



Farklı Akım/Kapasite Oranlarının Trafik Simülasyon Kalibrasyon Performansına Etkisi

The Impact of Different Volume/Capacity Ratios on Traffic Simulation Calibration Performance

Gülnur Kandemir^{1*}, Erdem Doğan²

¹Türk Telekom, İnşaat Direktörlüğü, Ankara, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71451 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 19/03/2024

Kabul / Accepted: 14/05/2024

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2024

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2024

Öz

Günümüzde, çeşitli trafik senaryolarını değerlendirmek ve farklı operasyonel durumların performansını tahmin etmek için önemli sayıda mikro-simülasyon modeli geliştirilmiştir, ancak bu modellerin, trafik koşullarını doğru bir şekilde yansıtabilmesi için model parametrelerinin kalibre edilmesi gereklidir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen model parametrelerinin, sistemin performansına olan etkisi, trafik simülasyon modellerinin güvenilirliği ve kullanılabilirliği açısından önemlidir ve detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, mikroskobik trafik simülasyonunda farklı akım/kapasite (v/c) oranlarının kalibrasyon performansı üzerindeki etkisini analiz ederek, model parametrelerinin optimum kalibrasyonunun belirlenmesine yönelik bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntem kapsamında, SUMO'nun araç takip model parametreleri için Latin Hiper Küp ile kombinasyonları oluşturulmuştur. Yüksek zaman çözünürlüğüne sahip detektörlerle donatılmış tek, çift ve üç şeritli yol ağları için simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Üç farklı yol ağının her bir şeridi farklı v/c oranları için kalibre edilmiştir. Sonuç olarak, kalibrasyon için en uygun v/c oranının belirlenmesinin ve bu v/c oranında mikro-simülasyon model kalibrasyonunun yapılmasının, modelin etkinliğine ve güvenilirliğine olumlu yönde katkı sağladığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Trafik, simülasyon, kalibrasyon, akım/kapasite oranı”

Abstract

Today, a significant number of microscopic simulation models have been developed to evaluate various traffic scenarios and predict the performance of different operational conditions. However, for these models to accurately reflect traffic conditions, model parameters need to be calibrated. The impact of the model parameters obtained from calibration on system performance is crucial for the reliability and usability of traffic simulation models and requires detailed analysis. This study proposes a method to determine the optimum calibration of model parameters by analyzing the effect of different volume/capacity (v/c) ratios on calibration performance in microscopic traffic simulation. Within the scope of the proposed method, combinations of Latin Hypercube are generated for the vehicle tracking model parameters of SUMO. Simulation studies are conducted for single, double, and triple-lane road networks equipped with detectors with high temporal resolution. Each lane of the three different road networks is calibrated for different v/c ratios. As a result, it is observed that determining the most suitable v/c ratio for calibration and performing microsimulation model calibration at this v/c ratio positively contributes to the effectiveness and reliability of the model.

Key Words

“Traffic, simulation, calibration, volume/capacity ratio”

1. Giriş

Trafik simülasyon modelleri, trafik akışını modelleyerek trafik yönetim planlarının değerlendirilmesi için uygulanabilir ve uygun maliyetli bir yaklaşımdır. Mikroskobik trafik simülasyon modelleri, bu yaklaşımlardan biridir ve belirli sürücü davranışının simülasyonunda mezoskopik ve makroskopik simülasyon modellerinden daha iyi performans gösterir (TRB, 2000). Mikroskobik trafik simülasyon modelleri, farklı trafik kontrol özelliklerini ve trafik kontrol süreçlerini temsil etmek amacıyla çeşitli varsayılan parametrelere sahiptir. Herhangi bir mikroskobik simülasyon aracının temel bileşeni sürücü davranışını içerir, ki bu da sürücülerin rota seçimi, araç takibi ve şerit seçimi konularında nasıl karar verdiklerini açıklar. Tüm sürücü davranış modelleri, parametreler ve bunların ilgili varsayılan değerlerinden oluşur; böylece kullanıcılar, bu sürüş davranışı parametreleri için belirli bir aralıktaki değerleri sahadaki trafik koşullarına göre girebilirler. Ancak, trafik koşullarının bir yerden bir yere değiştiği göz önünde bulundurulduğunda, simülasyon geliştiricilerinin varsayılan parametre değerleri, belirli bir alanda sahadaki trafik özellikleri ve trafik koşullarıyla nadiren eşleşir. Bu bağlamda, bu tür değişkenlere ilişkin varsayılan değerlerin, saha sürüş koşullarının gerçekçi bir şekilde kopyalanması için ayarlanması esastır (Barceló, 2010). Dolayısıyla, simülasyon modelinin tercih edilen arka planında trafik analizi için kullanılmasını sağlayan parametre değerlerinin kalibre edilmesi gereklidir.

Kalibrasyon, belirlenen bir trafik değişkeni için yerel saha ölçümleri ile simülasyon çıktıları arasındaki farkı kabul edilebilir bir seviyeye indirmek için model parametrelerinin ayarlanması prosedürüdür. Trafik mühendisliği alanında, mikroskobik simülasyonlar için kalibrasyon süreci, simülasyon sisteminin yüksek belirsizliğini ve çok sayıda parametreyi içeren mikroskobik trafik simülasyonunda oldukça karmaşık ve zordur. Geleneksel parametre kalibrasyon işlemi birkaç simülasyon çalışması gerektirir ve karmaşık hesaplamalar ve bir karayolu ağı ölçeği göz önüne alındığında uzun süreler harcanabilir. Trafik mikro-simülasyon modellerinin parametre kalibrasyonu genellikle simülasyon tabanlı optimizasyon (STO) problemi olarak ele alınır. Burada, her bir amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi için bir simülasyon gereklidir ve bu da çözülmesi gereken bir optimizasyon sürecini ortaya çıkarır. Bu süreçte, amaç fonksiyonunun minimize edilebilmesi için optimum parametre seti belirlenir ve elde edilir. Uygun optimizasyon yönteminin seçilmesiyle yüksek hesaplama yükü ve süresi hafifletilebilir. Simülasyon tabanlı optimizasyon teknikleri, trafik modellerindeki parametrelerin kalibrasyonunu ele almak için genel amaçlı algoritmalar içermektedir. STO algoritmaları, simülasyon çıktılarına gözlemlenen verilere en uygun parametreleri belirlemek için yinelemeli prosedürlere dayanmaktadır (Ciuffo vd., 2014). Kalibrasyon neticesinde tahmin edilen model parametrelerinin gerçek trafik akış koşullarını ve araç etkileşimlerini doğru bir şekilde yansıtması simülasyon modelinin güvenilirliği ve tahmin yeteneği açısından büyük öneme sahiptir. Dolayısıyla, kalibrasyon sonucunda elde edilen model parametrelerinin sistemin kalibrasyon performansına etkisi, trafik simülasyon modellerinin, güvenilirliği, doğruluğu ve kullanılabilirliği açısından analiz edilmesi gerekmektedir.

