



# Toplu Taşıma Araçları Sefer Sıklığı Belirleme ve Çizelgeleme Problemi\*

## Frequency Setting and Timetable Development Problems of Public Transportation Vehicles

Kismet Cingöz<sup>1</sup> , Tevfik Aytemiz<sup>2</sup> 

### Öz

Günümüzde dünya nüfusunun artması, kentleşme oranının artması ve kıt kaynakların azalması çevresel farkındalığın artmasına neden olmaktadır. İnsanlar her gün evlerine, işlerine, okullarına gitmek ve sosyal aktivitelerde bulunmak için hareket etmektedirler yani şehir içinde yer değiştirmektedirler. Bu da kişisel araç, taksi, otobüs, minibüs kullanımının artmasına sebep olmaktadır. Yetkililer ise bu hareket veya dolaşım esnasında oluşan çevre kirliliğinin, gürültünün, karbon salınımının ve kazaların azalmasını sağlamak amacıyla toplu taşıma hizmetlerinin daha kullanılabilir hale gelmesi için çaba sarf etmektedirler. Toplu taşıma hizmetlerinin kullanımını arttırmak için kullanıcılara yani vatandaşlara daha sık, daha düzenli ve daha güvenilir hizmet verilmesi gerekmektedir. Toplu taşıma hizmetlerinin düzenlenmesi ile ilgili yapılan faaliyetler literatürde toplu taşıma ağ planlama süreci olarak adlandırılmaktadır. Toplu taşıma ağ planlama süreci, sırasıyla ağ planlama, sıklık oluşturma ve zaman çizelgesi geliştirme, araç çizelgeleme ve sürücü çizelgeleme faaliyetlerinden oluşmaktadır ve ağ planlama sürecinin her bir aşaması kendisinden sonra gelen aşamanın girdisi olmaktadır. Ağ tasarım faaliyetleri oldukça maliyetli olduğu ve alt yapı çalışmaları gerektirdiği için sefer sıklıklarını değiştirmek hizmet sağlayıcıları için daha kolaydır. Sefer sıklığı oluşturma ve zaman çizelgesi geliştirme aşaması kullanıcıların konforunu dikkate alan ve hizmet kalitesi ile ilgili olan planlama aşamasıdır. Bu sebeple, toplu taşıma kullanımının artırılması üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. Bu çalışmanın amacı, toplu taşıma sefer sıklığı ayarlama ve zaman çizelgesi oluşturma problemlerini çözmeye yönelik metodolojik genel bir bakış ve örnekler sunmaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Toplu Taşıma, Toplu Taşıma Ağ Planlama Süreci, Sıklık Ayarlama ve Zaman Çizelgesi Geliştirme

### ABSTRACT

Today, the increase in the world population and the rate of urbanization as well as the decrease in scarce resources cause an increase in environmental awareness. People constantly move for different purposes such as going to their house, school, work and performing social activities. It causes usage of private car, taxi, bus, minibuses increase. Authorities are trying to make services of public transport vehicles more available on the purpose of reducing the environmental pollution, noise pollution, carbon emission and accidents which are caused during the movements in the city. It is necessary to provide more frequent, more regular and more reliable services to users (i.e., citizens) in order to increase the use of public transport services. The activities committed relating to the arrangement of public transportation services are named as public transportation network planning process in the literature. As the literature assesses, the public transit planning process is usually divided in a sequence of four steps: network design, frequencies setting and timetable development, the bus scheduling and the driver scheduling. The output of each activity positioned higher in the sequence becomes an important input for lower-level decisions. Since network

<sup>1</sup> **Corresponding Author:** Tarsus University, Faculty of Applied Science, Department of International Trade and Logistics, [kismetcingoz@tarsus.edu.tr](mailto:kismetcingoz@tarsus.edu.tr), 0000-0002-6006-6760

<sup>2</sup> Mersin University, Faculty of Economics and Administrative Science, Department of Business Administration, [taytemiz@hotmail.com](mailto:taytemiz@hotmail.com), 0000-0001-8370-4721

\* Bu çalışma Haziran - 2021 yılında savunulmuş olan "Toplu taşıma araçlarını çizelgeleme probleminde simülasyon modeli yaklaşımı: Mersin Büyükşehir Belediyesi örneği" isimli doktora tezinden üretilmiştir.



*design activities are very costly and require infrastructure investments, it is easier for service providers to change the frequency of busses. The stage of creating a bus frequency and developing a timetable is the planning stage that takes into account the comfort of the users and is related to the service quality. For this reason, increasing the use of public transport is an issue that should be emphasized. In this direction, the purpose of this study is to provide an overview and examples of certain practical methodologies aimed at solving the public transit frequency setting and scheduling problems.*

**Keywords:** Public Transportation, Public Transit Network Planning Process, Frequency Setting and Timetable Development.

## GİRİŞ:

Dünya genelinde nüfusun kırsal alanlardan kentsel alanlara taşınması şehir yaşamında bazı zorlukları da beraberinde getirmiştir. Şehir nüfusunun artmasıyla işsizlik ve çarpık kentleşme artarken şehirler de genişlemeye başlamıştır. İnsanlar iş yerlerine ve okullara gitmek ya da sosyal aktiviteleri gerçekleştirmek için özel araçlarını ya da toplu taşıma araçlarını kullanmaktadırlar. Ancak trafikte özel araçların sayısının artmasıyla birlikte trafik sıkışıklığı, trafik kazaları, gürültü, hava kirliliği ve park yeri problemleri de artmaktadır. Bu sebepler yüzünden, insanların şehir içi ulaşımında toplu taşıma araçlarını kullanmaları için toplu taşımanın daha çekici hale getirilmesi gerekmektedir.

Toplu taşıma türleri arasında otobüsler, tramvaylar ve metrolar oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tramvay ve metro ile karşılaştırıldığında daha az alt yapı maliyeti gerektirdiği ve daha fazla esneklik sağladığı için otobüslerin daha yaygın bir şekilde kullanıldığı gözlemlenmektedir. Metro ve tramvaylar kendileri için hazırlanmış özel bir zemin üzerinde hareket edebildiği için, bir şehirde sadece bu türlerle tüm toplu taşıma talebini karşılamak mümkün değildir. Ayrıca insanlar konforlarına önem verdikleri için aktarma yapmayı çok fazla tercih etmemektedirler. Bu sebeple şehir içi ulaşımında otobüslerin önemi gün geçtikçe artmaktadır.

Bir otobüs hattını işletebilmek için gerekli olan ağ tasarımı (1), sefer sıklığının belirlenmesi ve zaman çizelgesi oluşturulması (2), araçların çizelgelenmesi (3) ve sürücülerin çizelgelenmesi (4) faaliyetleri literatürde toplu taşıma ağ planlama süreci olarak adlandırılmaktadır. Toplu taşıma ağ planlama sürecinin ikinci aşaması olan sefer sıklığı belirleme ve zaman çizelgesi oluşturma aşaması, kullanıcıların konforunu dikkate alan ve hizmet kalitesi ile ilgili olan planlama aşamasıdır. Bu sebeple kullanıcıların toplu taşıma araçlarını tercih etmesi amacını gerçekleştirebilmek için özellikle üzerinde durulması gereken bir aşamadır. Kullanıcılar otobüsleri kullanırken duraklarda çok fazla beklemek istemezler ve varmak istedikleri yere en kısa rota ile en kısa sürede ulaşmak isterler. Toplu taşıma hizmeti sağlayıcıları ise kâr elde etme amacı gütmedikleri için olabilecek en az maliyetle en iyi hizmeti sunmaya çalışırlar. Bir hatta, sefer aralığı kısaltıldıkça yani sefer sıklığı arttıkça yolcuların durakta bekleme süresi azalmaktadır. Ancak toplu taşıma hizmeti sağlayıcıları olan belediyeler için bu hizmet maliyetlerinin ve sefer sayısını arttırmak için otobüs satın alınması gibi sabit maliyetlerin artması anlamına gelir ve birbiriyle çelişen bu iki amaç arasında bir denge kurmak oldukça zordur.

Bu kapsamda, birbiriyle çelişen bu amaçlar birlikte değerlendirildiğinde, bu çalışmanın ilk amacı konunun daha iyi anlaşılması için toplu taşıma ağ planlama sürecinin ne olduğu, nasıl çalıştığı ve toplu taşıma hizmeti sunarken dikkat edilmesi gereken faktörlerle ilgili detaylı bilgi vermektir. Çalışmanın ikinci ve ana amacı, sefer sıklığı/ sefer aralığı belirlenirken göz önünde bulundurulacak değişkenlerin neler olduğu ve sefer aralığı/sefer sıklığı belirleme problemlerinin nasıl çözüldüğünü detaylı bir şekilde açıklamaktır. Bu doğrultuda bu çalışma ile sefer aralığı/sefer sıklığı belirlenirken amaçlara göre kullanılacak farklı yöntemleri, farklı kısıtları ve farklı değişkenleri ortaya koymak amaçlanmaktadır. Bunlara ek olarak, yapılan literatür araştırmasına göre konuyu bu kadar kapsamlı ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple çalışmanın aynı zamanda akademisyenler ve toplu taşıma hizmeti sağlayıcıları olan belediyeler için bir rehber olacağı düşünülmektedir.

### 1. Toplu Taşıma Ağ Planlaması

Datzing vd. (1979) kentsel ulaşım ağ tasarımı problemlerini yeni caddelerin kurulması veya var olan caddelerin kapasitesinin genişletilmesi olarak tanımlanmaktadır. Friesz'e (1985) göre kentsel ulaşım ağ tasarımı problemleri taşımacılık ağına eklenecek tesislerin optimal yerinin belirlenmesi ya da ağ içinde

var olan tesislerin optimal kapasitesinin iyileştirilmesine karar verilmesidir. Bu tanımda tesisler ile kast edilen duraklar ya da bağlantılardır. Tanımlar incelendiğinde fiziksel olarak kapasitenin artırılmasına ve etkin bir yerleşim yapılmasına değinirken, aslında kentsel ulaşım ağ tasarım problemleri, yol ağı tasarım problemlerinin (Road Network Design Problem - RNDP) ve toplu taşıma ağ tasarım problemlerinin (Public Transit Network Design Problem - PTNDP) ikisini de kapsamaktadır (Farahani, Miandoabchi, Szeto & Rashidi, 2013: 283).

Yol ağı tasarım problemleri (RNDP) genellikle cadde – sokak ağlarını dikkate alır ve toplu taşıma araçlarının ya da özel araçların akışı ile ilgilenmez (Farahani, Miandoabchi, Szeto & Rashidi, 2013: 283). Toplu taşıma ağının hizmet ve maliyet etkin bir şekilde planlanması ve tasarlanması o toplu taşıma ağının rekabet edebilirliğini ve pazar payını arttırmaktadır. Toplu taşıma ağ tasarımı olarak tanımlanan bu problemler toplu taşıma rota tasarım problemleri olarak da adlandırılabilir. Bu problemler, toplu taşıma rotalarının sayısı ve uzunluğu, izin verilen hizmet sıklığı ve ulaşılabilir otobüs sayısı gibi işlemsel ve kaynak kısıtları altında toplu taşıma ağlarının verimliliğini gösteren amaçların optimizasyonuna odaklanmaktadır (Chakroborty 2003: 184; Fan & Machemehl 2006: 40).

Toplu taşıma ağ tasarım problemlerinin çözümü için toplu taşıma ağ planlama süreci geliştirilmiştir. Bu süreç takip eden bölümde detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

### 1.1. Toplu Taşıma Ağ Planlama Süreci

Toplu taşıma ağ planlama süreci toplu taşıma kullanıcılarının binış ve varış yeri arasında etkin bir şekilde taşınmasını sağlamayı amaçlamaktadır (Ceder, 2001: 126). Yolcular açısından ucuz, konforlu, güvenilir ve hızlı seyahat imkanı sağlaması beklenirken, bir yandan da işletenler için düşük maliyetlerde bunu sağlanması beklenir. Toplum açısından değerlendirildiğinde ise çevre kirliliğini azaltan yakıtlar kullanılması, özel araç kullanımının azaltılarak ve çevre dostu otobüsler kullanılarak trafik gürültüsünün azaltılması beklenir. Bir bütün olarak değerlendirildiğinde bu küresel bir problemdir ve çözümü kolay değildir.

Bunun sonucu olarak da bu problem, planlama sürecinin farklı aşamalarında sırayla çözülebilen alt problemlere ayrılmaktadır. Ceder ve Wilson (1986) tarafından geliştirilen ve birbirini takip eden sistematik bir karar olarak toplu taşıma ağ planlama süreci Tablo 1’de gösterilmektedir.

