

APLIKASI PENUGASAN TRAFIK DINAMIK MELALUI SIMULASI MIKROSKOPIK DALAM KAJIAN IMPAK TRAFIK DAN PERBANDINGAN DENGAN PENUGASAN TRAFIK STATIK

Lee Vien Leong^{1,*}, Wei Ai Chin², Ali Hussein Hashim Al-Yasee²

¹Pusat Pengajian Perumahan, Bangunan dan Perancangan, Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, MALAYSIA

²Pusat Pengajian Kejuruteraan, Kampus Kejuruteraan, Universiti Sains Malaysia, Nibong Tebal, Pulau Pinang, MALAYSIA.

*Corresponding author: celeong@usm.my

Abstrak

Kajian impak trafik membantu pembuat keputusan menilai kesesuaian cadangan pembangunan serta mengenal pasti penambahbaikan infrastruktur pengangkutan bagi mengekalkan kelestarian. Kajian ini membandingkan output trafik seperti kelengahan, nisbah isipadu terhadap kapasiti (v/c), dan tahap perkhidmatan (LOS) antara model penugasan trafik dinamik AIMSUN dan model statik SIDRA. Model SIDRA telah diselaraskan dengan rangkaian AIMSUN dari segi geometri, permintaan trafik, dan komposisi kenderaan bagi membolehkan perbandingan merentas platform yang sah. Output simulasi termasuk kelengahan, LOS dan nisbah v/c telah diekstrak daripada kedua-dua platform, dengan AIMSUN menyediakan hasil dalam format agregat dan siri masa. Hasil kajian menunjukkan bahawa AIMSUN, terutamanya melalui simulasi siri masa, memberikan gambaran trafik lebih realistik dengan mengenal pasti perubahan mengikut masa, tingkah laku pemandu adaptif dan corak kesesakan setempat. SIDRA pula secara konsisten melebihi anggaran kelengahan, iaitu purata 46.1% (50.6 saat) berbanding kelengahan agregat AIMSUN dan 34.2% (47.9 saat) berbanding kelengahan maksimum AIMSUN (siri masa), terutamanya di persimpangan yang sibuk. SIDRA juga melebihi anggaran nisbah v/c berbanding AIMSUN, dengan purata 62.2% (agregat) dan 56.9% (siri masa). AIMSUN turut menunjukkan keupayaan yang lebih unggul dalam mengenal pasti gangguan aliran trafik serta fenomena limpahan barisan kenderaan, sekali gus menonjolkan kelebihan model penugasan trafik dinamik dalam penilaian yang tepat dan responsif terhadap rangkaian trafik bandar yang kompleks. Penemuan ini menyokong penggunaan kaedah analisis berasaskan simulasi serta meningkatkan kredibiliti model penugasan trafik dinamik untuk ramalan trafik yang lebih tepat dan perancangan infrastruktur mampan.

Kata Kunci: Kajian impak trafik, metrik prestasi, penugasan trafik dinamik, penugasan trafik statik, simulasi mikroskopik

APPLICATION OF DYNAMIC TRAFFIC ASSIGNMENT THROUGH MICROSCOPIC SIMULATION IN TRAFFIC IMPACT STUDY AND COMPARISON WITH STATIC TRAFFIC ASSIGNMENT

Abstract

Traffic impact studies help decision-makers assess the suitability of development proposals and identify transportation infrastructure improvements to maintain sustainability. This study compares traffic outputs such as delay, volume-to-capacity (v/c) ratio, and level-of-service (LOS) between the AIMSUN dynamic traffic assignment model and the SIDRA static model. The SIDRA model was calibrated to match the AIMSUN network in terms of geometry, traffic demand, and vehicle composition to enable valid cross-platform comparisons. Simulation outputs including delay, LOS, and v/c ratio were extracted from both platforms, with AIMSUN providing results in both aggregate and time-series formats. The findings show that AIMSUN, particularly through time-series simulation, offers a more realistic depiction of traffic by capturing temporal variations, adaptive driver behavior, and localized congestion patterns. SIDRA, on the other hand, consistently overestimated delays by an average of 46.1% (50.6 seconds) compared to AIMSUN's aggregate delay and 34.2% (47.9 seconds) compared to AIMSUN's maximum delay (time-series), especially at busy intersections. SIDRA also overestimated the v/c ratio compared to AIMSUN, with an average of 62.2% (aggregate) and 56.9% (time-series). AIMSUN also demonstrated superior capability in identifying traffic flow disruptions and queue spillback phenomena, highlighting the advantages of dynamic traffic assignment models in providing accurate and responsive assessments of complex urban traffic networks. These findings support the use of simulation-based

analysis methods and enhance the credibility of dynamic traffic assignment models for more accurate traffic forecasting and sustainable infrastructure planning.

