

Kentsel Karayolu Ağlarının Tek Bölge Makroskobik Temel Diyagram-tabanlı Dinamik Modeli için Parametre Kestirme ve Model Geçerleme

Parameter Estimation and Model Validation for Single Region Macroscopic Fundamental Diagram-based Dynamical Model of Urban Road Networks

Işık İlber Sirmatel

Kontrol Anabilim Dalı, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi, Trakya Üniversitesi, Edirne

ilbersirmatel@trakya.edu.tr

Özetçe

Bu bildiri büyük ölçekli kentsel karayolu trafiği ağlarının makroskobik temel diyagram-tabanlı dinamik modelleri için model-tabanlı parametre kestirme yöntemlerini ve model geçerleme problemini inceliyoruz. Parametre kestirme yöntemleri, makroskobik temel diyagram-tabanlı dinamiklere sahip tek bölge dinamik model için formüle ediliyor. Soyut bir grid karayolu ağı için gerçekçi trafik verileri oluşturmak adına rastgele oluşturulmuş talep profillerine sahip mikroskobik benzetim sonuçları kullanılıyor. Model geçerleme problemi, oluşturulan talep senaryoları kümesi üzerinde kabul edilebilir benzetim başarımı gösteren model parametresi değerlerinin varlığı incelenerek ele alınıyor. Parametre kestirme yöntemlerinin başarımı, kestirilen parametre değerlerinin model geçerleme analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmasıyla inceleniyor. Sonuçlar, dikkate alınan tek bölge modelin makul benzetim başarımı sağlayabildiğini ve parametre kestirme yöntemiyle iyi başarımlar gösteren parametre değerlerinin hesaplanabildiğini göstermektedir.

Abstract

In this paper we investigate model-based parameter estimation methods and the model validation problem for macroscopic fundamental diagram-based dynamical models of large-scale urban road traffic networks. Parameter estimation methods are formulated for a single region dynamical model with macroscopic fundamental diagram-based dynamics. Microscopic simulation results with randomly generated demand profiles are employed for generating realistic traffic data for an abstract grid network. Problem of model validation is treated by examining existence of model parameter values resulting in acceptable simulation performance over the generated set of demand scenarios. Performance of parameter estimation methods are investigated by comparisons of estimated parameters with the model validation analysis results. Results suggest that the considered single-region model is capable of reasonable simulation performance and using the parameter estimation method it is possible to compute well-performing parameter values.

1. Giriş

Kentsel karayolu trafiği ağlarının gerçek zamanlı yönetimi, artan nüfus yoğunluğundan kaynaklanan yüksek trafik tıkanıklığı seviyeleri ile giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu tip trafik yönetim sistemlerinin tasarımı modelleme ve kontrol açılarından büyük zorluklar içerir. Kentsel ağın alt sistemleri arasındaki koordinasyon eksikliği, yetersiz altyapı, trafik tıkanıklığının mekansal-zamansal yayılımı, ağın büyüklüğü ve sürücülerin trafik yönetim sistemleriyle etkileşimleri gibi unsurlar, büyük ölçekli kentsel karayolu trafik ağları için modelleme, kestirme ve kontrol yöntemleri geliştirmeye çalışırken karşılaşılan zorluklardan bazıları olarak listelenebilir. Son yıllarda gerçek zamanlı trafik kontrol yöntemlerine (özellikle otoyol sistemleri için) literatürde gösterilen önemli ilgiye rağmen (bir inceleme için bkz. [1]), büyük ölçekli kentsel ağlarda modelleme, kestirme ve kontrol tamamlanmamış araştırma doğrultuları olarak öne çıkmaktadır.

Büyük ölçekli ağlar için modelleme ve kontrol yöntemlerinde kentsel trafik için tanımlı makroskobik temel diyagram (MTD) bir modelleme yaklaşımı olarak literatürde giderek daha büyük ilgi çekmektedir. İlk olarak [2] tarafından önerilen ve [3] tarafından deneysel olarak varlığı kanıtlanan MTD, araç birikimi ile araç seyahat üretimi arasında tek modlu, düşük saçılmalı ve seyahat talebi varyasyonlarında değişimsiz bir ilişki ifade eden bir modelleme aracıdır.

Büyük ölçekli ağlarda durum kestirme ve kontrol tasarımını olanaklı hale getiren düşük boyutlu dinamik modeller oluşturmak için güçlü bir yaklaşım olmasına rağmen, MTD'nin trafik modellemedeki başarımının azalmasına neden olacak bazı unsurlardan olumsuz etkilenmesi de mümkündür. Literatürdeki birçok çalışmada bir kentsel karayolu ağındaki MTD'nin düşük saçılmalı halde mevcut olmasını sağlayan fiziksel özellikler ve ağ koşulları incelenmiştir (bkz. [4]). Trafik tıkanıklığının kentsel yollar üzerinde heterojen bir şekilde dağılması nedeniyle MTD'de yüksek saçılma ile karşılaşılabılır (bkz. [5]). Modellemedeki başarımı etkileyebilecek bu zorluklara rağmen, MTD kullanarak dinamik trafik modellerindeki karmaşıklık önemli ölçüde azaltılabilir, böylece birleştirilmiş ve düşük boyutlu dinamik modellerle ağ seviyesinde model-tabanlı kestirme ve kontrol tasarımı mümkün olur.