Trafik simülasyonlarında, akım/kapasite (v/c) oranı bir yol veya bir şeridin belirli bir zaman diliminde ne kadar etkin bir şekilde kullanıldığını değerlendirmek için kullanılan bir ölçümdür. Başka bir deyişle, v/c oranı trafik mühendisleri ve planlamacılar için yolların veya şeritlerin performansını değerlendirmede önemli bir araçtır. Bu bağlamda, kalibrasyon için doğru v/c oranının belirlenmesi ve bu v/c oranında mikro-simülasyon model kalibrasyonunun yapılması, modellerin etkinliğini ve güvenilirliğini olumlu yönde etkileme potansiyelini ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışmada, trafik mikro-simülasyon modelinin araç takip model parametrelerini tahmin etmek için verimli bir kalibrasyon metodu geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bununla beraber, kalibrasyon için en uygun v/c oranının tespit edilmesi amacıyla farklı v/c oranlarının kalibrasyon performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda, öncelikle SUMO (Simulation of Urban Mobility) programında yol ağı modellenmiştir. Ardından SUMO Krauss araç takip modeli parametreleri, parametre kümesi (P) olarak belirlenmiştir. Deney setini oluşturmak amacıyla, Latin Hiper Küp (LHK) yöntemi kullanılarak parametrelerin tanımlanan sınır koşullarına göre parametre setleri oluşturulmuştur. Parametre setlerini girdi değerleri ile SUMO simülasyon çalıştırılması sonucunda trafik hız değerleri model çıktısı olarak elde edilmiştir. Simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemi kullanılarak, yol ağından elde edilen trafik hız ölçümleri ve simülasyon ortalama hız ölçümleri arasındaki farkı minimize edecek parametre değerleri araştırılmıştır. Girdi parametre değerleri ile optimum parametre değerleri arasındaki fark, hata kümesi olarak tespit edilmiştir. Bu süreç sonunda, farklı v/c oranlarının, sistemin kalibrasyon performansına etkileri analiz edilmiştir. Bu çalışmadaki önemli bir kısıt, kalibrasyon sonucunda tahmin edilen model parametrelerinin sistem performansı üzerine etkisinin analiz edilmesidir. v/c oranları kullanılarak tahmin edilen araç takip modeli parametrelerinin modelin kalibrasyon performansı üzerindeki etkilerinin araştırılmasına geçmiş çalışmaların çoğunda rastlanılmamıştır. Bu nedenle, v/c oranlarının kalibrasyon sürecine dahil edilmesi bu çalışmanın kalibrasyon konusundaki sürece katkı sağlama potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Bu makalenin devam eden bölümlerinde öncelikle geçmiş çalışmalar tartışılmıştır. Ardından önerilen yöntem bileşenleri olan LHK, SUMO, Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) ve diğer yöntem bileşenleri hakkında bilgi verilmiştir. Akabinde, simülasyon deneylerin yapıldığı yol kesimleri ve kullanılan trafik akış değerleri hakkında bilgiler sunulmuştur. Son olarak farklı akım/kapasite değerlerinin kalibrasyon performansına etkileri detaylı olarak tartışılmıştır.

2. Literatür Taraması

Trafik simülasyon modellerinde kalibrasyon sürecinin gelişimi, başlangıçta deneme yanılma yöntemlerine dayanmıştır; ancak bu yaklaşım zaman alıcıdır ve model çıktılarında tutarsızlıklara neden olmuştur. Sonraki yıllarda, trafik mikro-simülasyon modellerinin güvenilirliğini artırmak ve daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla prosedürler basit, zaman alıcı manuel kalibrasyondan, daha verimli otomatik süreçlere dönüşmüştür. Literatürde, mikroskobik simülasyon modellerinin kalibre edilmesi için birçok etkili yöntem önerilmiştir.

Hourdakis vd. (2003), manuel ve otomatik kalibrasyon tekniklerini karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma, otomatikleştirilmiş kalibrasyon yöntemlerinin zaman ve çaba açısından daha verimli olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, Park & Qi (2005) harekete geçirilmiş bir sinyalizasyon kavşak modeli için Genetik Algoritma kullanarak sürücü davranış parametrelerini seyahat süresi değerlerini kullanarak kalibre etmiştir. Diğer kalibrasyon girişimleri arasında, Eşzamanlı Pertürasyon Stokastik Yaklaşım (SPSA) algoritmaları (Lee & Ozbay, 2009) ve Ağırlıklı SPSA (W-SPSA) (Antonioni vd., 2015) gibi varyasyonlar da yaygın olarak kullanılmıştır. Trafik simülasyon modellerini kalibre etmeye yönelik diğer girişimler, Çoklu Başlatma Algoritmaları, Tabu Arama, Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritma yaklaşımını içermektedir. Paz vd. (2015), Genetik Algoritma ve Simüle Edilmiş Tavlama Algoritma kombinasyonunu içeren bir Memetik Algoritma önermiştir. Kalibrasyon sonuçları, kalibrasyondan sonra tüm parametrelerin makul sınırlar içinde olduğunu göstermiştir.

Kentsel trafik akışını doğru bir şekilde simüle etmek ve farklı trafik çözümlerinin etkilerini tahmin etmek için çeşitli araçlar ve metodolojiler kullanılmıştır. Örneğin, Bieker vd. (2015), İtalya'nın Bologna kentinde gerçek bir otoyol kesiminden trafik simülasyon senaryosu oluşturmak için VISSIM modelini kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, İtalya bölgesindeki trafiği tanımladığını göstermiştir. Chiappone vd. (2016) mikro-simülasyon trafik modeli kalibrasyon işlemi için Genetik Algoritma kullanarak kavşaklarda sürücü davranış parametrelerini hız-yoğunluk ilişkisini kullanarak kalibre etmiştir. Araştırma sonuçları, bu prosedürün hem kalibrasyon hem de doğrulama adımlarında iyi bir uyum sağladığını göstermiştir. Yu & (David) Fan (2017), Genetik Algoritma tekniğinin performansını Tabu Arama Buluşsal yöntemi ile birleştirerek test etmiş ve geliştirmiştir. Bu çalışma, Tabu Arama Buluşsal yönteminin mikro-simülasyon modeli parametrelerini kalibre etmek için Genetik Algoritma yönteminden daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir.

Amirjamshidi & Roorda (2019), mikroskobik trafik simülasyon modellerini kalibre etmek için çok kriterli bir amaç fonksiyonunu genetik algoritma kullanarak optimize etmişlerdir. Bu amaç fonksiyonu, hızları, trafik sayımlarını arasındaki farkları en aza indirmeyi hedeflemiştir. Kalibre edilmiş üç farklı model, simüle edilmiş sürüş döngüleri ve döngü parametreleri, tahmini parametreler ve emisyon faktörleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Bu parametreler daha sonra trafik mikro-simülasyon emisyonlarını hesaplamak için kullanılmıştır. Karimi & Alecsandru (2019), VISSIM'de gerçek bir otoyol kesimini simüle etmek için Çok Amaçlı Parçacık Sürüşü Optimizasyon yöntemi kullanarak parametreleri kalibre etmişlerdir. Simüle edilmiş ilerleme dağılımı ile sahada gözlemlenen ilerleme dağılımı arasındaki farkların yanı sıra farklı konumlarda gözlemlenen ve simüle edilen şerit değişikliği sayısı arasındaki farkları en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Çok Amaçlı Parçacık Sürüşü Optimizasyon, Parçacık Sürüşü Optimizasyon, Genetik Algoritma ve Balina Optimizasyon yöntemi gibi diğer optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmış ve daha doğru sonuçlar vermiştir.

Nassrullah & Yousif (2020), otoyol çalışma bölgeleri için çeşitli geçici trafik yönetimi stratejilerinin etkinliğini değerlendirmek amacıyla bir mikro-simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Model, araç takip, isteğe bağlı şerit değiştirme, zorunlu şerit değiştirme, boşluk kabulü ve dar şerit kuralları temel alınarak geliştirilmiş ve farklı konumlardan, trafik akış koşullarından, şerit sayılarından ve bölüm türlerinden elde edilen verileri kullanarak modeli kalibre etmişlerdir. Kalibre edilmiş model, simüle edilmiş trafik akışı gerçek saha verileriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Guo vd. (2021), mikrosimülasyon modellerinde çarpışma tahminlerinin doğruluğunu artırmak için, bir kalibrasyon yaklaşımı önermişlerdir. Gerçek trafik koşullarına uyacak şekilde bir VISSIM modelini Genetik Algoritma yöntemleri kullanarak kalibre etmişlerdir. Bu yaklaşım, Kanada'daki iki sinyalizasyon kavşağına uygulanmış ve simülasyondan güvenlik önlemlerinin tahmin edilmesinde etkili olmuştur.