**Tablo 1:** Toplu Taşıma Ağ Planlama Süreci

Bağımsız Girdiler	Planlama Faaliyeti	Çıktı
Talep Verisi	<u>Seviye A</u>	Rota değışimi
Arz verisi	Ağ tasarımı	Yeni rotalar
Rota Performans Göstergeleri		İşlemsel stratejiler
Destek ulaşılabilirliği	<u>Seviye B</u>	Hizmet sıklıkları
Otobüs ulaşılabilirliği	Sıklık Ayarlama ve	Sefer kalkış zamanı
Hizmet Politikaları	Zaman Çizelgesi Geliştirme	Sefer varış zamanı
Mevcut Müşteriler		
Günün saatine göre talep verisi		
İlk ve son sefer zamanları		
Çalışma süreleri		
Boş kalma süresi		Otobüs çizelgesi

Tamir/Bakım süresi	<u>Seviye C</u>	
Çizelge kısıtları	Araç çizelgeleme	
Maliyet yapısı		
Sürücü çalışma kuralları	<u>Seviye D</u>	Sürücü çizelgesi
Çalışma maliyeti yapısı	Sürücü Çizelgeleme	

**Kaynak:** Ceder & Wilson, 1986: 332; Ceder & Israeli, 1992: 114; Ceder, 2002: 22

Desaulniers ve Hickman (2007) ise toplu taşıma ağ planlama sürecini farklı planlama türleri olan stratejik, taktiksel ve operasyonel planlama açısından sınıflandırmışlardır. Tablo 1’de yer alan ve birinci planlama faaliyeti olan ağ tasarımı aşamasını stratejik planlama olarak değerlendirmiştir. Çünkü stratejik planlama türleri uzun vadeli planlama kararlarını içerir. Bu kapsamda ağ tasarımı alt yapı faaliyetlerine dayandığı için ve durak yeri, rota vs. gibi kararların verildiği aşama olduğu için stratejik planlama olarak kabul edilmiştir. Sıklık ayarlama ve zaman çizelgesi geliştirme aşamaları ise hizmet kalitesini arttırmak ile ilgili olduğu için ve mevsimsel olarak görüldüğü için operasyonel planlama olarak düşünülmüştür. Operasyonel planlama problemleri, önerilen hizmeti minimum maliyetle sunmak için işlemlerin nasıl yürütülmesi gerektiği ile ilgilidir. Bu problemler, araç çizelgeleme, sürücü çizelgeleme, otobüs park etme ve garajlara sevkiyat ve bakım planlaması gibi çok çeşitli problemleri içerir. Bu planlama türünün diğer planlama türünden farkı toplam maliyeti minimize etmeye çalışmasıdır (Desaulniers & Hickman, 2007: 59-69-70).

Tablo 1’de görülen toplu taşıma ağ planlama süreci tüm toplu taşıma türleri için geçerlidir. Kısaca otobüs, metrobüs, tramvay, metronun da dahil olduğu tüm toplu taşıma türleri için bu planlama faaliyetleri uygulanabilmektedir. Tablo 1’de yer alan her planlama faaliyeti sonucunda elde edilen çıktı aslında kendisinden sonra gelen planlama faaliyetleri için girdi olmaktadır. Bu nedenle genellikle sistemin kapasitesinden en üst düzeyde yararlanmak ve sistemin üretkenliğini ve verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için dört faaliyetin hepsinin aynı anda planlanması arzu edilir. Toplu taşıma ağ planlama sürecinin aşamaları takip eden bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### 1.1.1. Ağ Tasarım Aşaması

Toplu taşıma sistemleri çok sayıda insanın hareketini sağlamak zorundadır. Yetkililer, yolcular farklı rotaları kombine ederek uzun ve karmaşık yolculuklarını yapabilsin diye rota ağları sağlayarak çok sayıda insanın hareket etmesine fırsat yaratmaya çalışırlar. Ancak yetkililerin bütün gereklilikleri karşılayacak doğrudan bir toplu taşıma rotası sağlanması mümkün değildir. Bu sebeple genellikle ağlar veya rota ağları ifadesi; seyahat edenlerin seyahatlerinde bir, iki ya da daha fazla farklı rota kullanabilmesi için, bireysel rotaların bir diğerinin tamamlayıcısı olduğu ve belirli bir alana hizmet veren toplu taşıma rotalarının tamamını tanımlamak için kullanılır. En etkin ağ, bir seyahat boyunca kullanılan ayrı rotaların sayısını minimize edendir ve rotalar arasındaki değişimin olabildiğince kolay yapıldığı ağdır.

Ağ tasarımı faaliyeti, toplu taşıma ağ planlama sürecinin ilk aşamasıdır. Bu aşama toplu taşıma ağ tasarımı sürecinin en önemli parçasıdır. Çünkü toplu taşıma sisteminin maliyetinin büyük bir kısmı bu aşamaya bağlıdır. Bu aşamada amaç belirli bir bölgede otobüs duraklarını sıralayarak belirlenecek her bir rota ile otobüs rotasını tanımlamaktır. Otobüs rotasını belirleyebilmek için girdi verisi olarak kullanılacak bilgiler; bölgenin topolojisi, yollar, otobüs durakları için olası alanlar ve aktarma noktaları olarak tanımlanabilir (Guihaire & Hao, 2008: 1253). Bu aşamada kalkış-varış yeri matrisine (origin-destination matrix) ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü halkın talebini olabildiğince yüksek oranlarda karşılayacak toplu taşıma rota ağının belirlenmesinde kalkış-varış yeri matrisi kullanılmaktadır. Bu aşamada mevcut duraklar kullanılarak rota kümesi oluşturulabileceği gibi, var olan duraklar kümesine yeni duraklar eklenerek de yeni rota kümesi oluşturulabilir.

Bir toplu taşıma ağı tasarımında genellikle şu aşamalar izlenir: ilk olarak aday bir rota kümesi belirlemek için bir rota üretme stratejisi geliştirilir. İkinci olarak, bir başlangıç çözümü üretmek için aday rotaları kombine edecek bir prosedür belirlenir. Üçüncü aşamada, önceden üretilen çözümlere bağlı olarak ve iteratif işlemler ile yeni bir çözüm üretilir. Sonrasında bu yeni çözüm test edilir ve tatmin edici bir rota kümesi elde edilinceye kadar yeni çözümler analiz edilir (Bagloee & Ceder, 2011: 1789). Zaman çizelgesi geliştirme ile ilgili bütün kararlar ağ tasarım aşamasına bağlıdır (Ceder & Wilson, 1986:333; Owais, Osman & Moussa, 2015: 670) .

### 1.1.2. Sıklık Ayarlama ve Zaman Çizelgesi Oluşturma

Bu planlama aşamasında ilk olarak sıklık ayarlamaları yapılmaktadır. Burada amaç ağ içindeki her bir hat ve her bir zaman aralığı için sefer sıklıklarını belirlemektir. Çalışacak olan hatların sayısı bu aşamada belirlenmektedir. Diğer bir deyişle, her planlanan dönemde yolcu talebini karşılamak için ihtiyaç duyulan saatlik sefer sayısına karar verilmektedir.

Sefer sıklıklarına karar verildikten sonra zaman çizelgesi oluşturulmaktadır. Bu aşamada ağıdaki her hat tarafından hizmet verilen bütün duraklardan kalkış zamanını içeren bir zaman çizelgesi elde edilir. Bir diğer tanıma göre ise zaman çizelgesi oluşturma, bazı ana duraklarda doğru zamanlanmış yolcu seyahatlerini en üst düzeye çıkarmak için tüm yolculukların kalkış saatlerinin belirlenmesidir (Ibarra-Rojas, Giesen & Rios-Solis, 2014: 35). Bir hat rotasının zaman çizelgesi başlangıç terminalindeki hareket saatinden, rota üzerindeki her bir duraktan kalkış saatinden ve son durağa beklenen geliş saatinden oluşur. Sıklık ayarlama ve zaman çizelgesi oluşturma takip eden bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

### 1.1.3. Araçların Çizelgelenmesi Aşaması

Araçların çizelgelenmesi aşamasında, seyahatler zinciri yaratmak amaçlanır ve bu zincirin her biri verilen zaman çizelgesine göre bir araç programı olarak anılmaktadır (Ceder, 2007:7). Bu aşamanın ana amacı, planlanan dönem boyunca (genellikle bir gün uzunluğunda) ihtiyaç duyulan otobüs sayısını belirlemek ve bu otobüs sayısını minimize etmektir. Bütün planlanan seyahatleri kapsayan araç-seyahat atamaları bu aşamada yapılmaktadır (Ibarra-Rojas, Delgado, Giesen & Munoz, 2015: 40). Bu planlama problemi kombinatoriyal bir problemdir ve şu şartları taşıması gerekir: her sefere en az bir araç ataması yapılmalıdır, farklı teknik ve işletme kısıtlamalarına uyulmalıdır ve bir minimizasyon problemi olarak ele alınmalıdır (Carraresi & Gallo, 1984: 139). İhtiyaç duyulan minimum araçlar ile var olan zaman çizelgelerini işletebilmek için boş seferlerin seyahatlerini bir rotadan başka bir rotaya aktarmak gerekir. Araç çizelgeleme işlemlerinin etkin bir şekilde yapılması oldukça önemlidir. Çünkü bu sayede toplu taşıma hizmeti sağlayıcıları hem hizmet kalitesini arttırabilirler hem de işlemsel maliyetlerin azaltılmasını sağlayabilirler (Zuo, Chen, Tan & Zhou, 2014: 1031).

Tablo 1'e göre bir toplu taşıma ağının araç çizelgelerinin hazırlanabilmesi için araçların boş kalma sürelerinin, tamir ve bakım sürelerinin, zaman çizelgelerinin ve maliyet yapılarının bilinmesi gerekmektedir. Araçların boş kalma süresi ile kast edilen bir sonraki seyahat için otobüsün hazırlanması gereken minimum ve maksimum sürelerdir. Ayrıca burada seferin başlayacağı ve biteceği istasyonların da bildirilmesi gerekmektedir. Bunlara ek olarak farklı kapasiteye sahip farklı türde araçların sayısı ve maliyetleri de araç çizelgelemede önemli unsurlar arasında yer almaktadır (Ceder, 2002: 225).

Üç farklı türde araç rotalama problemi vardır. Bunlar: tek depolu araç çizelgeleme problemi, çok depolu araç çizelgeleme problemi ve Robust araç çizelgeleme problemidir. Tek depolu araç çizelgeleme problemlerinde bütün seyahatlerin, depo olarak adlandırılan bir istasyondan kalkan ve aynı istasyona geri dönen araçlar tarafından kapsanması için araçların zaman çizelgeleri belirlenir. Çok depolu araç rotalama probleminde araçlar birçok farklı depodan hareket eder. Robust araç çizelgeleme probleminde, araç çizelgeleri trafik sıkışıklığından ve sürücülerin davranışlarından çok güçlü bir şekilde etkilenir (Ibarra-Rojas, vd., 2015: 56-57).

#### 1.1.4.Sürücü Çizelgeleme Aşaması

Bu aşamada, otobüslere şoförlerin atanması amaçlanmaktadır. Her şoför belirli bir dönem için bir zaman çizelgesine sahip olur. Burada zaman çizelgesi hazır olan otobüslere ya da trenlere sürücülerin atanması işlemi yapılmaktadır. Sürücü çizelgeleme, aslında insan kaynakları yönetiminin işidir ve hatların çalışma saatleri birbirinden farklı olduğu için ve günden güne değişebildiği için oldukça karmaşık bir iştir. Ayrıca burada işçi birlikleri ya da toplu taşıma işletmecileri tarafından belirlenen kurallara uyulması gerekmektedir. Kısaca bir yandan işletimciler için ücret harcamalarını azaltmak amaçlanırken bir yandan da farklı yönetsel kurallara uyulması gerekmektedir (Vuchic, 2005: 59).

Sürücü çizelgeleme aşamasında, duraklar, rota başlangıç ve bitiş duraklarının hangileri olduğu, sürücülerin iki sefer arasındaki maksimum ve minimum dinlenme süreleri, görevin uzunluğu yani günde kaç saat çalışacağı, sürücülerin adları ve soyadlarının yazılı olduğu bir liste, çalışma ücretleri ve koşulları gibi bilgiler girdi verisi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bir önceki aşama olan araç çizelgeleri de bu aşamanın girdi verisi olarak kullanılmaktadır. Hangi hatlarda hangi araçların kullanılacağı, araçların rotalar arasında nasıl değiştirileceği bilgisi aslında sürücü çizelgeleme aşamasının ana girdi verisidir. Sürücü çizelgeleme işlemleri bu bilgilere göre yapılmalıdır (Bunte & Kliewer, 2009: 300).

