlarında fazla sayıda transferin gerçekleşmesi, ulaşım maliyetlerinin artmasına ve söz konusu istasyonlarda yığılmalara neden olmaktadır. Bu çalışmada, farklı ulaşım araçları arasındaki senkronizasyona odaklanılarak, otobüs ve tren hattı arasındaki senkronizasyon sayısını maksimize etmeyi amaçlayan tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Model, senkronizasyon sayısını etkileyen parametrelerden olan transfer yürüyüş süresinin yanısıra bekleme süresini de dikkate almaktadır. Modelin performansı, küçük bir ağda denenmiş ve sonuçları analiz edilmiştir.

*Sorumlu yazar; e-posta: eliifkaymaz@gmail.com

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1420465>

INTEGER PROGRAMMING MODEL FOR SYNCHRONIZATION MAXIMIZATION BETWEEN BUS AND TRAIN LINES

| Keywords | Abstract |
|--|---|
| <p><i>Transportation Planning, Timetabling, Synchronization, Integer Programming</i></p> | <p><i>In public transportation systems, the desired location is usually reached by making more than one transfer. The lack of synchronization of the two vehicles for the transfer causes increases the waiting time of the passengers at the transfer station and thus negatively affects the use of public transportation. On the other hand, a large number of transfers at transfer stations causes high transportation costs and accumulation at the corresponding stations. In this study, an integer programming model is developed that aims to maximize the number of synchronizations between bus and train lines focusing on the synchronization between different means of transportation. The model takes into account the waiting time as well as the transfer walking time, which is one of the parameters affecting the number of synchronizations. The performance of the model is tested on a small network and the results are analyzed.</i></p> |
| <p>Araştırma Makalesi</p> | <p>Research Article</p> |
| <p>Başvuru Tarihi : 15.01.2024</p> | <p>Submission Date : 15.01.2024</p> |
| <p>Kabul Tarihi : 10.08.2024</p> | <p>Accepted Date : 10.08.2024</p> |

1. Giriş

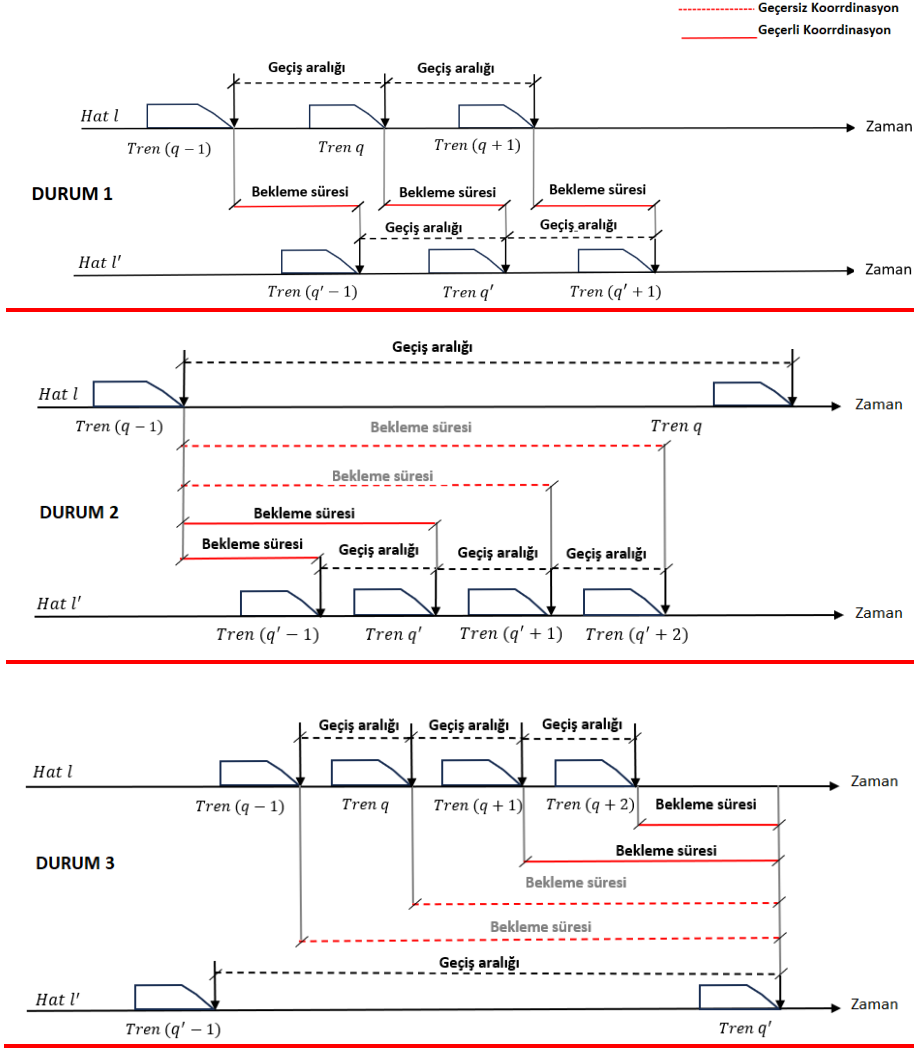
Büyük şehirlerde, artan trafiği yönetmek, yolcu ve yük taşımacılığını verimli hale getirmek, toplu taşıma kullanımını teşvik etmek gibi çeşitli amaçlar için ulaşım planlama çalışmaları yapılmaktadır. Ulaşım planlama, stratejik planlama, taktiksel planlama ve operasyonel planlama olmak üzere üç farklı sınıfta incelenmektedir (Lu, Han ve Zhou, 2018). Stratejik planlama, ulaşım ağlarının altyapıları ile ilgili uzun vadeli kararları ele alırken, taktiksel planlama, ulaşım ağı altyapı ve kaynaklarının etkin kullanımı ile ilgili kararları incelemektedir. Operasyonel planlama ise çoğunlukla trafik akış kontrolü, talep yönetimi veya çizelgeleme problemleriyle ilgili olan kararları ele almaktadır (Farahani, Miandoabchi, Szeto ve Rashidi, 2013).

Taktiksel ve operasyonel planlamadan oluşan zaman çizelgeleme, her seyahatin hareket zamanının belirlendiği toplu taşıma ağı planlama sürecidir. Zaman çizelgesi tasarım ve optimizasyonunda en zorlu konulardan biri senkronizasyon bir diğer ifadeyle eş zamanlı geliştir (Ceder, Golany ve Tal, 2001). Senkronizasyon, farklı hatlardan gelen ulaşım araçlarının bir transfer istasyonunda veya depoda koordine edilmesi olarak tanımlanırken, bu duruma uygun çizelgelerin oluşturulması problemleri, zaman çizelgeleme senkronizasyon problemleri olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 1’de iki tren hattı arasındaki senkronizasyonun ele alındığı üç farklı senkronizasyon durumu verilmektedir (Guo ve diğ., 2017). Şekil 1’de verilen ilk durumda, iki hattaki trenlerin tümü iyi senkronize edilmekte, l hattındaki yolcular, l' hattına sorunsuz bir şekilde geçebilmektedir. Bu durum, yolcular ve toplu taşıma işletmeleri tarafından istenen durumdur, yolcular kısa bir bekleme süresi ardından transfer gerçekleştirebilmektedir. İkinci durumda, l hattının $q - 1$ numaralı treninden gelen yolcular, l' hattının $q' - 1$, q' , $q' + 1$ ve $q' + 2$ trenlerine binebilseler de yolcular genellikle ilk gelen tren ile ayrılmak istediklerinden, q ve $q' - 1$ veya q ve q' trenleri arasında transfer gerçekleşmekte, $q' + 1$ ve $q' + 2$ trenine transfer gerçekleştirilmemektedir. Söz konusu durum fazla sayıda transfere izin verdiğinden toplu taşıma işletmelerinin maliyetlerinin artmasına ve transfer istasyonunda yığılmalara neden olmaktadır. Son olarak, üçüncü durumda, q ve $q - 1$ treni ile q' treni arasında transfer süresinin aşırı uzun olması nedeniyle geçerli koordinasyon sağlanamamaktadır. Bu durum, yolcuların uzun süre transfer istasyonunda beklemesine neden olmaktadır.

Ulaşım ağı alt yapısına göre, aynı ulaşım türleri arasında transfer gerçekleşebileceği gibi farklı ulaşım türleri arasında da sıklıkla transfer gerçekleşebilmektedir. Özellikle büyük şehirlerde toplu taşıma hizmetlerinin yoğun olarak kullanılması nedeniyle, herhangi bir başlangıç varış noktası çifti arasında, tek bir toplu taşıma sistemi kullanılamamakta, yolcular, birden fazla modu entegre bir şekilde kullanarak gitmek istedikleri konuma ulaşmaktadır (Dou, Meng ve Guo, 2015). Farklı ulaşım modları arasındaki transferler, genellikle otobüs ve tren hattı arasında gerçekleşmektedir. Trenlerin özel bir hatta hareket etmesi ve hızlı olması nedeniyle, otobüsten trene veya trenden otobüse sıklıkla transfer gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, ulaşım ağı alt yapısına farklı ulaşım araçları arasında da transfer gerçekleşmektedir.