MTD-tabanlı kontrol üzerine yapılan ilk çalışma olan ve tek

bölgeli bir sistemi ele alan [6]'daki çalışmadan bu yana, literatürde MTD-tabanlı analiz, modelleme ve kontrol yöntemlerine odaklanan birçok çalışma ortaya konmuştur. Bu çalışmaların çoğunda MTD-tabanlı yaklaşımlarla birlikte çeşitli kontrol tasarımları yöntemleri ele alınmıştır: Oransal-integral kontrol [7, 8], uyarlamalı kontrol [9, 10], dayanıklı kontrol [11, 12], optimal kontrol [13, 14] ve öngörülü kontrol [15, 16, 17]. Bahsi geçen çalışmaların çoğu eyleyici yöntemi olarak perimetre kontrolünü ele alırken, trafik tıkanıklığı fiyatlandırması [18], talep yönetimi [19] ve rota yönlendirme [20, 21] gibi yaklaşımların incelendiği çalışmalar da mevcuttur. Bazı yeni çalışmalarda, genişletilmiş Kalman filtresi [22] ve doğrusal olmayan hareketli ufuklu kestirme [23] gibi MTD-tabanlı durum kestirme yöntemleri de ele alınmaktadır.

MTD-tabanlı dinamik modellerde model geçerleme konusunu dikkate alan ilk eser olan [24]'teki çalışmada tek ve çok bölgeli modellerin benzetim performansı (benzetilmiş bölgesel birikim yörüngelerine göre) incelenmiştir. Ele alınan dinamik modeller, iyi tanımlanmış üretim MTD'lerine sahip kentsel bölgeleri göz önünde bulundurarak bölgesel birikim dinamiklerine dayanmaktadır. Modeller kurulurken aynı zamanda bölgesel birikimi makroskobik rotalara göre bölme ve bölge-rotaya dayalı olarak yolculuk uzunluklarını tanımlama yaklaşımları uygulanmıştır. Lyon şehrinden gerçek trafik verileriyle karşılaştırmalara dayanan sonuçlar, incelenen modellerin gerçek verilerle iyi eşleşen benzetilmiş yörüngeler üretebildiğini göstermektedir. İki-modlu MTD'lerle [24]'teki çalışmayı genişleten [25]'teki çalışmada birikim-tabanlı, gecikmeli birikim-tabanlı ve seyahat-tabanlı modellerin benzetim performansı incelenmiştir. Ele alınan dinamik modeller, olağan tek-modlu iki boyutlu tipte (yani araç birikimini üretimle ilişkilendiren) ve iki-modlu üç boyutlu tipte (yani araç ve otobüs birikimlerini üretimle ilişkilendiren) iyi tanımlanmış üretim MTD'lerine sahip kentsel bölgeleri içeren bölgesel birikim dinamiklerine dayanmaktadır. Zürih şehrinin gerçek trafik verileriyle karşılaştırmaları içeren sonuçlar, dikkate alınan modellerin gerçek verilerle iyi eşleşen benzetilmiş yörüngeler üretebildiğini göstermektedir. Model geçerleme probleminde birleşen ve ayrılan akışlar perspektifinden yaklaşan [26]'teki çalışmada bir grid karayolu ağı üzerinde mikroskobik benzetimler kullanılarak çeşitli içeri akış ve dışarı akış birleştirme modellerinin geçerliliği incelenmiştir. İyi tanımlanmış üretim MTD'lerine sahip kentsel bölgeler, bölgesel birikim dinamiklerine dayalı dinamik modeller ile birlikte çalışmada ele alınmaktadır. Ele alınan MTD-tabanlı modellerin mikroskobik benzetim sonuçlarıyla iyi eşleşen giriş, çıkış ve birikim yörüngeleri üretebildiği gösterilmiştir.

Yukarıda anılan çalışmalar incelenerek aşağıdaki gözlemler yapılabilir: a) Sayıca çok az olmasına rağmen, literatürde MTD-tabanlı dinamik modeller için model geçerlemenin önemini fark edildiği çalışmalar mevcuttur, b) Bu çalışmalarda, seçilen benzetim konfigürasyonları veya gerçek verilerin toplandığı trafik koşulları için, incelenen MTD-tabanlı modellerin benzetim performansı ortaya konmaktadır, c) Çalışmalar, mevcut bölge-hedef bölge indisleri içeren birikim-tabanlı modellere kıyasla model-tabanlı geribeslemeli kontrol tasarımına pek uygun olmayan ve nispeten basit olan bölgesel birikim-tabanlı modellere odaklanmaktadır, d) Literatürde, uygulamada karşılaşılabilecek çeşitli karayolu ağı konfigürasyonları ve trafik akış talep koşullarının model (benzetim, kontrol, vb.) performansına

etkisi, MTD parametrelerini hesaplamak için kullanılan yöntemler, ve bu yöntemlerle elde edilen dinamik modellerin performansı incelenmemiş halde bulunmaktadır. Bu bildiriye, literatürdeki bahsi geçen eksiklikleri kısmi olarak tamamlama girişiminde bulunmak adına, büyük ölçekli kentsel karayolu ağlarının tek-bölgeli MTD-tabanlı dinamik modelleri için model-tabanlı parametre kestirme yöntemlerine ve benzetim-tabanlı model geçerleme yaklaşımlarına odaklanacağız.

