

Kademeli mesai saati ile trafik sıkışıklığının azaltılması Staggered working hours in order to reduce traffic congestion

Özcan MUTLU¹, Zehra DURAK², Hasan AKYER^{3*}

^{1,2,3}Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Denizli
mutlu@pau.edu.tr, ztasci@pau.edu.tr, hakyer@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 17.01.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 16.10.2019

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.90922

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Günümüzde trafik sıkışıklığı, insan yaşamını pek çok açıdan olumsuz etkileyen önemli sorunlardan birisidir. Trafik sıkışıklığı özellikle zirve saatler olarak isimlendirilen trafik yoğunluğunun en fazla olduğu sabah ve akşam saatlerinde yaşanmaktadır. Bu saatlerdeki trafik sıkışıklığının temel nedeni ise özel ve kamudaki işyerlerinin mesai başlangıç ve bitiş saatlerinin genellikle çok yakın olmasıdır. Zirve saatlerdeki ulaşım talebinin daha geniş zaman dilimine yayılması trafik sıkışıklığının azaltılması için yollardan birisidir. Kademeli mesai saati uygulaması bu amaçla kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada, kademeli mesai saati stratejisi ile zirve saatlerdeki trafik sıkışıklığını azaltmak için bir matematiksel model önerilmektedir. Modelde bir şehirdeki başlangıç-varış noktaları arasındaki ulaşım talepleri, güzergâhlar ve yolların kapasiteleri dikkate alınarak her bir varış noktasının mesaiye başlama saatinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bunun için bir 0-1 tam sayılı hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model farklı büyüklükteki veri setleri için çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar kademeli mesai saati stratejisinin zirve saatlerdeki trafik sıkışıklığını büyük ölçüde azaltacağını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Trafik sıkışıklığı, ulaşım talep yönetimi, kademeli mesai saati

Abstract

Today traffic congestion is one of the most important problems that adversely affect human life in many aspects. Traffic congestion is experienced during the morning and evening peak hours which have the highest traffic intensity. The main reason of the traffic congestion during the peak hours is that the work start and finish times of the firms in both private and public sectors are very close. Spreading the travel demand during peak hours for longer time period is a means to reduce the traffic congestion during the peak hours. The staggered working hours is one of the methods used for this purpose. In this study, a mathematical model is proposed to reduce the traffic congestion by using the staggered working hours strategy. The aim of the model is to find the working hours of the each destination node by considering the travel demands between origin-destination nodes, the paths and the capacities of the roads. A 0-1 integer goal programming model is developed for this purpose. The developed model is solved for different sized data sets. The results show that the staggered working hours strategy will significantly reduce the peak hours traffic congestion.

Keywords: Traffic congestion, travel demand management, staggered working hours

1 Giriş

Trafik sıkışıklığı ulaşım taleplerinin belirlenen normal süreler içinde karşılanamaması olarak tanımlanmaktadır. Trafik sıkışıklığı ekonomik kayıpların yanı sıra insan ve çevre sağlığı açısından oldukça ciddi sorunlara neden olan önemli bir problemdir [1]. Hızlı nüfus artışı, plansız kentleşme, ekonomik büyüme sonucunda şehirlerdeki ulaşım talebi sürekli olarak artmaktadır. Buna karşılık trafik altyapısı, artan talebi karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle özellikle büyükşehirlerde trafik sıkışıklığı yıldan yıla daha da büyüyen bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

Trafik sıkışıklığının temel sebebi, ulaşım talebi ile arzı arasındaki dengesizliktir. Bu nedenle trafik sıkışıklığını azaltmak için ya arzın artırılması ya da talebin azaltılması gerekir. Yeni yollar, köprüler, kavşaklar vb. yapmak arzı arttırmaya yönelik çalışmalardır. Arzı arttırmak genellikle yüksek maliyetli olup çoğu zaman çevreyi olumsuz etkilemektedir. Ayrıca arzı arttırmak yeni ulaşım taleplerinin doğmasına neden olabilmektedir [2]. Örneğin, yeni bir yol yapıldığında zaman içinde bu yolun geçtiği yerlerde yeni yerleşim alanları oluşmakta ve böylece yeni ulaşım talepleri ortaya çıkmaktadır. Diğer bir husus, trafik sıkışıklığının gün

inde belli saatlerde daha yoğun yaşanmasıdır. Bu saatlerdeki sıkışıklığı gidermek için arzın artırılması, günün geri kalan

zamanında kapasitenin atıl kalmasına neden olmaktadır [3]. Bu nedenle ulaşım arzı arttırılırken oldukça dikkatli olunmalı ve uzun vadede çevreye ve ekonomiye etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Günümüzde trafik sıkışıklığının azaltılmasında daha çok talep odaklı çalışmalara ağırlık verilmektedir. Ulaşım talep yönetimi (UTY) başlığı altında toplanan bu çalışmalarda, insanların trafikteki davranışlarını etkileyerek, ulaşım talebinin azaltılması, zamana yayılması veya daha verimli araçlarla karşılanması amaçlanmaktadır[1]. UTY içinde kullanılan stratejiler üçe ayrılmaktadır: (a) araç başına düşen kişi sayısını arttıracak şekilde alternatifler geliştirmek, (b) teşvik veya ceza ile ulaşım taleplerini yoğunluğu daha az olan saatlere kaydırmak, (c) ulaşım taleplerini ortadan kaldırmak [1].