Senkronize zaman çizelgeleri oluşturabilmek için senkronizasyonu etkileyen çeşitli parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Transfer yürüyüş süresi senkronizasyonu etkileyen önemli parametrelerden biridir. Ulaşım araçları arasında transfer yapacak yolcular, genellikle transfer gerçekleştirecekleri istasyona yürüyerek ulaşmaktadır. Transfer istasyonu uzaklığı, yürüyüş hızına bağlı olarak transfer istasyonuna ulaşım süresi değişmekte, bu durumun zaman çizelgeleri oluştururken dikkate alınması gerekmektedir. Senkronizasyonu etkileyen bir diğer parametre yolcuların transfer istasyonundaki bekleme süresidir. Bekleme süresinin uzun olması yolcuları negatif etkilemekle birlikte çok kısa veya sıfır bekleme süresinde çeşitli belirsizlikler ve değişkenlikler nedeniyle yolcular için huzursuzluk yaratmaktadır.



Şekil 1. Koordinasyon Çeşitleri (Guo ve diğ., 2017)

Bu çalışmada, literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınan farklı ulaşım türleri arasındaki senkronizasyona odaklanılarak, otobüs ve tren hattı arasındaki senkronizasyon sayısını maksimize etmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, literatürde yer alan Ibarra-Rojas ve Rios-Solis (2012) tarafından geliştirilen matematiksel modelin temel alındığı tamsayı programlama modeli geliştirilmiş, söz konusu çalışmadan farklı olarak bu çalışmada tren hattından kalkışların önceden belirli olduğu kabul edilerek, yalnızca otobüs hattı için uygun

çizelge oluşturulmuştur. Bu sayede, transfer istasyonlarına konumlandırılacak her yeni otobüs hattı için tren hat çizelgesi değiştirilmeden yalnızca otobüs hattı için uygun çizelge oluşturulacaktır. Özellikle büyük şehirlerde otobüs ve tren hattı arasında sıklıkla transfer gerçekleştiğinden, konumlandırılacak her yeni otobüs hattı için tren çizelgesinin değiştirilmesi verimsizliklere neden olabilmektedir. Bu durum dikkate alındığında çalışmada ele alınan problem kurgusunun gerçek hayatta sıkça karşılaşılan bir durumu yansıttığı söylenebilir. Bu duruma ek olarak, çalışmada transfer istasyonunun uzaklığına bağlı olarak farklı transfer yürüme süresi ve farklı bekleme süresi dikkate alınarak çözüme etkileri incelenmiştir. Son olarak, çalışmada farklı tren hattı periyotları için model çalıştırılarak periyot değişiminin çözüme etkisi analiz edilmiştir.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Sonraki bölümde kısa bir literatür taraması sunulmuştur. İzleyen bölümde problem tanımı verilmiştir. Bu şekilde sonraki bölümde (Yöntem) tamsayılı programlama modelinin detayları yer almaktadır. Yöntem kısmında önerilen tamsayılı programlama modelinin detayları sunulduktan sonra; izleyen bölümlerde, sırasıyla, önerilen modelin örnek bir problem üzerinde çalışması gösterilmiş ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Son bölümde çalışma özetlenerek, genel bir tartışma sunulmuştur.

2. Literatür Araştırması

Ulaşım ağ planlama problemlerindeki en zor problemlerden biri zaman çizelgesi senkronizasyon problemleridir (Ceder ve diğ., 2001). Söz konusu problemlerde genellikle amaç senkronizasyon sayısını maksimize etmek ve bekleme süresini minimize etmek olmakla birlikte farklı amaç fonksiyonları da dikkate alınmaktadır.

Zaman çizelgeleme senkronizasyon problemleri ile ilgili olarak yapılan bazı çalışmalarda senkronizasyon sayısını maksimize etmek amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalarda genellikle matematiksel programlama modeli önerilmiş, problem yapısının zorluğu nedeniyle sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin; Ceder ve Tal (2001) tarafından yapılan çalışmada, otobüs transfer istasyonuna eş zamanlı gelişleri maksimize etmek için, karışık-tamsayılı programlama modeli geliştirilmiş, büyük boyutlu örneklerin çözülmesi için sezgisel yöntem önerilmiştir. Ceder ve diğ. (2001) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, önceki çalışmaya benzer şekilde belirli bir otobüs ağı için senkronizasyon sayısını maksimize etmeyi amaçlayan bir zaman çizelgesi oluşturma problemi ele alınmıştır. Çalışmada, karışık-tamsayılı doğrusal programlama modeli sunulmuş ve büyük boyutlu problemleri çözmek için sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Eranki (2004), Ceder ve Tal (2001) tarafından yapılan çalışmadan farklı olarak otobüslerin gelişleri için bir alt ve üst sınır aralığı tanımlamış ve otobüslerin, izin verilen zaman aralığında geliş sayısını maksimize etmek amacıyla, karışık-tamsayılı programlama modeli formüle

etmiştir. Ibarra-Rojas ve Rios-Solis (2012) senkronizasyonu, yolcu transferleri için fayda sağlamak ve ortak duraklardaki otobüs tıkanıklığını azaltmak amacıyla kullanmışlardır. Çalışmada senkronizasyon sayısını maksimize etmek için tamsayılı doğrusal programlama modeli sunulmuş ve büyük boyutlu örnekleri çözmek için metasezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Ibarra-Rojas, López-Irarragorri ve Rios-Solis (2016) her bir hattın gün boyunca kendi planlama dönemine sahip olduğu, seyahat süreleri, sıklık ve geçiş süreleri gibi farklı parametreleri dikkate alan çok dönemli otobüs zaman çizelgeleme senkronizasyon problemini ele almışlardır. Çalışmada senkronizasyon sayısını maksimize etmek amacıyla tamsayılı doğrusal programlama formülasyonu sunulmuş ve modeli çözmek için metasezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Benzer şekilde Guo ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada da tren geçiş aralıklarının ve yolcu seyahat talebinin önemli ölçüde değiştiği farklı periyotlar için transfer senkronizasyonuna odaklanılmıştır. Çalışmada, senkronizasyon sayısını maksimize etmek için karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli önerilmiş ve büyük boyutlu örnekler için hibrit optimizasyon algoritması geliştirilmiştir.

Literatürde yapılan bazı çalışmalarda, yolcuların transfer istasyonunda bekleme süresini minimize etmeye odaklanılmıştır. Örneğin; Shafahi ve Khani (2010) tarafından yapılan çalışmada transfer bekleme süresini minimize etmek amacıyla karışık-tamsayılı programlama modeli sunulmuş, transfer istasyonlarındaki araçların ekstra durma süreleri yeni bir değişken seti olarak ele alınarak, model ikinci bir modele genişletilmiştir. Wu ve Tang (2012), bir otobüs ağındaki transfer bekleme süresini minimize etmek için karışık-tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli önermişlerdir. Model, aktarma istasyonlarının ağırlıkları, aktarma istasyonlarındaki düzensiz yolcu akışını ve yoğun saatlerde yol tıkanıklığı nedeniyle araçların bekleyebileceği belirli bir gecikmeyi içermektedir. Çalışmada modelin çözümü için genetik algoritma yaklaşımı geliştirilmiştir. Wu ve diğ. (2015) tarafından yapılan bir başka çalışmada bir tren ağındaki bekleme süresini belirleyebilmek için bir ikili değişken ikame yöntemi önerilmiş ve söz konusu yöntem transfer senkronizasyon modelini çözerken genetik algoritmada uygunluğu hesaplamak için kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada yoğun dönem ve yoğun olmayan dönem olmak üzere iki senaryo ele alınarak sonuçları analiz edilmiştir. Cao, Tang ve Gao (2020) tarafından yapılan çalışmada bir şehir içi raylı ulaşım sistemindeki tüm transfer yolcuları için, transfer istasyonundaki ağırlıklı bekleme süresini minimize etmek amacıyla, bir karışık tamsayılı programlama modeli geliştirmiş ve modeli çözmek için genetik algoritma önerilmiştir. Aksu ve Yılmaz (2014) heterojen geçiş aralıkları için ulaşım koordinasyon problemi ele almışlardır. Çalışmada heterojen geçiş aralıklarının faydalarını ölçmek için, karışık-tamsayılı programlama modeli geliştirilmiş ve modelin çözümü için genetik algoritma kullanılmıştır.

Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda zaman çizelgeleme senkronizasyon problemlerinin özel bir durumu olan ilk tren ve son tren çizelgeleme problemleri

ele alınmaktadır. İlk tren çizelgeleme problemleri yolcuların ilk treni bekleme süresi ile ilgilenirken, son tren çizelgeleme problemleri son trene transfer yapacak yolcuların erişilebilirliği ile ilgilenmektedir. İlk tren çizelgeleme problemleri ile ilgili gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki çalışmalarda, genellikle transfer bekleme süresi ve toplam bağlantı süresini minimize etmek amaçlanmıştır. Örneğin, Kang ve Zhu (2016) tarafından yapılan çalışmada yolcuların transfer bekleme süresini minimize etmeyi amaçlayan ilk tren çizelgeleme problemi için model oluşturulmuş ve modeli çözmek için tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır. Guo, Wu, Sun, Liu ve Gao (2016) transfer performansını iyileştirmek için hatların ve transfer istasyonlarının önemine dayalı bir zaman çizelgesi koordinasyon modeli önermişlerdir. Çalışmada bir alt ağ bağlantı yöntemi geliştirilmiş ve önerilen modeli çözmek için bir matematiksel programlama çözümü kullanılmıştır. Kang ve diğ. (2016) çalışmalarında transfer bekleme süresi ve kaçırılan tren sayısını minimize etmek amacıyla karışık-tamsayılı programlama modeli önermiş ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için yerel arama sezgiseli geliştirmişlerdir. Li, Yamamoto, Yan, Lu ve Ye (2020) yolcuların treni kaçırma konusundaki beklentileri, toleransları ve memnuniyetsizliği dikkate alarak yolcuların transfer bekleme süresi memnuniyetini maksimize etmek amacıyla model oluşturmuş ve modeli çözmek için yapay arı kolonisi algoritması geliştirmişlerdir. Chai, Tian ve Niu (2022) çalışmalarında ilk tren çizelgeleme problemi için yolcu talebini dikkate almıştır. Çalışmada seyahat süresi ve çizelge sapmasını minimize etmek için iki amaçlı bir doğrusal olmayan programlama modeli oluşturulmuştur. Chen, Shi, Claudel ve Hu (2023) tarafından yapılan çalışmada normal ve aralıklı trenlerin dikkate alındığı ilk tren zaman çizelgesi problemi ele alınmıştır. Çalışmada karışık-tamsayılı programlama modeli önerilmiş ve büyük boyutlu örneklerin çözümü için genetik tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Yüksel ve Öztürk (2024) çalışmalarında yolcu bekleme sürelerini minimize etmeyi amaçlayan ilk tren senkronizasyon modeli oluşturmuş, modelin çözümü için genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritması geliştirmişlerdir. Yine daha yakın tarihli Li, Kang, Sun, Wu ve Amihere (2024) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise ilk tren zaman çizelgeleme ve yolcu transfer yönlendirme problemleri birlikte ele alınmıştır. Çalışmada toplam bekleme süresini minimize etmek amacıyla karışık-tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirilmiştir.

Son tren çizelgeleme problemleri ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle transfer istasyonlarındaki bekleme süresine veya bağlantı süresinin minimize edilmesine odaklanıldığı görülmektedir. Kang, Wu, Sun, Zhu ve Gao (2015) tarafından yapılan çalışmada, son tren bağlantı süresi ve transfer bekleme süresini yansıtan, geçiş aralıklarını maksimize etmek için, son tren ağ transfer modeli oluşturulmuş ve modeli çözmek için genetik algoritma geliştirilmiştir. Kang, Wu, Sun, Zhu ve Wang (2015) tren operasyonlarında meydana gelen olayların neden olduğu tren gecikmelerini göz önünde bulundurarak son trenler için yeniden planlama modeli önermişlerdir. Çalışmada, çalışma süresini ve bekleme süresini minimize

etmek; ortalama transfer fazlalık süresini ve ağ erişilebilirliğini maksimize etmek için bir optimizasyon modeli oluşturulmuş ve modeli çözmek için genetik algoritma geliştirilmiştir. Kang ve Meng (2017) son tren zaman çizelgeleme problemini, bir karışık-tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak formüle etmiş ve orjinal modeli küçük boyutlu iki karışık-tamsayılı programa dönüştürerek büyük ölçekli problemleri çözmek için iki aşamalı ayrıştırma yöntemi önermişlerdir. Kang ve Zhu (2017) tarafından yapılan çalışmada, transfer fazlalık sürelerinin standart sapmasını minimize etmek ve metro ağlarında son tren transferlerini dengelemek için iki optimizasyon modeli önerilmiş ve modelleri çözmek için yeni bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Son tren çizelgeleme problemleri ile ilgili yapılan daha yakın tarihli çalışmalarda, hedefe ulaşılabilirliğe dayalı yöntemler geliştirilmiştir. Zhou, Wang, Yang ve Yan (2019) tarafından yapılan çalışmada varış noktasına ulaşılabilirliğe dayalı son tren çizelgeleme problemi, karışık-tamsayılı doğrusal programlama olarak formüle edilmiş ve önerilen modeli çözmek için CPLEX çözücüsü kullanılmıştır. Yao, Zhu, Shi ve Shang (2019), üst seviyede son trenlerin hizmet verdiği yolcu sayısını maksimize etmek ve transfer bekleme sürelerini minimize etmek; alt seviyede yolcu yol seçimini ele alan iki seviyeli bir model sunmuşlardır. Üst seviye modelin çözümü, genetik algoritma ile bulunmuş ve alt seviye model bir yarı atama algoritması ile çözülmüştür. Chen, Mao, Bai, Ho ve Li (2019a) tarafından yapılan çalışmada ağ erişilebilirliğini iyileştirmek için son trenlerin zaman çizelgesi senkronizasyonuna odaklanılmıştır. Çalışmada, erişilebilir başlangıç varış çiftlerini maksimize etmek ve varış noktalarına başarıyla ulaşan yolcuların yüzdesini maksimize etmek amacıyla bir karışık-tamsayılı programlama modeli önerilmiştir. Büyük ağları çözebilmek için, zaman çizelgesi tabanlı Dijkstra algoritması ile birleşen genetik algoritma geliştirilmiştir. Chen, Mao, Bai, Ho ve Li (2019b) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise heterojen transfer yürüyüş süresi dikkate alınarak son trenler arasındaki transfer erişilebilirliğine odaklanılmıştır. Çalışmada son tren tarifesi optimizasyonu için üç matematiksel model önerilmiştir: İlk model, sınırlı bekleme süresi altında son treni çizelgelemektedir. İkinci model uzun bekleme süresine izin verilen daha genel bir modeldir. Bu modelde karşılıklı transferlere izin verilerek, transfer erişilebilirliği ile bekleme süresinin uzatılması arasındaki dengeyi aramak için iki amaçlı model önerilmiştir. Son olarak üçüncü model de transfer yürüyüş süresinin heterojenliği, rastgele bir değişken olarak ele alınmıştır. Long, Meng, Miao, Hong ve Corman (2020), transfer yürüyüş süresi farklı kabul edilen son tren çizelgeleme problemi ele almışlardır. Çalışmada, hedeflerine başarıyla ulaşabilecek yolcu sayısını maksimize etmek ve sistemdeki son trenler için toplam operasyon bitiş süresini minimize etmek için iki amaçlı karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş ve önerilen çift amaçlı model için Pareto optimal çözümlerini bulmak amacıyla ϵ -kısıtı yöntemi kullanılmıştır. Guo ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, transfer sayısını maksimize etmek ve en uzun transfer senkronizasyon süresini minimize etmek amacıyla çok amaçlı karışık-tamsayılı programlama modeli geliştirilmiş ve modelin çözümü

için baskın olmayan sıralı genetik algoritma önerilmiştir. Ning, Peng, Zhu, Jiang ve Nielsen (2022) tarafından yapılan çalışmada, ulaşılabilir yolcu sayısını maksimize etmek ve tüm yolcuların toplam kalan seyahat mesafesini minimize etmek amaçlanmıştır. Çalışmada iki amaçlı karışık-tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş, modelinin tüm Pareto optimal çözümlerini üretmek için genişletilmiş ε -kısıtlama yöntemi kullanılmıştır.