2. Dinamik Modelleme

Aşağıda verilen dinamik modeli ele alalım [6]:

$$\dot{n}(t) = q(t) - g(n(t)). \quad (1)$$

Bu, tek bölgeli bir araç sayısı korunumu denklemdir. Burada $t \in \mathbb{R}$ sürekli zamanı, birikim $n(t) \in \mathbb{R}$ (birim: araç) bölgedeki trafikte seyahat eden toplam araç sayısını, giren akış talebi $q(t) \in \mathbb{R}$ (birim: araç/s) seyahat etmeye başlayan araç akışını, çıkan akış $g(n(t)) \in \mathbb{R}$ (birim: araç/s) ise toplam araç sayısı $n(t)$ 'nin fonksiyonu olarak seyahatini bitirip trafikten çıkan araç akışını ifade etmektedir.

Çıkan akış $g(n(t))$ bir fonksiyonel çıkan akış MTD'si ile modellenebilir. Bölgenin $P(n(t)) \in \mathbb{R}$ (birim: araç.m/s) formunda iyi-tanımlı bir üretim MTD'sinin mevcut olduğu ve bölgesel ortalama seyahat mesafesi $l \in \mathbb{R}$ 'nin (birim: m) zamanda değişimsiz olduğu varsayılırsa, çıkan akış MTD'sinin yaklaşıklık $g(n(t)) = P(n(t))/l$ formunda bir fonksiyonel MTD ile ifade edilebilir (buna P/l yaklaşıklık denir; detaylar için bkz. [6]). [6]'daki çalışmada P/l yaklaşıklarının $P(n(t))$ 'nin mevcut olması ve $q(t)$ 'nin zamanda yavaş değişmesi halinde geçerli olduğu varsayımı ortaya konmuş ve bu varsayım [3]'teki çalışmada deneysel olarak kanıtlanmıştır. Fonksiyonel MTD farklı formlarda ifade edilebilir ([27]'deki Tablo 1'de bir liste görülebilir), ancak bu çalışmada aşağıdaki form ele alınacaktır:

$$g(n(t)) = n(t) \frac{v_{\text{free}}}{l} \exp\left(-0.5 \left(\frac{n(t)}{n_{\text{crit}}}\right)^2\right). \quad (2)$$

Buradaki $v_{\text{free}} \in \mathbb{R}$ (birim: m/s) ve $n_{\text{crit}} \in \mathbb{R}$ (birim: araç) MTD parametreleridir: v_{free} 'ye serbest-akış hızı denir ve trafik sıklığının düşük olduğu (yani, $0 \leq n(t) \leq n_{\text{crit}}$) durumlar için yaklaşık olarak araçların uzay-ortalama hızını ifade eder. n_{crit} 'ye kritik birikim denir ve çıkan akış $g(n(t))$ 'yi maksimize eden birikimi ifade eder. Bölgesel ortalama seyahat mesafesi l ile birlikte bu fiziksel parametreleri denklem (1) ile verilmiş diferansiyel denklemin parametreleri olarak toplu halde aşağıdaki şekilde yazabiliriz

$$p_1 \triangleq \frac{v_{\text{free}}}{l} \quad p_2 \triangleq \frac{0.5}{n_{\text{crit}}^2}. \quad (3)$$

Buradan dinamik modelin parametre vektörü $p \in \mathbb{R}^2$ aşağıdaki şekilde tanımlanabilir

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \frac{v_{\text{free}}}{l} \\ \frac{0.5}{n_{\text{crit}}^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ve fonksiyonel MTD $g(n(t))$ tekrar yazılabilir

$$g(n(t), p) = n(t) p_1 \exp(-p_2 n^2(t)). \quad (5)$$

Buradan hareketle dinamik model de tekrar yazılabilir

$$\dot{n}(t) = q(t) - g(n(t), p). \quad (6)$$

Böylelikle $g(n(t))$ 'nin ve dinamik modelin parametre vektörü p 'nin fonksiyonu olduğunu vurgulayabiliriz.

MTD-tabanlı dinamik modeli kullanarak benzetim yapabilmek için modeli ayrık-zamanlı forma dönüştürmek gerekir:

$$n(k+1) = F(n(k), q(k), p). \quad (7)$$

Burada $k \in \mathbb{Z}$ ayrık zamanı (yani, t 'nin ayrıklaştırılmış hali; $t = kT$ ile, $T \in \mathbb{R}$ (birim: s) örnekleme zamanı), $n(k)$ ile $q(k)$ sırasıyla $n(t)$ ve $q(t)$ 'nin bu ayrıklaştırmaya karşılık gelen hallerini, fonksiyon $F(\cdot)$ ise denklem (1) ile verilen sürekli-zamanlı dinamiklerin zamanda ayrıklaştırılmış halini ifade eder.