Doğan (2022), Özellik Seçim Algoritmalarının kalibrasyon doğruluğu üzerindeki etkilerinin bir analizini yapmış ve uygun Özellik Seçim Algoritmasının belirlenmesi için bir yaklaşım önermiştir. Bu çalışmada, kalibre edilecek SUMO model parametre sayısını azaltmak için farklı Özellik Seçim Algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar LHK ile oluşturulmuş veri kümesiyle eğitilmiş ve parametre ağırlıkları rasyonel bir yaklaşımla tespit edilmiştir. Özellik Seçim Algoritması kullanımının kalibrasyon performansını önemli ölçüde iyileştirebileceği gözlemlenmiştir.

Chowdhury vd. (2022), mikro-simülasyon modeli kullanarak yol tasarımının, trafiğin ve sürücü davranışının birleştirme manevraları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, kalibre edilmiş modelin araç sınıflandırması, kritik mesafe ve boşluk kabulü parametrelerini doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir. Otković vd. (2023), yapay sinir ağlarını kullanarak kalibre edilmiş VISSIM mikro-simülasyon modelinin gerçek trafik özelliklerini yansıtan modelleme sonuçları sağlayabildiğini göstermiştir. Tablo 1, mikro-simülasyon trafik modellerinin kalibrasyonu ile ilgili literatüre kısa bir genel bakış sunmaktadır.

Tablo 1. Mikroskobik Trafik Modellerinin Kalibrasyonuna Yönelik Farklı Yaklaşımlara Genel Bakış

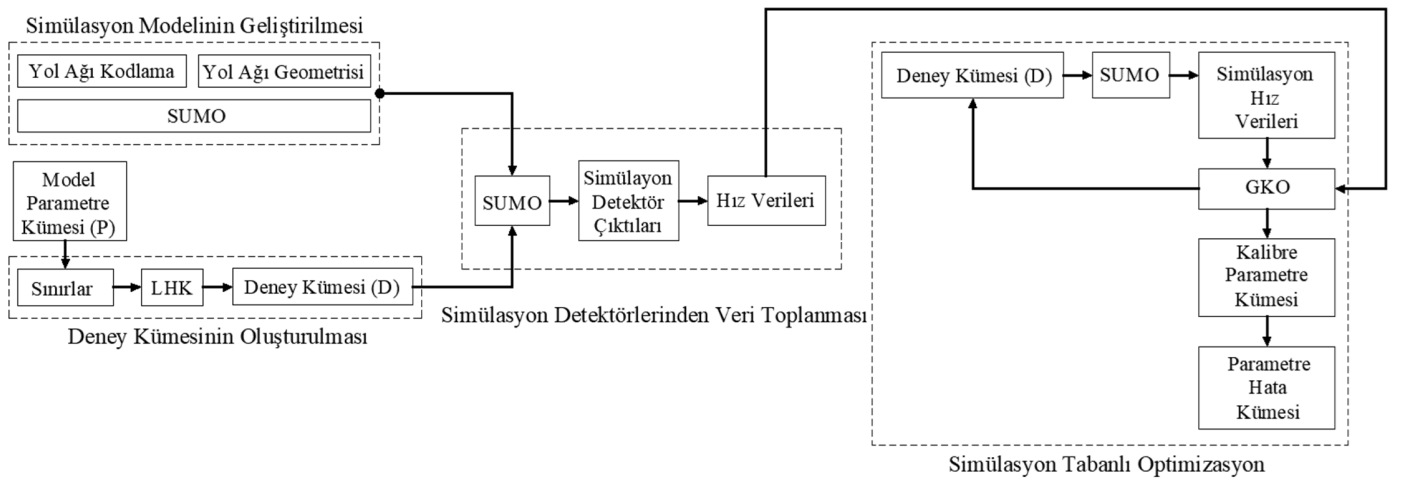
Yazar	Yazılım	Optimizasyon Prosedürü	Kalibrasyon Performans Ölçütü
Hourdakis vd. (2003)	AIMSUN	Yarı Newton Algoritması	Hacim
Park & Qi (2005)	VISSIM	Genetik Algoritma	Seyahat süresi
Lee & Ozbay, (2009)	PARAMICS	SPSA	Trafik akışı
Antoniou vd., (2015)	DYNAMIT	Ağırlıklı SPSA (W-SPSA)	Seyahat süresi
Paz vd. (2015)	CORSİM	Memetik Algoritma	Araç sayısı ve hız
Bieker vd. (2015)	VISSIM	Deneme Yanılma	Trafik akışı
Chiappone vd. (2016)	AIMSUN	Genetik Algoritma	Hız-yoğunluk ilişkileri
Yu & (David) Fan (2017)	VISSIM	Metasezgisel Algoritmalar	Trafik akışı ve hız
Amirjamshidi & Roorda (2019)	PARAMICS	Genetik Algoritma	Trafik sayımları ve hız
Karimi & Alecsandru (2019)	VISSIM	Çok Amaçlı Parçacık Sürüsü Optimizasyonu	İlerleme dağılımı
Nassrullah & Yousif (2020)	FORTRAN	İstatiksel Yöntemler (GEH)	Trafik akışı
Guo vd. (2021)	VISSIM	Genetik Algoritma	Trafik çatışmaları
Doğan (2022)	SUMO	GKO Algoritması	Trafik akışı
Chowdhury vd. (2022)	VISSIM	İstatiksel Yöntemler (GEH)	Hacim
Otković vd. (2023)	VISSIM	Yapay Sinir Ağları	Seyahat süresi

Model parametrelerini tahmin etmek için, literatürde Genetik Algoritma ve Eşzamanlı Pertürbasyon Stokastik yaklaşımı gibi metasezgisel yöntemler de dahil olmak üzere çeşitli arama teknikleri yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Bu çalışmaların büyük bir kısmı, simülasyon modeli çıktılarını hacim, hız, seyahat süresi gibi performans ölçütleriyle başarılı bir şekilde eşleştirmek için algoritmik ve yinelemeli prosedürlere odaklanmıştır. Bazı araştırmalar, farklı optimizasyon tekniklerinin kalibrasyon performansını karşılaştırmıştır. Ancak, geçmiş çalışmaların çoğunda, v/c oranlarının tahmin edilen model parametrelerinin gerçek trafik akış koşullarını ve araç etkileşimlerini yansıtmaya açısından modelin kalibrasyon performansı üzerindeki etkilerine yeterince değinilmemiştir. Bu nedenle, farklı v/c oranlarının kalibrasyon performansı üzerine etkilerinin literatürde daha fazla incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kalibrasyon performans ölçütü olarak hız değeri kullanılmıştır, bununla birlikte farklı v/c oranlarının modelin kalibrasyon performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir ve geçmiş kalibrasyon çalışmalarında bu alanda sık kullanılmayan SUMO trafik modeli kullanılmıştır.