Literatürde farklı ulaşım türleri arasındaki senkronizasyonu dikkate alan sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Kang ve diğ. (2019) son treni kaçıran yolcuların sayısını azaltmak ve başarılı transfer gerçekleştiren yolcu sayısını maksimize etmek amacıyla, son tren otobüs köprüleme koordinasyon modeli geliştirmişlerdir. Kang ve diğ. (2021) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise ilk tren ve otobüs köprüleme modeli geliştirilmiş, ilk trene yetişemeyen yolcuların otobüs ile gitmek istedikleri konuma ulaşmaları sağlanmıştır. Guo ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada ilk trenlerden otobüs servisine kesintisiz senkronizasyonları içeren ve toplam transfer süresini minimize etmeyi amaçlayan çok amaçlı karışık-tamsayılı programlama modeli sunulmuş ve modeli çözmek için genetik algoritma ile birlikte Alt Ağ Bağlantı yöntemi kullanılmıştır. Shrivastava ve Dhingra (2002) bir tren hattı ile besleyici otobüsler arasındaki transfer süresini minimize etmek için model geliştirmişler ve modelin çözümü için genetik algoritma kullanmışlardır. Dou ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada son tren için optimal bir otobüs tarifesi belirlemek ve transfer başarısızlıklarını azaltmak amacıyla karışık-tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirilmiştir. Ke, Nie, Liebchen, Yuan ve Wu (2020) bir demiryolu hava alanı entegrasyon hizmetini ele alarak iki ulaşım türü arasındaki senkronizasyonu iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Huang ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, çok modlu koordinasyon içeren son tren tarifesini optimize etmek için üç model önerilmiştir. İlk model, transfer sayısını maksimize etmekte iken, ikinci model, farklı taşıma modları arasında transferleri optimize etmektedir. Son olarak, üçüncü model çok modlu koordinasyonu maksimize etmektedir. Çalışmada ele alınan, üç modelde karışık-tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak formüle edilmiştir. Ning, Peng, Zhu, Xing ve Nielsen (2023) son treni kaçıran yolcular için taksi ve otobüs olmak üzere iki köprü hizmeti dikkate almıştır. Toplam yolcu seyahat süresi ve maliyeti minimize etmeyi amaçlayan iki amaçlı karışık-tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirilmiş olan çalışma, aynı zamanda metro hattı yoğunluğu, hava koşulları, ray arızaları, beklenmedik kazalar ve altyapı bakımına bağlı planlı kesintiler gibi durumlar için son yıllardaki çalışmalarda ele alınan köprüleme hizmetlerine de örnek oluşturmaktadır.

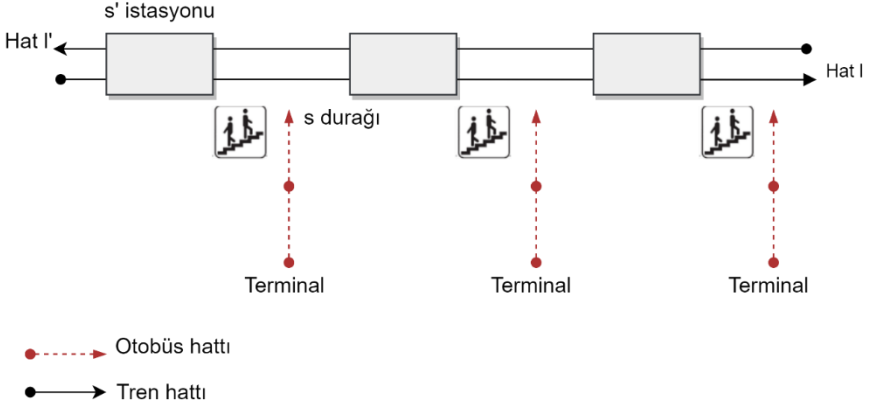
Benzer şekilde köprüleme hizmetlerinin kullanıldığı diğer çalışmalar incelendiğinde, örneğin; Chen ve An (2021) raylı taşıma sistemlerinde meydana gelen kesintiler için kısa dönüş ve ekspres rotalarını birleştiren etkili bir otobüs köprüleme stratejisi tasarlamayı amaçlamıştır. Çalışmada rota seçimi, otobüs dağıtımı ve otobüs tarife planlama sorununu eşzamanlı olarak çözmek için karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiş, modeli verimli bir

şekilde çözmek için tabu arama yöntemi kullanılmıştır. Geng, Zhang, Yang, Meng ve Qi (2024), metro hattındaki yoğun yolcu akışı nedeniyle, yolcuların seyahatlerini tamamlamaları için servis otobüslerinin kullanıldığı bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada metro ve servis otobüs hattı birleştirilerek entegre çizelge oluşturmak ve böylece yolcu memnuniyetini artırırken sistem işletme maliyetlerini azaltmak amaçlanmıştır. Liu, Zhang, Li ve Shi (basım aşamasında) özellikle tatil dönemlerinde artan şehirler arası yolcu talebini dikkate alarak metro ve tren hattı arasındaki sorunsuz koordinasyon sağlamayı amaçlamıştır. Çalışmada metro hattının zamansal kullanılabilirliğini maksimize etmek ve sabah erken saatlerde seyahat eden tren hattı yolcuları için aktarma bekleme sürelerini minimize etmek amacıyla iki amaçlı bir model önerilmiştir. Modeli çözmek için, uyarlanabilir komşu arama ve tavlama benzetimi tekniklerini içeren geliştirilmiş bir yapay arı kolonisi algoritması önerilmiştir. Li, Lu ve Yang (2024) çalışmalarında, metro ve otobüsler üzerindeki yolcu hareketleri arasındaki bağlantıları dikkate alarak, ağırlıklı yolcu bekleme süresini ve otobüs köprüsü hizmetlerinin işletme maliyetini minimize etmek için tamsayılı doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, iki farklı ulaşım türü olan otobüs ve tren hattı arasındaki senkronizasyon ele alınmıştır. Çalışmada tren hattından gelişlerin önceden belirli olduğu kabul edilerek yalnızca otobüs hatları için uygun çizelge oluşturulmuştur Buna ek olarak, çalışmada senkronizasyonu etkileyen parametrelerden olan transfer yürüyüş süresi ve bekleme süresi dikkate alınarak senkronizasyon sayısını maksimize etmeyi amaçlayan tamsayılı programlama modeli önerilmiştir. Farklı tren hattı periyotları için model çalıştırılmış ve farklı periyotların çözüme olan etkileri incelenmiştir.

3. Problem Tanımı

Bu çalışmada bir ulaşım ağında, en çok kullanılan toplu taşıma araçlarından olan otobüs ve tren hattı arasındaki senkronizasyon ele alınmaktadır. Çalışmada ele alınan ulaşım ağı, farklı istasyonlardan geçen otobüs hatlarından ve aynı istasyonlardan farklı yönlerde geçen tren hatlarından oluşmaktadır. Şekil 2'de otobüs ve tren hattı arasındaki transfer gösterilmektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi otobüs terminalinden kalkan ulaşım aracı otobüs hattının s durağında seyahatini tamamlamakta, s durağında otobüsten inen yolcular, transfer gerçekleştirecekleri istasyona (s' istasyonu) yürüyerek ulaşmaktadır. Transfer istasyonuna gelen yolcular gidecekleri konuma uygun olacak şekilde l hattına veya l' hattına transfer gerçekleştirmektedir. Söz konusu iki ulaşım hattı arasındaki transfer yürüyüş süresi, transfer istasyonu uzaklığı ve yürüyüş hızı gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada, yürüyüş hızı sabit kabul edilerek her transfer istasyonu için farklı transfer yürüyüş süresi dikkate alınmıştır.



Şekil 2. Ulaşım Ağı Gösterimi

Senkronizasyonu etkileyen bir diğer unsurda, yolcuların transfer istasyonunda bekleme süresidir. Bekleme süresi, tren ve otobüs hattındaki çeşitli değişkenlik ve belirsizliklerden etkilenmektedir. Tren hattında, trenlerin her istasyonda durma-kalkma süresi, diğer istasyonlardaki ekstra bekleme süresi; otobüs hattında ise trafik, kaza gibi çeşitli değişkenlikler ve belirsizlikler bulunmaktadır. Bu çalışmada söz konusu durum dikkate alınarak transfer istasyonlarındaki bekleme süresi için bir aralık belirlenmiş ve bu aralığa uygun gelişler için transferlerin gerçekleşmesine izin verilmiştir.

4. Yöntem

Bu çalışmada, Ibarra-Rojas ve Rios-Solis (2012) tarafından geliştirilen otobüs senkronizasyon modeli, otobüs ve tren hattı arasındaki senkronizasyonu dikkate alacak şekilde genişletilmiştir. Bu çalışmada, söz konusu çalışmadan farklı olarak tüm hatlar birlikte çizelgelenmemiş, tren hattından gelişlerin önceden belirli olduğu kabul edilmiştir. Bu sayede tren hattındaki çizelge değiştirilmeden tren hattından gelişlere uygun olacak şekilde, otobüs hattı için zaman çizelgesi oluşturulmuştur. Bununla birlikte, Ibarra-Rojas ve Rios-Solis (2012) tarafından ele alınmayan transfer yürüyüş süresi bu çalışmada dikkate alınarak, her transfer istasyonu için transfer istasyonu uzaklığına bağlı olarak farklı transfer yürüyüş süresi belirlenmiştir. Modelle ilgili detaylara aşağıda yer verilmiştir.

