

Araç Takip Modellerinin Karma Otoyol Trafik Akım Başarımlarına Olan Etkisinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi: İstanbul E-80 Otoyolu Örneği

Mehmet Ali SİLGÜ^{1,2*}

¹ İnşaat Mühendisliği, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye

² Endüstri Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

*¹ masilgu@bartin.edu.tr; msilgu@ku.edu.tr

(Geliş/Received: 13/08/2025;

Kabul/Accepted: 07/09/2025)

Öz: Bu çalışma, farklı oranlarda işbirlikçi seyir uyarlamalı denetime sahip (Cooperative Adaptive Cruise Control- CACC) araçları içeren karma trafik akımlarında, otoyol trafik akımı denetim stratejilerinin performansını incelemektedir. Çalışmada, insan sürücülerin temsil edildiği araç takip modelleri değiştirilerek, CACC penetrasyon oranı ve iki temel yol tabanlı trafik yönetim yaklaşımı—katılım denetimi ve değişken hız kısıtı—benzetim tabanlı bir çerçevede değerlendirilmiştir. Çerçeve, gerçek bir otoyol ağ parçası için kalibrasyonu yapılmış model üzerinde uygulanmış ve farklı denetim algoritmalarının etkileri karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. Bulgular, araç takip modelinin, CACC penetrasyon oranının ve uygulanan denetim stratejisinin trafik akımı performansı üzerindeki etkileşimlerini ortaya koymakta; model seçiminin sonuçların güvenilirliğinde kritik rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Trafik yönetimi, işbirlikçi seyir uyarlamalı denetim, karma trafik, simülasyon.

A Comparative Analysis of the Effects of Car-Following Models on Mixed Freeway Traffic Flow Performance: The Case of Istanbul E-80 Freeway

Abstract: This study investigates the performance of freeway traffic flow control strategies in mixed traffic streams with varying proportions of Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) vehicles. By varying the car-following models representing human drivers, the effects of CACC penetration rates and two main roadway-based traffic management approaches—ramp metering and variable speed limits—are evaluated within a simulation-based framework. The proposed framework is implemented on a calibrated model of a real freeway segment, enabling a comparative analysis of different control algorithms. The findings reveal the interactions among car-following model selection, CACC penetration rate, and applied control strategies, highlighting the critical role of model choice in ensuring the reliability of results.

Key words: Traffic management, cooperative adaptive cruise control, mixed traffic, simulation.

1. Giriş

Otoyol trafik akım dinamikleri, bağlantılı ve sürücüsüz araç (Connected and Automated Vehicles – CAV) teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, geleneksel modellerin ötesine geçerek daha karmaşık ve çok katmanlı bir yapıya evrilmiştir. Günümüzde trafik akışı yalnızca bireysel araçların hız-yoğunluk ilişkileriyle değil; araçlar arası iletişim, uyarlanabilir denetim stratejileri, altyapı ile etkileşim ve çevresel belirsizliklere verilen tepkiler gibi unsurlarla tanımlanmaktadır. Bu dönüşüm, sistem başarımını artırmayı hedefleyen yenilikçi denetim yaklaşımlarını da beraberinde getirmiştir.

Bu bağlamda, son yıllarda işbirlikçi ve seyir uyarlamalı araç (Cooperative Adaptive Cruise Control -CACC) sistemleri ön plana çıkmaktadır. CACC, geleneksel uyarlanabilir hız sabitleyiciye (Adaptive Cruise Control-ACC) ek olarak, araçlar arası kablosuz iletişim sayesinde öndeki araç veya araç grubunun hız, ivme ve konum bilgilerini anlık olarak paylaşabilmektedir. Böylece araçlar daha kısa takip aralıklarıyla güvenli seyredebilmekte ve konvoy kararlılığı korunabilmektedir. Literatürde CACC'nin başlıca faydaları arasında kapasite artışı, araçlar arası çarpışma riskinin azalması ve yakıt tüketimi ile emisyonların düşmesi yer almaktadır. Bu özellikler, CACC'yi yalnızca trafik mühendisliği bağlamında değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik bir teknoloji haline getirmektedir.

Özellikle CACC araçların, trafik akım kompozisyonuna girmesiyle birlikte, akım dinamiklerinde önemli değişimler meydana gelmektedir [1]. Bu değişimin temelinde, CACC araçlarının daha düşük takip aralıkları ile seyir edebilmesi, altyapı ile sürekli iletişim ve etkileşim halinde olması ve çevresel farkındalıkla yöreng

* Sorumlu yazar: masilgu@bartin.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-7667-8796

planlaması yapabilmesi yatmaktadır. Bu sistemlerde iletişim topolojisi, denetleyici tasarımı, ileri-geri beslemeli stratejiler ve bozucu gözlemler; ardışık kararlılığın korunması ve dışsal bozuluculara karşı dayanıklılığın artırılmasında kritik rol oynamaktadır. Dolayısıyla, insan sürücülü araçlar ile CACC araçlarının birlikte yer aldığı karma trafik akımlarının nasıl performans gösterdiğini anlamak hem akademik hem de uygulamalı açıdan büyük önem taşımaktadır. Gerçek dünya koşullarında, iletişim kesintileri, sensör arızaları veya parametre belirsizlikleri gibi durumlar karşısında geliştirilen dayanıklı denetim mimarileri, sistemin sürekliliğini güvence altına almaktadır [2] – [4]. CACC araçlarının belirli koşullarda sürücü müdahalesi olmadan kısmi sürüş gerçekleştirebilmesi ve Uluslararası Otomotiv Mühendisleri Birliği'nin sınıflandırmasına göre Seviye 3 sürücüsüz araç olarak nitelendirilmesi, bu araçların trafik akımı ve kapasite üzerindeki etkilerinin son yıllarda literatürde yoğun olarak incelenmesine yol açmıştır [5].