Trafik sıkışıklığını azaltmak için en çok uygulanan UTY stratejilerden birisi mesai saatlerinin yeniden düzenlenmesidir. Şehirlerdeki trafik sıkışıklığı özellikle zirve saatler olarak isimlendirilen sabah 7:00-9:00, akşam 17:00-19:00 saatlerinde yoğun bir şekilde yaşanmaktadır. Bu saatlerdeki trafik sıkışıklığının temel sebebi, işyerlerinde mesailerin genellikle aynı saatlerde başlaması ve bitmesidir. Bu nedenle zirve saatlerdeki yolculukların büyük bir kısmı işe, okula, hastaneye vb. gidiş ve gelişlerden oluşmaktadır. Şehrin farklı noktalarından başlayan yolculuklar zaman içinde belli yollarda keşismekte, ulaşım talebi yolların kapasitesini aştığında ise trafik sıkışıklığı meydana gelmektedir. Bu nedenle mesai saatlerinde bir düzenleme yaparak ulaşım talebinin daha geniş zamana yayılması sıkışıklığı büyük ölçüde rahatlatacaktır.

Bu amaçla uygulamada kullanılan üç farklı yöntem mevcuttur: (a) esnek mesai saati, (b) sıkıştırılmış hafta, (c) kademeli mesai saati. Esnek mesai saati uygulamasında çalışanlara, sekiz saatlik çalışma süresini doldurmak şartı ile belirli bir zaman aralığında işe başlamalarına izin verilmektedir. Sıkıştırılmış hafta uygulaması esnek mesai saati uygulamasının özel bir hali olarak ele alınabilir. Bu uygulamada çalışanlar bazı günler daha uzun çalışarak bir veya iki günü boşa çıkarmaktadır. Kademeli mesai saati uygulamasında ise alternatif işe başlama saatleri belirlenmekte, iş yerleri veya çalışanlar bu saatlerden birisine atanmaktadır. Ayrıca söz konusu politikalar karma bir şekilde de uygulanabilmektedir [1].

Bu çalışmada kademeli mesai saati uygulaması ele alınmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde kademeli mesai saati konusunda yapılan uygulamalar ve teorik çalışmalar hakkında kısaca bilgi verilmekte ve bu çalışmanın literatüre sağlayacağı katkılar tartışılmaktadır. Üçüncü bölümde matematiksel model ve modelde kullanılan varsayımlar ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde çözülen örnek test problemleri ile ilgili bulgular sunulmaktadır. Sonraki bölümde çalışma sonuçları tartışılmakta ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

2 Literatür incelemesi

Kademeli mesai saati 1920 yılından itibaren şehirlerdeki trafik sıkışıklığını çözmek için uygulanmaya başlanmıştır [4]. 1955 yılında Fransa'nın Metz şehrindeki bir uygulamada okullar 15 dakika erken, işyerleri ise 15 dakika geç işe başlatılmış ve sonuç olarak toplu taşıma sisteminin kullanımında iyileşme elde edilmiştir [4]. Daha sonra 1957 ve 1958 yılında Fransa'nın Dijon ve Strasbourg şehirlerinde de aynı uygulama yapılmış, Strasbourg'ta toplu taşımayı kullanan kişi sayısında %37 artış sağlanmış, Dijon'da ise trafik kazalarında azalma olmuştur [4].

1970 yılında Amerika'nın New York şehrinde 2500 çalışana sahip bir işyerinde kademeli mesai saati ve esnek mesai saati karma bir şekilde uygulanmış ve zirve saat talebinde %31 azalma sağlanmıştır [5]. Bu başarılı sonuçtan sonra uygulama, 45 firma ve 50.000 çalışana kapsayacak şekilde genişletilmiş ve zirve dönemde metroyu kullanan kişi sayısında %26 azalma elde edilmiştir [5].

1973 yılında Kanada'nın Toronto şehrinde 11.000 kamu personelinin %68'i kademeli mesai saati, %23'ü ise esnek mesai saati uygulamasına tabi tutulmuş ve sonuç olarak zirve saat talebinde %50 azalma elde edilmiştir [6]. 1974 yılında Ottawa şehrinde 33.000 kamu personeli üzerinde benzer bir uygulama yapılmış ve daha önce olduğu gibi zirve saat talebinde %50 azalma gözlemlenmiştir [6].

1988 yılında Hawaii'nin Honolulu şehrinde 7.500 kamu personelinin 3.500'ü 45 dakika işe geç başlatılmış ve böylece seyahat sürelerinde ortalama olarak %8 azalma elde edilmiştir [7].

Singapur'da yapılan bir deneysel çalışmada mesaiye başlama saati olarak 7:30 ve 8:00 şeklinde iki kademe belirlenmiş ve seyahat sürelerinde ortalama olarak 8-10 dakika azalma sağlandığı tespit edilmiştir [8].

Almanya'nın Münih şehrinde iki büyük firma (BMW ve Siemens) sosyal sorumluluk programı kapsamında trafik sıkışıklığını azaltmak için kademeli mesai saatini uygulamaya koymuştur [9].