3. Parametre Kestirme

Aşağıda verilen ve benzetim hatasının minimizasyonunu içeren standart en küçük kareler parametre kestirme problemi formülasyonunu (bkz. [28]) MTD-tabanlı dinamik modelin parametrelerini kestirmek için (bkz. [29]) kullanabiliriz

$$\underset{p, \{\hat{n}(k)\}_{k=0}^K}{\text{minimize}} \sum_{k=0}^K \|n(k) - \hat{n}(k)\|_2^2 \quad (8a)$$

$$\text{bağlı } p \in \mathcal{P} \quad (8b)$$

$$k = 0, \dots, K-1 \text{ için:} \quad (8c)$$

$$\hat{n}(k+1) = F(\hat{n}(k), q(k), p). \quad (8d)$$

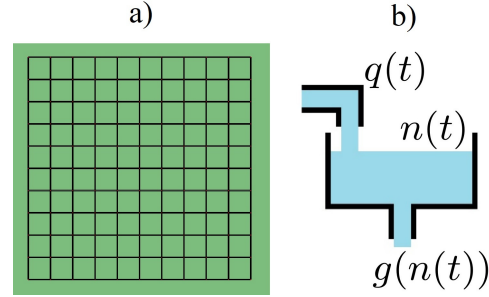
Burada $\hat{n}(k)$ denklem (7)'deki ayrık-zamanlı dinamik model ile oluşturulan benzetilmiş birikim durumu yörüngelerini ifade etmektedir. $n(k)$ ile $q(k)$ sırasıyla gerçek sistemden toplanan birikim durumu ve giren akış talebi yörüngelerini belirtir. K verinin zamandaki uzunluğunu ve \mathcal{P} model parametreleri kısıtlarını ifade eden kümeyi belirtir. Denklem (8) ile verilen problem, denklem (8d)'deki p 'nin optimizasyon değişkeni olmasından dolayı bir dışbükey-olmayan optimizasyon problemidir ve bu tarz problemler için geliştirilmiş çözümler (örneğin iç nokta yöntemi-tabanlı çözümler [30]) ile çözülebilir.

4. Model Geçerleme

Model geçerleme problemine mikroskobik benzetim senaryoları ile tutarlılık analizi yaklaşımıyla çözüm bulmaya çalışacağız. Literatürde bilindiği üzere (bkz. [31]) model geçerleme hatalı bir terimdir çünkü bir modeli geçermek sonsuz sayıda deney ve veri seti gerektirdiği için imkansızdır [32]. Dolayısıyla model geçerleme analiziyle bir dinamik modelin geçersiz olduğu çalışma koşullarının incelenmesi ve dinamik modelde iyileştirme gerekip gerekmediğinin tespit edilmesi hedeflenmelidir. Bu çalışmada büyük ölçekli kentsel karayolu trafiği ağlarının model geçerlemesi için (bu tarz sistemler için gerekli biçimde ve sistemin farklı çalışma koşullarında toplanmış gerçek veriye ulaşmanın ilgili analizleri yapmayı engelleyecek seviyede zor olmasından dolayı) mikroskobik benzetim için geliştirilmiş Simulation of Urban MObility (SUMO, [33]) yazılım paketini kullanacağız. Bu yazılım kullanılarak yapılan benzetimlerin sonuçlarını gerçek trafik verisi olarak kabul ederek

model geçerleme analizinde dinamik modelin bu veriyle ne kadar uyumlu olduğunu ve model parametrelerinin bu uyuma nasıl etki ettiğini inceleyeceğiz.

Mikroskobik benzetim için şekil (1)'de verilen soyut kentsel karayolu trafiği grid ağını kullanacağız. Bu ağ 121 düğüm (kavşak) ve 440 ayrıt (yol bağlantısı) içeren soyut bir grid ağıdır ve her ayrıt, 180 m uzunluğunda dört şeritli, iki yönlü bir kentsel yoldur. Kavşaklar, boşluk-tabanlı çalışan eyleycilere sahip trafik ışıklarıyla donatılmıştır. Bu ağ, yaklaşık 4000 aracın sürekli trafiğini taşıyabilen gerçek bir şehir merkezinin kavramsal bir temsili olarak görülebilir. Örnekleme zamanı T , mikroskobik benzetimdeki trafik ışığı çevrim süresi ile aynı olacak şekilde 90 s olarak seçilmiştir. Dinamik modelin zamanda ayrıklaştırılması için Runge-Kutta 4 yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 1: a) 121 düğümlü bir kentsel karayolu trafiği grid ağının SUMO'da oluşturulmuş mikroskobik benzetim modeli, b) denklem (1)'deki dinamik modelin su tankı benzeşimi şeması.