Karma trafik akım kompozisyonları; bağlantılı ve sürücüsüz araçlar ile insan sürücülü araçların aynı ağda birlikte çalışmasını ifade eder. Bu durumda, insan sürücülü araçların değişken sürüş davranışları ile otonom araçların tahmin ve öngörü tabanlı sürüş algoritmaları etkileşim halindedir. Bağlantılı ve sürücüsüz araç oranının artması, bu etkileşimi kısmen değiştirerek trafik akım başarımını etkilemektedir. Yol tabanlı trafik denetim uygulamaları da bu kompozisyon üzerinde farklı etkileşimler oluşturabilmektedir. Bu etkileşimlerin incelenmesi, güncel literatürde genellikle benzetim tabanlı yaklaşımlarla yapılmaktadır. Ancak bu çalışmaların çoğunda, insan sürücülerin temsil edildiği araç takip modellerinin sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir. Genel yaklaşım, her araç takip modelinin her tür sürücü davranışını temsil edebildiği varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayım, yol tabanlı trafik akım denetimlerinin sonuçlarına olan etkilerin de göz ardı edilmesine neden olmaktadır.

Yol tabanlı denetim yaklaşımları, otoyol trafik yönetimi kapsamında değişken hız sınırları, katılım denetimi, şerit yönetimi ve kavşak geçiş optimizasyonu gibi uygulamaları kapsamaktadır. Geleneksel sabit kurallara dayalı sistemler, yüksek yoğunlukta verim kaybına yol açarken; merkezi veya dağıtık işbirlikçi karar mekanizmaları, araçların geçiş sırası ile hız ve ivme profillerini eşzamanlı optimize ederek kapasite artışı ve güvenlik kazanımı sağlamaktadır. Bu yöntemler, özellikle darboğaz bölgelerinde stokastik kırılma modelleriyle desteklenerek kırılma olasılığını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Bu bağlamda sunulan çalışmada; otoyol trafik denetiminde sık kullanılan katılım denetimi ve değişken hız kısıtı uygulamalarının, farklı oranlarda CACC aracı içeren trafik akımlarında, insan sürücülerin temsil edildiği araç takip modelleri değiştirilerek otoyol trafik akım başarımına etkileri benzetim tabanlı olarak karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- İnsan sürücülerin temsil edildiği araç takip modellerinin, otoyol trafik akımı denetim yaklaşımları ve CACC araçları ile olan etkileşimlerinin benzetim tabanlı incelenmesine yönelik bir çerçeve sunulmuştur.
- Sunulan çerçeve, gerçek bir otoyol ağ parçası için kalibrasyonu yapılmış bir model üzerinde sınanmıştır.
- Farklı denetim algoritmaları karşılaştırmalı analiz ile değerlendirilmiştir.

Çalışmanın devamında sırasıyla ilgili literatür derlemesi sunulmuş, deneysel tasarım detaylandırılmış ve vaka analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Çalışma, sonuç bölümünde elde edilen bulguların genel değerlendirmesiyle tamamlanmıştır.

2. Literatür

Araç takip davranışı, mikroskobik trafik modellemesinin en kritik unsurlarından biri olarak hem bireysel araç hem trafik akım dinamiklerini hem de sistem düzeyinde trafik akışını belirleyen temel bir faktördür [2], [6]. Bu davranış yalnızca araçların birbirleriyle olan uzunlamasına mesafe ve hız ilişkilerini değil, aynı zamanda sürücülerin algısal, bilişsel ve davranışsal özelliklerini de kapsamaktadır. Klasik araç takip modelleri, trafik akışını belirli varsayımlar altında temsil eden matematiksel yapılara dayanır. Örneğin, Gazis–Herman–Rothery (GHR) modeli [7] sürücü tepkilerini uyarı–tepki ilişkisi çerçevesinde açıklarken; Gipps modeli güvenlik mesafesi varsayımını kullanır [8]. Akıllı Sürücü Modeli (Intelligent Driver Model) [9], sürücünün hedeflediği hız ve mesafeye göre ivmelenme kararlarını tanımlarken; Wiedemann modeli [10] ise sürücünün algısal eşikleri üzerinden psikofiziksel bir yaklaşım sunar [11].

Bu modeller, sabit parametre kullanımı sayesinde benzetimlerde uygulanabilirliği kolaylaştırır da sürücüler arası farklılıklar ve değişken trafik koşulları karşısında yetersiz kalabilmektedir [12], [13]. Özellikle agresif ve temkinli sürücüler arasındaki davranış farkları, model doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu sınırlılıklar, insan faktörlerini ve gelişen araç teknolojilerini dikkate alan yeni nesil modellerin gelişmesine zemin hazırlamıştır. Modern modeller; tepki süresi gecikmeleri, dikkat dağınıklığı, risk algısı, öngörü hataları ve ani manevralara verilen tepkiler gibi unsurları dikkate alarak daha gerçekçi sonuçlar sunmaktadır [14] – [16]. Bu bağlamda, sürücülerin farklı modlarda (dikkatli, dikkatsiz, hızlı tepki veren, gecikmeli tepki veren vb.) modellenmesi hem bireysel hem de toplu sürüş davranışlarının daha doğru temsil edilmesini sağlamaktadır. Özellikle örülme

bölgelerindeki ani şerit değiştirme durumlarında, üç aşamalı tepki süreçlerine dayalı insan benzeri karar alma mekanizmaları, otonom araç sistemlerinin karma trafik koşullarına uyumunu kolaylaştırmaktadır. Ayrıca derin öğrenme, transfer öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme tabanlı yaklaşımlar, bağlantılı ve otonom araçlar ile insan sürücülü araçlar arasındaki etkileşimleri yüksek doğrulukla tahmin edebilmektedir [17-18].

Bağlantılı ve otonom araçlar, yalnızca bireysel araç davranışlarını optimize etmekle kalmayıp, araçlar arası iletişim ve eşgüdümü de iyileştirerek sistem düzeyinde trafik akışını güçlendirmektedir. Özellikle konvoy (platoon) sistemlerinde iletişim topolojisi, zaman gecikmeleri ve denetim algoritmalarının tasarımı; dizi kararlılığı (string stability) ve güvenlik açısından belirleyici olmaktadır [19]. Sabit ve geçişli iletişim topolojilerinde performans farklılıkları gözlemlenmekte; iki-öncül-lider-takipçi (Two-Predecessor-Leader-Follower; TPLF) topolojisinin dinamik performans açısından daha üstün olduğu belirlenmektedir. TPLF topolojisi, her takipçi aracın yalnızca kendi öncüsünden değil, aynı zamanda onun öncüsünden ve lider araçtan bilgi aldığı bir iletişim yapısıdır. Bu yaklaşım, bilgi yayılım hızını artırarak konvoy kararlılığını ve akış performansını iyileştirmektedir [6], [19]. Karma trafik koşullarında ise işbirlikçi birleşme stratejileri, şerit değiştirme optimizasyonu ve kavşak eşgüdümü; kapasiteyi artırmakta ve gecikme sürelerini azaltmaktadır [20]. Sinyalsiz kavşaklarda derin pekiştirmeli öğrenme ve zaman penceresi optimizasyonu tabanlı yöntemler, çarpışma riskini önemli ölçüde azaltmakta ve trafik akışının sürekliliğini sağlamaktadır [21], [22].

Enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik, bağlantılı ve otonom araç teknolojilerinin temel hedeflerinden biridir. Eko-sürüş stratejileri; dur-kalk davranışını azaltarak, rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanımını artırmakta, yakıt tüketimini ve emisyonları düşürmektedir [23] – [25]. Bazı denetim stratejileri ise yalnızca bağlantılı ve otonom araçların değil, onları takip eden geleneksel araçların da enerji tüketimini minimize edecek şekilde tasarlanmaktadır [26]. Bu durum, sistem çapında enerji verimliliği hedeflerinin ulaşım planlamasına entegre edilebileceğini göstermektedir.

Güvenlik açısından, iletişim kesintileri, sensör arızaları, denetim değişkenlerindeki sapmalar ve dışsal bozucular gibi gerçek dünya koşullarında dayanıklı denetim mimarileri geliştirilmiştir [27]. Bozucu gözlemciler, kayma modu tabanlı denetim sistemleri ve H_∞ performans ölçütleri hem bireysel araçların hem de konvoy sistemlerinin istikrarını garanti altına almaktadır. Lineer Matris Eşitsizliği (Linear Matrix Inequality, LMI) tabanlı yaklaşımlar, bu stratejilerin teorik temellerini güçlendirmektedir [28] – [30]. LMI, bilinmeyen değişkenler içeren simetrik bir matris ifadesinin pozitif yarı tanımlı olmasını gerektiren matematiksel bir kısıttır. Kontrol teorisi ve optimizasyon problemlerinde, sistem kararlılığı ve performans kriterlerinin çözümünü doğrusal biçimde ifade etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [31].

Otoyol trafik denetimi ve CACC araçlarının trafik akım performansına etkilerine ilişkin mevcut literatür, temel olarak CACC araçlarının olumlu etkilerini ve bunları çeşitli performans göstergeleri üzerinden incelemiştir [32], [33]. Bu göstergeler; sistemden çıkan taşıt sayısı, toplam seyahat süresi, toplam gecikme, katılım kollarındaki kuyruklanma uzunluğu ve emisyon salımlarıdır. Ancak yapılan çalışmalarda, insan sürücülerin temsilinde genellikle tek bir araç takip modeli kullanılmış, farklı modellerle karşılaştırmalı analiz yapılmamıştır. Araç takip modellerinin geliştirilme süreçlerinde, belirli bir bölgedeki sürücü profili ve trafik akım özellikleri esas alındığından, aktarılabilirlik konusu göz ardı edilmiştir [34]. Ayrıca trafik akımındaki iyileşmelerin ne ölçüde CACC araçlardan ne ölçüde otoyol trafik denetim uygulamalarından kaynaklandığı net biçimde ölçülmemiştir.

Bu bağlamda, sunulan çalışma literatürden farklı olarak; insan sürücüler için farklı araç takip modellerini, çeşitli trafik denetim algoritmalarını ve farklı oranlarda CACC araç varlığını dikkate alarak karşılaştırmalı bir analiz çerçevesi sunmaktadır. Literatür, insan benzeri sürüş davranışlarının ve karma trafik uyumunun araç takip modellerinde giderek önem kazandığını ortaya koymaktadır. Gelecekte, geniş ölçekli doğal sürüş verileri ile yapay zekâ tabanlı algoritmaların entegrasyonu sayesinde, daha güvenli, enerji verimli ve sürdürülebilir bağlantılı ve otonom araç sistemlerinin geliştirilmesi beklenmektedir.

3. Metodoloji

Çalışmada trafik akımı performansı, sistemden çıkan taşıt sayısı, toplam seyahat süresi, toplam gecikme, kuyruk uzunluğu ve emisyon göstergeleri üzerinden değerlendirilmiştir. Sistemden çıkan taşıt sayısı, belirli bir süre içerisinde otoyolu terk eden toplam araç sayısını ifade etmekte ve kapasite kullanım etkinliğini göstermektedir. Toplam seyahat süresi, tüm araçların yolculukları boyunca geçirdikleri sürenin toplamını ifade ederken, düşük değerler daha verimli bir trafik akışına işaret etmektedir. Toplam gecikme, serbest akım koşullarına kıyasla yaşanan zaman kaybını yansıtmakta ve darboğaz bölgelerindeki yönetim stratejilerinin etkinliğini ölçmek açısından önem arz etmektedir. Katılım kollarında oluşan ortalama kuyruk uzunluğu ise yoğunluk yönetimi başarısının bir göstergesidir. Ayrıca, yakıt tüketimi ve CO₂ salımları gibi emisyon göstergeleri de enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından ikincil bir performans ölçütü olarak dikkate alınmıştır.