Çin'in Pekin şehrinde 2010 yılında 800.000'den fazla kamu çalışanın mesai saati klasik 8:30-17:30 yerine 9:00-18:00 şeklinde düzenlenmiştir [10].

Ülkemizde mesai saatleri konusunda, merkezi ve yerel yönetimler tarafından trafik sıkışıklığını azaltmak için zaman zaman kararlar alınmıştır. 2007 yılında İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul Ticaret Odası ile birlikte, iş yerlerini, kamu kurumlarını ve okulları farklı gruplara ayrılarak mesai saatlerinin yeniden düzenlenmesi konusunda bir çalışma yapmıştır. Çalışmada işçilerin mesai saatlerinin 06:00'da, memurların 07:00'de, okulların 08:00'de, özel sektörün 09:00'da, üniversitelerin de 10:00'da başlaması önerilmiştir [11],[12]. Ancak bu uygulama hayata geçirilmemiştir.

Yukarıdaki pratik uygulamaların yanı sıra ulaşım talep yönetimi konusunda çok sayıda teorik çalışma da bulunmaktadır. Kademeli mesai saati ile ilgili ilk teorik çalışma Henderson tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada işçi ücretleri, ulaşım maliyeti ve fırsat maliyetleri dikkate alınarak kademeli mesai saati uygulaması ekonomik açıdan incelenmiştir[13]. D'Este kademeli mesai saati uygulaması ile seyahat süreleri arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak modellemiştir [14].

Yoshimura ve Okumura bir iş merkezine sadece bir yerleşim bölgesinden gelişlerin olduğu ve güzergâh üzerinde tek bir dar boğaz noktasının bulunduğu bir ulaşım ağında esnek mesai saati uygulamasını teorik olarak modellemiştir [15].

Yushimito ve arkadaşları iki aşamalı bir optimizasyon modeli ile kademeli mesai saati uygulamasının trafik sıkışıklığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Birinci aşamada firma içindeki her bölümün çalışma saatleri belirlenmiştir. Bunun için bölümlerin farklı saatlerde işe başlamasına bağlı olarak oluşan maliyetler göz önünde bulundurularak kareli atama modeli ile bölümlerin mesai saatleri bulunmuştur. İkinci aşamada belirlenen çalışma saatleri için Ben ve arkadaşları [16] tarafından geliştirilen model kullanılarak işçilerin evden çıkış zamanları ve toplam seyahat süreleri tespit edilmiştir [3].

Takayama ortaya koyduğu çalışmada literatürde Henderson'un [13] geliştirdiği modeli referans alarak trafik sıkışıklısını akış sıkışıklığı modelleri ile tanımlayan çalışmalardan farklı olarak darboğaz sıkışıklığı faktörünü içeren bir işe başlama zamanı seçim modeli geliştirmiştir [17].

Zhu ve Long kademeli mesai uygulamasının sabah trafiğinde kullanıcı davranışları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada kademeli mesai saatleri içeren faaliyet tabanlı bir dar boğaz modeli önerilmiştir. Çalışma sonucunda kademeli mesai uygulamasının, kişilerin seyahat davranışlarını değiştirdiği ve alternatif kümülatif akışlara neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır [18]. Araştırmacılar bir diğer çalışmalarında kademeli mesai saatleri içeren faaliyet tabanlı bir dar boğaz modeli ile mesaiye başlama saatlerini optimize etmeyi amaçlamışlardır. İlk aşamada faaliyet tabanlı dar boğaz modeli için tek bir mesaiye başlama saati ele alınmıştır. Geliştirilen model maksimum toplam sistem etkinliği sağlayacak tek bir mesaiye başlama saati türetmiştir. Sonrasında model iki adet mesaiye başlama zamanı için çözülmüştür. Son olarak oluşturulan sayısal örnekler geliştirilen modele uygulanmıştır [19].

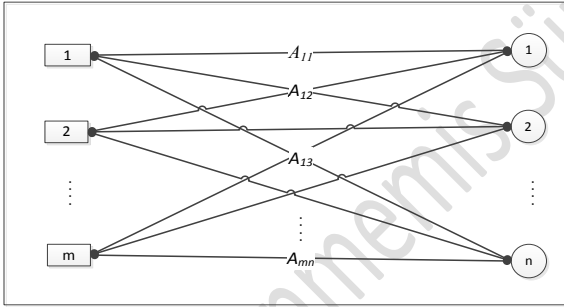
Yukarıda açıklanan pratik ve teorik çalışmalar, kademeli mesai saati uygulamasının trafik sıkışıklığının azaltılmasında etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Fakat bu çalışmalarda konu genellikle dar kapsamda ele alınmıştır. Pek çok çalışmada sadece bir firma veya bir sektörde çalışan işçilerin bir bölümü için kademeli mesai saati uygulaması incelenmiştir. Kademeli mesai saati ne kadar yaygın bir şekilde uygulanır ise elde edilecek fayda daha fazla olacaktır. Bu nedenle, bu problemde şehir bütün olarak ele alınmış ve çok sayıda firmanın ve kamu