Denklem (7)'deki ayrık-zamanlı dinamik modeli ve giren akış talebi $q(k)$ 'nin yörüngesini kullanarak ağın birikim durumu $n(k)$ 'nin benzetilmiş yörüngesi $\hat{n}(k)$ 'yi (model parametresi p 'ye bağlı olarak) hesaplayabiliriz:

$$\hat{n}(k+1) = F(\hat{n}(k), q(k), p), k = 0, \dots, K-1 \quad (9)$$

Buradaki K benzetim uzunluğudur (ayrık zaman adımı cinsinden). Benzetim için başlangıç durumu, trafik senaryolarının ağ boş ($n(0) = 0$) halde başladığı varsayılarak $\hat{n}(0) = 0$ olarak alınacaktır.

Mikroskobik benzetimden ve dinamik model ile benzetimden gelen birikim yörüngelerini birer sembol ile belirtebiliriz:

$$N = [n(0) \quad n(1) \quad \dots \quad n(K)]^T \quad (10)$$

$$\hat{N}(p) = [\hat{n}(0) \quad \hat{n}(1) \quad \dots \quad \hat{n}(K)]^T.$$

Burada N mikroskobik benzetim ile oluşturulmuş, $\hat{N}(p)$ ise dinamik model ile oluşturulmuş birikim yörüngelerini ifade etmektedir. Bu tanımlarla model geçerleme analizi için kullanacağımız benzetim başarımlı ölçütü (uyum, fit) tanımlayabiliriz:

$$\phi(p) = 100 \left(1 - \frac{\|N - \hat{N}(p)\|_2}{\|N - \bar{N}\|_2} \right). \quad (11)$$

Bu ölçüt yüzde olarak düzelenmiş ortalama karesel benzetim hatasıdır ve gerçek durum yörüngesi N 'nin dinamik modelin ürettiği yörünge ile ne oranda doğru şekilde oluşturulabildiğinin (veya, modelin veriyle ne kadar uyumlu olduğunun) bir ölçüsüdür [34].

5. Benzetim Sonuçları

Dinamik model tarafından oluşturulan birikim durumu yörüngesini mikroskobik benzetimden gelen yörünge ile detaylı şekilde karşılaştırmak amacıyla, rastgele oluşturulmuş bir giren akış talebi yörüngesi $q(k)$ ile oluşan trafik senaryosu ile elde edilmiş benzetim sonuçları şekil (2)'de verilmiştir. Bu şekilde, benzetimde giriş olarak kullanılan giren akış talebi yörüngesi $q(k)$ ile birlikte mikroskobik benzetim (SUMO) ve dinamik modelden gelen birikim, zamanın fonksiyonu olarak çıkan akış, ve birikim-çıkan akış verisi (yani, ampirik MTD) ile dinamik modele dahil olan fonksiyonel MTD görülmektedir. Model parametreleri $p_1 = 0.0038$ ve $p_2 = 0.000285$ şeklinde seçilerek elde edilen bu sonuçlar için uyum değeri $\phi(p) = 74.8\%$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer çok yüksek olmamakla birlikte, 0-8000 arası sayıdaki aracın birikim dinamiklerinin sadece bir adet durum değişkeni kullanarak modellenmesini sağlayan bir dinamik model için makul ölçüde iyi bir benzetim başarımı olarak değerlendirilebilir. Literatürde bu başarımı nicel olarak inceleyen bir çalışma olmadığı için başarımların literatürle karşılaştırması yapılamamaktadır. MTD-tabanlı modellerin başarımının kapsamlı olarak değerlendirilebilmesi için gelecekteki çalışmalarda model varyasyonlarıyla durum kestirme ve kontrol başarımı analizleri incelemeye alınacaktır.

Kapsamlı bir model geçerleme analizi için, dinamik modelin belirli bir aralık içindeki parametre değerleri ve bir grup trafik senaryosu için başarımını inceleyeceğiz. Bu amaçla, giren akış talebi $q(k)$ için rastgele oluşturulmuş 50 yörünge ile mikroskobik benzetim sonuçları üretildi. İki boyutlu parametre uzayında dikkörtgen şeklinde bir kümeye dahil olan değerler üzerinde bir grid oluşturularak her bir grid noktası p 'de bu 50 senaryonun her biri için dinamik model ile benzetim yapıldı ve karşılık gelen uyum $\phi(p)$ hesaplandı. Sonuçlar şekil (3)'te verilmiştir. Bu şekilde, model parametreleri p 'nin bir fonksiyonu olarak $\phi(p)$ 'nin bu 50 senaryo üzerinden 10., 50., ve 90. yüzdabirliklerinin düzey eğrileri görülmektedir. Ayrıca 50 senaryodan elde edilen mikroskobik sonuçların her biri için denklem (8) ile verilen benzetim hatası yöntemi-tabanlı parametre kestirme probleminin çözülmesiyle elde edilen kestirilmiş model parametreleri (BHY), aynı problemin parametre kısıtları kullanılarak çözülmesinden elde edilen parametreler (BHY+ \mathcal{P}), ve eğri uydurma (fonksiyonel MTD'nin gerçek çıkan akış verisine (yani, ampirik MTD'ye) uydurulması; MTD parametrelerinin kestirilmesinde standart yöntem [10]) yoluyla elde edilen parametreler aynı şekilde gösterilmiştir. BHY+ \mathcal{P} için p , denklem (2)'deki fiziksel MTD parametrelerinde

$$\begin{aligned} 10.4 \text{ m/s} &\leq v_{\text{free}} \leq 17.4 \text{ m/s} \\ 500 \text{ m} &\leq l \leq 3000 \text{ m} \\ 3000 \text{ araç} &\leq n_{\text{crit}} \leq 5000 \text{ araç} \end{aligned} \quad (12)$$