3. Metodoloji

3.1. Genel Bakış

Mikroskobik trafik simülasyonu modelinin kalibrasyonu için önerilen metodoloji Şekil 1’de şematik olarak gösterildiği gibi genel olarak dört aşamayı içermektedir. (i) Trafik simülasyonu modeli geliştirme: Bu aşamada SUMO’da simülasyonu modeli geliştirilmiştir ve SUMO yol ağı yapılandırma dosyası xml formatında elde edilmiştir. (ii) Parametre deney kümesinin (D) oluşturulması: LHK kullanılarak kalibre edilecek parametrelere ait kombinasyon oluşturulmuştur. (iii) Simülasyon detektörlerinden trafik hız ölçümü verilerinin alınması: SUMO ve D kümesi kullanılarak oluşturulmuş trafik modeli simülasyonu Python platformu aracılığıyla başlatılmıştır. Simülasyon detektör çıktılarından hız değeri elde edilmiştir. (iv) Parametre deney kümesindeki (D) elemanların STO ile kalibre edilmesi: Bu aşamada, deney kümesindeki (D) model parametreleri kalibre edilmiştir. Python platformu aracılığıyla SUMO ve GKO birlikte çalışarak hız değerleri arasındaki farkı minimize edecek parametre değerlerini araştır. Program, Kalibre Parametre Kümesi (KPK) önerir. Devamında, KPK ve D kümesi arasındaki ortalama karesel hata (OKH) değeri hesaplanmıştır ve bu değer Parametre Hata Kümesi olarak önerilmiştir. Önerilen bu metodoloji, v/c oranı 0,1’den 1,2’ye kadar uygulanıp analiz edilmiştir.



Şekil.1 Önerilen Kalibrasyon Metodolojisinin Akış Diyagramı

3.2. SUMO Simülasyon Programı ile Modelin Geliştirilmesi

Bu çalışmada, SUMO (Lopez vd., 2018) mikroskobik trafik simülasyonu modelleme yazılımı kullanılmıştır. SUMO, kentsel trafik ağlarını modellemek için geliştirilmiş açık kaynak kodlu bir simülasyon programıdır. SUMO, ülke ve şehir ağlarının yanı sıra küçük trafik ağlarını da kolaylıkla modellenebilecek yazılımsal bir ortam sunmaktadır. Ayrıca, SUMO Matlab ve Python gibi programlarla esnek bir şekilde entegre edilebilen kullanışlı arayüzler sağlamaktadır. Araç takip modelleri arasında varsayılan olarak Krauss modelini içerir. Krauss araç takip modeli, araçların maksimum güvenliği sağlarken aynı zamanda mümkün olan en hızlı şekilde ilerlemesini sağlama ilkesine dayanmaktadır. SUMO, farklı dosya girdileri kullanılabilir, ancak temelde yol ağı dosyası, araç rota dosyası ve yapılandırma dosyası gibi üç dosyaya ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışma için ilk aşamada, SUMO simülasyonu programıyla yol ağı modeli oluşturulmuş ve yol ağı yapılandırma dosyası xml formatında elde edilmiştir.

3.3. Kalibrasyon Parametreleri İçin Deney Kümesinin Oluşturulması

Bir trafik simülasyonunda, kalibrasyon metodolojisini oluşturmadan önce gerekli parametreler belirlenir. Ancak, belirlenen parametrelerin kombinasyonları çok fazla olduğundan, tüm senaryoların değerlendirilmesi mümkün değildir. LHK tasarımı gibi deneysel bir yöntem, kombinasyon sayısını etkili bir şekilde azaltabilir. LHK, tüm tasarım alanını eşit olasılıklı bölgelere bölen ve onları rastgele örnekleyen bir dizi sağlar (McKay vd., 1979). Bu yöntem, parametre uzayını keşfetmek ve deneyi belirli bir sayıda kombinasyonla sınırlamak için kullanışlıdır. Her parametrenin aralığının örneklediği LHK, kalibrasyon sürecinin performansını artırabilir. Bu çalışmada, Python'daki Latin Hiper Küp Araç Kutusu kullanılarak simülasyonu modeli için önceden belirlenmiş sayıda senaryo oluşturulmuştur.

Deney kümesinin oluşturulma süreci, SUMO simülasyonu programının içerdiği parametreler arasından seçilen elemanların ve $P = \{p_i: i \leq np \wedge i \in \mathbb{N}\}$ olarak ifade edilen Model Parametre Kümesinin belirlenmesiyle başlamıştır. Daha sonra, p_i parametresinin değeri ap_i ile gösterilecek olursa her p_i parametresi için alt sınır $L = \{l_i: l_i \leq ap_i\}$ ve üst sınır $U = \{u_i: u_i \geq ap_i\}$ kümeleri tespit edilmiştir. Bu sınır değerleri, araç dinamikleri ile ilgili fizik kurallarına bağlı olarak belirlenebilir. Sürücü davranışlarıyla ilgili sınırların belirlenmesi ise daha karmaşık bir süreç olup, bazı saha gözlemleri veya modelin varsayılan sınırları kullanılabilir.

LHK yöntemi uygulandıktan sonra, deney kümesi $D = \{AP_k: a_{p(k)} \in AP_k, (k \leq nD), (K \in \mathbb{N})\}$ elde edilmiştir. Bu bağlamda nD , D deney kümesinin eleman sayısını, yani deney sayısını belirler ve işlem öncesinde kullanıcı tarafından belirlenir.

3.4. Simülasyon Detektörlerinden Trafik Hız Verilerinin Elde Edilmesi

Kalibre edilecek parametrelerin değerleri ve ilgili performans ölçümleri tarafından verilen çıktı veri kümesini oluşturmak için trafik simülasyon modelinin çalıştırılmıştır. Simüle edilmiş yol ağı boyunca detektörler simülasyon için saha verilerini toplamak için kullanılmıştır. Simülasyon, sürücü davranışının rastgeleliği için temel oluşturan ve ardından simülasyonu SUMO'da başlatan Python platformu aracılığıyla çalıştırılmıştır. Python programlama dilinde kullanılan bir kütüphane olan TraCI (Trafik Kontrol Arayüzü), bu çalışmada SUMO simülasyon ortamında simüle edilen çeşitli senaryolardan ortalama hız veya şeritte giden araç sayısı gibi trafik verilerini toplamak için kullanılmıştır. Akabinde, SUMO ve D kümesi kullanılarak oluşturulmuş trafik modeli, simülasyon detektör çıktılarıyla hız verilerini içeren bir veri seti oluşturmuştur. Bu veri kümesi, sonraki aşamada parametreleri kalibre etmek için simülasyona girdi olarak tanımlanmıştır.

3.5. Deney Kümesindeki Parametrelerin Simülasyon Tabanlı Optimizasyonla Kalibre Edilmesi

Kalibrasyon sürecinde ilerlemeden önce kalibrasyon hedefi olarak performans ölçütünün açıkça tanımlanması önemlidir. Bu çalışmada, trafik hız değeri performans ölçütü olarak seçilmiştir. Kalibrasyon işlemi, hata fonksiyonu olarak da adlandırılan amaç fonksiyonuna dayanır. Bu fonksiyon, bir ağdan alınan gerçek zamanlı veriler veya geçmiş veriler ile simüle edilmiş bir modelden elde edilen veriler arasındaki farkı temsil eder. Kalibrasyon aşamasının amacı, modelin parametrelerine farklı konfigürasyon değerleri uygulamak ve amaç fonksiyonu için en küçük değeri vereni çıkarmaktır. Amaç fonksiyonu, ölçülen hız değerlerini ve simülasyon hız değerleri arasındaki ortalama karesel hatayı en aza indirmeyi amaçlamıştır.