kurumunun bu uygulamaya destek verdiği durum için matematiksel model geliştirilmiştir. İkinci olarak, kademeli mesai uygulamalarında genellikle güzergâhlar ihmal edilmektedir. Ancak mesai saatleri belirlenirken insanların ikamet ve varış noktalarına ait coğrafi konumların göz önünde bulundurulması yollardaki trafik yoğunluklarının belirlenmesi için gereklidir. Örneğin bir şehrin iki ucunda yer alan iki firmada çalışanların güzergâhları kesişmiyor ise bu iki firmanın aynı veya farklı saatte mesaiye başlaması trafik sıkışıklığını etkilemeyecektir. Diğer taraftan sabah saatlerinde şehrin birçok bölgesinden yoğun gelişlerin olduğu şehir merkezindeki iki firmanın farklı saatte mesaiye başlaması trafik sıkışıklığının azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada, bölgeler arasındaki ulaşım talepleri ile bu ulaşım taleplerini karşılamak için kullanılan güzergâhlar birlikte ele alınarak aynı yollara olan talep miktarını azaltacak şekilde mesai saatleri belirlenmektedir.

3 Matematiksel model

Çalışma kapsamında, bir şehirde trafik yoğunluğuna sebep olan üniversiteler, okullar, hastaneler, alışveriş merkezleri, organize sanayi bölgesi gibi seçilmiş merkezlerin mesaiye başlama ve bitiş zamanlarının optimum şekilde belirlenmesi amaçlanmaktadır. Model kapsamında sadece şehir içindeki kritik öneme sahip olan ana yollar dikkate alınmaktadır.

Ele alınan problemi şu şekilde tanımlayabiliriz; mesai saatleri belirlenecek n adet varış noktası bulunmaktadır. Varış noktalarına m adet başlangıç noktasından trafik akışı bulunmaktadır. Başlangıç ve varış noktaları arasında k adet yol mevcuttur. Ayrıca başlangıç varış çiftleri arasındaki güzergâhlar bilinmektedir. i başlangıç noktası ile j varış noktası güzergâhındaki yollar kümesi A_{ij} kümesi ile tanımlanmıştır. Bu açıklamalar doğrultusunda problem Şekil 1'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 1: Ulaşım ağı.

Model oluşturulurken aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

Ulaşım talepleri bilinmektedir: Trafik mühendisliğinde, planlama sürecinin birinci aşamasını ulaşım taleplerinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Ulaşım talebi, bir şehirdeki bölgeler arasında belli bir zaman aralığında yapılan yolculukların sayısı olarak tanımlanmaktadır. Ulaşım talebi belirlenirken şehir, ulaşım ihtiyaçları açısından aynı özelliklere sahip bölgelere ayrılmakta, daha sonra bölgeler arasında yapılan yolculukların sayısı, zamanı ve nitelikleri tespit edilmektedir. Bir bölgedeki ulaşım talebi, konut sayısı, yolcu sayısı, okula giden çocuk sayısı, işyeri sayısı, park imkanları, araç sahipliği vb. pek çok faktöre bağlı olarak değişmektedir [16]. Bölgelerin ulaşım taleplerini tahmin etmek için literatürde çok farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler genel olarak statik-dinamik, analitik temelli-simülasyon temelli, deterministik-stokastik olarak sınıflandırılmaktadır [16].

Ulaşım taleplerini belirlemek için hane halkı ulaşım anketlerinden ve nüfus, işyeri, adres vb. bilgileri içeren veri tabanlarından faydalanılmaktadır. Bu çalışmada bölgeler arasındaki ulaşım taleplerinin bilindiği varsayılmıştır.

Sabah mesaisinde oluşan trafik akşam mesaisinde ters yönde oluşmaktadır; Çalışmada tüm işyerlerinin günde 8 saat çalıştığı varsayılmıştır. Bu nedenle, sabah saatlerinde oluşan talep, akşam saatlerinde ters yönde oluşmaktadır. Böylece sabah saatlerinde trafikte sağlanan rahatlama akşam saatlerindeki trafığa de yansımaktadır.

Bölgeler arasındaki güzergâhlar bilinmekte ve zaman içinde değişmemektedir; İki bölge arasındaki güzergâh, alternatif yolların varlığı, trafik ışıkları, yollardaki azami hız vb. pek çok faktöre bağlı olarak zaman içinde kullanıcılar tarafından belirlenmektedir. Trafik mühendisliğinde bu durum kullanıcı dengesi olarak isimlendirilmektedir [20]. Wardrop, kullanıcı dengesi için iki temel prensip ortaya atmıştır. Wardrop'un birinci prensibine göre "Tüm kullanıcıların tercih ettiği bir güzergâhtaki seyahat süresi, tercih edilmeyen bir güzergâhtaki tek bir kullanıcının seyahat süresinden daha kısa veya eşittir". İkinci prensibi ise "Dengeye ulaşıldığında, ortalama seyahat süresi minimumdur" [20]. Bu nedenle hiçbir kullanıcı güzergâhını değiştirerek daha kazançlı hale gelemeyecek, başlangıç koşulları aynı kalmak suretiyle iki bölge arasındaki en iyi güzergâh değişmeyecektir. Literatürde Wardrop'un bu iki prensibine dayanarak geliştirilmiş çok sayıda trafik atama modeli bulunmaktadır [21], [22], [23], [24]. Bu çalışmada bölgeler arasındaki güzergâhların bilindiği ve zaman içinde değişmediği varsayılmıştır.