İndisler:

i : Otobüs hattı indisi, $i = 1, \dots, n_f$

p : Çizelgelenen otobüs sayısı indisi, $p = 1, \dots, f_i$

- q : Tren sayısı indisi, $q = 1, \dots, f_l$
 l : Tren hattı indisi, $l = 1, \dots, n_l$
 k : Transfer düğümleri indisi, $k = 1, \dots, n_k$
 K_{il} : i ve l hattında bulunan transfer düğümleri kümesi

Parametreler:

- n_l : Toplam otobüs hattı sayısı
 n_k : Toplam transfer düğümü sayısı
 n_l : Toplam tren hattı sayısı
 T_{max} : Planlama periyodu uzunluğu
 M : Çok büyük bir sayı
 H_i^{min} : i otobüs hattındaki iki komşu otobüs kalkışı arasındaki minimum geçiş aralığı
 H_i^{max} : i otobüs hattındaki iki komşu otobüs kalkışı arasındaki maksimum geçiş aralığı
 t_{tw}^k : k transfer istasyonuna transfer yürüyüş süresi
 f_i : i otobüs hattında çizelgelenebilecek kalkış sayısı
 f_l : l tren hattındaki kalkış sayısı
 t_i^k : i otobüs hattının başlangıcından k transfer istasyonuna kadarki seyahat süresi
 wt_{min}^k : k transfer istasyonunda minimum bekleme süresi
 wt_{max}^k : k transfer istasyonunda maksimum bekleme süresi
 R_l^k : l tren hattının başlangıç noktasından k transfer istasyonuna seyahat süresi
 u_l^q : l tren hattındaki q . trenin kalkış zamanı

Karar Değişkenleri:

- x_i^p : i otobüs hattındaki p . otobüsün kalkış zamanı
 y_{il}^{pqk} : i otobüs hattındaki p . otobüs l hattındaki q . tren ile k transfer istasyonunda karşılaşırsa 1, diğer durumda 0 değerini alan değişken

Amaç Fonksiyonu:

$$\max \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{l=1}^{n_l} \sum_{k \in K_{il}}^{n_k} \sum_{p=1}^{f_i} \sum_{q=1}^{f_l} y_{il}^{pqk} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$x_i^1 \leq H_i^{max}, \quad \forall i \quad (2)$$

$$T_{max} - H_i^{max} \leq x_i^{f_i} \leq T_{max}, \quad \forall i \quad (3)$$

$$H_i^{min} \leq x_i^{(p+1)} - x_i^p \leq H_i^{max}, \quad \forall i, p = 1, \dots, f_i - 1 \quad (4)$$

$$(u_l^q + R_l^k) - (x_i^p + t_i^k) - wt_{min}^k - t_{tw}^k + M(1 - y_{il}^{pqk}) \geq 0, \quad (5)$$

$$\forall i, l, p = 1, \dots, f_i, q = 1, \dots, f_l, k \in K_{il}$$

$$(u_l^q + R_l^k) - (x_i^p + t_i^k) - wt_{max}^k - t_{tw}^k - M(1 - y_{il}^{pqk}) \leq 0 \quad (6)$$

$$\forall i, l, p = 1, \dots, f_i, q = 1, \dots, f_l, k \in K_{il}$$

$$x_i^p \in \{0, 1, \dots, T_{max}\}, \quad \forall i, p = 1, \dots, f_i, \quad (7)$$

$$y_{il}^{pqk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, l, p = 1, \dots, f_i, q = 1, \dots, f_l, k \in K_{il} \quad (8)$$

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Eşitlik (1)) ile verilen amaç fonksiyonu senkronizasyon sayısını maksimize etmektedir. Eşitlik (2) otobüslerin ilk kalkış zamanının maksimum geçiş aralığından önce başlamasını sağlamaktadır. Eşitlik (3) otobüslerin son kalkış zamanının planlama döneminin içinde olmasını sağlamaktadır. Eşitlik (4)'te geçiş aralığı sınırları verilmektedir. Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) ile verilen kısıtlara göre, otobüs ve tren, k transfer istasyonuna izin verilen bekleme süresi aralığında gelmişse, y_{il}^{pqk} karar değişkeni 1 değerini almakta, aksi takdirde ise 0 değerini almaktadır. Eşitlik (7), otobüslerin kalkış zamanının planlama dönemi

içinde olması gerektiğini ifade etmektedir. Eşitlik (8) ile y_{il}^{pqk} karar değişkeni tanımlanmaktadır.

Problem kapsamında, i otobüs ve l tren hatları için transfer düğümleri kümesi K_{il} ile gösterilmektedir. Planlama periyodu uzunluğu T_{max} ile gösterilirken, talep ve toplu taşıma işletmeleri tarafından karar verilen kalkış sayısı i otobüs hattı için f_i ve l tren hattı için f_l ile gösterilmektedir. Önerilen formülasyonda, otobüs kalkış zamanlarının belirlenmesinde tren kalkış zamanları (l tren hattındaki q . trenin kalkış zamanı u_l^q) girdi olarak alınmakta ve böylece verilen hatlardaki tren hareket çizelgesi için karşılık gelen otobüs hareket çizelgesi oluşturulabilmektedir. Ayrıca oluşturulan çizelgelerin gerçek hayat sistemleri için daha uygulanabilir olması için çeşitli teknolojik kısıtlar kullanılmaktadır. Bunlar arasında otobüsler arası geçiş zamanları, bekleme, seyahat ve yürüyüş süreleri bulunmaktadır. Seyahat süresi, t_i^k , (i otobüs hattının başlangıç noktasından k transfer istasyonuna kadarki seyahat süresi) ve R_l^k (l tren hattının başlangıç noktasından k transfer istasyonuna kadarki seyahat süresi) olarak tanımlanırken, bekleme süresi için aralık değeri $[wt_{min}^k, wt_{max}^k]$ tanımlanarak minimum wt_{min}^k maksimum wt_{max}^k aralığındaki bekleme sürelerine izin verilmiştir. Benzer şekilde iki komşu kalkış arasındaki fark olarak tanımlanan geçiş aralığı minimum H_i^{min} (i otobüs hattındaki iki komşu otobüs kalkışı arasındaki minimum geçiş aralığı) ve maksimum H_i^{max} (i otobüs hattındaki iki komşu otobüs kalkışı arasındaki maksimum geçiş aralığı) olarak belirlenmiştir. Bir diğer teknolojik kısıt olarak ele alınan transfer yürüme süresi, t_{tw}^k (k transfer istasyonuna transfer yürüyüş süresi) ile ifade edilmektedir. Transfer istasyonunun uzaklığına bağlı olarak t_{tw}^k değişmektedir. Çalışmada y_{il}^{pqk} ve x_i^p olmak üzere iki karar değişkeni tanımlanmıştır. Otobüs ve tren hatları arasındaki senkronizasyon sayısı y_{il}^{pqk} karar değişkeni olarak tanımlanmakta, söz konusu karar değişkeni elemanları i ve l üzerinden toplam alınarak maksimize edilmektedir. Buna ek olarak, senkronizasyon sayısının maksimize edilmesini sağlamak amacıyla ilgili otobüs hatlarındaki otobüslerin kalkış zamanları i otobüs hattındaki p . otobüsün kalkış zamanı olan x_i^p değişkenlerinin değerleri ile belirlenmektedir.

5. Örnek Uygulama ve Bulgular

Bu çalışmada, otobüs ve tren hattı arasındaki senkronizasyon sayısını maksimize etmek amaçlanmıştır. Otobüsler belirli bir başlangıç istasyonundan bir diğer ifadeyle terminalden kalkmakta, tren hattına transfer yapacakları istasyonda seyahatlerini tamamlamaktadır. Otobüste seyahati biten yolcular ulaşmak istedikleri konuma gidebilmek için tren hattına yürümekte, burada gitmek istedikleri noktaya uygun olarak transfer gerçekleştirmektedir.

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere transfer yürüyüş süresi; transfer istasyonu uzaklığı ve yürüyüş hızı gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik

göstermektedir. Bu çalışmada, yürüyüş hızı sabit kabul edilmiş ve transfer istasyonunun uzaklığına bağlı olarak her transfer istasyonu için farklı transfer yürüyüş süreleri dikkate alınmıştır. Benzer şekilde, transfer istasyonlarında bekleme süresi için bir aralık değeri belirlenmiş, bekleme süresi aralığındaki gelişler için transfere izin verilmiştir. Önerilen yöntem, farklı istasyonlardan geçen üç otobüs hattı ve aynı istasyonlardan farklı yönlerde geçen iki tren hattından oluşan bir ulaşım ağında test edilmiştir. Otobüs hatlarının geçiş aralığı sınırları ve sıklıkları Tablo.1'de verilmiştir. Transfer yürüyüş süresi üç transfer istasyonu için sırasıyla 1, 2 ve 3 dakika olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ele alınan iki tren hattı için minimum geçiş aralığı sırasıyla 6 ve 15 dakika, maksimum geçiş aralığı sırasıyla 15 ve 20 dakika olarak alınmıştır. Tren hatlarından kalkış zamanı, minimum ve maksimum geçiş aralığı sınırları içinde rassal olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak, birinci tren hattı için 10 ikinci tren hat için 6 adet kalkış planlanmıştır. Çalışmada, otobüs hattı için [0,120] dakika, tren hattı için [0,120], [60,180] ve [30,150] dakika olmak üzere üç farklı periyot ele alınmıştır.