İncelenen yol ağı üstünde nd adet detektör bulunsun ve j detektörünün $t \leq nt$ periyodunda ölçtüğü simülasyon ve gerçek trafik hız değerleri, $V_{j(t)}$ sırasıyla ve $\hat{V}_{j(t)}$ olsun. Bu çalışmada trafik hız değerlerine bağlı kalibrasyon yapılmıştır. Bu durumda bu yol ağının t periyodu için hata değeri Denklem 1 ile hesaplanır.

$$h_{(t)} = \frac{1}{nd} \sum_{j=1}^{nd} (V_{j(t)} - \hat{V}_{j(t)})^2 \quad (1)$$

GKO algoritmaları, Numpy, Pandas, Sumolib gibi veri kitaplıklarıyla Python programlama dilinde uygulanır. GKO algoritması, verilen D ve h değerleriyle optimizasyon işlemini gerçekleştirir. Çözüm, belirlenen hata veya iterasyon değerine ulaşıldığında sonlanır ve elde edilen elemanları, KPK olarak kabul edilir. KPK ile D kümesi arasındaki ortalama karesel hata değeri hesaplanır.

GKO, doğada gri kurt sürülerinin avlanma stratejilerinden ilham alarak geliştirilen bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, gri kurtlardaki hiyerarşik yapıyı dört seviyede modellemektedir: alfa, beta, delta ve omega. Alfa kurt, hiyerarşinin en üstünde yer alırken, diğer seviyeler altında yer alır. GKO algoritması, bir problemi çözmeyi, avın pozisyonuna benzeter ve her hiyerarşinin amacı, çeşitli teknikler kullanarak avın pozisyonuna yaklaşmaktır (Mirjalili vd., 2014).

4. Uygulama ve Bulgular

Bu bölümde, uygulama adımları ve elde edilen sonuçların analizi sunulmaktadır. SUMO simülasyon ortamında tek, iki ve üç şeritli yol ağı modelleri oluşturulmuştur. Her bir model, farklı trafik koşullarını yansıtmak amacıyla tasarlanmıştır. Her yol ağı için kalibre edilen simülasyonda, v/c oranı 0.1'den 1.2'ye kadar uygulanıp sistemin performansı test edilmiştir. v/c oranı, trafik yoğunluğunu ve kapasiteyi ifade etmektedir. Her oran için simülasyon çalıştırılmış ve elde edilen veriler kaydedilmiştir. Çalışma boyunca, tek, iki ve üç şeritli yol ağı simülasyon modelleri için uygulanan adımlarda ortak aşamalar bulunmaktadır. Bu ortak aşamalar, model parametre sınırlarının belirlenmesi ve algoritma başlangıç ayarlarının yapılmasıdır.

4.1. Model Parametresi ve Sınırlar

Bu çalışmada, simülasyonlarda SUMO'nun varsayılan araç takip modeli olan Krauss modeli kullanılmıştır. Çalışmanın merkezinde, Krauss modelinin dört temel parametresi (P elemanları) belirlenmiştir. Tablo 2'de açıklamaları verilen Sigma, Tau, Accel ve Decel olarak adlandırılan bu parametreler, trafik akışının modellenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu parametreler, araçların hızlanma ve yavaşlama süreçlerini, takip mesafelerini ve araç arası ilişkileri belirlemede önemli bir etkiye sahiptir.

Tablo 2. Model Parametre Kümesine Ait Bilgiler

Parametre	l	u	Açıklama
<i>Accel</i>	0,5	2,6	Taşıtların hızlanma ivmesini ifade eden değerdir.
<i>Decel</i>	1	4,5	Taşıtların yavaşlama ivmesini ifade eden değerdir.
<i>Sigma</i>	0	1	Sürücü kusuru değeridir. 0, mükemmel sürüşü ifade eder.
<i>Tau</i>	0,5	3	Sürücünün takip ettiği araç ile arasındaki olmasını istediği sn. cinsinden minimum mesafedir.

Bu çalışma kapsamında, belirli parametrelerin tanımlanması ve kullanılmasıyla ilgili olarak, Tablo 2'de belirtilen parametreler, SUMO programında orijinal isimleri İngilizce olarak korunarak sunulmuştur. Bu yaklaşım, benzer literatür çalışmalarıyla uyumlu olup, karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için önemlidir. Her bir parametre için alt ve üst sınır değerleri (l, u), fizik kuralları ve makul sınır değerleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bu değerlerin seçimi, modelin gerçek trafik akışına mümkün olduğunca uygun olmasını sağlamak amacıyla dikkatle yapılmıştır. P kümesi dışındaki parametreler için, SUMO'nun varsayılan değerleri kullanılmıştır. Bu parametreler, araştırmanın odak noktası olmayan değişkenlerdir ve varsayılan değerlerin kullanılması, modelin doğruluğunu etkilemeyecektir.

Araştırmanın bir parçası olarak, Python'daki LHK aracı, belirlenen parametre kümesini ve aralıklarını kullanarak kombinasyonlar oluşturmak için kullanılmıştır. LHK'den elde edilen parametre değerleri, modelin her bir kombinasyonu ayrı ayrı beslenmiş ve sonuçlar detaylı bir şekilde kaydedilmiştir. Bu kombinasyonlar, belirlenen parametrelerin çeşitli değerlerinin birleştirilmesiyle elde edilmiş olup, simülasyon için geniş bir veri yelpazesini kapsamaktadır. Bu veri, simülasyon sonuçlarının kapsamlı bir şekilde analiz edilmesini sağlamak için kullanılmış ve trafik akışının doğru bir şekilde modellenmesi için gerekli bilgileri sunmuştur. LHK ile oluşturulmuş parametre deney kümesine ait değerler Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. LHK İle Oluşturulmuş Parametre Deney Kümesi

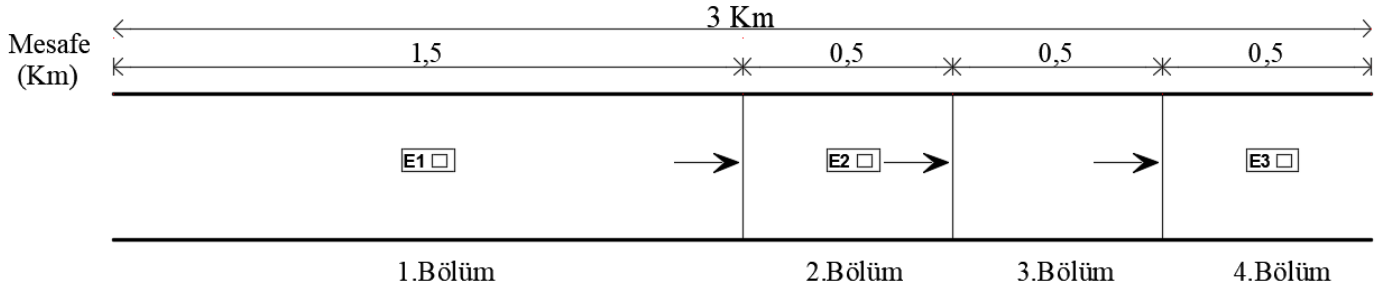
Accel	Decel	Sigma	Tau
1,52	1,28	0,68	2,62
1,72	2,91	0,75	0,72
0,92	3,69	0,83	1,88
2,26	2,07	0,93	1,57
2,08	3,85	0,52	2,79
1,24	4,21	0,12	1,40
2,50	3,40	0,28	1,21
1,78	1,95	0,06	2,05
0,60	2,70	0,39	2,34
0,83	1,59	0,46	0,76

4.2. Algoritma Başlangıç Ayarları

Bu çalışma çerçevesinde GKO algoritması kullanılmıştır. GKO algoritması, çeşitli parametreler kullanarak seçim işlemlerini gerçekleştirir. Literatürde, bu parametrelerin seçimi için net bir öneri bulunmama birlikte, mühendislik problemleri için popülasyon sayısı için 5 ile 100 arası ve maksimum iterasyon sayısı için 50 ile 1000 arası değerler denenmiştir. Akabinde, GKO algoritmasının ilk 50 yinelemede hızlı bir şekilde küresel keşif yapabildiği belirtilmiştir (Mirjalili vd., 2014). Bu bilgiye dayanarak, popülasyon numarası için 50 ve iterasyon sayısı için 50 kullanılmıştır. Genel olarak, programın önerdiği varsayılan değerler tercih edilmiştir. SUMO trafik ağı ve sürü tanımlamaları yapılmış GKO algoritması arasında gerçekleştirilen entegrasyon işlemleri, iki ayrı platformun birbirleriyle uyumlu şekilde çalışabilmesi için xml dosyalarına etki edilerek sistem bütünleştirilmiştir. Bu entegrasyon işlemleri, Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelde, binek araçlar kategorisi kullanılmıştır. Bu kategorizasyon, trafik akışını modelleme ve simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesinde önemli bir role sahiptir. Binek araçlar, trafik akışının ve kapasitenin belirlenmesinde ana faktörlerden biridir ve bu çalışma bu faktörleri dikkate alarak gerçekleştirilmiştir.