Yolların yoğunluk (k) değerleri bilinmektedir; Trafik akımını ifade etmek amacıyla üç temel eleman tanımlanmıştır: hız (u), yoğunluk (k) ve akım oranı (q). Hız birim zamanda alınan mesafedir. Trafik akımı içinde araçlar koşullara uygun olarak farklı hızlarla hareket ettiğinden trafik akımı içindeki her bir taşıt grubunun ortalama hızının v 'ye eşit olduğu kabul edilmektedir. Trafik akım oranı (q), bir şerit üzerinde yolun belirli bir kesitinden, belirli bir zaman aralığında geçen taşıt sayısıdır. Trafik yoğunluğu (k) ise, yolun birim uzunluğunda (genellikle 1 kilometre) her hangi bir anda bulunan taşıt sayısı olarak ifade edilmektedir. İki adet özel yoğunluk vardır: Bunlar, tıkanma yoğunluğu (k_j) ve optimum yoğunluktur (k_0). Tıkanma yoğunluğu, trafik akım hızı sıfıra yaklaştığında oluşan yoğunluktur. Bu noktada trafikte kuyruklar meydana gelmektedir. Optimum yoğunluk ise maksimum akım koşullarına ulaşıldığında meydana gelen yoğunluktur [25]. Çalışmada güzergâhlar kapsamında tanımlanan her bir ana yola ait tıkanma yoğunluğu ve optimum yoğunluk değerlerinin bilindiği varsayılmıştır.

Hız - yoğunluk ilişkisinin doğrusal olduğu varsayımı altında k_0 ve k_j arasında $k_0 = k_j/2$ eşitliği mevcuttur [25, 26]. Geliştirilen modelde söz konusu eşitlikten yararlanılmıştır. Modelde trafik talebini l adet zaman periyoduna (mesaiye başlama zamanına) yayarak birinci hedef olarak tıkanma yoğunluğunun ikinci hedef olarak optimum yoğunluğun aşılması belirlenmiştir. Yolların tıkanma yoğunluğu öncelikli hedef olarak ele alınmış ve bu önceliği sağlamak için bir ceza katsayısı (w) tanımlanmıştır.

Yukarıda açıklanan varsayımlar doğrultusunda ele alınan problemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$\text{Min} \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^q w p_{lk}^+ + s_k^+ \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^q a_{ij} g_{ijk} x_{jl} + p_{lk}^- - p_{lk}^+ = b_k, k = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^q a_{ij} g_{ijk} x_{jl} + s_{lk}^- - s_{lk}^+ = d_k, k = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^q x_{jl} = 1, \forall j \quad (4)$$

$$x_{jl} = 0 \text{ veya } 1 \quad (5)$$

$$s_{lk}^-, s_{lk}^+, p_{lk}^-, p_{lk}^+ \geq 0 \quad (6)$$

Problemi matematiksel olarak modellemek için aşağıdaki indisler ve kümeler kullanılmıştır;

i = başlangıç noktası, $M = \{1, \dots, m\}$

j = varış noktası, $N = \{1, \dots, n\}$

k = yol, $K = \{1, \dots, p\}$

l = zaman periyodu, $L = \{1, \dots, q\}$

$A_{ij} = i-j$ başlangıç varış noktaları arasındaki güzergâh,

$A = \{(i, j) | i \in M, j \in N\}$

Matematiksel modele ait parametreler aşağıda listelenmiştir;

$a_{ij} = i-j$ başlangıç varış noktaları arasındaki talep

$$g_{ijk} = \begin{cases} 1, & i-j \text{ başlangıç varış noktaları arasında} \\ & \text{tanımlanan güzergâhta } k \text{ yolu yer alıyor ise} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$b_k = k$ yolunun tıkanma yoğunluğu değeri (taşıt/km)

$d_k = k$ yolunun optimum yoğunluk değeri (tıkanma yoğunluğu değerinin %50'si), (taşıt/km)

w = ceza katsayısı (10.000)

Geliştirilen modele ait karar değişkenleri aşağıdaki gibidir;

$$x_{jl} = \begin{cases} 1, & j \text{ varış noktası mesaiye } l. \text{ zaman periyodunda başlıyor} \\ & \text{ise} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$p_{lk}^- = l$ zaman periyodunda k yolunun tıkanma yoğunluğu değerinden negatif sapmalar

$p_{lk}^+ = l$ zaman periyodunda k yolunun tıkanma yoğunluğu değerinden pozitif sapmalar

$s_{lk}^- = l$ zaman periyodunda k yolunun optimum yoğunluk değerinden negatif sapmalar

$s_{lk}^+ = l$ zaman periyodunda k yolunun optimum yoğunluk değerinden pozitif sapmalar

(1) numaralı eşitlik modelin amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. Amaç fonksiyonunda tanımlanan iki adet hedeften ilki her l zaman periyodunda, her k yolu için belirlenen tıkanma yoğunluğu değerlerinden diğeri ise optimum yoğunluk değerlerinden pozitif sapmaların minimize edilmesidir. Belirlenen iki hedef arasındaki önceliği sağlamak için tanımlanan w ceza katsayısından faydalanılmaktadır.