Toplu taşıma ağ planlama sürecinin etkin, düşük maliyetli ve verimli bir şekilde gerçekleştirebilmesi amacıyla yolcu konforu ve hizmet maliyetleri arasında bir uzlaşma sağlanması gerekmektedir. Bunu bir örnekle açıklamak gerekirse, kullanılan otobüs sayısı minimize edilirken gözlemlenen yolcu talebinin karşılanabilmesi amacıyla bir ulaşım zaman çizelgesi oluşturulduğunda, yolcu talebi ve otobüs arzı arasında uyum sağlanması gerekir.

## 2. Sıklık Ayarlama ve Zaman Çizelgesi Oluşturma

Bir saat boyunca (ya da günlük çalışma süresi gibi benzer zaman aralıkları da kullanılabilir) belirli bir yönde toplu taşıma hattı üzerindeki bir noktadan (duraktan) geçen araç sayısı hizmet sıklığı olarak tanımlanmaktadır. Sefer aralığı ise bir toplu taşıma hattı üzerinde aynı yönde sabit bir noktadan geçen iki otobüsün hareketi arasındaki zaman aralığıdır (Vuchic, 2005: 11). Tanımlardan da anlaşılacağı üzere sefer aralığı, sefer sıklığının tersidir.

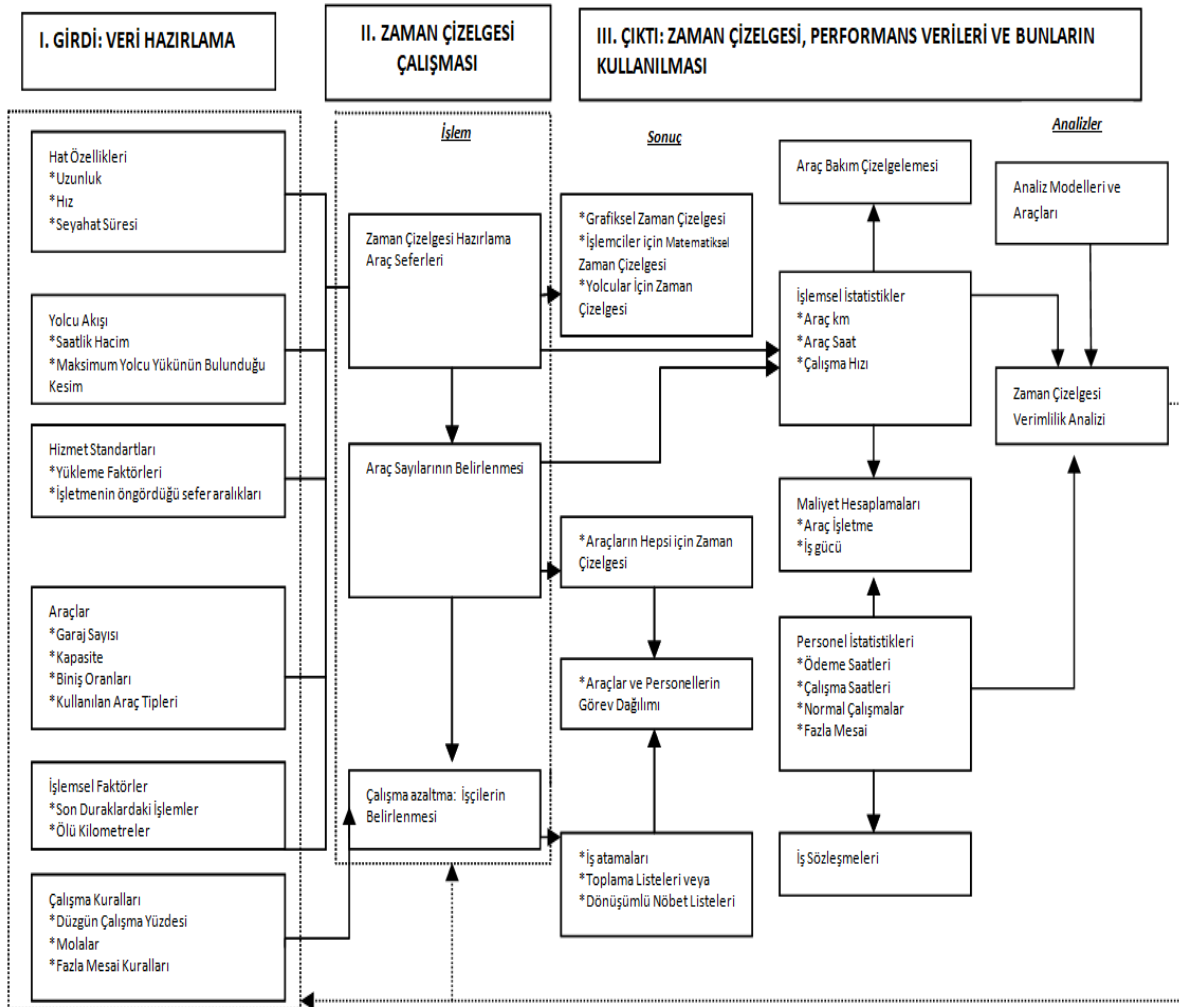
Her bir rota için sefer sıklıkları ve otobüs türleri rota tasarımı aracılığıyla belirlenen operasyonel özelliklerdir. Hesaplamalar, ulaşılabilirlik, filo büyüklüğü ve istenen yükleme faktörleri gibi sıklık ihtiyaçları kısıtları altında toplu taşıma atama teknikleri uygulanarak veya deneysel olarak tahmin edilen rotalar boyunca beklenen yolcu büyüklüklerine dayandırılır. Bütün tasarım aşamalarında olduğu gibi bu aşamada da toplu taşıma planlayıcılarının uzman görüşleri ve operatörlerin tecrübeleri oldukça önemlidir (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009: 491-492).

Ağdaki her bir hat ve her bir çalışma dönemi için bir sefer sıklığı belirlenmelidir. Sefer sıklığı belirlemek için rotaların belirlenmiş olması gerekmektedir. Ayrıca beklenen toplu taşıma talebinin de bilinmesine ihtiyaç vardır. Çünkü yolcuların hangi rotaları hangi oranda kullanacağı bilinirse, otobüslerin sefer sıklıkları buna göre hesaplanabilir. Burada gidiş – varış yeri matrisleri önem kazanmaktadır. Otobüs filosunun büyüklüğü de bu aşamada oldukça önemli bir veridir. Çünkü bazı durumlarda sefer sıklıkları filo büyüklüğüne ve otobüs kapasitesine göre ayarlanmaktadır. Sefer sıklıkları ayarlanırken karar vericilerin amacı talebi tatmin etmektir. Ancak bunu yaparken tüm hatlar göz önünde bulundurulacağı için aynı zamanda maliyet etkin bir şekilde yapılması gerekmektedir. Ayrıca karar vericilerin ya da düzenleyicilerin, devlet ya da diğer kurumlar tarafından izin verilen sefer aralıklarına uyması gerekmektedir (Guihaire & Hao, 2008: 1254).

Zaman çizelgesi hazırlama ise her sabit rota üzerinde istenen sıklığı bir zaman planına dönüştürme sürecidir. Bu sürecin girdileri rota yapısını, ana zaman noktaları (bir gün içindeki ilk seferlerin ve son seferlerin saati) arasındaki çalışma süresini, hizmet sıklığını ve duraklardan kalkış süresini içerir. Buradan elde edilen sonuç bir seyahatler kümesidir ve rota üzerindeki duraklar ile ana noktalar arasındaki zamanın planlanmasıdır (Desaulniers & Hickman, 2007: 91). Vuchic (2007)'e göre toplu taşıma zaman çizelgesi, hizmet sıklığının, ihtiyaç duyulan araç sayısının, seyahat süresinin ve ilgili diğer işletme elemanlarının hesaplanması sürecidir.

Zaman çizelgesi oluşturmanın ve geliştirmenin amacı, genel toplu taşıma talebini karşılamaktır. Talep günün saatlerinden saatlerine, haftanın günlerinden günlerine, mevsimden mevsime ve yıldan yıla değişmektedir. Zaman çizelgesinin belirlenmesi yolcuların sayısı temel alınarak yapılmalıdır ve hizmet sıklığı kısıtlarıyla uyumlu olmalıdır.

Sefer sıklığı ve zaman çizelgesi oluşturma aşaması operasyonel bir planlama faaliyetidir ve en basit şekilde bir toplu taşıma ağında zaman çizelgesi oluşturmak için Şekil 1'de gösterilen adımların izlenmesi gerekmektedir.



Şekil 1. Toplu Taşıma Ağı Zaman Çizelgesinin Akış Şeması

Kaynak: Vuchic, 2005: 4

Şekil 1'e göre toplu taşıma zaman çizelgesi oluşturma 3 aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama girdilerin yani verilerin hazırlanması aşamasıdır. Bu aşamada zaman çizelgesi oluşturmak için ihtiyaç

duyulan veriler belirlenir ve gerekli hesaplamalar yapılacak şekilde düzenlenir. Zaman çizelgesi oluşturmak için ihtiyaç duyulan veriler; hat özellikleri, var olan hattın mevcut zaman çizelgesi, yolcu büyüklükleri, hizmet standartları, araçların özellikleri, her hat için işlemsel faktörler ve çalışma kuralları ile çalışma standartlarıdır. Görüldüğü gibi bu veriler aslında hat uzunluğu gibi sabit sayılardan ve yolcu sayıları ve araç sayıları gibi dönemsel olarak güncellenen sayılardan ve son olarak çeşitli özellikler ve standartlardan oluşmaktadır.

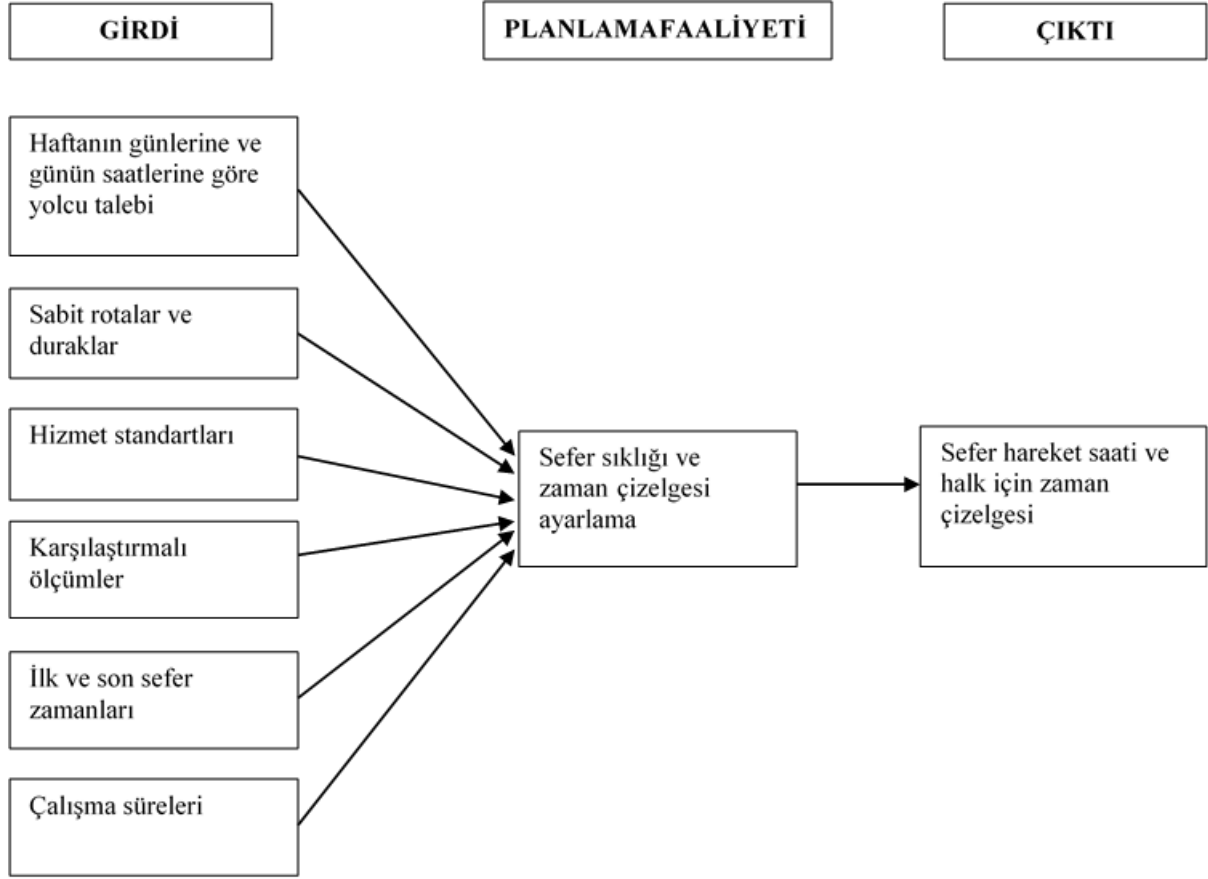
Bu girdiler yani veriler elde edildikten sonra bu sürecin merkezi bileşeni ve ikinci aşaması olan zaman çizelgesi oluşturma aşamasına geçilir. Bu aşama genellikle 3 bölüme ayrılır. İlki zaman çizelgesi hazırlamadır. Burada sefer aralıklarına, sefer bitiş zamanlarına ve diğer elemanlara karar verilir. Bunun sonucunda grafiksel ve sayısal zaman çizelgeleri elde edilir. Bu zaman çizelgesi işletme personeli ve halk için hazırlanır. Zaman çizelgesi oluşturma aşamasında ikinci bölüm, araçların hazırlanmasıdır. Bunun anlamı zaman çizelgesi üzerinde belirlenen bütün seferlere araçların atamasının yapılmasıdır. Bu işlemlerden sonra bir gün için her bir aracın çalışma programı hazırlanmış olur. Zaman çizelgesi oluşturma aşamasının üçüncü bölümü ise bir gün boyunca sürücülerin iş görevlerinin belirlenmesidir. Bu işlemler her bir sürücü için nöbet listelerinin hazırlanmasını sağlamaktadır. Sürücülerin tam zamanlı mı veya yarı zamanlı mı çalışacağı ya da mesaiye kalıp kalmayacağı bu bölümde belirlenmektedir (Vuchic, 2005: 46-47).