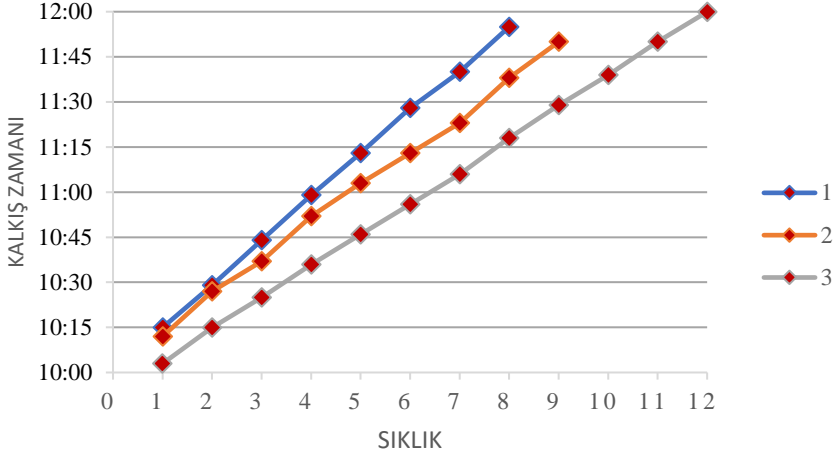
Otobüs ve tren arasındaki senkronizasyonun ele alındığı matematiksel programlama modeli, Intel (R) Core™ i7-7500 CPU 2.70GHz 2.90GHz özelliklerine sahip kişisel bir bilgisayarda Mathematical Programming Language (MPL) ortamında GUROBI çözücüsü kullanılarak çözülmüştür.

Tablo 1

Otobüs Hatlarının Geçiş Aralığı Sınırları ve Sıklıkları

| Otobüs Hatları | Minimum Geçiş Aralığı, H_i^{min} | Maksimum Geçiş Aralığı, H_i^{max} | Sıklık, f_i |
|----------------|---------------------------------------|--|---------------|
| 1 | 12 | 15 | 8 |
| 2 | 10 | 15 | 9 |
| 3 | 10 | 12 | 12 |

Örnek uygulama için bekleme süresinin [1,2] dakika ve otobüs ve tren periyodunun [0,120] dakika olduğu durum dikkate alınarak model çözülmüş ve karşılık gelen otobüs kalkış zamanları verilmiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi en fazla sayıda kalkış, belirlenen sıklığa uygun olacak şekilde 3. hatta en az sayıda kalkış ise 1. hatta gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. Bekleme Süresinin [1,2] dakika ve Tren Periyodunun [0,120] dakika Olduğu Durum için Otobüslerin Kalkış Zamanları

Bekleme süresinin senkronizasyon sayısına etkisini gözlemlemek amacıyla, otobüs ve tren periyodunun [0,120] dakika olduğu durum için üç farklı bekleme süresi dikkate alınarak model çözülmüş, elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi bekleme süresi için izin verilen aralık genişlediğinde senkronizasyon sayısı artmakta, aralık daraldığında ise senkronizasyon sayısı azalmaktadır. Örneğin; bekleme süresi aralığının [1,2] dakika olduğu durumda 24 senkronizasyon gerçekleşirken, bekleme süresi aralığının [6,12] dakika olduğu durumda 37 senkronizasyon gerçekleşmektedir. Çözüm süreleri açısından model performansı incelendiğinde, çözüm sürelerinin 0,02 ve 0,03 saniye arasında değiştiği görülmektedir.

Tablo 2

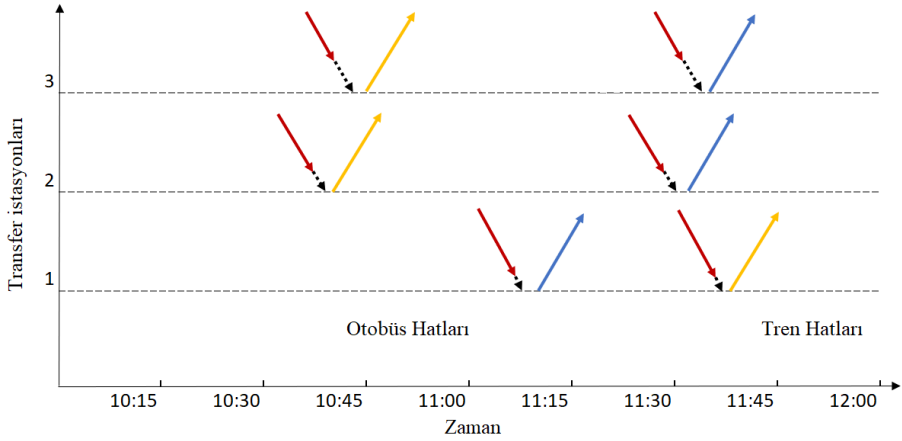
Farklı Bekleme Sürelerine Göre Senkronizasyon Sayısı Değişimi

| Bekleme Süresi [$w_t^k_{min}$, $w_t^k_{max}$] | 1.Transfer İstasyonu | | 2.Transfer İstasyonu | | 3.Transfer İstasyonu | | Toplam | ÇS (saniye) |
|---|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|--------|-------------|
| | 1.Hat | 2.Hat | 1.Hat | 2.Hat | 1.Hat | 2.Hat | | |
| | [1,2] | 3 | 4 | 8 | 2 | 4 | | |
| [3,6] | 6 | 4 | 8 | 4 | 7 | 4 | 34 | 0,03 |
| [6,12] | 7 | 4 | 7 | 5 | 10 | 4 | 37 | 0,03 |

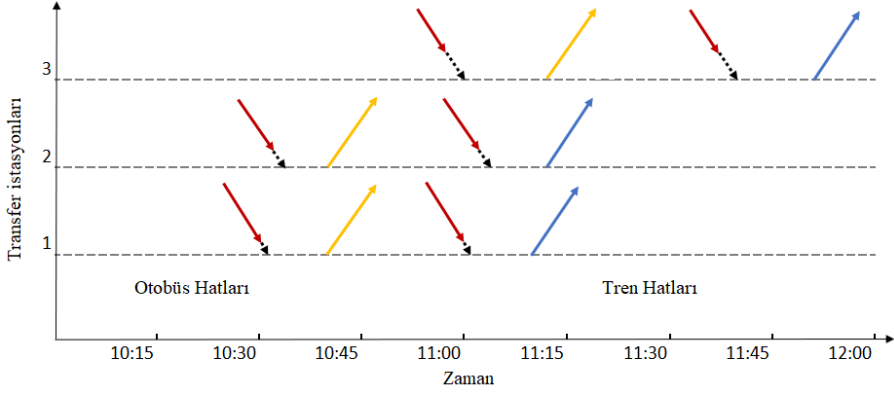
ÇS: Çözüm Süresi

Şekil 4 ve Şekil 5'te iki farklı bekleme süresi aralığı için elde edilen örnek senkronizasyon durumları gösterilmiştir. Söz konusu şekillerde, otobüs hattından transfer istasyonuna gelişler kırmızı renk ile tren hattından transfer istasyonuna gelişler mavi ve sarı renk ile gösterilmiştir. Sarı renk birinci tren hattını, mavi renk ikinci tren hattını göstermektedir. Buna ek olarak, siyah kesikli ok ile transfer yürüyüş süresi gösterilmektedir.

Şekil 4'te tren periyodunun $[0,120]$ dakika ve bekleme süresi aralığının $[1,2]$ dakika olduğu durumlar için, model sonucunda elde edilen bazı senkronizasyonlar gösterilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi otobüs hattından 1.transfer istasyonuna 5. geliş 11:37'de (11:36 otobüs hattına geliş ve 1 dakika transfer yürüyüş süresi) gerçekleşmekte, 1. tren hattından 8. geliş ise 11:38'de olmaktadır. Otobüs hattından tren hattına geçecek olan yolcular 1 dakika bekleyerek tren hattına geçiş yapmakta, bekleme süresi izin verilen aralıkta olduğundan otobüs ve tren hattı arasında transfer gerçekleşmektedir. Bir diğer durumda, otobüs hattından 2. transfer istasyonuna 5. geliş 11:30'da (11:28 otobüs hattına geliş ve 2 dakika transfer yürüyüş süresi) gerçekleşmekte, 2. tren hattından 2. transfer istasyonuna 3. geliş ise 11:32'de olmaktadır. Bekleme süresi izin verilen bekleme süresi aralığında olduğundan bu durumda da transfer gerçekleşmektedir. Benzer şekilde diğer durumlarda da bekleme süresi aralığına uygun olarak transferler gerçekleşmektedir.