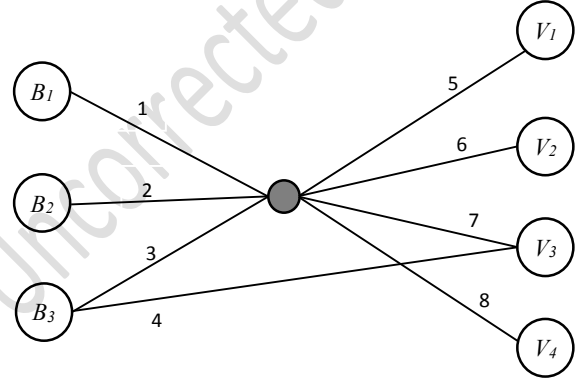
(2) numaralı kısıt tıkanma yoğunluğu ile ilgili kısıttır. Bu kısıt ile her bir zaman periyodunda, talep ile tıkanma yoğunluğu değerinin farkı belirlenmektedir. Eğer herhangi bir zaman periyodunda belirli bir yol için tıkanma yoğunluğu değeri aşıyor ise ilgili p_{lk}^+ pozitif değer almakta, p_{lk}^- ise sıfır değerini almaktadır. Talebin tıkanma yoğunluğu değerinin altında kalması durumunda ise ilgili p_{lk}^- pozitif değer almakta, p_{lk}^+ ise sıfır olmaktadır. (3) numaralı kısıt optimum yoğunluk ile ilgili kısıttır ve bu kısıt ile her bir zaman periyodunda, talep ile optimum yoğunluk değerinin farkı belirlenmektedir. (2)

numaralı kısıt ile benzer şekilde eğer herhangi bir zaman periyodunda belirli bir yol için optimum yoğunluk değeri aşıyor ise ilgili s_{lk}^+ pozitif değer almakta, s_{lk}^- ise sıfır değerini almaktadır. Talebin optimum yoğunluk değerinin altında kalması durumunda ise ilgili s_{lk}^- pozitif değer almakta, s_{lk}^+ ise sıfır olmaktadır.

Her bir varış noktası tek bir zaman periyodunda mesaiye başlamalıdır. (4) nolu kısıt ile bu gereklilik modele yansıtılmıştır. (5) ve (6) nolu kısıtlar ise ilgili karar değişkenlerinin 0-1 tamsayı ve pozitif değer almasını sağlamaktadır.

4 Bulgular

Modelin daha iyi açıklanabilmesi için küçük boyutlu bir problem üzerinde uygulama yapılmıştır. Şekil 1'de ağ yapısı gösterilen problemde üç adet başlangıç noktası (B_i), dört adet varış noktası (V_j), sekiz adet yol ve üç adet zaman dilimi bulunmaktadır.



Şekil 2: Örnek problem ulaşım ağı

Örnek probleme ait yolların kapasite ve hedef yoğunluk değerleri Tablo 1'de görülmektedir. Tabloda yer alan optimum yoğunluk değerleri tıkanıklık yoğunluğu değerlerinin %50'si olarak alınmıştır.

Tablo 1: Örnek probleme ait yolların bilgisi.

Yollar	Tıkanıklık yoğunluğu değerleri (taşıt / km)	Optimum yoğunluk değerleri (taşıt / km)
1	250	125
2	150	75
3	100	50
4	250	125
5	100	50
6	90	45
7	180	90
8	380	190

Tablo 2'de başlangıç noktalarından varış noktalara talep bilgisi yer almaktadır.

Tablo 2: Örnek probleme ait talep bilgisi.

Başlangıç noktaları	Varış noktaları			
	1	2	3	4
1	42	71	49	96
2	20	0	0	55
3	66	144	70	0

Tablo 3'te her bir başlangıç noktasından her bir varış noktasına ulaşmak için kullanılması gereken yollar yani güzergâh bilgisi yer almaktadır. Örneğin kullanıcılar 1 nolu başlangıç noktasından, 2 nolu varış noktasına ulaşmak için 1 ve 6 nolu yolları içeren güzergâhı kullanmaktadır.

Tablo 3: Örnek probleme ait güzergâh bilgisi.

Başlangıç- Varış noktası	Yollar							
	1	2	3	4	5	6	7	8
B_1-V_1	1	0	0	0	1	0	0	0
B_1-V_2	1	0	0	0	0	1	0	0
B_1-V_3	1	0	0	0	0	0	1	0
B_1-V_4	1	0	0	0	0	0	0	1
B_2-V_1	0	1	0	0	1	0	0	0
B_2-V_4	0	1	0	0	0	0	0	1
B_3-V_1	0	0	1	0	1	0	0	0
B_3-V_2	0	0	1	0	0	1	0	0
B_3-V_3	0	0	0	1	0	0	0	0

Son olarak Tablo 4'te problem kapsamında tanımlanan üç farklı zaman periyoduna ait bilgi görülmektedir.

Tablo 4: Örnek probleme ait alternatif mesai başlangıç zamanları.

Zaman periyodu	Mesai başlangıç zamanı
1	08:00
2	08:30
3	09:00

Geliştirilen matematiksel model, yukarıda sunulan örnek problem verileri uygulanarak, 2 50 GHz ve 4.00 GB RAM özelliklerinde bir bilgisayar ortamında GAMS ara yüzü kullanılarak CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre 1 ve 2 nolu varış noktalarının saat 08:30'da, 3 nolu varış noktasının saat 08:00'de, 4 nolu varış noktasının ise saat 09:00'da mesaiye başlamasının trafik yoğunluğunun azaltılması açısından en iyi alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında yukarıda çözümü sunulan örnek problem dışında farklı boyutlarda 18 adet veri seti oluşturulmuştur. Söz konusu veri setlerinin boyutları ile ilgili detaylı bilgi Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5: Geliştirilen veri setleri bilgisi.