Toplu taşıma ağı zaman çizelgesi oluşturma son aşaması ise çıktıların elde edilmesidir. Zaman çizelgesinin hazırlanmasının sonucunda araçların atamaları yapılır, sürücülerin ataması yapılır ve çalışacak araç sayıları belirlenir. Ayrıca bunlara ek olarak araç-km, ödeme-saat, iş-saat gibi çeşitli performans verileri de elde edilebilir. Bu veriler maliyet hesaplamalarında, toplu taşıma ile ilgili raporlarda ve en önemlisi zaman çizelgesinin verimliliğinin analizinde kullanılabilir.

Vuchic (2005) Şekil 1'de sefer aralığı ve zaman çizelgesi oluşturma, araçlar için zaman çizelgesi oluşturma ve sürücüler için zaman çizelgesi oluşturma aşamalarını açıklamıştır ve bunlar birbirini takip eden aşamalardır. Önce zaman çizelgesi oluşturulur. Sonrasında araçların seferlere ataması yapılır ve en sonunda da sürücüler araçlara atanır. Kısaca Şekil 1'de genel olarak bir toplu taşıma hattı işlemlerinin planlaması sürecindeki bütün çizelgeleme işlemleri birlikte gösterilmektedir.

Ancak bu çalışmanın ana konusu olan toplu taşıma zaman çizelgesi ve sefer aralığı oluşturma süreci Şekil 2'de gösterilmiştir. Spesifik olarak değerlendirildiğinde bu süreç Şekil 1'de belirtilenden çok daha karmaşık bir süreçtir ve sefer sıklığını ve zaman çizelgesini hazırlamak için çok farklı verilere ihtiyaç duyulmaktadır.





**Şekil 2.** Toplu taşıma sefer sıklığı ve zaman çizelgesi ayarlama süreci  
**Kaynak:** Ceder, 2007: 5

Şekil 2’de toplu taşıma zaman çizelgesi oluşturmak için yolcu talebinin, var olan rotaların ve durakların sayısı ve yerinin, hizmet standartlarının, ilk ve son sefer zamanlarının, çalışma sürelerinin ve diğer bazı ölçüm değerlerinin bilinmesi gerektiği görülmektedir. Bu bilgiler ışığında zaman çizelgeleyici, sıklıkları ve zaman çizelgesini hazırlayabilmektedir. Bunun sonucunda da vatandaşların faydalanabileceği zaman çizelgeleri oluşturulmaktadır.

Toplu taşıma ağ planlama sürecinde sefer sıklıklarının ve zaman çizelgesinin birlikte ele alınmasının sebebi, zaman çizelgesinin sıklıklardan türeyen bir küme oluşturmasıdır. Genellikle sıklıkların belirlenmesi için kullanılan temel kriterler: (a) yolcu talebini karşılamak için uygun araç alanını sağlamak ve (b) minimum sıklıkla hizmeti garanti etmektir (Ceder, 2007: 84).

Araç arzı ve yolcu talebi arasında iyi bir eşleşme olması için araç sayısı minimize edilirken gözlemlenen yolcu talebinin karşılandığı çizelgelerin oluşturulması gerekmektedir. Uygun sıklık atamalarının kullanıcıları memnun edecek düzenli hizmeti sağlamalı ve işletimci maliyetlerini ve ihtiyaç duyulan filo büyüklüğünü azaltacak kadar seyrek olmalıdır. Çalışmanın bu bölümünde toplu taşıma sefer aralığı/sefer sıklığı belirleme problemleriyle ilgili yapılan çalışmaların bir özeti olan literatür taramasına yer verilmiştir. Literatür taraması, kullanılan yöntemlere göre, matematiksel yöntemler, sezgisel ve metasezgisel yöntemler ve diğer yöntemler olmak üzere üç ayrı alt bölümde özetlenmiştir.

## 2.1. Matematiksel Yöntemler

Yapılan literatür taramasına göre, sefer aralığı belirlemek için kullanılan ilk matematiksel yöntem Salzborn (1972) tarafından geliştirilmiştir. Salzborn (1972) ihtiyaç duyulan otobüs sayısını ve varyans

hesabını kullanarak yolcuların bekleme süresini minimize etmek amacıyla yolcu geliş oranlarına göre sefer sıklıklarını belirlemiştir.

Scheele (1980) sefer sıklıklarını belirlemek için karşılaştırmalı minimizasyon problemi şeklinde doğrusal olmayan bir model formüle etmiş ve seyahat sürelerini minimize etmek amacıyla, yolcuların seyahat atamalarını sefer sıklığı ayarlama problemleri ile birlikte eşzamanlı olarak çözmüştür.

Furth ve Wilson (1981) kullanıcıların faydalarını arttırmak ve bekleme sürelerini azaltmaktan oluşan net sosyal fayda maksimizasyonu sağlamak amacıyla sefer sıklığı belirleme problemi için bir matematiksel model geliştirmiştir. Burada kullanıcı faydası ile kast edilen bekleme sürelerinin azaltılması iken toplum faydası ile kast edilen ise, trafik yoğunluğunu, hava kirliliği ve enerji kullanımını azaltmaktır. Geliştirilen modelde filo büyüklüğü, maksimum sefer aralığı ve toplam bütçe kısıtları kullanılmıştır. Maksimum sefer aralığı ve filo büyüklüğü gevşetildiğinde problem Kuhn-Tucker şartlarının kullanıldığı bir algoritma yardımıyla çözülmüştür.

Constantin ve Florian (1995) filo büyüklüğü kısıdı altında yolcuların beklenen toplam seyahat süreleri ve bekleme sürelerini minimize etmek amacıyla sefer sıklığı belirleme problemi için bir doğrusal olmayan karma tamsayı programlama modeli ve bir çözüm önerisi ortaya koymuştur. Yolcuların rota seçimlerini göz önünde bulundurarak optimum hat sefer sıklıklarını belirlemek için bir algoritma sunulmuştur. Modelin denemeleri Stockholm, Winnipeg ve Portland'da şehir içinde çalıştırılmıştır.

Uludağ (2010) İzmir ili kent içi otobüs ağı sefer sıklıklarını ve durak yerlerini optimize etmek amacıyla Lozan ve Montrö duraklarını kullanan toplam 26 adet hattın otobüs yoğunluğunun fazla olduğu sabah saatlerine (09:00 – 11:00) ait yolcu talep değerleri, sefer sıklıkları, seyahat süreleri ve filo parametrelerini kullanarak bir doğrusal programlama modeli geliştirmiş ve WINQSB programı ile sefer sıklıklarını belirlemiştir. Sonrasında yolcuların duraklara erişim sürelerini ve seyahat sürelerini en aza indirmek amacıyla geliştirilen bulanık doğrusal programlama modeli ile bu hatlar üzerinde yer alan durakların arasındaki mesafe optimize edilmeye çalışılmıştır. Problemin çözümünde LINGO programı kullanılmıştır.

Deri (2012) İzmir kent merkezindeki toplu taşıma olanakları ve yolculuk eğilimlerini incelediği çalışmada sefer sıklıklarını optimize etmek amacıyla İzmir güney-batı bölgesi ile Konak-Halkapınar arasında hizmet veren otobüs hatlarını incelemiştir. Sabah zirve saatlerinin sefer sıklıklarının optimize edilmesi amacıyla hafta ortası bir güne ait yolculuk verileri kullanılarak Doğrusal Hedef Programlama (DHP) modeli geliştirilmiştir.

Hadas ve Shnaiderman (2012) stokastik talep ve seyahat süresi ile aşırı yolcu yükü ve boş koltukla çalışma maliyetlerini göz önünde bulundurarak toplu taşıma sıklıklarını ayarlamak için bir model geliştirmiştir. Bu model maliyetlere dayalı sıklıkların optimize edilmesini sağlamaktadır. Burada maliyetler, işlem seviyesinin sayısal ölçümlerinin sebep olduğu işletimci maliyetleri ve yolcu konforudur. Ayrıca model, seyahat süresi ve talep dalgalanmaları yüzünden sıklıklarla ilgili gerekli düzenlemeleri de yansıtmaktadır. Bu modelde sıklıklar ve araç kapasitesi kısıtları ile maliyetler minimize edilmeye çalışılmıştır.

Verbas and Mahmassani (2013) toplu taşıma ağı sıklık ayarlama problemleri için bir formülasyon önermiştir. Bu formülasyon her otobüs rotası boyunca çoklu hizmet yapılarının varlığını tanımlarken zaman ve yer ile ilgili kaynakların optimum tahsisini öngörmektedir. Toplu taşıma kuruluşları hem kullanıcıların hem de işletimcilerin faydalarını maksimize etmek için bu sınırlı kaynakları optimal bir şekilde tahsis etmelidir. Hizmet türleri ile rotaların birleşimi, rotaların hepsi ya da bir kısmı boyunca etkinliğin sağlanmasını ve kullanıcı ve işletimci açısından bir formülde birleştirilmesini sağlar. Kullanıcılar duraklarda rota sefer aralıklarının birleştirilmiş sonucunu görürler. Binen yolcu sayıları o

duraktan geçen otobüs sayılarına göre değişmektedir. Bu noktada iki formül geliştirilmiştir. Birincisi Furth ve Wilson (1981)'in çalışmasından türetilmiştir ve bütçe, filo büyüklüğü, sefer aralığı kuralı ve otobüs yükleme kısıtları altında yolcuların binış sayılarını maksimize etmeyi ve toplam bekleme sürelerini azaltmayı amaçlamaktadır. İkincisi ise, bütçe, filo büyüklüğü, sefer aralığı kuralı, otobüs yükleme, minimum binen yolcu sayısı ve minimum bekleme süresi kısıtları ile net maliyetleri minimize etmeyi amaçlamaktadır. İki formülasyonda da günün farklı zamanlarına göre örnek sefer aralıkları karar değişkenidir. Bu kapsamda doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi önerilmiştir. Problemin çözümünde ticari doğrusal olmayan optimizasyon problemi çözücü AMPL–KNITRO kullanılmıştır. Verbas, Frei, Mahmassani ve Chan (2015) ise bu çalışmayı daha geniş bir örneklem ile zamansal ve konumsal talep esnekliğinin etkisini analiz etmek amacıyla yeniden ele almıştır.