şeklindeki kısıtlara denk gelecek şekilde kısıtlanmıştır. Bu kısıtlar yoluyla sistemin fiziksel koşullarına dair önsel bilgiler (örneğin, ağdaki hız sınırının 13.9 m/s olması) parametre kestirme başarımının iyileştirilmesi amacıyla kullanılabilir.

Bu analizle izleyen gözlemler ve yorumlar yapılabilir: (1) Düzey eğrilerinden görülebileceği üzere, dinamik modelin istikrarlı (yani, 10., 50., ve 90. yüzdabirliklerin hepsi için) olarak makul seviyede yüksek benzetim başarımı göstermesini sağlayan model parametresi değerleri mevcuttur. Bu durum, dina-

mik modelin incelenen ağ ve ele alınan trafik senaryoları ($q(k)$ yörüngeleri) için benzetim başarımı sağlama açısından makul oranda geçerli bir model olarak kabul edilebileceğine işaret etmektedir. (2) Kısıtlı parametre kestirme probleminin çözümünden elde edilen parametre değerleri (BHY+ \mathcal{P}) tutarlı olarak yüksek benzetim başarımı gösteren parametre değeri aralıklarında yer almaktadır. Kısıtsız parametre kestirme problemi (BHY) ise eğri uydurmaya göre daha iyi sonuçlar vermekle birlikte kısıtlı problemde gelen değerlere göre daha az tutarlı (yani, p uzayında daha büyük bir alana yayılmış) sonuçlar göstermektedir. Buradan hareketle, kısıtlı parametre kestirme problemi incelenen ağ ve ele alınan trafik senaryoları için iyi benzetim başarımı sağlayan model parametrelerini hesaplama açısından tercih edilebilir bir yöntem olarak kabul edilebilir.

6. Sonuç

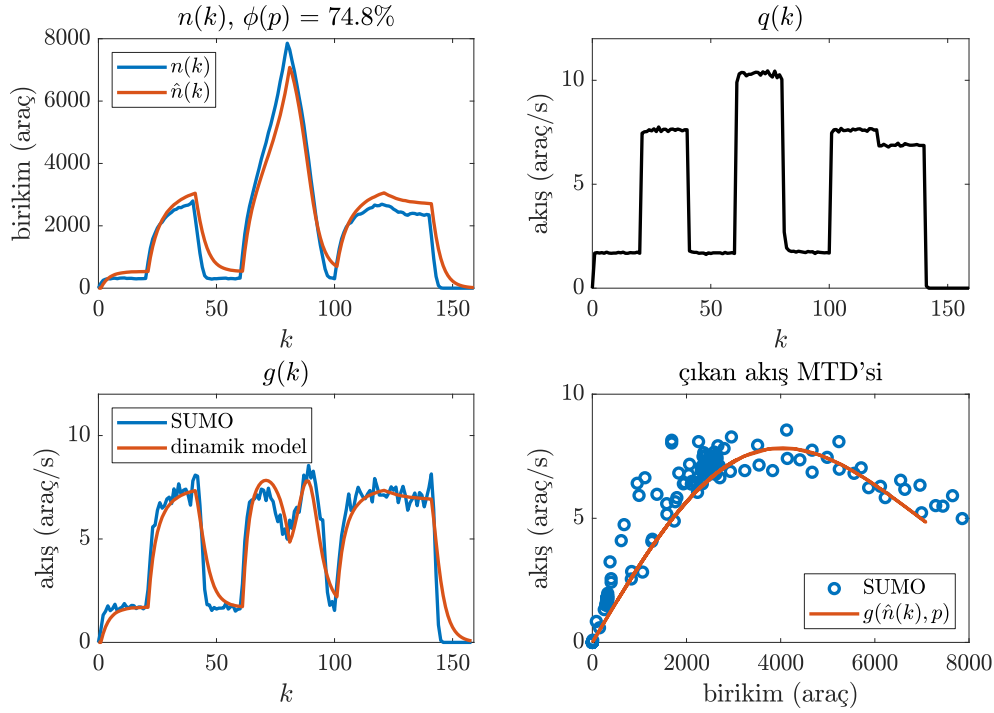
Bu çalışmada büyük ölçekli kentsel karayolu trafiği ağlarının tek bölgesel makroskobik temel diyagram-tabanlı dinamik modeli için mikroskobik benzetime dayalı model geçerleme analizi gerçekleştirdik. Ayrıca standart bir model-tabanlı parametre kestirme yönteminin başarımını model geçerleme analizinde kullanılan mikroskobik benzetim sonuçları yardımıyla değerlendirdik. Model geçerleme analiziyle dinamik modelin incelenen ağ geometrisi ve rastgele oluşturulmuş trafik senaryoları için makul seviyede benzetim başarımı göstermesini sağlayan model parametresi değerlerinin mevcut olduğu, parametre kestirme yönteminin analiziyle de sadece bir senaryodan gelen sistem verisi kullanılarak tutarlı şekilde iyi benzetim başarımı gösteren parametre değerlerinin hesaplanmasının mümkün olduğu sonucuna vardık. Bu sonuçlar, incelenen dinamik model ve varyasyonlarının büyük ölçekli kentsel ağlarda durum kestirme ve kontrol tasarımı gibi model-tabanlı mühendislik çalışmaları için potansiyel taşıdığına işaret etmektedir. Gelecekteki çalışmalarda, dinamik modelin iki ve daha fazla bölgesel varyasyonları ile farklı parametre kestirme yöntemleri (örneğin, öngörü hatası yöntemi [35]) ve bunların model ve ölçüm belirsizliğini hesaba katan formülasyonları incelenebilir.