No	Düğüm sayısı	Başlangıç noktası sayısı	Varış noktası sayısı	Yol sayısı
1	7	3	4	8
2	10	2	8	10
3	10	2	8	20
4	10	4	6	10
5	10	4	6	20
6	19	5	14	12
7	20	4	16	20
8	20	4	16	40
9	20	8	12	20
10	20	8	12	40
11	50	10	40	40
12	50	10	40	50
13	50	20	30	40
14	50	20	30	50
15	66	33	33	40
16	83	33	50	40
17	105	5	100	100
18	205	5	200	100

Matematiksel model 18 adet veri seti kullanılarak sırası ile 1, 2, 3, 4 ve 5 zaman periyodu olan durumlar için çözülmüş ve her bir zaman periyodu için tıkanma yoğunluğu ve optimum yoğunluk değerinden pozitif sapmalar toplamını içeren sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur. Bir zaman periyodu olan durum, mevcut uygulamaya hiç bir müdahale yapılmadığında oluşan toplam tıkanma yoğunluğu ve optimum yoğunluk değerlerinden aşmaları vermektedir. Görüldüğü gibi mesaiye başlama zamanları kademelendirilerek zaman periyodu sayısı artırıldığı sürece çözüm sonuçları hızla iyileşmektedir. Söz konusu iyileşmeyi göstermek amacıyla, 1 zaman periyodu olan duruma göre 2, 3, 4 ve 5 zaman periyodu olan durumlardaki sapma miktarı azalma oranları tabloda yer almaktadır. Geliştirilen problemler için en son anlamlı iyileşmenin üç adet zaman dilimi olan durumda gerçekleştiği görülmektedir.

Geliştirilen model GAMS paket programı kullanılarak ilk 15 veri seti için çözülmüş büyük boyuttaki 17 ve 18 nolu veri setleri için sadece tek zaman periyodu olan versiyon çözülebilmektedir. GAMS programında çözüm süresi kısıtı, standart olarak 1000 saniyedir. RESLIM komutu ile değiştirilebilmektedir ve çalışmada, 100.000 saniye olarak alınmıştır. Çözüm süresi bir günden daha uzun bir süreyi kapsayacak şekilde uzatılmasına rağmen 17 ve 18 nolu veri setleri için 2, 3, 4 ve 5 zaman periyodu olan durumlarda çözüm elde edilememiştir.

Tablo 6: Veri setleri ile matematiksel modelin çözüm sonuçları.

No	Bir zaman periyodu	İki zaman periyodu	Azalma Oranı (%)	Üç zaman periyodu	Azalma Oranı (%)	Dört zaman periyodu	Azalma Oranı (%)	Beş zaman periyodu	Azalma Oranı (%)
1	183421	37143	79,75	37079	79,78	37079	79,78	37079	79,78
2	812056	123348	84,81	26	100,00	12	100,00	12	100,00
3	1624112	191721	88,20	38	100,00	12	100,00	12	100,00
4	866566	141	99,98	20	100,00	20	100,00	20	100,00
5	1223449	53249	95,65	33096	97,29	33096	97,29	33096	97,29
6	4026396	0345764	91,41	129265	96,79	129180	96,79	129179	96,79
7	6534896	288070	95,59	30101	99,54	30057	99,54	30057	99,54
8	13706248	246031	98,20	10228	99,93	10128	99,93	10128	99,93
9	5346034	828865	84,50	753809	85,90	678753	87,30	603696	88,71
10	24232362	1071445	95,58	586	100,00	16	100,00	0	100,00
11	116682862	12968124	88,89	7093626	93,92	6593086	94,35	6092711	94,78
12	223228774	95933374	57,02	11888359	94,67	12210	99,99	60	100,00
13	198899692	47679712	76,03	572205	99,71	558	100,00	0	100,00
14	307047711	78173960	74,54	254297	99,92	488	100,00	0	100,00
15	23961240	2165915	90,96	473787	98,02	411047	98,28	410920	98,29
16	662310115	13001306	98,04	993	100,00	0	100,00	0	100,00
17	68634684	-	-	-	-	-	-	-	-
18	134777260	-	-	-	-	-	-	-	-

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, kademeli mesai saati uygulaması ile şehirlerdeki en önemli sorunlardan birisi olan trafik sıkışıklığına bilimsel yöntemler ile bir çözüm getirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ulaşım talepleri, güzergâhlar ve yolların kapasiteleri dikkate alınarak işyerlerinin mesaiye başlama saatlerini belirleyen bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu açıdan çalışma, literatürden farklı olarak konuyu bir şehrin bütünü için ele alabilmekte böylelikle toplumsal fayda sağlamaktadır. Geliştirilen model aracılığı ile araştırmacılar ve yerel yönetimler kendi veri setlerine özgün çözümler elde edebileceklerdir. Geçmişteki pratik uygulamalar ve bu çalışmadan elde edilen bulgular kademeli mesai saatinin trafik sıkışıklığının çözümünde oldukça etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bu nedenle ülkemizde de özellikle büyük şehirlerde gerekli verilerin toplanarak bu tarz çalışmaların yapılmasına acil olarak ihtiyaç bulunmaktadır.