Martinez, Mauttone ve Urquhart (2014) her hat boyunca talebi ve sefer sıklığını birlikte belirlemek için bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Problemden ayrı sefer sıklıkları, kapasitesiz araçlar ve sınırlandırılmış filo büyüklüğü göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmanın ana faydası ise yolcuların varış yerlerine ulaşabilecekleri en kısa yolu seçtikleri varsayılarak toplu taşıma atama kararlarının modellenmesidir. Önerilen formülasyon, sefer sıklıkları sabit bir şekilde ayarlandığında bağımsız problemlerin alt gruplara ayrılmasına izin veren özel bir yapıya sahiptir. Model gerçek bir toplu taşıma ağında test edilmiş olup, sonuçlar modelin gerçek sistem ile karşılaştırıldığında seyahat süresini %13 azalttığını göstermektedir. Modelin büyük örneklerle uygulanması zor olduğu için, bir tabu arama modeli geliştirilmiş ve Uruguay'ın Montevideo şehrinin toplu taşıma ağına uygulanmıştır. Mevcut sistem ile model sonuçları kıyaslandığında ise %1,7'lik bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Gkiotsalitis ve Cats (2017) otobüs çalışma süresi boyunca yaşanan talep ve seyahat süresi değişimlerinin olumsuz etkilerini azaltmak için operasyonel değişiklik konularını sıklık ayarlama problemiyle birlikte ele almıştır. Önerilen sıklık ayarlama modelinde günün farklı saatleri için, her otobüs rotasının seçiminde talep, sefer aralığı ve seyahat süresindeki değişimler göz önünde bulundurulmuştur. Problem doğrusal olmayan ayrı sefer programlama ile formüle edilmiş ve kısıtlara da doğrusal olmama şartı yansıtılmıştır. Problemin çözüm yönteminde dal ve sınır ve Ardışık İkinci Derece Programlama (Sequential Quadratic Programming) yöntemleri esas alınmıştır. Önerilen modelin performansı Stokholm'de 17 merkez otobüs hattı üzerinde test edilmiştir.

Demirkollu (2017) Denizli ilinde faaliyet gösteren belediye otobüs hatlarının sefer sıklıklarını en iyilemek amacıyla bir doğrusal hedef programlama modeli geliştirmiştir. Modelde 42 otobüs hattının, kış sezonu yani okul sezonu, yaz sezonu yani tatil sezonu ve hafta sonu pazar günlerinin en yoğun yolcu taleplerinin bulunduğu günleri göz önünde bulundurulmuştur. Geliştirilen model ile sefer sıklıkları azaltılmış ve yakıt ve iş gücü maliyetleri düşürülmüştür.

Alkheder, AlRukaibi ve Zaqzouq (2018) Kuwait toplu taşıma şirketi için günlük talebi karşılayacak şekilde kaç sefer olması gerektiğini ve bu seferleri karşılamak için ihtiyaç duyulan otobüs sayılarını farklı otobüs türlerine göre belirlemek amacıyla ilk olarak bir tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Modelin ana amacı kullanılan otobüs sayısını ve böylece toplam maliyetleri minimize etmektir. Pareto analizi yardımıyla şehirdeki en önemli 5 hat örneklem olarak seçilmiştir. Sonrasında her bir rota için yıllık toplam kâr hesaplanmış ve mevcut durum ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, 5 hatta ortalama günlük talebi karşılamak için günlük sefer sayısına 668,5 seferin daha eklenmesi ve 81 adet otobüsün daha filoya dahil edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Bertsimas, Sian ve Yang (2020) çok araçlı toplu taşıma ağlarında zaman çizelgesi sıklığı ve fiyatı-ücreti birlikte optimize etmek için genel bir sistem önermiştir. Bu sistem çok terimli logit model aracılığıyla toplu taşıma işletimcileri tarafından alınan sefer sıklığı ve fiyat – ücret kararlarına yolcuların

cevaplarının ne olacağı geri bildiriminden oluşmaktadır. Yolcuların seçimleri toplu taşıma hizmetleri için talebi göstermektedir ve toplu taşıma hizmet sağlayıcıları toplu taşıma hizmetinde bekleme süresini minimize ederek bu talebi etkin bir şekilde karşılamak için çabalamaktadırlar. Bekleme süresi minimizasyonu amacıyla geliştirilen doğrusal olmayan modele bütçe, kapasite ve yolcu tercihi kısıt olarak dahil edilmiştir. Burada yolcuların tercihlerinden kast edilen toplu taşıma hizmetleri ile Uber ve Lyft gibi çağırılan özel araçlar arasında yolcuların yaptığı seçimdir.

Pathak, Agrawal, Suman ve Bolia (2020) yolcuların neden olduğu kalabalık rahatsızlığı maliyetini amaç fonksiyonundaki bekleme süresi, araçta geçen süre ve işlemler gibi diğer maliyet bileşenlerine dahil eden bir sefer sıklığı optimizasyon modeli geliştirmiştir. Kalabalık rahatsızlığı maliyetinin yükleme faktörünün üstel bir fonksiyonu olarak tahmin edildiği çalışmada doğrusal olmayan karma tamsayı bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model Hindistan'ın Delhi şehrinde 34 otobüs rotasında uygulanmıştır.

de Weert ve Gkiotsalitis (2021) pandeminin getirdiği kapasite limitlerini ve hizmet verilmeyen yolculardan kaynaklanan gelir kayıplarını göz önünde bulundurarak orijinal ve kısa döngülü otobüs hatlarının sefer sıklıklarını optimize eden karma tam sayılı quadratik bir model önermişlerdir. Önerilen model, Hollanda'nın Twente şehrinde hizmet veren iki otobüs hattında uygulanmıştır. Önerilen modelin, araç çalıştırma maliyetlerini ve hizmet almayan yolculardan kaynaklanan gelir kayıplarını dikkate alan amaç fonksiyonunun performansını iyileştirdiğini gözlemlenmiştir.

Polat, Sağbaşı ve Dermenci (2022) sefer sıklıklarının ve sayılarının optimum sayılarını belirlemek için bir doğrusal hedef programlama modeli önermişlerdir. Önerilen model Çorlu ilçesinin 6 nolu hattında uygulanmıştır. Modelin sistem kısıtları belirlenirken, her hattın otobüs sefer sürelerini, her otobüs hattının aldığı yol uzunluğunu ve otobüs taşıma kapasitesinin o hattaki yolcu talebini karşılaması esas alınmıştır. Önerilen model sonuçlarına göre, ay bazında ortalama sefer sayıları (12 aylık) mevcut sefer sayılarından daha düşüktür. Bu sayede yakıt kazanç miktarı belirlenmiştir.

## 2.2. Sezgisel ve Metasezgisel Yöntemler

Literatürde sefer sıklığı belirleme problemlerinin çözümüne matematiksel yöntemlerin yanı sıra sezgisel ve metasezgisel yöntemler yardımı ile de yaklaşılmıştır. Optimizasyon algoritmaları kesin algoritmalar ve yaklaşık algoritmalar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılırlar. Kesin algoritmalar probleme kesin sonuç verirler. Yaklaşık algoritmalar kesin ya da kesin olmayan sonuçlar verebilirler. Diğer bir deyişle probleme yaklaşık sonuçlar verirler. Yaklaşık algoritmalar sezgisel (heuristik) ve metasezgisel (metaheuristik) olarak iki kategoriye ayrılırlar (Desale, Rsool, Andhale & Rane, 2015: 296). Sezgisel algoritmalar arama uzayının genellikle sınırlı bir araştırmasını yapar ve neredeyse doğru cevabı verirler veya problemin bütün örnekleri için bir çözüm sağlayamazlar (Kokash, 2005: 2). Metasezgisel algoritmalar ise arama alanını keşfetmek ve kullanmak için farklı kavramları birleştirerek ikincil bir sezgisel algoritmayı yönlendiren iteratif bir üretim süreci olarak tanımlanır. Optimale en yakın sonuçları bulmak amacıyla bilgiyi yapılandırmak için öğrenme stratejilerini kullanır (Osman & Laporte, 1996: 514). Sezgisel algoritmalar en yakın komşuyu seçerek problemi çözmeye çalışırken, metasezgisel algoritmalar global optimumu bulmayı amaçlarlar. Sezgisel algoritmalar, yerel arama (local search), böl ve yönet (divide and conquer), dal ve sınır (branch & bound)'dir. Metasezgisel algoritmalar ise tavlama benzetimi, tabu arama, sürü zekası, genetik algoritma, yapay sinir ağları, diferansiyel gelişim ve yapay arı kolonisidir. Sezgisel ve metasezgisel algoritmalar, matematiksel optimizasyonun uzun hesaplama süreleri ya da eksik problem tanımlamaları yüzünden mümkün olmadığı zamanlarda karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır (Stegherr, Heider & Hähner, 2020: 1).

Bu çerçevede sefer aralığı belirleme problemlerinin çözümünde sezgisel ve metasezgisel algoritmaları kullanan çalışmalar incelendiğinde ilk olarak, Han ve Wilson (1982) sezgisel bir yöntem kullanarak yolcuların toplam bekleme süresini ve duraktaki yoğunluğu minimize etmek amacıyla toplu taşıma

sefer sıklığı ayarlama problemlerine bir model önermiştir. Her rota için maksimum yükleme noktasında maksimum doluluk oranını minimize etmek amacıyla yapılan çalışmada her bir rota için kapasite ve filo büyüklüğü kısıtları kullanılmıştır.

Ceder (1984) otobüs sefer sıklıklarını sefer aralıklarını oluşturmak amacıyla otobüs işletmecileri için uygun veri toplama yöntemini tanımladığı ve analiz ettiği çalışmada sefer sıklığını belirlemek için dört farklı yöntem tanımlamıştır. Bunlardan ikisi noktasal ölçüm yöntemine, diğer ikisi araçta ölçüm yöntemine dayanmaktadır. Araçta ölçüm yöntemi noktasal ölçüm yöntemine kıyasla daha detaylı veriler sağlamaktadır ancak maliyetleri oldukça yüksektir. Mevcut eski verilere bağlı olarak bu dört yöntem veri toplama türü seçiminde otobüs planlayıcılarına iyi bir rehberlik sağlamaktadır. Çalışma kapsamında otobüslerin doluluk oranı, kapasitenin aşılmaması gibi durumlarda sefer aralıklarının nasıl belirlenebileceğine de değinilmiştir. Ayrıca tek bir hat için gerekli otobüs seferlerinin ve otobüs sayısının en aza indirilmesi ile birlikte alternatif tarifeler de örnek olarak araştırılmıştır.

Van Oudheusden ve Zhu (1995) otobüsle toplu taşıma sistemlerinde minimum maliyet ile kabul edilebilir bir hizmet kalitesi sağlamak amacıyla mevcut uygulamaları, sınırlı filo büyüklüğünü, park alanlarının eksikliğini, günlere göre trafik şartlarındaki dalgalanmaları dikkate alarak Bangkok'ta sefer aralıklarını düzenlemeye çalışmıştır. Bu amaçla bir doğrusal programlama modeli ve iki sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Bu iki sezgisel algoritmadan biri doğrusal programlamaya dayanırken diğeri türe ve dayandırılmıştır. Sonuçlar iki otobüs hattında uygulanmış ve bu hatlarda hizmet kalitesi artmış, işletme maliyetleri ise azalmıştır.

Tom ve Mohan (2003) yolcuların toplam seyahat sürelerinin ve işlemsel maliyetlerin bir fonksiyonu olarak ifade edilen toplam maliyeti minimize etmek amacıyla bir optimizasyon problemi formüle etmiştir. İki aşamalı bir çözüm yöntemi geliştirilen çalışmada, ilk aşamada aday rota üretim algoritması kullanılarak aday rota kümeleri üretilmiştir. İkinci aşamada, genetik algoritma yardımıyla aday rota kümelerinden sefer sıklıkları ile birlikte bir çözüm rota kümesi seçilmiştir. Eş zamanlı olarak, toplu taşıma sefer sıklıkları ve rotaları, genetik algoritmaya dayalı olarak optimize etmişlerdir.

Park (2005) otobüs işletim maliyeti, yolcuların araçta geçirdiği süre ve kullanıcı aktarma maliyetlerinden oluşan toplam sistem maliyetini minimize etmek için optimal sefer aralığını bulmak amacıyla, genetik algoritma ve simülasyon yöntemini kullanmıştır. İki farklı durumun dikkate alındığı çalışmada, otobüslerin deterministik geliş süreci için genetik algoritma modeli geliştirilmiş ve sefer aralıkları genetik algoritma modeline göre belirlenmiştir. Otobüslerin geliş stokastik olduğunda artık zamanları optimize etmek için simülasyon temelli bir genetik algoritma modeli geliştirilmiştir.