7. Teşekkür

Yazar TÜBİTAK tarafından 2232 B Uluslararası Genç Araştırmacılar programı kapsamında (proje no: 121C076) desteklenmektedir. Bildiri ile ilgili tüm sorumluluk yazara aittir. TÜBİTAK'tan alınan maddi destek, bildirinin içeriğinin bilimsel anlamda TÜBİTAK tarafından onaylandığı anlamına gelmez.

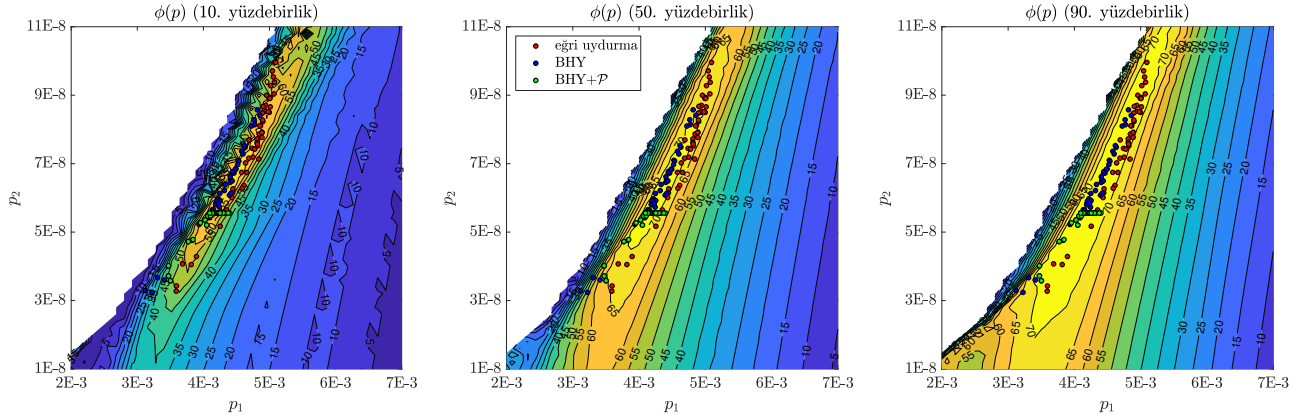
8. Kaynakça

- [1] Markos Papageorgiou, Christina Diakaki, Vaya Dinopolou, Apostolos Kotsialos, and Yibing Wang, "Review of road traffic control strategies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 12, pp. 2043–2067, 2003.
- [2] J Godfrey, "The mechanism of a road network," *Traffic Engineering & Control*, vol. 8, no. 8, 1969.
- [3] Nikolas Geroliminis and Carlos F Daganzo, "Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 42, no. 9, pp. 759–770, 2008.



Şekil 2: Mikroskobik benzetim ve dinamik model ile oluşturulan ağ değişkeni yörüngelerinin karşılaştırması.