Önerilen yöntem bazı varsayımlar ve kısıtlar altında uygulanmıştır. İnsan sürücüler belirli araç takip modelleriyle temsil edilmekte olup, gerçek sürücü davranışındaki heterojenlikler tam olarak yansıtılamamaktadır. CACC araçlarının iletişim kesintisi, sensör hatası veya donanım arızası gibi durumlarla karşılaşmadığı varsayılmış, bu nedenle elde edilen sonuçlar ideal koşulları yansıtmaktadır. Kalibrasyon sürecinde kullanılan parametreler İstanbul E-80 otoyolunun belirli bir kesimine özgüdür; bu nedenle bulgular farklı yol geometrileri veya trafik kompozisyonlarına doğrudan genellenemeyebilir. Ayrıca, hava koşulları, yol çalışmaları ve beklenmedik olaylar gibi dışsal etkiler modelleme kapsamında ele alınmamıştır. Bu varsayımlar yöntemin sınırlarını belirlemekte ve bulguların hangi koşullar altında geçerli olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu kapsamlı çerçevenin ardından, metodolojinin temel unsurları ve çalışmada uygulanan modelleme yaklaşımları alt başlıklarda ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

3.1 Araç Takip Modelleri

Bu çalışmada, farklı sürücü tepkilerini ve hız-izleme dinamiklerini yansıtmak amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan yedi araç takip modeli değerlendirilmiştir. General Motors (GM) modeli, araç takip teorisinin en erken matematiksel temsil biçimlerinden biri olarak, takip eden aracın hız değişimini, öndeki araç ile arasındaki mesafe ve bağıl hız üzerinden tanımlar [35], [36]. Basit yapısına rağmen, temel akım-hız-mesafe ilişkilerini açıklayabilmesi sayesinde birçok daha karmaşık modelin geliştirilmesine zemin oluşturmıştır. Gazis-Herman-Rothery (GHR) modeli [7], GM modelinin bir genellemesi olarak sürücü tepkisini bağıl hız, takip mesafesi ve ayarlanabilir hassasiyet katsayılarıyla ifade eder; böylece farklı trafik yoğunlukları ve heterojen sürücü profilleri gerçekçi biçimde modellenebilir. Gipps modeli [34], sürücünün güvenli frenleme kabiliyeti ve maksimum hız tercihlerini dikkate alan deterministik bir yaklaşıma sahiptir. Takip mesafesini, öndeki aracın ani frenlemesine güvenli bir şekilde tepki verilebilecek biçimde belirler ve bu yönüyle güvenlik odaklı mikroskopik simülasyonlarda yaygın olarak tercih edilir. Krauss modeli [37] ise güvenli takip mesafesini stokastik bileşenlerle hesaplayarak sürücü davranışındaki rastlantısallığı temsil eder. Parametreleri hem agresif hem de temkinli sürüş tarzlarını yansıtacak biçimde ayarlanabilir, böylece geniş bir sürücü davranış spektrumunu kapsar. Intelligent Driver Model (IDM) [9] sürekli ve diferansiyel bir formülasyona sahip olup, hedef hız, minimum takip mesafesi, ivmelenme ve yavaşlama parametreleri aracılığıyla dengeli ve kararlı bir hız profili üretir. Parametrik esnekliği sayesinde serbest akım koşullarından yoğun sıkışıklığa kadar farklı trafik durumlarını tutarlı biçimde temsil edebilir. Wiedemann modeli [10] ise özellikle VISSIM gibi mikroskopik simülasyon yazılımlarında standart olarak kullanılan, psikofizik temelli bir yaklaşımdır. Sürücülerin algı eşikleri, reaksiyon süreleri, bağıl hız algıları ve bireysel karakteristikleri dikkate alınarak hem takip hem de sollama davranışlarını ayrıntılı biçimde modelleyebilir.

Bunlara ek olarak, ileri seviye otomasyon teknolojilerinin uzunlamasına kontrol mantığını temsil eden Milanes ve Shladover [38] tarafından geliştirilmiş ACC/CACC araç takip modeli de değerlendirmeye alınmıştır. Bu model, hem uyarlanabilir hız sabitleyici (ACC) hem de kooperatif uyarlanabilir hız sabitleyici (CACC) modlarını kapsayan hibrit bir yapıya sahiptir. ACC modunda, araç sensörleri aracılığıyla ölçülen takip mesafesi ve bağıl hız bilgileri kullanılarak sabit zaman aralıklı güvenli takip mesafesi korunur. CACC modunda ise araçlar arası kablosuz iletişim (V2V) ile öndeki araç veya araç grubundan hız, ivme ve konum bilgileri gerçek zamanlı olarak alınır. Böylece, insan sürücülü araçlara kıyasla daha kısa takip aralıklarında dahi güvenli ve kararlı konvoy hareketi sağlanabilir. Model hem insan sürücülü hem de kooperatif kontrollü araçların birlikte yer aldığı karma trafik akımlarında, farklı penetrasyon oranlarının trafik akımı ve kararlılığı üzerindeki etkilerini yüksek doğrulukla simüle edebilme kapasitesine sahiptir.

3.2 İrdeleme Çerçevesi

Bu çalışma, CACC araç teknolojisinin trafik akım dinamikleri üzerindeki etkilerini, insan sürücülerin temsilinde kullanılan araç takip modellerinin çeşitliliğini dikkate alarak incelemeyi amaçlamaktadır. Literatürde, CACC araçlarının karma trafik akımlarındaki etkisi genellikle tek bir araç takip modeli üzerinden değerlendirilmekte; böylece insan sürücü davranışı sabit bir varsayıma indirgenmektedir. Bu yaklaşım, model seçiminden kaynaklanabilecek metodolojik yanlışlık riskini artırmakta ve farklı model yapılarının trafik akımı üzerindeki olası etkilerinin göz ardı edilmesine yol açmaktadır.

Bu bağlamda, çalışmamız mevcut araştırma çizgisinden ayrılarak insan sürücü davranışını temsil eden araç takip modelini senaryo değişkeni olarak ele almakta ve her bir modelin CACC penetrasyon oranı ile olan etkileşimini sistematik biçimde irdelemektedir.

İnceleme kapsamında, altısı literatürde yaygın kullanılan ve biri ileri otomasyon teknolojilerini temsil eden toplam yedi araç takip modeli değerlendirilmiştir. CACC araç penetrasyon oranı, %0'dan %100'e kadar %25'lik artışlarla tanımlanmış; böylece beş farklı penetrasyon seviyesi (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) ele alınmıştır. Her penetrasyon seviyesinde, CACC araçlar Milanes ve Shladover tarafından önerilen model ile, insan sürücülü araçlar ise seçilen senaryodaki araç takip modeli ile temsil edilmiştir.

Araştırma tasarımı, yalnızca araç takip modelini ve CACC penetrasyon seviyesini değil, aynı zamanda uygulanan trafik akım denetim yaklaşımını da bağımsız bir değişken olarak ele almaktadır. Bu kapsamda üç farklı denetim stratejisi uygulanmıştır:

(i) Denetimsiz senaryo – herhangi bir katılım denetimi veya değişken hız kısıtı uygulanmadan temel akımın gözlemlenmesi,

(ii) ALINEA katılım denetimi [38] – yalnızca lokal katılım denetimi ile akım yönetimi,

(iii) H ∞ bütünlüştür katılım denetimi ve değişken hız kısıtı – katılım denetimi ile değişken hız yönetiminin tek bir algoritma bünyesinde uygulanması.