Yu, Yang ve Yao (2009) yolcuların toplam seyahat sürelerini minimize etmek amacıyla, yolcuların rota seçim davranışlarını açıklayarak filo büyüklüğü kısıtına bağlı, optimal sefer sıklıklarının belirlenebileceği iki aşamalı bir model geliştirmiştir. İki aşamalı modelin ilk aşaması düşük seviye sıklık, ikincisi yüksek seviye sıklıktır. İlk aşamada, optimal stratejiye bağlı olarak otobüs rota ağına seferlerin atanması amaçlanırken, ikinci aşamada, rotaların otobüs sıklıklarının, yolcu atamalarının bir sonucu olarak, optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu iki aşamalı problemi çözmek için genetik algoritma etiketleme yaklaşımından oluşan iteratif bir yöntem kullanılmıştır.

Yoo, Kim ve Chon (2010) değişken taleple toplu taşıma sefer sıklığı tasarım problemini modellemek amacıyla, problemi tanımlamak için işbiriksiz Stackelberg oyununu temel alan iki aşamalı optimizasyon modelini kullanılmıştır. Üst aşama işletimci problemi, filo büyüklüğü ve sefer sıklığı kısıtları ile talebi maksimize etmek için doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli olarak formüle edilmiştir. Kapasite kısıtlı alt düzeyde stokastik kullanıcı denge ataması modeli değişken talep ve aktarma gecikmeleri dikkate alınarak çözülmüştür. Önerilen formülasyonu çözmek için, yazarlar iki aşamalı iteratif bir

yöntem geliştirmişlerdir. İlk aşamada belirli bir sefer sıklığı için alt aşama çözülürken ikinci aşamada gradyan izdüşüm yöntemi ile yeni sefer sıklıkları belirlenmektedir.

Luhua, Yin ve Xinkai (2011) yolcuların otobüs bekleme süresini, aktarma yapmak için geçirdikleri bekleme süresini, otobüsün içinde geçirdikleri süreyi ve işletimcilerin otobüsleri çalıştırma sürelerini minimize eden bir model geliştirmiş ve modelin analizinde genetik algoritma yöntemini kullanmıştır.

Dell’Olio, Ibeas ve Ruisa’ncez (2012) talebi karşılamak amacıyla ihtiyaç duyulan sefer sıklığını ve araç kapasitesini belirleme problemine değinmiştir. Bu problem için, otobüs kapasitesi kısıdı göz önünde bulundurularak iki aşamalı bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Problemin üst düzeyinde, toplam kullanıcı ve operatör maliyetlerinin optimizasyonu dikkate alınırken, alt düzeyde toplu taşıma atama kararları yansıtılmıştır. Bu optimizasyon problemini çözmek için üç aşamadan oluşan iteratif bir sezgisel algoritma önerilmiştir. Her bir iterasyonda şu üç aşama uygulanmıştır: (i) sıklıkların başlangıç kümesini oluşturma, (ii) toplu taşıma atama modelini çözmeye ve (iii) araç kapasitesini belirlemek ve yeni sıklıklar bulmak için Hooke–Jeeves algoritmasını uygulama. Önerilen model İspanya’nın Santander kentinin toplu taşıma ağının belirli bir kısmında uygulanmış ve heterojen bir filo kullanarak daha faydalı sonuçlar elde edilmiştir.

Huang, Ren ve Liu (2013) belirsiz yolcu talebini esas alan otobüs sıklıkları optimizasyonu için iki aşamalı bir programlama modeli formüle etmiştir. Çalışmada üst düzey aşama sıklıkları belirlerken alt düzey aşama toplu taşıma ağının her bağlantısı boyunca yolcu akışının ortalaması ve varyansını hesaplar. Önerilen model genetik algoritma yardımı ile çözülmüştür. Geliştirilen model Çin’in Liupanshui şehrinin küçük bir bölümünde uygulanmış ve mevcut durumla kıyaslandığında toplam maliyetlerin %6 oranında azaldığı görülmüştür.

Ibeas, Alonso, dell’Olio ve Moura (2013) otobüs büyüklüklerinin ve sefer aralıklarının optimizasyonu için iki aşamalı bir optimizasyon modeli önermiştir. Problemin üst düzeyinde kullanıcı ve operatör maliyetlerinin minimizasyonu amaçlanırken, alt düzeyinde ulaşım türü seçimi (özel – halk) ile atama modeli kombine edilmiştir. Önerilen modelin çözümünde Hooke-Jeeves arama algoritmasına dayalı sezgisel algoritma kullanılmıştır. Önerilen modelde toplu taşıma sistemindeki trafik sıkışıklığı ve talep esnekliği göz önünde bulundurulmuştur. Çalışma gerçek bir sisteme uygulandığında toplu taşımada otobüsü tercih eden yolcuların sayısının arttığı, yolcuların bekleme sürelerinin kısaldığı, kısa sefer aralıkları için düşük kapasiteli otobüslerin daha uygun olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Owais v.d. (2013) otobüs rotası seçiminde yolcuların oranını takip etmek için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model, toplam seyahat süresini minimize etmek amacıyla toplam otobüs filo büyüklüğüne ve toplu taşıma ağına yolcuların otobüs rotası seçimindeki ilgilerine bakarak sefer sıklığını rotalar arasında optimal bir şekilde ayarlanması konusunda yardımcı olacaktır. Kısaca rotalara yolcu atamak için sefer sıklığını temel alan rota seçim modeli geliştirilmiştir. Toplu taşıma kullanıcılarının seçimi ile otobüs hizmeti sağlayıcılar arasındaki etkileşim karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak düşünülmüştür. Önerilen modelin çözümünde genetik algoritma kullanılmıştır. Önerilen sefer sıklığı ayarlama modeli, otobüs rotaları arasında sefer sıklığı dağılımlarını optimize ederek toplam seyahat süresini minimize etmeye çalışmaktadır.

Li, Xu ve He (2013) firma maliyetlerinin ve yolcuların bekleme süresi maliyetlerinin beklenen değerini minimize etmek amacıyla bir stokastik optimizasyon yaklaşımı tanımlamışlardır. Stokastik parametreler olarak talep, geliş süreleri, binış/iniş süreleri ve seyahat sürelerinin dikkate alındığı çalışmada optimum sefer aralıklarını belirlemek için hibrit bir zeka algoritması geliştirilmiştir. Formüle edilen problemin çözümünde genetik algoritma kullanılmış ve elde edilen sonuçlar geleneksel sefer sıklığı belirleme modelleriyle karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modelin var olan modellerden daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Lin, Ma ve Chen (2018) yolcuların toplam seyahat maliyetlerini minimize etmek amacıyla optimal otobüs sefer sıklıklarını belirlemiştir. Bu amaçla, yolcuların mobil uygulamaları kullanarak gerçek zamanlı bilgiye ulaştıklarını da göz önünde bulundurdıkları bir model geliştirilmiştir. Önerilen bu optimizasyon problemini çözmek için Tabu Arama yöntemi kullanılmıştır.

Özcan (2018) otobüslerin sefer sıklıklarını ve otobüslerin güzergah başlangıçlarından kalkış zamanlarını optimize etmek için iki seviyeli bir simülasyon/optimizasyon modeli önermiştir. Modelin üst aşamasında, kullanıcı ve işletimci açısından maliyetleri minimize eden sefer aralıkları ve kalkış ötelemesi değerlerinin tespit edildiği bir tamsayılı programlama modeli olarak formülize edilmiş ve metasezgisel armoni araştırması (AA) tekniği ile çözülmüştür. Alt aşamada ise kullanıcıların güzergâh seçimlerinin modellendiği toplu taşıma ataması problemi VISUM yazılımının toplu taşıma modülü kullanılarak ele alınmıştır.

Jiang (2022), adalet/tarafsızlığı esas alan otobüs sıklıkları optimizasyonu için iki aşamalı bir programlama modeli formüle etmiştir. Çalışmada üst düzey problemde, ağdaki her bir kalkış-varış yeri çifti için dengelenmiş etkin seyahat maliyetindeki minimum azalma olarak tanımlanan adalet ölçümünü maksimuma çıkarmak ve toplam etkin seyahat maliyetini aynı anda en aza indirmek için sefer sıklığını belirlemek amaçlanmaktadır. Alt düzey problem ise yolcuların rota seçimlerinde seyahat süresinin belirsizliğini ele alan güvenilirliğe dayalı toplu taşıma atama problemidir. Problemi çözmek için çok amaçlı yapay arı kolonisi algoritması geliştirilmiştir.

### 2.3. Diğer Yöntemler

Literatürde sefer sıklığı belirlemek için matematiksel yöntemler, sezgisel ve metasezgisel yöntemler dışında simülasyon, markov zincirleri, stokastik modeller gibi farklı yöntemlerin de kullanıldığı görülmüştür.

Grosfeld-Nir ve Bookbinder (1995) sefer aralığını belirlemek için toplu taşıma hattını bir bütün olarak ele alan iki yeni hizmet kriteri geliştirdikleri çalışmalarında COD adı verilen ilk kriter ile aşırı kalabalık olduğunda yolcuların rahatsızlığını ve ikinci kriter olan POF ile de belirli bir durakta bekleyen bazı kullanıcıların halihazırda kalabalık olduğu için bir araca/otobüse binememe olasılığını ölçmüştür. Her iki kriter de tüm rotanın özelliklerini hesaba katar ve en kalabalık durağı kullanarak geçiş yollarını planlayan benzer kriterlerin genellerler. COD analizinde simülasyon yöntemi kullanılırken, POF rota boyunca mesafe açısından "homojen olmayan" zamana bağlı bir Markov zinciri ile analiz edilmiştir. Çalışmada iki kriterin her birine dayalı modeller gösterilmiş ve İsraili transit şirketi DAN'ın bir dizi güzergâhına uygulanmıştır.

Chen (2007) yolcuların iniş ve biniş duraklarının hattın başlangıç ve bitiş durağı olduğu tek bir hat için beklenen karı maksimize eden stokastik bir optimizasyon modeli önermiştir. Modelde yolcuların gelişinin Poisson sürecine uyduğu varsayılmıştır. Ayrıca her durakta inen ve binen yolcu sayılarının Binom dağılıma ve araç seyahat süresinin Weibull dağılıma uyduğu varsayılmıştır. Bu stokastik optimizasyon probleminin çözümünde homojen ve homojen olmayan Poisson sürecinin ikisini de ele alan geçmişe dönük (retrospective) optimizasyon modeli önerilmiştir. Modelin çözümünde simülasyon yönteminden yararlanılmış ve buna göre önce optimal sefer sıklığı, sonrasında ise optimal sefer aralığı bulunmuştur.

Mohaymany ve Amiripour (2009) bir gün boyunca talepteki değişkenliği ve talebin stokastik yapısını göz önünde bulundurarak, otobüs ağının kapsamasını maksimize etmek amacıyla geliştirilen simülasyon modelinde, gün boyunca talep değişkenliğine göre bekleme süresini minimize etmeyi amaçlamış ve modelde kısıt olarak filo büyüklüğünü dikkate almıştır. Modelde duraklar arasındaki mesafenin sabit olduğu ve talebin normal dağılıma uyduğu varsayımlarında bulunulmuştur. Model için

geliştirilen çözüm algoritması 4 aşamadan oluşmaktadır. İhtiyaç duyulan veriler toplandıktan sonra birinci aşamada, sistemin çalışma kurallarına göre alternatif sefer aralıkları belirlenmektedir. Bu alternatifler simülasyona temel teşkil etmek için kullanılır. İkinci aşama toplu taşıma atamalarıdır ve birinci aşamaya paralel bir şekilde çalışmaktadır. Birinci aşamada ağdaki her iki durak arasındaki en kısa yol bulunmaktadır. İkinci aşamada rotalara yolcuların ataması yapılmaktadır. Üçüncü aşama simülasyon aşamasıdır. Burada her alternatif zaman çizelgesi, kullanım ölçümlerini hesaplamak için simüle edilmektedir. Dördüncü aşamada ise sistem kısıtlarına göre en iyi alternatif seçilmektedir.