4.3. Birinci Simülasyon Çalışması

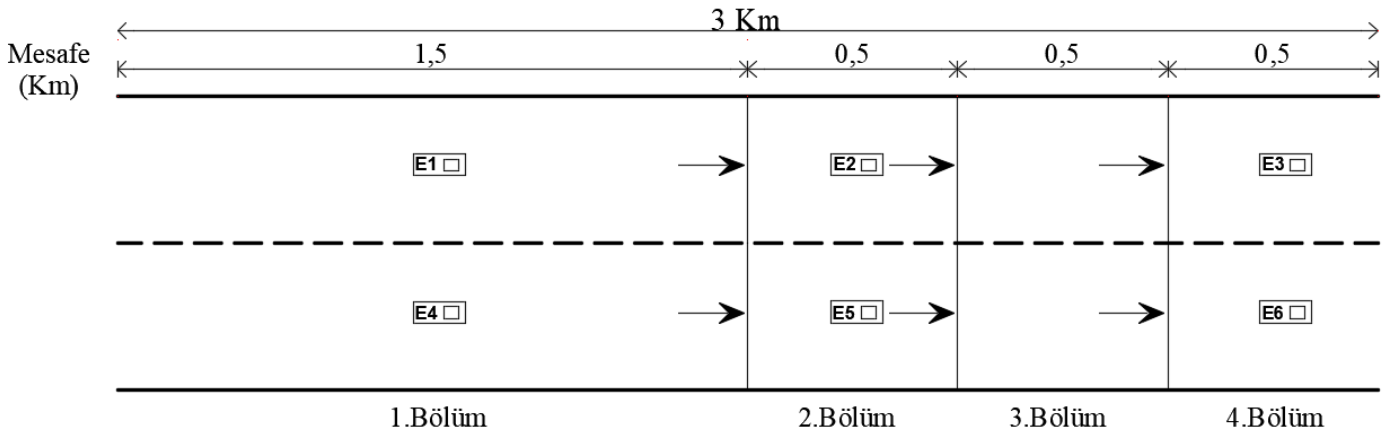
Bu araştırma kapsamında, SUMO trafik simülasyon modelinde tek şeritli bir yol ağı detaylı bir şekilde tasarlanmıştır. Yol ağının toplam uzunluğu 3 kilometre olup, şerit 3,5 metre genişliğindedir. Tasarlanan tek şeritli yol ağı Şekil 2’de görüldüğü gibi, dört farklı bölüme ayrılmıştır. Tüm araçlar, sisteme giriş yapmak için birinci bölüme yönlendirilmiş ve daha sonra ikinci ve üçüncü bölümleri geçerek sistemi terk etmek için dördüncü bölüme ulaşmıştır. Yol ağının tek yönlüdür, trafik yalnızca bir yönde hareket eder. Kalibrasyon için gerekli veriler trafik akımını mikroskobik olarak modelleyen SUMO’dan üretilmiştir. Çalışma bölgesinin SUMO yol ağı üzerine (Şekil 2) yerleştirilmiş olan 3 adet detektör tarafından ölçülen trafik ortalama hız değerleri elde edilmiştir. Detektörler E_n olarak anılmaktadır. Sonraki aşamada, SUMO ve GKO birlikte kullanılarak, trafik hız ölçümleri ve simüle edilmiş hız ölçümleri kullanılarak araç takip parametreleri kalibre edilmiştir.



Şekil 2. Tek Şeritli Otoyol Planı ve Detektör Numaraları

4.4. İkinci Simülasyon Çalışması

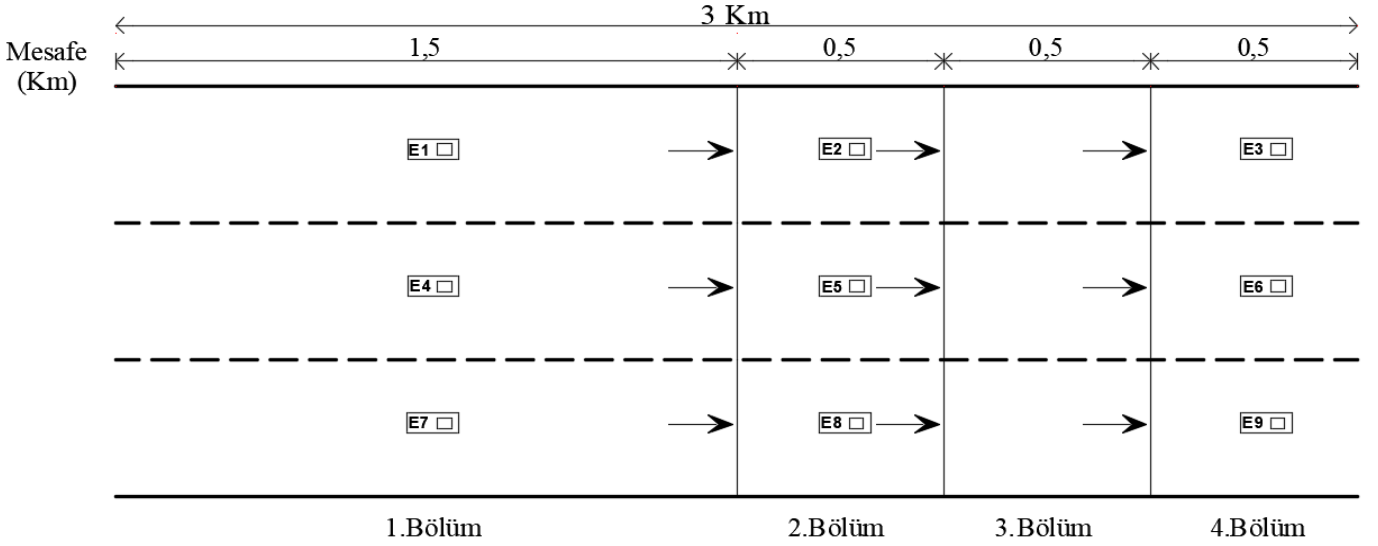
İkinci simülasyon çalışması kapsamında, SUMO trafik simülasyon modelinde çift şeritli bir yol ağı detaylı bir şekilde modellenmiştir. Yol ağının toplam uzunluğu 3 kilometre olup, şeritlerin her biri 3,5 metre genişliğindedir. Tasarlanan çift şeritli yol ağı Şekil 3’te görüldüğü gibi, dört farklı bölüme ayrılmıştır. Tüm araçlar, sisteme giriş yapmak için birinci bölüme yönlendirilmiş ve daha sonra ikinci ve üçüncü bölümleri geçerek sistemi terk etmek için dördüncü bölüme ulaşmıştır. Yol ağının tek yönlüdür, trafik yalnızca bir yönde hareket eder. Çalışma bölgesinin SUMO yol ağı üzerine (Şekil 3) yerleştirilmiş olan 6 adet detektör tarafından ölçülen trafik ortalama hız değerleri elde edilmiştir. Detektörler E_n olarak anılmaktadır. Sonraki aşamada, SUMO ve GKO birlikte kullanılarak, trafik hız ölçümleri ve simüle edilmiş hız ölçümleri kullanılarak araç takip parametreleri kalibre edilmiştir.