Böylece, araç takip modeli – penetrasyon seviyesi – denetim stratejisi üçlüsünden oluşan deney tasarımı altında sistematik karşılaştırmalar yapılabilmektedir.

Tüm model-senaryo kombinasyonları için, insan sürücüleri temsil eden araç takip modelinin parametreleri, denetimsiz ve %0 CACC penetrasyonuna sahip temel durum kullanılarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sürecinde, simülasyon çıktıları ile hedef veri seti arasındaki uyumun değerlendirilmesinde GEH istatistiği [39] ve Theil Katsayısı [40] esas alınmıştır.

Bu çerçevede elde edilen deney tasarımı, insan sürücü davranışının modelleme biçiminin, CACC penetrasyon oranının ve trafik denetim stratejisinin birbirleriyle olan etkileşimlerini ayrıntılı olarak ortaya koyma olanağı sağlamaktadır. Böylece, farklı araç takip model yapılarının yalnızca tekil temsil başarımları değil, aynı zamanda karma trafik koşullarındaki sistem dinamiklerine etkileri de bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilebilmektedir.

3.3 Çerçevenin Sınılandığı Otoyol Trafik Ağ Parçası, Kalibrasyon Sonuçları ve Benzetim Senaryoları

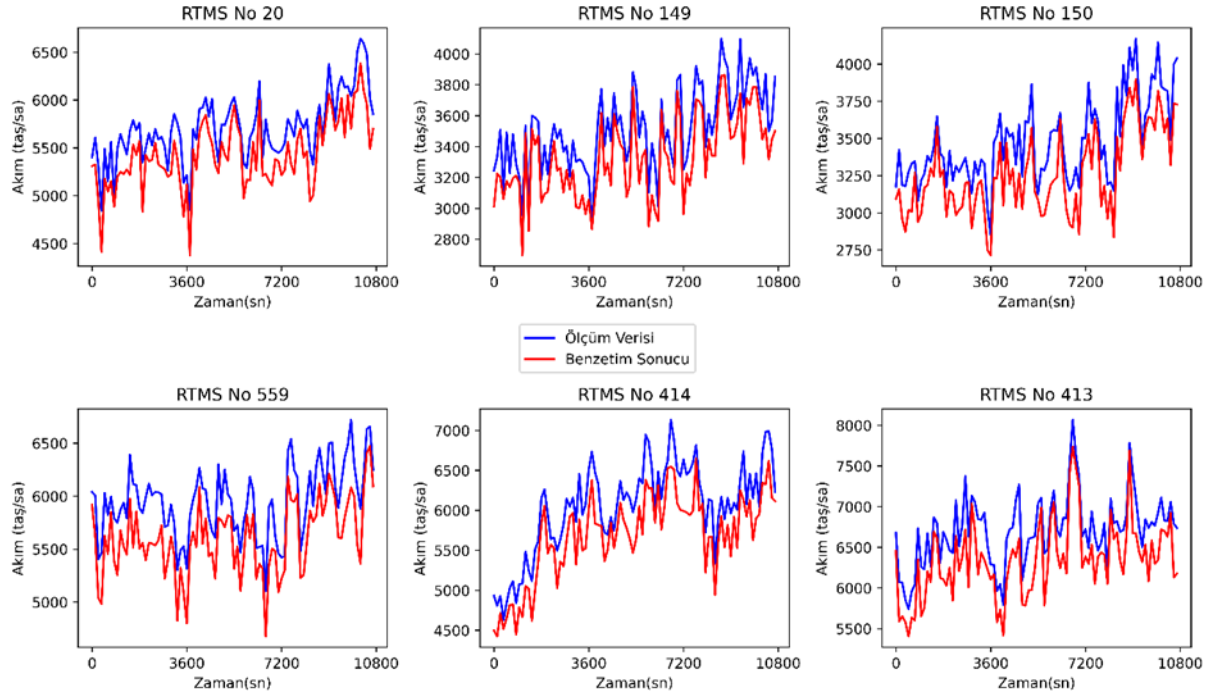
Çalışma kapsamında önerilen çerçeve, benzetim tabanlı bir vaka analizi üzerinden sınanmıştır. Vaka analizi, E80 Otoyolu'nun Edirne istikametinde, Seyrantepe ve Metris kavşakları arasında yer alan 11 km'lik kesim özelinde gerçekleştirilmiştir. Bu alan, SUMO ince boyutlu benzetim yazılımı kullanılarak gerçekçi biçimde modellenmiş ve çalışma kapsamında temin edilen trafik akım ölçümleri aracılığıyla, benzetime girdi teşkil edecek veriler oluşturulmuştur. İlgili çalışma alanına ait uydu görüntüsü Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu alanın temel özelliği, yüksek hacimli bir trafik akışına sahip olmasıdır. Geometrik açıdan ise yol boyunca değişken şerit sayısı, katılım ve ayrılımlar arasında homojen olmayan ara mesafeler öne çıkmaktadır. İncelenen ağ parçasında bir ayrılma ve dört katılım rampası bulunmaktadır. Şerit genişlikleri 3,5 metre olup, yolun en geniş kesimi sekiz şeritli, en dar kesimi ise üç şeritli ana akım platformundan oluşmaktadır.



Şekil 1. E-80 Otoyolunun, Seyrantepe-Metris Kavşakları arasındaki 11 km'lik kesime dair uydu görüntüsü.

Ağ üzerinde bulunan uzaktan mikrodalga algılayıcılar (Remote Traffic Microwave Sensors – RTMS) aracılığıyla yerel idareden temin edilen veri setleri sayesinde, trafik benzetim modeline girdi teşkil eden büyüklükler elde edilmiş ve GEH istatistiği esas alınarak kalibrasyon yapılmıştır. Kalibrasyon sonucunda, benzetimden elde edilen trafik akımları ile ölçülen trafik akımlarının karşılaştırılması Şekil 2’de sunulmaktadır. [39]’a göre, GEH istatistiği değeri toplam tüm ölçüm aralıklarında (örn. 120 saniye) hesaplanmakta ve benzetim süresince elde edilen tüm değerlerin en az %85’inde 5’in altında olması beklenmektedir. Ayrıca, kümülatif akım değerleri (her bir sensör konumu için) bazında da GEH değerlerinin 5’in altında kalması gerekmektedir.