İncelenen konu teorik olarak oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle önerilen modelin çözülebilirliğini arttırmak için bazı varsayımlarda bulunulmuştur. İleriki çalışmalar için bu varsayımlardan bir kısmı kaldırılarak daha gerçekçi modeller geliştirilebilir.

6 Kaynaklar

- [1] Meyer M. "Demand Management as an Element of Transportation Policy: Using Carrots and Sticks to Influence Travel Behavior". *Transportation Research Part A*, 33, 575-599, 1999.
- [2] Çelik F. "Geçmişte Ülkemizde Uygulanan Yolculuk Talep Yönetimi Yaklaşımları ve Bu Yaklaşımların Kalıcılığına İlişkin Alınması Gereken Önlemler." *II. Ulaşım Ve Trafik Kongresi-Sergisi*, 34-50, 1999.
- [3] Yushimito WF, Ban XJ, Holguín-Veras J. "A Two-Stage Optimization Model for Staggered Work Hours". *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 18, 410-425, 2014.

- [4] Maric D. "Staggered Working Hours". Adapting Working Hours to Modern Needs, Geneva, Switzerland: International Labor Organization, 1977.
- [5] O'Malley B, Selinger CS. "Staggered Work Hours in Manhattan". *Traffic Engineering and Control*, 14(9), 418-423, 1973.
- [6] TRB. "Alternative Work Schedules: Impacts on Transportation". Tech. Rep. NCHRP Synthesis of Highway Practice 73, Transportation Research Board, Washington, DC., 1980.
- [7] Guiliano G, Golob TF. "Staggered Work Hours for Traffic Management: A Case Study". *Transportation Research Record*, 1280, 46-58, 1990.
- [8] Chin ATH. "Influences on Commuter Trip Departure Time Decisions in Singapore". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 24(5), 321-333, 1990.
- [9] Arnott R, Rave T, Schob R. "Staggered Work Hours for Dominant Employers". *Alleviating Urban Traffic Congestion*, MIT Press, Cambridge, MA, 135-185, 2005.
- [10] Wen L. "Beijing Adopts Staggered Working Hours". http://www.china.org.cn/china/2010-04/12/content_19793838.htm, Sayfasından alınmıştır, 2010.
- [11] Özçelik B. "Şirketlerden Trafik Çilesine Özel Çareler" *Hürriyet Gazetesi*, http://www.hurriyet.com.tr/yasam/7797592_p.asp sayfasından alınmıştır, 2007.
- [12] İ.T.O. "Trafığın Mesaisi Değişmeli". İTO Ticaret Gazetesi, <http://www.ito.org.tr/wps/portal/gazete-tumu/?site=gzt-2014-1-24&category=gzt-itodan> sayfasında alınmıştır, 2014.
- [13] Henderson JV. "The Economics of Staggered Work Hours", *Journal of Urban Economics*, 9(3), 349-364, 1981.
- [14] D'Este, G. "The Effect of Staggered Working Hours on Commuter Trip Durations". *Transportation Research Part A: General*, 19(2), 109-117, 1985.

- [15] Yoshimura M, Okumura M. "Optimal Commuting and Work Start Time Distribution under Flexible Work Hours System on Motor Commuting". *Proceedings of the Eastern Asian Society for Transportation Studies*, 2, 455-469, 2001.
- [16] Ben-Akiva M, Bottom J, Gao S, Koutsopoulos HN, Wen Y. "Towards Disaggregate Dynamic Travel Forecasting Models". *Tsinghua Science & Technology*, 12(2), 115-130, 2007.
- [17] Takayama, Y. "Bottleneck Congestion and Distribution of Work Start Times: The Economics of Staggered Work Hours Revisited." *Transp. Res. Procedia* 7, 499-518, 2015.
- [18] Zhu T, ve Long J. "Travel Behavior of Morning Commute with Staggered Work Hours". *Procedia Engineering* 137, 796 - 805, 2016.
- [19] Zhu T., Long J., and Liu H. "Optimal official work start times in activity-based bottleneck models with staggered work hours." *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2018.
- [20] Wardrop JG. "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research". *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Part II, No 1, 325-378, 1952.
- [21] LeBlanc LJ, Morlok EK, Pierskalla WP. "An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem". *Transportation Research*, 9, 309-318, 1975.
- [22] Lawphongpanich S, Hearn DW. "Simplicial Decomposition of Asymmetric Traffic Assignment Problem". *Transportation Research*, 18, 123-133, 1984.
- [23] Bar-Gera H. "Origin-based Algorithm for the Traffic Assignment Problem". *Transportation Science*, 36, 398-417, 2002.
- [24] Nie, Y. "A Class of Bush-based Algorithms for the Traffic Assignment Problem". *Transportation Research Part B*, 44(1), 73-89, 2010.
- [25] May, A. D. "Traffic Flow Fundamentals". *Prentice Hall, Englewood Cliffs*, 1990.
- [26] Huber, M. J. "Transportation and Traffic Engineering Handbook" *Institute of Transportation Engineers*, 1982.