Ruiz v.d. (2017), otobüs rotalarının sefer aralıklarında yapacakları küçük değişimlerin şehirdeki toplu taşımanın hizmet kalitesini ve toplu taşımanın eşitliğini (equity) geliştireceğini düşündükleri çalışmada bu düşüncelerini test etmek için ilk olarak bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Simülasyon modeli sosyal eşitlik ve hizmet seviyesinin coğrafik dağılımına göre otobüs sefer aralıklarının etkisini test etmek için geliştirilmiştir. Sonrasında, geliştirilen bu optimizasyon modeli ile hem sosyal eşitliği hem de hizmet seviyesini geliştirmek amacıyla toplu taşıma otobüsleri ağı için otobüs sefer aralıklarının en iyi kombinasyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen model Palma şehrinde uygulanmıştır. Bu çalışmada geliştirilen simülasyon modelinin amacı, otobüs hatlarının sefer aralıklarındaki değişimler konusunda Palma şehrinin farklı komşuları genelinde toplu taşıma hizmet seviyesinin istatistiksel davranışlarını ve bunların dağılımlarını belirlemektir. Farklı otobüs hatlarında sefer aralıklarının rassal değişimi toplanmış ve her kombinasyon için hizmet seviyesi ve Gini katsayısı hesaplanmıştır. Simülasyon modelini geliştirmek için @Risk 6.2. yazılım programı kullanılmıştır.

Tablo 2’de yukarıda bahsedilen çalışmaların kısa bir özeti sunulmuştur. Tabloda yazarlar, çalışmaların ne zaman yapıldığı, amacı, kısıtları ve çözüm yöntemleri bir arada gösterilmiştir.

**Tablo 2:** Literatür Özeti

Yazar	Yıl	Amaç	Kısıtlar	Çözüm Yöntemi
Salzborn	1972	Toplam bekleme süresi ve filo büyüklüğü minimizasyonu	Yolcu geliş oranları	Matematiksel
Scheele	1980	Seyahat süresi minimizasyonu	Kapasite ve filo büyüklüğü	Matematiksel
Furth & Wilson	1981	Kullanıcı faydası maksimizasyonu	Filo büyüklüğü, maksimum sefer aralığı ve toplam bütçe	Matematiksel
Han & Wilson	1982	Maksimum doluluk oranı minimizasyonu	Kapasite ve filo büyüklüğü	Sezgisel
Ceder	1984	Otobüs geçişi minimizasyonu	Yük profilleri ve araç kapasitesi	Sezgisel
Constantin & Florian	1995	Yolcuların beklenen toplam seyahat süreleri ve bekleme süreleri minimizasyonu	Filo büyüklüğü	Matematiksel
Van Oudheusden & Zhu	1995	Maliyet minimizasyonu	Filo büyüklüğü, park alanlarının eksikliği, günlere göre trafik şartlarındaki dalgalanmaları	Sezgisel



Tom & Mohan	2003	Maliyet minimizasyonu	Seyahat süreleri ve işletim maliyetleri	Metasezgisel
Park	2005	Maliyet minimizasyonu	İşletim maliyeti, araçta geçirilen süre ve aktarma maliyeti	Metasezgisel & Simülasyon
Chen	2007	Kar maksimizasyonu	İşletim maliyeti ve yolcuların bekleme maliyeti	Simülasyon
Mohaymany & Amiripour	2009	Beklenen bekleme süresi minimizasyonu	Filo büyüklüğü	Simülasyon
Yu, Yang & Yao	2009	Seyahat süresi minimizasyonu	Filo büyüklüğü	Metasezgisel
Yoo, Kim ve Chon	2010	Talep maksimizasyonu	Filo büyüklüğü, sefer sıklığı ve araç kapasitesi	Sezgisel
Uludağ	2010	Seyahat süresi ve otobüs kapasitesi eksikliği minimizasyonu	Talep, sefer sıklığı, seyahat süreleri, araç kapasitesi, sefer süresi ve filo büyüklüğü	Matematiksel
Luhua, Yin & Xinkai	2011	Yolcuların bekleme süresi, seyahat süresi, aktarma süresi ve değişken operatörlerin çalışma süresi malitelerinin minimizasyonu	Park süresi, aktarma süresi, yürüme mesafesi, maksimum kalkış	Metasezgisel
Hadas & Shnaiderman	2012	Boş koltuk ve karşılanmayan talep minimizasyonu	Sefer aralıkları ve araç kapasitesi	Matematiksel
Deri	2012	Atıl kapasite ve otobüs eksikliği minimizasyonu	Sefer sıklığı, araç kapasitesi, otobüs sayısı, hatların sefer süresi	Matematiksel
dell'Olio, Ibeas & Ruisa'nchez	2012	Toplam kullanıcı ve işletimci maliyeti minimizasyonu	Araç kapasitesi ve bir otobüsün kapsayabileceği hatların sayısı	Sezgisel
Huang, Ren ve Liu	2013	İşletimci maliyetlerinin ve seyahat süresindeki sapmaların minimizasyonu	Filo büyüklüğü ve minimum sefer sayısı	Metasezgisel
Ibeas, Alonso, dell'Olio & Moura	2013	Toplam kullanıcı ve işletimci maliyeti minimizasyonu	Trafik sıkışıklığı ve talep esnekliği	Sezgisel
Owais, Moussa, Abbas & El-Shabrawy	2013	Toplam seyahat süresi minimizasyonu	Filo büyüklüğü ve yolcuların rota seçimi	Metasezgisel

Verbas & Mahmassani	2013	Yolcu sayılarının ve bekleme sürelerinin ağırlıklandırılmış minimizasyonu	Bütçe, filo büyüklüğü, sefer aralığı ve yük faktörü	Matematiksel
Li, Xu & He	2013	Firma maliyeti ve yolcuların bekleme süresi maliyeti değerlerinin minimizasyonu	Otobüs kapasitesi	Metasezgisel
Martinez, Mauttone & Urquhart	2014	Seyahat süresi minimizasyonu	Talep tahmini ve filo büyüklüğü	Matematiksel
Demirkollu	2017	Süre, Kapasite, mesafe sapma değişkenleri minimizasyonu	Süre, kapasite ve mesafe	Matematiksel
Gkiotsalitis ve Cats	2018	Beklenen bekleme süresi değişkenliği, , işletim maliyetleri, ekstra otobüs maliyeti minimizasyonu	Talep, sefer aralığı, seyahat süresindeki dalgalanmalar, işletim maliyetleri ve filo büyüklüğü	Matematiksel
Lin, Ma ve Chen	2018	Yolcuların toplam seyahat maliyetleri minimizasyonu	Mobil otobüs uygulaması kullanıcı sayısı, toplam kullanıcı sayısı, sefer sıklığı	Metasezgisel
Alkheder, AlRukaibi & Zaqzouq	2018	Toplam maliyet minimizasyonu	Talep, otobüs kapasitesi, otobüsün toplam tur süresi	Matematiksel
Özcan	2018	Toplam kullanıcı ve işletimci maliyeti minimizasyonu	Aktarma süresi, sefer sayısı, kapasite, seyahat süresi	Metasezgisel
Bertsimas, Ng & Yang	2020	Bekleme süresi minimizasyonu	Bütçe, kapasite ve yolcu tercihi	Matematiksel
Pathak, Agrawal, Suman & Bolia	2020	Toplam işletim maliyeti, bekleme süresi, seyahat maliyeti ve kalabalık rahatsızlığının maliyetinin minimizasyonu	Yük faktörü ve optimum sefer sıklığı	Matematiksel
Weert ve Gkiotsalitis	2021	Gelir kayıpları ve işlemsel maliyetlerin minimizasyonu	Filo büyüklüğü, kapasite, minimum hizmet sıklığı	Matematiksel
Jiang	2022	Yolcuların toplam maliyetlerinin ve sayahat maliyetlerinin minimizasyonu	Filo büyüklüğü, beklenen seyahat süresi, kapasite	Metasezgisel
Polat, Sağbaş & Dermenci	2022	İşletim maliyeti minimizasyonu	Yolcu talebi, taşıma kapasitesi, yol uzunluğu ve çalışma süresi	Matematiksel

**SONUÇ:**

Kent nüfusunun artmasıyla birlikte şehirlerde yaşayan vatandaşların ulaşım ihtiyaçlarını karşılarken aynı zamanda trafik sıkışıklığını, kazaları, gürültüyü, gaz emisyonlarını ve çevre kirliliğini azaltmak amacıyla devlet, belediyeler, çevreciler ve vatandaşlar toplu taşıma kullanımını arttırmak istemektedir. Ancak toplu taşımanın kullanımını arttırabilmek için vatandaşlara güvenilir, konforlu ve çok beklemeyecekleri yani vakit kaybının çok yaşanmayacağı toplu taşıma hizmeti sunulması gerekmektedir.

Temelde hizmet sektörü kapsamında değerlendirilen ulaştırma sektörü yolcuların beklentilerine cevap verirken aynı zamanda sektör yöneticilerinin beklentilerine de cevap vermelidir. Yolcular açısından düşünüldüğünde, toplu taşıma ile ilgili en önemli hizmet yürüme mesafesinin kısa olması, duraklara erişimin kolay olması ve durakta bekleme süresinin kısa olmasıdır. Sektör yöneticileri açısından değerlendirildiğinde ise sefer sıklıkları, tarife düzenlemeleri ve otobüslerin doluluk oranı oldukça önemlidir. Bu kapsamda birbiriyle çelişen bu iki amaç arasında bir denge kurulması gerekmektedir. Kullanıcılara hızlı, konforlu, güvenilir ve çok beklemeyecekleri bir hizmet sunarken hizmet sağlayıcıların da işletim maliyetlerini minimumda tutmak gerekmektedir.

Bu doğrultuda hizmette ve maliyette avantajlı bir toplu taşıma ağının planlanması ve tasarlanması toplu taşıma araçlarının özel araç ya da taksi kullanımıyla rekabet edebilirliğini ve bu araçların kullanımını arttırabilir. Böyle bir toplu taşıma ağı tasarımının oluşturulması problemi Toplu Taşıma Ağ Planlama Problemi olarak tanımlanmaktadır. Toplu taşıma ağ planlama problemi, toplu taşıma rotalarının uzunluğu ve sayısı, izin verilen hizmet sıklığı ve ulaşılabilir otobüs sayısı gibi işlemsel ve kaynak kısıtları altında toplu taşıma ağlarının etkinliğini gösteren farklı amaçların optimizasyonu için kullanılmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar incelendiğinde toplu taşıma sistemi oluşturma sürecine, ağ tasarımından çalışanların görev listesinin hazırlanmasına, talebin değerlendirilmesinden toplu taşıma yolculuk atamasına, matematiksel çözüm yöntemlerinden farklı sonuçlara birçok açıdan yaklaşılmaktadır. Bu da aslında toplu taşıma sisteminde problemlerin birçok bileşenden oluştuğunu ve kapsamlı bir şekilde ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Toplu taşıma hatlarının planlanmasında sefer sıklığı veya sefer aralıklarının belirlenmesi, sunulan hizmetin kalitesi açısından ve diğer taşıma türleri ile rekabet edilebilirlik açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple toplu taşıma hizmeti sağlayıcıları için konu oldukça önemlidir. Genellikle belediyelerin sorumlu olduğu taşıma hizmetleri, kâr elde etme amacı güdümeden verilen bir hizmet olduğu için, hem maliyetler azaltılmaya hem de yolculara ve potansiyel kullanıcılara en iyi hizmet vermeye çalışılır.

Sefer sıklığı veya sefer aralığı problemlerini ele alan çalışmalar detaylı bir şekilde incelendiğinde genellikle şu amaçları gerçekleştirmeye çalıştıkları gözlemlenmektedir:

- Kullanıcı ve işletimci maliyetleri toplamının minimizasyonu,
- Yolcu biniş sürelerinin minimizasyonu,
- Seyahat sürelerinin ve bekleme sürelerinin minimizasyonu,
- Aktarma sayılarının minimizasyonu,
- Toplam seyahat süresinin minimizasyonu,
- Yolcu konforsuzluğunun minimizasyonu,

- Tatmin edilemeyen yolcu sayılarının minimizasyonu,
- Filo büyüklüğünün minimizasyonu,
- Seyahat yoğunluğu maksimizasyonu,
- Direk seyahat sayılarının maksimizasyonu gibi.

Bu amaçları gerçekleştirmeye çalışırken genellikle aşağıda sıralanan kısıtlar söz konusu olmaktadır.

- Araç kapasitesi
- Minimum sıklık
- Bütçe ve filo büyüklüğü
- Talep miktarı
- Yükleme faktörü
- Hat uzunluğu
- Aktarma sayısı
- Aktarma süresi

Seyahat sürelerini, bekleme sürelerini, toplam maliyetleri kısaca yukarıda bahsedilen amaçları etkileyen birçok faktörün olduğu görülmektedir. Bu faktörler de kısıtlardır. Bu kapsamda amaçlar ve kısıtlar birlikte değerlendirildiğinde, toplu taşıma hatlarında hizmet sıklıkları belirlenirken çok fazla faktörün bir arada değerlendirilmesi gerektiği ve birbiriyle çelişen amaçlar arasında denge kurulması gerektiği görülmektedir.