Şekil 3. Çift Şeritli Otoyol Planı ve Detektör Numaraları

4.5. Üçüncü Simülasyon Çalışması

Üçüncü simülasyon çalışması kapsamında, SUMO trafik simülasyon modelinde üç şeritli bir yol ağı detaylı bir şekilde modellenmiştir. Yol ağının toplam uzunluğu 3 kilometre olup, şeritlerin her biri 3,5 metre genişliğindedir. Tasarlanan üç şeritli yol ağı Şekil 4'te görüldüğü gibi, dört farklı bölüme ayrılmıştır. Tüm araçlar, sisteme giriş yapmak için birinci bölüme yönlendirilmiş ve daha sonra ikinci ve üçüncü bölümleri geçerek sistemi terk etmek için dördüncü bölüme ulaşmıştır. Yol ağının tek yönlüdür, trafik yalnızca bir yönde hareket eder. Çalışma bölgesinin SUMO yol ağı üzerine (Şekil 4) yerleştirilmiş olan 9 adet detektör tarafından ölçülen trafik ortalama hız değerleri elde edilmiştir. Detektörler E_n olarak anılmaktadır. Sonraki aşamada, SUMO ve GKO birlikte kullanılarak, trafik hız ölçümlerini ve simüle edilmiş hız ölçümleri kullanılarak araç takip parametreleri kalibre edilmiştir.



Şekil 4. Üç Şeritli Otoyol Planı ve Detektör Numaraları

5. Bulgular ve Değerlendirme

Tablo 4. Farklı Akım/Kapasite Oranlarında Ortalama Karesel Hata Değerleri

Parametre Hata Değeri	Akım/Kapasite Oranı (V/C)											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
Tek Şeritli Yol	7.94	8.57	8.10	5.76	6.33	6.59	7.03	5.37	5.76	6.64	5.60	5.10
Çift Şeritli Yol (Sol Şerit)	7.59	8.36	8.66	8.34	7.43	7.27	8.12	6.15	8.38	8.01	7.22	8.18
Çift Şeritli Yol (Sağ Şerit)	6.97	7.40	8.29	8.13	8.06	5.66	3.89	3.93	1.42	2.05	2.42	1.31
Üç Şeritli Yol (Sol Şerit)	2.67	0.96	2.39	1.69	7.10	6.47	5.00	4.08	2.51	2.71	2.53	2.90
Üç Şeritli Yol (Orta Şerit)	1.51	1.12	6.29	8.79	7.79	7.23	5.60	3.01	2.29	3.57	2.17	1.53
Üç Şeritli Yol (Sağ Şerit)	6.28	8.09	8.26	8.60	7.09	5.23	2.90	3.27	2.70	2.08	3.43	1.96

Çalışmadan iki temel sonuç elde edilmiştir. Bunlar; (i) kalibrasyon için tahmin edilen simülasyon modeli parametreleri ve (ii) tahmin edilen parametreler ile LHK ile oluşturulmuş girdi parametreleri arasındaki OKH değerleridir. Çalışmanın sonuçlarına göre, farklı v/c değerlerinin belirli şeritlerde trafik simülasyon kalibrasyonunu nasıl etkilediği incelenmiştir. Tasarlanan üç farklı yol ağı modelinde gerçekleştirilen kalibrasyon için OKH sonuçlarının, farklı v/c değerlerinde elde edilen değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Bu değerler, SUMO modelinde tanımlanan yol ağının ve şeritlerin özelliklerine göre elde edilmiştir.

Çalışma sonuçlarına göre, v/c oranı 1,0'dan büyük olduğu durumlarda, yol veya şeritte araç yoğunluğu kapasitenin üstünde olduğu ve bu durumun trafik sıkışıklığına veya aşırı yüklenmelere neden olduğu tespit edilmiştir. Trafik sıkışıkça araçlar birbirine yakın

davranırken, araçlar arasındaki mesafe azaldıkça sürücü davranışlarının benzerlik gösterdiği ve bu nedenle ortaya çıkan trafik durumlarının benzer özelliklere sahip olduğu anlamına gelmektedir. Mikro-simülasyonlarda sürücü davranışlarını belirleyen parametrelerin etkileri, araçların daha fazla manevra alanına sahip oldukları durumlarda daha net gözlemlenebilir.

Bu amaçla, çalışmada v/c oranı 1,0'dan küçük olan oranlar için en düşük OKH değerleri belirlenmiştir ve belirleme sonucunda tespit edilen en düşük OKH değerleri Tablo 4'te gri renk ile boyanarak gösterilmiştir.

Tek şeritli yol ağında en düşük hata, v/c oranı 0,8 iken yapılan kalibrasyonda tespit edilmiş olup bu oran yol ağının daha iyi bir şekilde kalibre edilebileceği optimal bir değeri işaret etmektedir. Bu bağlamda, yolun veya şeridin düşük yoğunlukta kullanıldığını ve kapasitesinin altında araç trafiği taşıdığını göstermektedir. Dolayısıyla, yola veya şeride daha fazla aracın sığabileceği veya daha hızlı seyahat edilebileceği anlamına gelmektedir. Trafik akışı için genellikle uygun olan bir durumdur, çünkü yol veya şerit, maksimum kapasitesine yakın bir şekilde kullanılmaktadır.

Çift şeritli yol ağında v/c oranı sol şeritte 0,8 ve sağ şeritte 0,9 iken daha iyi kalibrasyon performansı sağladığı gözlemlenmiş olup, her iki şeritte de tespit edilen bu akım/kapasite oranlarının kullanılmasıyla gerçek araç davranışının daha iyi kalibre edilebileceği tespit edilmiştir. Sol şerit için yol veya şeridin kapasitesinin altında araç trafiği olduğu ve bu durumun daha fazla aracın geçmesine veya daha hızlı seyahat etmesine olanak tanıyabileceği düşünülmektedir. Sağ şerit için ise, sol şeride kıyasla daha yoğun olduğu ve dolayısıyla daha az verimli olduğunu göstermektedir. Bu şeritte araçlar sol şeride kıyasla daha yavaş seyahat etmektedir. Bu durum, trafik akışının nispeten dengeli olduğunu gösterebilir, ancak yoğunluk artışı veya hafif bir azalma durumunda akışın hızla değişebileceğini gösterir.

Üç şeritli yol ağında yapılan analizlerde, sol şerit ve orta şerit için v/c oranı 0,2 ve sağ şerit için 1,0 iken ilgili şeritlerin en iyi şekilde kalibre edilebileceği optimal değeri göstermiştir. Bu durumda, sol ve orta şeridin yol veya şeridin kapasitesinin altında araç trafiği olduğu ve bu durumun daha fazla aracın geçmesine veya daha hızlı seyahat etmesine olanak tanıyabileceği düşünülmektedir. Sağ şerit için ise, akım/kapasite oranının 1,0 sınır değerinde olması, trafik mühendisliği ve planlamada önemli bir referans noktası olarak kabul edildiğinden ve bu değere yakın bir aralıktayken trafik akışının optimum verimlilikte olduğu ve yolun veya şeridin maksimum kapasitesine yakın bir şekilde kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Üç şeritli yol ağında yapılan analizlerde elde edilen bulguların gerçek trafik koşullarında beklenenden farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, şerit sayısının artmasıyla birlikte, v/c oranı kullanılarak yapılan kalibrasyon çalışmalarında, şerit bazlı bir yaklaşımın uygulanmasının gerekliliğinin göstermiştir.