Altı farklı araç takip modeli kullanıldığından, her model için ayrı ayrı görsel sunmak yerine kalibrasyon sürecine ait özet sonuçlar Tablo 1’de derlenmiştir.



Şekil 2. Ölçülen ile benzetilen akımların Gipps araç takip modeli özelinde karşılaştırılması.

Tablo 1. Kalibrasyon sonuçları.

Araç Takip Modeline Göre Derlenen Model İsimleri	GEH İstatistiği	Theil Katsayıları		
		U_m	U_s	U_c
<i>GM</i>	87.66%	0,018	0,019	0,932
<i>GHR</i>	87.78%	0,019	0,017	0,902
<i>Gipps</i>	89.68%	0,014	0,015	0,981
<i>Krauss</i>	93.97%	0,014	0,013	0,977
<i>Wiedemann</i>	87.77%	0,018	0,016	0,931
<i>IDM</i>	92.11%	0,016	0,015	0,968

Çalışma kapsamında geliştirilen benzetim senaryoları, farklı araç takip modelleri, CACC araç penetrasyon seviyeleri ve trafik akım denetim stratejilerinin etkileşimlerini sistematik biçimde inceleyecek şekilde tasarlanmıştır. Yedi farklı araç takip modeli, beş farklı CACC penetrasyon seviyesi (%0, %25, %50, %75, %100) ve üç farklı denetim yaklaşımı (denetimsiz, ALINEA katılım denetimi, H_∞ katılım denetimi + değişken hız kısıtı)

kombinasyonları kullanılarak kapsamlı bir senaryo kümesi oluşturulmuştur. Böylece her kombinasyon, karma trafik koşullarında performans karşılaştırmasına olanak verecek biçimde simülasyon ortamında temsil edilmiştir.

Her senaryoda, insan sürücülü araçlar ilgili senaryoda tanımlanan araç takip modeli ile, CACC araçlar ise Milanes ve Shladover tarafından önerilen ACC/CACC modeli ile temsil edilmiştir. CACC araçları, penetrasyon oranına bağlı olarak toplam araç filosu içinde oransal olarak yer almakta; kalan araçlar ise senaryoda belirlenen insan sürücülü model ile çalışmaktadır. Denetim stratejileri, araç takip modeli ve penetrasyon seviyesinden bağımsız olarak uygulanmış; bu sayede değişkenler arası karşılaştırma imkânı korunmuştur.

Tüm benzetim çalışmaları 10800 saniye (3 saat) boyunca yürütülmüş ve zamansal çözünürlük 0,1 saniye olarak belirlenmiştir. Bu yüksek çözünürlük, hız, ivme ve takip mesafesi gibi ince ölçekli değişimlerin hassas biçimde yakalanmasına olanak sağlamıştır. Böylece hem kısa süreli etkileşimler hem de uzun dönemli trafik akım eğilimleri aynı senaryo içinde güvenilir biçimde analiz edilebilmiştir. Benzetimler, rastgelelik kaynaklı hataları azaltmak amacıyla üç kez tekrarlanmış ve sonuçlar bu tekrarların ortalaması üzerinden raporlanmıştır. Toplamda 315 benzetim oluşturulmuş ve başarımlı ölçütlerine ilişkin sonuçlar derlenmiştir.

4. Bulgular ve Sonuçlar

Elde edilen analizler, CACC penetrasyon oranındaki artışın hem sistemden çıkan taşıt sayısını (Şekil 3) hem de toplam seyahat süresini (Şekil 4) belirgin ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Ancak bu etkinin deseni ve büyüklüğü, kullanılan araç takip modelinin yapısal özelliklerine ve bu modelin insan sürücü–CACC araç etkileşimini temsil etme başarısına bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak tüm modellerde, denetimsiz senaryoya kıyasla ALİNEA ve özellikle RM+VSL kontrol stratejileri daha yüksek sistemden çıkan taşıt sayısı ve daha düşük toplam seyahat süresi sağlamıştır. Bununla birlikte, kontrol stratejilerinin sağladığı kazanımların büyüklüğü modelden modele anlamlı ölçüde farklılık göstermiştir.

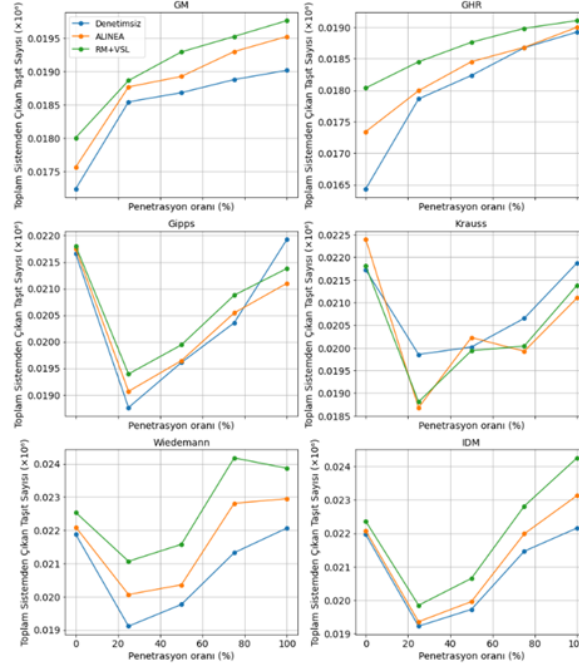
GM ve GHR modelleri, penetrasyon seviyesindeki artışa karşı hem sistemden çıkan taşıt sayısında istikrarlı bir yükseliş hem de toplam seyahat süresinde kademeli bir azalma sergilemiştir. Ancak bu modellerin eğrileri, literatürde sıklıkla raporlanan ve orta penetrasyon seviyelerinde (%40–%60 aralığı) görülebilen kapasite düşüşlerini yansıtmamıştır. Bu durum, GM ve GHR'nin insan sürücüler ile CACC araçlarının karma geçiş dinamiklerini ve özellikle adaptif hız–mesafe değişimlerini gerçekçi biçimde modelleme kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Buna karşılık, Gipps ve Krauss modellerinde düşük ve orta penetrasyon seviyelerinde sistemden çıkan taşıt sayısında belirgin dalgalanmalar ve toplam seyahat süresinde geçici artışlar gözlenmiştir. Bu davranış, literatürde bildirilen kapasite azalması fenomeni ile uyumludur ve bu modellerin insan sürücü–CACC etkileşimlerindeki hassas geçiş bölgelerini daha doğru yansıtabildiğini göstermektedir. Ayrıca bu iki modelin benzerliği tesadüf değildir; her ikisi de çarpışmadan kaçınma çerçevesi içerisinde geliştirilmiş olup, sürücünün güvenli takip mesafesi, maksimum hız ve frenleme kapasitesine dayalı karar mekanizmalarını içerir. Bu ortak çerçeve, belirli penetrasyon seviyelerinde görülen performans dalgalanmalarını açıklayan temel faktörlerden biridir. Bununla birlikte, Gipps modeli bazı penetrasyon seviyelerinde Krauss'a göre daha düşük sistemden çıkan taşıt sayısı üretirken, toplam seyahat süresi açısından benzer iyileşme eğilimleri sergilemiştir. Bu durum, aynı çerçevede yer alan modellerin bile parametre duyarlılığı ve stokastik bileşenler nedeniyle farklı mertebelerde sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.