Ayrıca yapılan literatür taramasında, toplu taşıma ağ planlama sürecinin birinci aşaması olan ağ tasarım aşaması ile ikinci aşaması sıklık ayarlama ve zaman çizelgesi geliştirme aşaması genellikle birlikte ele alınmaktadır. Bu çalışmada ise sadece sıklık ayarlama ve zaman çizelgesi geliştirme aşamasını ele alan çalışmalara değinilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalar için, ağ tasarım aşamasını ve zaman çizelgesi geliştirme aşamasını birlikte ele alan çalışmaların bir değerlendirilmesinin yapılması toplu taşıma ağ tasarım sürecinin nasıl işlendiğinin görülmesi açısından faydalı olacağı düşünülmektedir.

### **Etik Standart ile Uyumluluk**

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar, kendileri ve / veya diğer üçüncü kişi ve kurumlarla çıkar çatışmasının olmadığını beyan eder.

**Etik Kurul İzni:** Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur.

**Finansal Destek:** Yoktur.

### **KAYNAKÇA:**

Alkheder, S., AlRukaibi, F., & Zaqzouq, A. (2018). *Optimal bus frequency for Kuwait public transportation company: A cost view*. Sustainable cities and society, 41, 312-319.

Bagloee, S. A., & Ceder, A. A. (2011). Transit-network design methodology for actual-size road networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(10), 1787-1804.

- Bertsimas, D., Sian Ng, Y., & Yan, J. (2020). Joint frequency-setting and pricing optimization on multimodal transit networks at scale. *Transportation Science*, 54(3), 839-853.
- Bunte, S., & Kliewer, N. (2009). An overview on vehicle scheduling models. *Public Transport*, 1(4), 299-317.
- Carraraesi, P., & Gallo, G. (1984). Network models for vehicle and crew scheduling. *European Journal of Operational Research*, 16(2), 139-151.
- Ceder, A. (1984). Bus frequency determination using passenger count data. *Transportation Research Part A: General*, 18(5-6), 439-453.
- Ceder, A. (1986). Methods for creating bus timetables. *Transportation Research Part A: General*, 21(1), 59-83.
- Ceder, A. (2001). Operational objective functions in designing public transport routes. *Journal of advanced transportation*, 35(2), 125-144.
- Ceder, A. (2002). Urban transit scheduling: framework, review and examples. *Journal of urban planning and development*, 128(4), 225-244.
- Ceder, A. (2007). *Public transit planning and operation: Modeling, practice and behavior*. Oxford: CRC press.
- Ceder, A., & Israeli, Y. (1992). Scheduling considerations in designing transit routes at the network level. In *Computer-Aided Transit Scheduling* içinde (pp. 113-136). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ceder, A. & Wilson, N. H. M. (1986). Bus network design. *Transportation Research Part B* 20, 331-344.
- Chakroborty, P. (2003). Genetic algorithms for optimal urban transit network design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18(3), 184-200.
- Chen, H. (2007). Stochastic optimization in computing multiple headways for a single bus line. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 24(5), 351-359.
- Constantin, I., & Florian, M. (1995). Optimizing frequencies in a transit network: a nonlinear bi-level programming approach. *International Transactions in Operational Research*, 2(2), 149-164.
- Dantzig, G. B., Harvey, R. P., Lansdowne, Z. F., Robinson, D. W., & Maier, S. F. (1979). Formulating and solving the network design problem by decomposition. *Transportation Research Part B: Methodological*, 13(1), 5-17.
- de Weert, Y., & Gkiotsalitis, K. (2021). A covid-19 public transport frequency setting model that includes short-turning options. *Future Transportation*, 1(1), 3-20.
- Dell'Olio, L., Ibeas, A., & Ruisánchez, F. (2012). Optimizing bus-size and headway in transit networks. *Transportation*, 39(2), 449-464.
- Demirkollu, M. (2017). *Hedef programlama yöntemi ile otobüs sefer sayılarının tespit edilmesi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi: Denizli.
- Deri, A. (2012). *Akıllı kart verileri kullanılarak toplu ulaşım yolculuk talebinin belirlenmesi ve sefer çizelgeleme optimizasyonu*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi: İzmir.
- Desale, S., Rasool, A., Andhale, S., & Rane, P. (2015). Heuristic and meta-heuristic algorithms and their relevance to the real world: a survey. *International Journal of Computer Engineering in Ressearch Trends*, 2(5), 296-304.

- Desaulniers, G. & Hickman, M. D. (2007). Public transit. (Barnhart, C. & Laporte, G.). *Handbooks in Operations Research and Management Science: Transportation* içinde(ss. 69-127). North Holland: Elsevier.
- Fan, W., & Machemehl, R. B. (2006). Optimal transit route network design problem with variable transit demand: genetic algorithm approach. *Journal of Transportation Engineering*, 132(1), 40-51.
- Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., & Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 281-302.
- Friesz, T. L. (1985). Transportation network equilibrium, design and aggregation: key developments and research opportunities. *Transportation Research Part A: General*, 19(5-6), 413-427.
- Furth, P. G., & Wilson, N. H. (1981). Setting frequencies on bus routes: Theory and practice. *Transportation Research Record*, 818(1981), 1-7.
- Gkiotsalitis, K., & Cats, O. (2017). Exact optimization of bus frequency settings considering demand and trip time variations. *In 96th Transportation research board annual meeting*.
- Grosfeld-Nir, A., & Bookbinder, J. H. (1995). The planning of headways in urban public transit. *Annals of Operations Research*, 60(1), 145-160.
- Guihaire, V., & Hao, J. K. (2008). Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(10), 1251-1273.
- Hadas, Y., & Shnaiderman, M. (2012). Public-transit frequency setting using minimum-cost approach with stochastic demand and travel time. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(8), 1068-1084.
- Huang, Z., Ren, G., & Liu, H. (2013). Optimizing bus frequencies under uncertain demand: case study of the transit network in a developing city. *Mathematical problems in Engineering*, 1-10.
- Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2015). Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 38-75.
- Ibarra-Rojas, O. J., Giesen, R., & Rios-Solis, Y. A. (2014). An integrated approach for timetabling and vehicle scheduling problems to analyze the trade-off between level of service and operating costs of transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 35-46.
- Ibeas, A., Alonso, B., dell'Olio, L., & Moura, J. L. (2013). Bus size and headways optimization model considering elastic demand. *Journal of Transportation Engineering*, 140(4), 04013021.
- Jiang, Y. (2022). Reliability-based equitable transit frequency design. *Transportmetrica A: Transport Science*, 18(3), 879-909.
- Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. (2009). Transit route network design problem: review. *Journal of transportation engineering*, 135(8), 491-505.
- Kokash, N. (2005). An introduction to heuristic algorithms. *Department of Informatics and Telecommunications*, 1-8.
- Li, Y., Xu, W., & He, S. (2013). Expected value model for optimizing the multiple bus headways. *Applied Mathematics and Computation*, 219(11), 5849-5861.
- Luhua, S., Yin, H., & Xinkai, J. (2011). Study on method of bus service frequency optimal model based on genetic algorithm. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 869-874.

- Martínez, H., Mauttone, A., & Urquhart, M. E. (2014). Frequency optimization in public transportation systems: Formulation and metaheuristic approach. *European Journal of Operational Research*, 236(1), 27-36.
- Mohaymany, A. S., & Amiripour, S. M. (2009). Creating bus timetables under stochastic demand. *International Journal of Industrial Engineering*, 20(3), 83-91.
- Osman, I. H., & Laporte, G. (1996). Metaheuristics: A bibliography. *Annals of Operational Research*, 63, 513-628.
- Owais, M., Moussa, G., Abbas, Y., & El-Shabrawy, M. (2013). Optimal frequency setting for circular bus routes in Urban Areas. *Journal of Engineering Sciences*, 41(5), 1796-1811.
- Owais, M., Osman, M. K., & Moussa, G. (2015). Multi-objective transit route network design as set covering problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(3), 670-679.
- Özcan, T. (2018). *Kentiçi toplu taşıma sistemlerinde sefer sıklığı optimizasyonu*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi: Denizli.
- Park, S. J. (2005). Bus network scheduling with genetic algorithms and simulation (Doctoral dissertation). University of Maryland, Maryland.
- Pathak, P., Agrawal, K., Suman, H. K., & Bolia, N. B. (2020). Frequency optimization-based approach for reducing crowding discomfort in Delhi bus system. *Procedia Computer Science*, 170, 265-272.
- Polat, U., Sağbaş, A., & Dermenci, M. S. Sürdürülebilir ulaşım planlaması için şehir içi otobüs hatlarında sefer çizelgeleme optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(3), 1099-1116.
- Ruiz, M., Segui-Pons, J. M., & Mateu-LLadó, J. (2017). Improving Bus Service Levels and social equity through bus frequency modelling. *Journal of Transport Geography*, 58, 220-233.
- Salzborn, F. J. (1972). Optimum bus scheduling. *Transportation Science*, 6(2), 137-148.
- Schéele, S. (1980). A supply model for public transit services. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(1-2), 133-146.
- Stegherr, H., Heider, M., & Hähner, J. (2020). Classifying metaheuristics: Towards a unified multi-level classification system. *Natural Computing*, 1-17.
- Tom, V. M., & Mohan, S. (2003). Transit route network design using frequency coded genetic algorithm. *Journal of transportation engineering*, 129(2), 186-195.
- Uludağ, N. (2010). *Bulanık optimizasyon ve doğrusal hedef programlama yaklaşımları ile otobüs hatlarının modellenmesi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi: Denizli.
- Van Oudheusden, D. L., & Zhu, W. (1995). Trip frequency scheduling for bus route management in Bangkok. *European Journal of Operational Research*, 83(3), 439-451.
- Verbas, İ. Ö., & Mahmassani, H. S. (2015). Integrated frequency allocation and user assignment in multimodal transit networks: methodology and application to large-scale urban systems. *Transportation Research Record*, 2498(1), 37-45.
- Verbas, İ. Ö., Frei, C., Mahmassani, H. S., & Chan, R. (2015). Stretching resources: sensitivity of optimal bus frequency allocation to stop-level demand elasticities. *Public Transport*, 7(1), 1-20.
- Vuchic, V. R. (2005). *Urban transit: operations, planning and economics*. New Jersey: John Wiley & Sons.,

- Yoo, G. S., Kim, D. K., & Chon, K. S. (2010). Frequency design in urban transit networks with variable demand: model and algorithm. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(3), 403-411.
- Yu, B., Yang, Z., & Yao, J. (2009). Genetic algorithm for bus frequency optimization. *Journal of Transportation Engineering*, 136(6), 576-583.
- Zuo, X., Chen, C., Tan, W., & Zhou, M. (2014). Vehicle scheduling of an urban bus line via an improved multiobjective genetic algorithm. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 16(2), 1030-104.

## EXTENDED SUMMARY

### Research Problem:

The purpose of this study is to provide an overview and examples of certain practical methodologies aimed at solving the public transit frequency setting/headways determination and scheduling problems.

### Research Questions:

What is the public transit network planning? What is the public transit network planning process? How can we solve frequency setting problems? Which methods were used in literature to solve this problem? How can we classify solution methods? What are the objective functions? What are the constraints?

### Literature Review:

According to literature review, there are lots of studies about public transit frequency setting and scheduling problems. Their objects and constraints are different. The efficiency of a transportation systems depends on some variables such as technology, governmental policy and planning process etc. There are lots of social variables. Countries are different because of this; these variables are different from country to country.

### Methodology:

In this article, literature was reviewed. There are lots of articles about determination of public transit frequency. Because of this, articles were categorized by methods. They are mathematical methods, heuristics and metaheuristic methods and other methods. Other methods comprise of simulation, markov chains and stochastic models etc.

### Results and Conclusions:

When articles dealing with frequency determination are examined in detail, it is observed that they are generally try to achieve the following objectives; minimization of total user and operational costs, minimization of passenger riding time, minimization of waiting time and travel time, minimization of total travel time, minimization of passenger discomfort, minimization of fleet size and levels of vehicle loading and maximization of number of direct travels. While trying to achieve these objectives, these constraints are used: fleet size, minimum frequency, capacity of bus, demand, load factor, number of transfer, line length and transfer time.