Şekil 4. Bekleme Süresi Aralığının $[1,2]$ dakika ve Otobüs ve Tren Periyodunun $[0,120]$ dakika Olduğu Durum için Otobüs ve Tren Hattı Arasındaki Senkronizasyon Durumu



Şekil 5. Bekleme Süresi Aralığının [6,12] dakika ve Otobüs ve Tren Periyodunun [0,120] dakika Olduğu Durum için Otobüs ve Tren Hattı Arasındaki Senkronizasyon Durumu

Şekil 5'te bekleme süresi aralığının [6,12] dakika olduğu durum için model sonucunda elde edilen bazı senkronizasyonlar gösterilmiştir. Örneğin; Şekil 5'te görüldüğü gibi otobüs hattından 2. transfer istasyonuna 1. geliş 10:34'te (10:32 otobüs hattına geliş ve 2 dakika transfer yürüyüş süresi) gerçekleşmekte, 1. tren hattından 2. geliş ise 10:40'ta olmaktadır. Otobüs hattından tren hattına geçecek yolcular izin verilen bekleme süresi aralığında olan 6 dakika bekleyerek tren hattına geçiş yapmaktadır. Benzer şekilde otobüs hattından 3. transfer istasyonuna 4. geliş 11:00'da gerçekleşmekte, 1. tren hattından 3. transfer istasyonuna 3. geliş ise 11:12'de olmaktadır. Otobüs hattından tren hattına geçecek yolcular 12 dakika bekleyerek tren hattına geçiş yapmaktadır. Bekleme süresi izin verilen bekleme süresi aralığında olduğundan bu durumda da transfer gerçekleşmektedir.

Tablo 3'te dört farklı transfer istasyon sayısı (3, 7, 11 ve 15) ve üç farklı periyot ([0,120]), [60,180] ve [30,150]) için senkronizasyon sayısı ve modele ilişkin çözüm süreleri bilgileri verilmiştir. Tablo 3'te yer alan sonuçlar incelendiğinde, bekleme süresi aralığı genişlediğinde senkronizasyon sayısının arttığı görülmektedir. Örneğin; 7 transfer istasyonu, periyot aralığının [0,120] dakika ve bekleme süresinin [1,2] dakika olduğu durumda 56 senkronizasyon gerçekleşmekte, buna karşılık aynı transfer istasyonu sayısı ve periyot aralığında bekleme süresinin [6,12] dakika olduğu durum için 91 senkronizasyon gerçekleşmektedir. Benzer şekilde diğer tüm durumlar içinde bekleme süresi arttığında senkronizasyon sayısı arttığı görülmektedir.

Tablo 3

Farklı Transfer İstasyonları ve Farklı Periyotlar için Deneysel Sonuçlar

| Transfer İstasyonu Sayısı | Bekleme Süresi [wt_{min}^k, wt_{max}^k] | Periyot Aralığı | | | | | |
|---------------------------|--|-----------------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|
| | | [0,120] | | [60,180] | | [30,150] | |
| | | SS | ÇS (saniye) | SS | ÇS (saniye) | SS | ÇS (saniye) |
| 3 | [1,2] | 24 | 0,02 | 15 | 0,03 | 19 | 0,02 |
| | [3,6] | 34 | 0,03 | 19 | 0,02 | 28 | 0,02 |
| | [6,12] | 37 | 0,03 | 29 | 0,04 | 35 | 0,02 |
| 7 | [1,2] | 56 | 0,07 | 34 | 0,04 | 50 | 0,05 |
| | [3,6] | 74 | 0,08 | 44 | 0,04 | 65 | 0,05 |
| | [6,12] | 91 | 0,07 | 70 | 0,04 | 83 | 0,05 |
| 11 | [1,2] | 88 | 0,08 | 48 | 0,07 | 73 | 0,07 |
| | [3,6] | 111 | 0,11 | 66 | 0,06 | 98 | 0,09 |
| | [6,12] | 150 | 0,11 | 107 | 0,06 | 125 | 0,08 |
| 15 | [1,2] | 102 | 0,16 | 81 | 0,13 | 115 | 0,11 |
| | [3,6] | 147 | 0,10 | 109 | 0,15 | 155 | 0,11 |
| | [6,12] | 174 | 0,10 | 165 | 0,13 | 208 | 0,12 |

SS: Senkronizasyon Sayısı, ÇS: Çözüm Süresi

Çalışmada otobüs hattı periyodu [0,120] dakika olarak ele alınmış, tren hattı periyodu için daha önce de belirtildiği gibi üç farklı aralık belirlenmiştir. Tablo 3'te görüldüğü gibi tren periyodundaki değişim ile senkronizasyon sayısı değişmektedir. Örneğin; transfer istasyon sayısı 3, bekleme süresi aralığı [1,2] dakika ve periyot aralığı [0,120] dakika olduğu durumda 24 senkronizasyon gerçekleşirken, periyot aralığı [60,180] dakika olduğu durumda 15 ve periyot aralığı [30,150] dakika olduğu durumda ise 19 senkronizasyon gerçekleşmektedir. Bir diğer durum olan, transfer istasyon sayısı 7, bekleme süresi aralığı [3,6] dakika ve periyot aralığının [0,120] dakika olduğu durumda 74 senkronizasyon gerçekleşirken, periyot aralığının [60,180] dakika olduğu durumda 44 ve periyot aralığının [30,150] dakika olduğu durumda ise 65 senkronizasyon gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, transfer istasyon sayısı 15, bekleme süresi aralığı [6,12] dakika ve periyot aralığı [0,120] dakika olduğu durumda 174 senkronizasyon gerçekleşirken, periyot aralığının [60,180] dakika olduğu durumda 165 ve periyot aralığının [30,150] dakika olduğu durumda ise 208 senkronizasyon gerçekleşmektedir.

Çözüm süreleri açısından incelendiğinde ise problem boyutu büyüdüğünde çözüm sürelerinin nispeten arttığı görülmektedir. Örneğin, çalışmada ele alınan en küçük problem boyutu olan 3 transfer istasyonu için 0,02 saniyede çözüm

elde edilirken, en büyük problem boyutu olan 15 transfer istasyonu için 0,16 saniyede çözüm elde edilmektedir.

6. Tartışma ve Sonuç

Yolcular varmak istedikleri konuma ulaşmak için, aynı ulaşım modları arasında transfer gerçekleştirebileceği gibi ulaşım ağ yapısına göre farklı ulaşım modları arasında da transfer gerçekleştirebilmektedir. Farklı ulaşım modları arasında senkronize zaman çizelgelerinin olmaması, yolcuların transfer istasyonunda uzun bekleme sürelerine neden olmakta hatta bazı durumlarda başka ulaşım araçlarını tercih etmesine bile neden olmaktadır.

Bu çalışmada, literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınan farklı ulaşım modları arasındaki senkronizasyona odaklanılarak, otobüs ve tren hattı arasındaki senkronizasyon sayısını maksimize etmeyi amaçlayan, tamsayı programlama modeli önerilmiştir. Çalışma kapsamında, senkronizasyon sayısını etkileyen parametrelerden olan transfer yürüyüş süresine ek olarak, farklı bekleme süreleri dikkate alınarak çözüme olana etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, bekleme süresi aralığı genişledikçe senkronizasyon sayısının arttığı, aralık daraldığında ise senkronizasyon sayısının azaldığı görülmüştür.