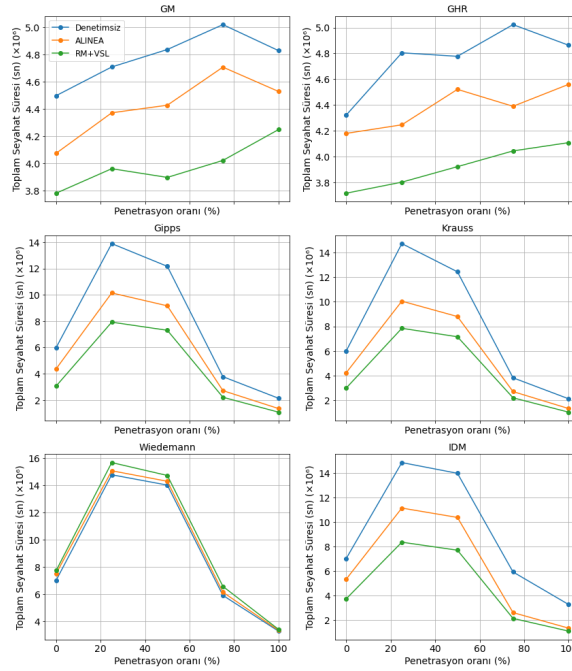
Wiedemann ve IDM modelleri ise genel olarak yüksek sistemden çıkan taşıt sayısı seviyelerini korumuş ve özellikle yüksek penetrasyon oranlarında toplam seyahat süresini keskin biçimde azaltmıştır. Ancak her iki model de düşük ve orta penetrasyon seviyelerinde kapasite düşüşlerini sınırlı ölçüde yansıtmış, dolayısıyla karma trafik koşullarındaki insan sürücü–CACC etkileşimlerini temsil etme açısından eksik kalmıştır. Yapısal olarak Wiedemann modeli, psikofizik temelli sürücü davranışını referans alırken; IDM diferansiyel denklemler ile sürekli hız–mesafe ilişkilerini modellemektedir. Bu yapısal farklılıklar, kontrol stratejilerine verilen tepkinin mertebesinde ve penetrasyon seviyeleri arasındaki geçişlerde gözlenen pürüzsüz eğrilerde kendini göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma her araç takip modelinin insan sürücü–CACC etkileşimini modelleme başarısının farklı olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Bazı modeller (örneğin Gipps ve Krauss) geçiş bölgelerindeki kritik davranış değişimlerini dinamik desenleriyle doğru yansıtırken; bazıları (örneğin GM ve GHR) bu etkileşimleri basitleştirilmiş biçimde temsil etmekte ve literatürde raporlanan kapasite düşüşlerini yakalayamamaktadır. Ayrıca, aynı çerçeveye ait modeller bile farklı mertebelerde çıktılar üretebilmekte, bu da model seçiminde yalnızca eğilimlerin değil, çıktıların nicel değerlerinin de kritik olduğunu göstermektedir.

Bu bulgular, karma trafik koşullarında CACC etkilerinin incelenmesinde araç takip modeli seçiminin, sonuçların güvenilirliği üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle model çerçevesinin (örneğin çarpışmadan kaçınma, psikofizik, diferansiyel formülasyon) insan sürücü–CACC etkileşimlerini

yansıtma biçimi hem sistemden çıkan taşıt sayısı hem de toplam seyahat süresi çıktılarından desenini ve mertebesini etkilemektedir. Gelecekte yapılacak çalışmaların, bu çerçevede farklılıklarını dikkate alan model seçim stratejilerini benimsemesi ve parametre duyarlılık analizleri ile modellerin karma trafik dinamiklerini temsil etme başarısını doğrulaması hem akademik hem de uygulamalı trafik yönetimi açısından kritik önem taşımaktadır.



Şekil 3. Sistemden çıkan taşıt sayılarının her bir araç takip modeli, artan penetrasyon oranı ve denetim durumuna göre değişimi.



Şekil 4. Toplam seyahat süresinin her bir araç takip modeli, artan penetrasyon oranı ve denetim durumuna göre değişimi.