- [4] Allister Loder, Lukas Ambühl, Monica Menendez, and Kay W Axhausen, “Understanding traffic capacity of urban networks,” *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1–10, 2019.
- [5] Nikolas Geroliminis and Jie Sun, “Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, no. 3, pp. 605–617, 2011.
- [6] Carlos F Daganzo, “Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 41, no. 1, pp. 49–62, 2007.
- [7] Mehdi Keyvan-Ekbatani, Anastasios Kouvelas, Ioannis Papamichail, and Markos Papageorgiou, “Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 46, no. 10, pp. 1393–1403, 2012.
- [8] Konstantinos Aboudolas and Nikolas Geroliminis, “Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 55, pp. 265–281, 2013.
- [9] Jack Haddad and Boris Mirkin, “Adaptive perimeter traffic control of urban road networks based on mfd model with time delays,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 26, no. 6, pp. 1267–1285, 2016.
- [10] Anastasios Kouvelas, Mohammadreza Saeedmanesh, and Nikolas Geroliminis, “Enhancing model-based feedback perimeter control with data-driven online adaptive optimization,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 96, pp. 26–45, 2017.
- [11] Jack Haddad and Arie Shraiber, “Robust perimeter control design for an urban region,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 68, pp. 315–332, 2014.
- [12] RX Zhong, C Chen, YP Huang, A Sumalee, WHK Lam, and DB Xu, “Robust perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: A control-Lyapunov function approach,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 117, pp. 687–707, 2018.
- [13] Jack Haddad, “Optimal perimeter control synthesis for two urban regions with aggregate boundary queue dynamics,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 96, pp. 1–25, 2017.
- [14] Wei Ni and Michael Cassidy, “City-wide traffic control: Modeling impacts of cordon queues,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019.
- [15] Nikolas Geroliminis, Jack Haddad, and Mohsen Ramezani, “Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: A model predictive approach,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 348–359, 2013.
- [16] Mohsen Ramezani, Jack Haddad, and Nikolas Geroliminis, “Dynamics of heterogeneity in urban networks: Aggregated traffic modeling and hierarchical control,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 74, pp. 1–19, 2015.
- [17] Isik Ilber Sirmatel and Nikolas Geroliminis, “Stabilization of city-scale road traffic networks via macroscopic fundamental diagram-based model predictive perimeter control,” 2019.



Şekil 3: Uyum $\phi(p)$ 'nin 50 rastgele senaryo üzerinden 10., 50., ve 90. yüzdebirliklerinin düzey eğrileri ve parametre kestirimleri.

- rol,” *Control Engineering Practice*, vol. 109, pp. 104750, 2021.
- [18] Alexander Genser and Anastasios Kouvelas, “Dynamic optimal congestion pricing in multi-region urban networks by application of a multi-layer-neural network,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 134, pp. 103485, 2022.
- [19] Mehmet Yildirimoglu and Mohsen Ramezani, “Demand management with limited cooperation among travellers: A doubly dynamic approach,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 132, pp. 267–284, 2020.
- [20] C. Menelaou, P. Kolios, S. Timotheou, C.G. Panayiotou, and M.P. Polycarpou, “Controlling road congestion via a low-complexity route reservation approach,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 81, pp. 118–136, 2017.
- [21] Isik Ilber Sirmatel and Nikolas Geroliminis, “Economic model predictive control of large-scale urban road networks via perimeter control and regional route guidance,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1112–1121, 2018.
- [22] Mohammadreza Saeedmanesh, Anastasios Kouvelas, and Nikolas Geroliminis, “An extended Kalman filter approach for real-time state estimation in multi-region MFD urban networks,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 132, pp. 103384, 2021.
- [23] Isik Ilber Sirmatel and Nikolas Geroliminis, “Nonlinear moving horizon estimation for large-scale urban road networks,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019.
- [24] Guilhem Mariotte, Ludovic Leclercq, SFA Batista, Jean Krug, and Mahendra Paipuri, “Calibration and validation of multi-reservoir mfd models: A case study in lyon,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 136, pp. 62–86, 2020.
- [25] Mahendra Paipuri and Ludovic Leclercq, “Empirical validation of bimodal MFD models,” *Frontiers in Future Transportation*, p. 1, 2020.
- [26] Guilhem Mariotte, Mahendra Paipuri, and Ludovic Leclercq, “Dynamics of flow merging and diverging in mfd-based systems: Validation vs. microsimulation,” *Frontiers in Future Transportation*, vol. 1, pp. 604088, 2020.
- [27] Xiaobo Qu, Shuaian Wang, and Jin Zhang, “On the fundamental diagram for freeway traffic: A novel calibration approach for single-regime models,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 73, pp. 91–102, 2015.
- [28] Victor M Zavala, Carl D Laird, and Lorenz T Biegler, “Interior-point decomposition approaches for parallel solution of large-scale nonlinear parameter estimation problems,” *Chemical Engineering Science*, vol. 63, no. 19, pp. 4834–4845, 2008.
- [29] Isik Ilber Sirmatel and Nikolas Geroliminis, “Model-based identification, estimation, and control for large-scale urban road networks,” in *19th European Control Conference (ECC)*. IEEE, 2020, pp. 408–413.
- [30] Andreas Wächter and Lorenz T Biegler, “On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming,” *Mathematical Programming*, vol. 106, no. 1, pp. 25–57, 2006.
- [31] Roy S Smith and John C Doyle, “Model validation—a connection between robust control and identification,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 7, 1992.
- [32] Stephen Prajna, “Barrier certificates for nonlinear model validation,” *Automatica*, vol. 42, no. 1, pp. 117–126, 2006.
- [33] Pablo Alvarez Lopez, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun-Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner, and Evamarie Wießner, “Microscopic traffic simulation using sumo,” in *2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC)*. IEEE, 2018, pp. 2575–2582.
- [34] Johan Schoukens and Lennart Ljung, “Nonlinear system identification: A user-oriented road map,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 39, no. 6, pp. 28–99, 2019.
- [35] Lennart Ljung, “Prediction error estimation methods,” *Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 1, pp. 11–21, 2002.