Bu sonuçlar, trafik simülasyonlarında kullanılan v/c oranlarının, yol ağının veya şeritlerin etkin bir şekilde kalibre edilmesinde kritik bir rol oynadığını ve belirli v/c oranlarının kalibrasyon işleminde daha iyi performans sağlayabileceğini göstermektedir.

6. Sonuç

Trafik simülasyon modelleri, çeşitli trafik alternatiflerini değerlendirmek ve farklı operasyonel senaryoların performans ölçümlerinin tahmin edilmesinde önemli bir role sahiptir. Ancak, bu modellerin incelenen bölge için kalibre edilmemesi durumunda, alınan kararlar hatalı olabilir. Kalibrasyon sürecinin verimliliği, tahmin edilen model parametrelerinin gerçek trafik koşullarını ve araç etkileşimlerini ne kadar doğru yansıtabildiğine bağlıdır. Bu bağlamda, kalibrasyon sonucunda tahmin edilen model parametrelerinin sistem performansı üzerine etkisinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve analiz edilmesi gerekir. Bu çalışmada, SUMO modelinde farklı v/c oranlarının kalibrasyon performansı üzerine etkisi incelenmiştir. SUMO'da üç farklı yol ağı modellenmiş ve araç takip parametrelerinin LHK ile bir kombinasyonu oluşturulmuştur. Son aşamada, yol ağları için kalibrasyon işlemleri GKO kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç farklı yol ağının her bir şeridi farklı v/c oranı için kalibre edilmiştir. Analizler, her bir yol ağı içinde çeşitli şeritlerde optimum kalibrasyon performansının farklı v/c oranlarında olduğunu göstermiştir. Bu durum, trafik simülasyon modellerinin daha doğru ve gerçekçi sonuçlar elde etmek için her bir şeridin özelliklerini ayrı ayrı değerlendirmelerinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Bulgular, şerit sayısının artmasıyla birlikte, v/c oranı kullanılarak yapılan kalibrasyon çalışmalarında şerit bazlı bir yaklaşımın doğruluğunu ortaya koymaktadır. Şerit bazlı analizler, her bir şeridin trafik akış özelliklerini ayrı ayrı değerlendirmeyi ve bu şekilde daha hassas kalibrasyon sonuçları elde etmeyi mümkün kılar. Bu yaklaşım, yol ağlarının daha verimli ve gerçekçi simülasyon modelleriyle analiz edilmesine olanak tanır. Bu sonuçlar, SUMO'da kullanılan model parametrelerinin sınırlı olsa da diğer simülasyon programları için benzer bir kalibrasyon yaklaşımında kullanılmasının faydalı olabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, düz ve kesintisiz bir yol ağı üzerinde kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ancak, gelecekteki çalışmalarda kavşaklar gibi daha karmaşık yol kesimlerinde daha fazla parametre ve veri seti kullanılarak benzer araştırmalar yapılmalıdır. Ayrıca, şehir içi yollar ve otoyollar gibi farklı yol kesimleri için kalibrasyon çalışmalarına ağırlık verilmelidir. Bu sayede, simülasyon modellerinin gerçek trafik koşullarına daha iyi uyum sağlaması ve farklı bölgelerdeki uygulayıcılar için kalibrasyon sürecinin daha etkili bir şekilde yönetilmesi sağlanabilir.

Referanslar

- Amirjamshidi, G., & Roorda, M. J. (2019). Multi-objective calibration of traffic microsimulation models. *Transportation Letters*, 11(6), 311-319. <https://doi.org/10.1080/19427867.2017.1343763>
- Antoniou, C., Azevedo, C. L., Lu, L., Pereira, F., & Ben-Akiva, M. (2015). W-SPSA in Practice: Approximation of Weight Matrices and Calibration of Traffic Simulation Models. *Transportation Research Procedia*, 7, 233-253. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2015.06.013>
- Barceló, J. (2010). Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation. *Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation*. In *Fundamentals of Traffic Simulation*, 1st ed.; Springer: New York, NY, USA, 2010, Volume 1, 1-62. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6_1
- Bieker, L., Krajzewicz, D., Morra, A., Michelacci, C., & Cartolano, F. (2015). Traffic simulation for all: A real world traffic scenario from the city of Bologna. In *Modeling Mobility with Open Data: 2nd SUMO Conference*, Berlin, Germany, 15–16 May 2014; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 47-60.
- Chiappone, S., Giuffrè, O., Granà, A., Mauro, R., & Sferlazza, A. (2016). Traffic simulation models calibration using speed-density relationship: An automated procedure based on Genetic Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 44, 147-155. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2015.09.024>
- Chowdhury, T. U., Park, P. Y., & Gingerich, K. (2022). Estimation of Appropriate Acceleration Lane Length for Safe and Efficient Truck Platooning Operation on Freeway Merge Areas. *Sustainability* 2022, 14, 12946. <https://doi.org/10.3390/su141912946>
- Ciuffo, B., Punzo, V., & Montanino, M. (2014). Global sensitivity analysis techniques to simplify the calibration of traffic simulation models. Methodology and application to the IDM car-following model. *IET Intelligent Transport Systems*, 8(5), (479–489). <https://doi.org/10.1049/iet-its.2013.0064>
- Doğan E. (2022). Trafik Mikro-Simülasyon Model Kalibrasyonu için Özellik Seçim Algoritmalarının Karşılaştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 752-761. <https://doi.org/10.29137/umagd.1096157>
- Guo, Y., Sayed, T., Zheng, L., & Essa, M. (2021). An extreme value theory based approach for calibration of microsimulation models for safety analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2021, 106, 102172. <https://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2020.102172>
- Hourdakis, J., Michalopoulos, P. G., & Kottommannil, J. (2003). Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models. *Transportation research record*, 1852(1), 130-139. <https://doi.org/10.3141/1852-17>
- Ištoka Otković, I., Tollazzi, T., Šraml, M., & Varevac, D. (2023). Calibration of the Microsimulation Traffic Model Using Different Neural Network Applications. *Future Transportation*, 3(1), 150-168. <https://www.mdpi.com/2673-7590/3/1/10>
- Karimi, M., & Alecsandru, C. (2019). Two-fold calibration approach for microscopic traffic simulation models. *IET Intell. Transp. Syst.* 2019, 13, 1507–1517. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5369>
- Lee, J. B., & Ozbay, K. (2009). New calibration methodology for microscopic traffic simulation using enhanced simultaneous perturbation stochastic approximation approach. *Transportation Research Record*, 2124, 233-240. <https://doi.org/10.3141/2124-23>
- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flotterod, Y. P., Hilbrich, R., Lucken, L., Rummel, J., Wagner, P., & Wiebner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2575-2582. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569938>
- McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, 21(2), 239. <https://doi.org/10.2307/1268522>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61. <https://doi.org/10.1016/J.ADVENGSOFT.2013.12.007>
- Nassrullah, Z., & Yousif, S. (2020). Development of a Microsimulation Model for Motorway Roadworks with Narrow Lanes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(4), 1536-1546. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2910159>
- Park, B., & Qi, H. (2005). Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*. <https://doi.org/10.1177/0361198105193400122>, 1934, 208-217. <https://doi.org/10.1177/0361198105193400122>

Paz, A., Molano, V., Martinez, E., Gaviria, C., & Arteaga, C. (2015). Calibration of traffic flow models using a memetic algorithm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 432-443. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2015.03.001>

Transport Research Board (2000), *Highway Capacity Manual – HCM 2000*, Transport Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2000.

Yu, M., & (David) Fan, W. (2017). Calibration of microscopic traffic simulation models using metaheuristic algorithms. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1), 63-77. <https://doi.org/10.1016/J.IJTST.2017.05.001>