Kaynaklar

- [1] Van Arem B, Van Driel CJG, Visser R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2006; 7(4): 429-436.
- [2] Yu M, Long J. An eco-driving strategy for partially connected automated vehicles at a signalized intersection. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022; 23(9): 15780-15793.
- [3] Liu H, Zhuang W, Yin G, Li Z, Cao D. Safety-critical and flexible cooperative on-ramp merging control of connected and automated vehicles in mixed traffic. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2023; 24(3): 2920-2934.
- [4] Wang J, Zheng Y, Chen C, Xu Q, Li K. Leading cruise control in mixed traffic flow: System modeling, controllability, and string stability. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022; 23(8): 12861-12876.
- [5] SAE. Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems. SAE Standard J3016-202104, 2021.
- [6] Massera Filho C, Terra MH, Wolf DF. Safe optimization of highway traffic with robust model predictive control-based cooperative adaptive cruise control. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2017; 18(11): 3193-3203.
- [7] Chandler RE, Herman R, Montroll EW. Traffic dynamics: Studies in car following. *Oper Res* 1958; 6(2): 165-184.
- [8] Zhang D, Chen X, Wang J, Wang Y, Sun J. A comprehensive comparison study of four classical car-following models based on the large-scale naturalistic driving experiment. *Simul Model Pract Theory* 2021; 113: 102383.
- [9] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Phys Rev E* 2000; 62(2): 1805-1824.
- [10] Wiedemann R, Reiter U. Microscopic traffic simulation, the simulation system—mission, background and actual state. CEC Project ICARUS, Project No V1052, Final Report, 1992.
- [11] Hoogendoorn S, Hoogendoorn RG, Daamen W. Wiedemann revisited. *Transp Res Rec* 2011; 2260(1): 152-162.
- [12] Sun Z, Yao X, Qin Z, Zhang P, Yang Z. Modeling car-following heterogeneities by considering leader-follower compositions and driving style differences. *Transp Res Rec* 2021; 2675(11): 851-864.
- [13] Goncu S, Erdagi IG, Silgu MA, Celikoglu HB. Analysis on effects of driving behavior on freeway traffic flow: A comparative evaluation of two driver profiles using two car-following models. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*; 2022 Jun; Aachen, Germany. New York, NY, USA: IEEE. pp. 688-693.
- [14] Ro JW, Roop PS, Malik A, Ranjitkar P. A formal approach for modeling and simulation of human car-following behavior. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2018; 19(2): 639-648.
- [15] Zhou A, Peeta S, Wang J. Cooperative control of a platoon of connected autonomous vehicles and unconnected human-driven vehicles. *Comput Civ Infrastruct Eng* 2023; 38(18): 2513-2536.
- [16] Fu R, Li Z, Sun Q, Wang C. Human-like car-following model for autonomous vehicles considering the cut-in behavior of other vehicles in mixed traffic. *Accid Anal Prev* 2019; 132: 105260.
- [17] Zhou J, Wan J, Zhu F. Transfer learning based long short-term memory car-following model for adaptive cruise control. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022; 23(11): 21345-21359.
- [18] Wang Z, Huang H, Tang J, Meng X, Hu L. Velocity control in car-following behavior with autonomous vehicles using reinforcement learning. *Accid Anal Prev* 2022; 174: 106729.
- [19] Li Y, et al. A car-following model for connected and automated vehicles with heterogeneous time delays under fixed and switching communication topologies. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022; 23(9): 14846-14858.
- [20] Shi J, Li K, Chen C, Kong W, Luo Y. Cooperative merging strategy in mixed traffic based on optimal final-state phase diagram with flexible highway merging points. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2023; 24(10): 11185-11197.
- [21] Luo J, et al. Real-time cooperative vehicle coordination at unsignalized road intersections. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2023; 24(5): 5390-5405.
- [22] Xu H, Cassandras CG, Li L, Zhang Y. Comparison of cooperative driving strategies for CAVs at signal-free intersections. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022; 23(7): 7614-7627.
- [23] Bai Z, Hao P, ShangGuan W, Cai B, Barth MJ. Hybrid reinforcement learning-based eco-driving strategy for connected and automated vehicles at signalized intersections. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022; 23(9): 15850-15863.
- [24] Goulet N, Ayalew B. Distributed maneuver planning with connected and automated vehicles for boosting traffic efficiency. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022; 23(8): 10887-10901.
- [25] Ma C, Yu C, Zhang C, Yang X. Signal timing at an isolated intersection under mixed traffic environment with self-organizing connected and automated vehicles. *Comput Civ Infrastruct Eng* 2023; 38(14): 1955-1972.
- [26] Wang Q, et al. Adaptive leading cruise control in mixed traffic considering human behavioral diversity. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2024; 25(6): 5059-5070.
- [27] Chong L, Abbas MM, Medina A. Simulation of driver behavior with agent-based back-propagation neural network. *Transp Res Rec* 2011; 2249(1): 44-51.
- [28] Silgu MA, Erdagi IG, Goksu G, Celikoglu HB. H_{∞} state feedback controller for ODE model of traffic flow. *IFAC-PapersOnLine* 2021; 54(2): 19-24.
- [29] Goksu G, Silgu MA, Erdagi IG, Celikoglu HB. Integral input-to-state stability of traffic flow with variable speed limit. *IFAC-PapersOnLine* 2021; 54(2): 31-36.
- [30] Silgu MA, Erdagi IG, Goksu G, Celikoglu HB. Combined control of freeway traffic involving cooperative adaptive cruise controlled and human driven vehicles using feedback control through SUMO. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022; 23(8): 11011-11025.

- [31] Dutta RG, Hu Y, Yu F, Zhang T, Jin Y. Design and analysis of secure distributed estimator for vehicular platooning in adversarial environment. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022; 23(4): 3418-3429.
- [32] Siri S, Pasquale C, Sacone S, Ferrara A. Freeway traffic control: A survey. *Automatica* 2021; 130: 109655.
- [33] Ferrara A, Sacone S, Siri S. Freeway traffic modelling and control. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.
- [34] Gipps PG. A behavioural car-following model for computer simulation. *Transp Res Part B Methodol* 1981; 15(2): 105-111.
- [35] Reuschel A. Fahrzeugbewegungen in der Kolonne. *Osterr Ing Arch* 1950; 4: 193-215.
- [36] Pipes LA. An operational analysis of traffic dynamics. *J Appl Phys* 1953; 24(3): 274-281.
- [37] Krauss S, Wagner P, Gawron C. Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Phys Rev E* 1997; 55(5): 5597-5602.
- [38] Milanés V, Shladover SE. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2014; 48: 285-300.
- [39] Barceló J, editor. *Fundamentals of traffic simulation*. New York, NY, USA: Springer, 2010.
- [40] Van Woensel T, Vandaele N. Empirical validation of a queueing approach to uninterrupted traffic flows. *4OR* 2006; 4(1): 59-72.