Önerilen model, daha büyük boyutlu gerçek-hayat problemlerinin çözümünde daha uzun çözüm süreleri gerektirebileceğinden, daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler geliştirilmesi gelecek çalışmalar kapsamında dikkate alınabilir. Gelecek çalışmalarda, otobüsten trene ve trenden trene transferler dikkate alınarak daha karmaşık bir ulaşım ağındaki senkronizasyon ele alınabilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Elif KAYMAZ, literatür araştırması, matematiksel programlama modelinin oluşturulması, test probleminin çözülmesi ve makale yazımı; Fatih ÇAVDUR, çalışmanın kurgulanması, problem tanımı, sonuçların değerlendirilmesi ve makale yazımı konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Aksu, D. ve Yılmaz, S. (2014). Transit coordination with heterogeneous headways. *Transportation Planning and Technology*, 37(5), 450-465. Doi: <https://doi.org/10.1080/03081060.2014.912419>

- Cao, N., Tang, T. ve Gao, C. (2020). Multiperiod transfer synchronization for cross-platform transfer in an urban rail transit system. *Symmetry*, 12(10), 46-67. 1665. Doi: <https://doi.org/10.3390/sym12101665>
- Ceder, A, Golany, B. ve Tal, O. (2001). Creating bus timetables with maximal synchronization. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(10), 913-928. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00032-X)
- Ceder, A. ve Tal, O. (2001). Designing Synchronization into Bus Timetables. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1760(1), 28-33. Doi: <https://doi.org/10.3141/1760-04>
- Chai, H., Tian, X., ve Niu, H. (2022). First-train timetable synchronization in metro networks under origin-destination demand conditions. *Journal of Advanced Transportation*, 2022(1), 8579354. Doi: <https://doi.org/10.1155/2022/8579354>
- Chen, Y. Z., Shi, C. L., Claudel, C. G. ve Hu, M. B. (2023). First train timetable synchronization with interval trains in subway networks. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 11(1), 69-92. Doi: <https://doi.org/10.1080/21680566.2022.2038304>
- Chen, Y. ve An, K. (2021). Integrated optimization of bus bridging routes and timetables for rail disruptions. *European Journal of Operational Research*, 295(2), 484-498. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.014>
- Chen, Y., Mao, B., Bai, Y., Ho, T. K. ve Li, Z. (2019a). Optimal coordination of last trains for maximum transfer accessibility with heterogeneous walking time. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1-13. Doi: <https://doi.org/10.1155/2019/9692024>
- Chen, Y., Mao, B., Bai, Y., Ho, T. K. ve Li, Z. (2019b). Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 99, 110-129. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.003>
- Dou, X., Meng, Q. ve Guo, X. (2015). Bus schedule coordination for the last train service in an intermodal bus-and-train transport network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 60, 360-376. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.09.006>
- Eranksi, A. (2004). *A model to create bus timetables to attain maximum synchronization considering waiting times at transfer stops*. (Yüksek lisans Tezi). Department of Industrial and Management Systems Engineering University of South Florida.
- Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y. ve Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 281-302. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>

- Geng, J., Zhang, C., Yang, L., Meng, F. ve Qi, J. (2024). Integrated scheduling of metro trains and shuttle buses with passenger flow control strategy on an oversaturated metro line. *Computers & Industrial Engineering*, 189, 109980. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109980>
- Guo, X., Sun, H., Wu, J., Jin, J., Zhou, J. ve Gao, Z. (2017). Multiperiod-based timetable optimization for metro transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 96, 46-67. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.11.005>
- Guo, X., Wu, J., Sun, H., Liu, R. ve Gao, Z. (2016). Timetable coordination of first trains in urban railway network: A case study of Beijing. *Applied Mathematical Modelling*, 40(17-18), 8048-8066. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.04.004>
- Guo, X., Wu, J., Sun, H., Yang, X., Jin, J. G. ve Wang, D. Z. W. (2020). Scheduling synchronization in urban rail transit networks: Trade-offs between transfer passenger and last train operation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 138, 463-490. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.06.008>
- Guo, X., Wu, J., Zhou, J., Yang, X., Wu, D. ve Gao, Z. (2019). First-train timing synchronisation using multi-objective optimisation in urban transit networks. *International Journal of Production Research*, 57(11), 3522-3537. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1542177>
- Huang, K., Wu, J., Liao, F., Sun, H., He, F. ve Gao, Z. (2021). Incorporating multimodal coordination into timetabling optimization of the last trains in an urban railway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 124, 102889. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102889>
- Ibarra-Rojas, O. J., López-Irarragorri, F. ve Rios-Solis, Y. A. (2016). Multiperiod bus timetabling. *Transportation Science*, 50(3), 805-822. Doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.2014.0578>
- Ibarra-Rojas, O. J. ve Rios-Solis, Y. A. (2012). Synchronization of bus timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(5), 599-614. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.01.006>
- Kang, L., Li, H., Sun, H., Wu, J., Cao, Z. ve Buhigiro, N. (2021). First train timetabling and bus service bridging in intermodal bus-and-train transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 149, 443-462. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.05.011>
- Kang, L. ve Meng, Q. (2017). Two-phase decomposition method for the last train departure time choice in subway networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 104, 568-582. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.05.001>
- Kang, L., Wu, J., Sun, H., Zhu, X. ve Gao, Z. (2015). A case study on the coordination of last trains for the Beijing subway network. *Transportation Research Part B: Methodological*, 72, 112-127. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.09.003>

- Kang, L., Wu, J., Sun, H., Zhu, X. ve Wang, B. (2015). A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks. *Omega*, 50, 29-42. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.07.005>
- Kang, L. ve Zhu, X. (2016). A simulated annealing algorithm for first train transfer problem in urban railway networks. *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 419-435. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.05.008>
- Kang, L. ve Zhu, X. (2017). Strategic timetable scheduling for last trains in urban railway transit networks. *Applied Mathematical Modelling*, 45, 209-225. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.12.016>
- Kang, L., Zhu, X., Sun, H., Puchinger, J., Ruthmair, M. ve Hu, B. (2016). Modeling the first train timetabling problem with minimal missed trains and synchronization time differences in subway networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 93, 17-36. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.006>
- Kang, L., Zhu, X., Sun, H., Wu, J., Gao, Z. ve Hu, B. (2019). Last train timetabling optimization and bus bridging service management in urban railway transit networks. *Omega*, 84, 31-44. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.04.003>
- Ke, Y., Nie, L., Liebchen, C., Yuan, W. ve Wu, X. (2020). Improving synchronization in an air and high-speed rail integration service via adjusting a rail timetable: A real-world case study in china. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 1-13. Doi: <https://doi.org/10.1155/2020/5081315>
- Li, X., Yamamoto, T., Yan, T., Lu, L. ve Ye, X. (2020). First train timetabling for urban rail transit networks with maximum passenger transfer satisfaction. *Sustainability*, 12(10), 4166. Doi: <https://doi.org/10.3390/su12104166>
- Li, X., Lu, Y. ve Yang, L. (2024). Collaborative optimization of passenger flow control and bus-bridging services in commuting metro lines. *Applied Mathematical Modelling*, 130, 806-826. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2024.03.022>
- Li, H., Kang, L., Sun, H., Wu, J. ve Amihire, S. (2024). First train timetabling and passenger transfer routing problems in urban rail transit networks. *Applied Mathematical Modelling*, 131, 344-362. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2024.04.005>
- Liu, Y., Zhang, Q., Li, X. ve Shi, Y. (basım aşamasında). Optimizing multimodal timetable synchronization of intercity railway and metro for the first service period during holidays. *International Journal of Transportation Science and Technology*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2024.04.005>
- Long, S., Meng, L., Miao, J., Hong, X. ve Corman, F. (2020). Synchronizing last trains of urban rail transit system to better serve passengers from late night trains

- of high-speed railway lines. *Networks and Spatial Economics*, 20(2), 599-633. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11067-019-09487-0>
- Lu, K., Han, B. ve Zhou, X. (2018). Smart urban transit systems: from integrated framework to interdisciplinary perspective. *Urban Rail Transit*, 4(2), 49-67. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40864-018-0080-x>
- Ning, J., Peng, Q., Zhu, Y., Jiang, Y. ve Nielsen, O. A. (2022). A Bi-objective optimization model for the last train timetabling problem. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 23, 100333. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100333>
- Ning, J., Peng, Q., Zhu, Y., Xing, X. ve Nielsen, O. A. (2023). Bi-objective optimization of last-train timetabling with multimodal coordination in urban transportation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 154, 104260. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104260>
- Shafahi, Y. ve Khani, A. (2010). A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(6), 377-389. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.007>
- Shrivastava, P. ve Dhingra, S. L. (2002). Development of coordinated schedules using genetic algorithms. *Journal of Transportation Engineering*, 128(1), 89-96. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:1(89))
- Wu, Y. ve Tang, J. (2012). Optimizing timetable synchronization for regional public transit with minimum transfer waiting times. *2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* içinde 3782-3786). Doi :<https://doi.org/10.1109/CCDC.2012.6244608>
- Wu, J., Liu, M., Sun, H., Li, T., Gao, Z. ve Wang, D. Z. W. (2015). Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 51, 1-18. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.001>
- Yao, Y., Zhu, X., Shi, H. ve Shang, P. (2019). Last train timetable optimization considering detour routing strategy in an urban rail transit network. *Measurement and Control*, 52(9-10), 1461-1479. Doi: <https://doi.org/10.1177/0020294019877480>
- Yüksel, T. ve Öztürk, Z. (2024). Timetable synchronisation for the first trains in the day according to actual transfer times. *Promet-Traffic&Transportation*, 36(1), 69-82. Doi: <https://doi.org/10.7307/ptt.v36i1.402>
- Zhou, Y., Wang, Y., Yang, H. ve Yan, X. (2019). Last train scheduling for maximizing passenger destination reachability in urban rail transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 129, 79-95. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.09.006>