Keywords: Traffic impact study, performance metrics, dynamic traffic assignment, static traffic assignment, microscopic simulation

Article history:

Submitted: 27/10/2025; Revised: 18/11/2025; Accepted: 20/12/2025; Online: 24/12/2025

PENGENALAN

Kajian impak trafik merupakan pendekatan analisis dan pengurusan yang menyeluruh, bertujuan untuk menilai kesan pembangunan terhadap rangkaian pengangkutan sekeliling serta aliran trafik secara keseluruhan. Di banyak negara membangun, tekanan daripada proses urbanisasi dan pertumbuhan industri telah mengubah guna tanah dan mempengaruhi pembangunan sosioekonomi. Malaysia menjadi contoh yang jelas bagi fenomena ini, khususnya di kawasan seperti Bertam, Pulau Pinang, di mana pengurusan trafik yang cekap terus menjadi cabaran utama. Peralihan daripada tanah pertanian kepada kawasan perumahan, komersial, dan perindustrian menyerlahkan keperluan mendesak terhadap metodologi penilaian trafik yang lebih tepat, responsif, dan sesuai dengan konteks setempat. Pembangunan kawasan baharu melalui pembinaan bangunan dan infrastruktur lazimnya membawa kepada peningkatan aktiviti manusia dan jumlah kenderaan, sekali gus menyumbang kepada pertambahan trafik keseluruhan (Angkoso et al., 2021; Venkatcharyulu & Mallikarjunareddy, 2020). Lonjakan permintaan perjalanan ini sering mengakibatkan kesesakan trafik yang dicirikan oleh penurunan kelajuan, peningkatan masa perjalanan, dan pembentukan barisan kenderaan yang panjang. Kesan sampingan seperti pelepasan gas rumah hijau (GHG) dan pencemaran bunyi turut memburukkan isu alam sekitar global, sekali gus menghalang kemajuan ke arah pembangunan bandar yang mampan (Perveen et al., 2020). Justeru, penugasan trafik yang tepat amat penting bagi memastikan rangkaian pengangkutan dapat menampung peningkatan permintaan tanpa menjejaskan prestasi sistem atau mencetuskan kesesakan yang serius. Ia berperanan dalam meminimumkan masa perjalanan, kerugian masa, tempoh menunggu, kelengahan pelepasan, serta kesesakan rangkaian yang berlebihan (Lu & Tettamanti, 2021). Di samping itu, ia menyokong perancangan infrastruktur dengan menentukan agihan aliran trafik merentasi arka rangkaian berdasarkan ciri-ciri khusus dan permintaan trafik secara agregat (Rojo, 2020).

Apabila bandar terus berkembang dan rangkaian trafik menjadi semakin kompleks, model penugasan trafik statik tradisional semakin kurang berupaya untuk menggambarkan variasi masa serta dinamik tingkah laku yang wujud dalam trafik dunia sebenar. Bagi mengatasi kekurangan ini, model penugasan trafik dinamik telah diperkenalkan. Tidak seperti model statik yang menganggap keadaan trafik berada dalam keseimbangan dan aliran yang seragam, penugasan trafik dinamik mensimulasikan trafik sebagai proses yang berubah mengikut masa. Pendekatan ini membolehkan pemahaman yang lebih mendalam terhadap corak kesesakan serta kesan turun naik permintaan, perubahan infrastruktur, dan tindak balas tingkah laku pemandu dari semasa ke semasa yang merupakan faktor-faktor yang sangat relevan khususnya di kawasan bandar yang sedang membangun (Saxena et al., 2021). Platform simulasi mikroskopik seperti AIMSUN menyediakan analisis terperinci di peringkat kenderaan, membolehkan penalaan halus terhadap parameter tingkah laku seperti keganasan pemandu, tahap kerjasama, dan komposisi motosikal. Simulasi ini turut diperkaya dengan keupayaan pengendalian data masa nyata serta pemodelan lanjutan, termasuk kaedah pemilihan laluan stokastik dan keseimbangan pengguna dinamik. Kaedah pemilihan laluan stokastik ialah pendekatan penugasan trafik dinamik yang beroperasi tanpa proses lelaran yang direka bentuk untuk mencerminkan kesilapan persepsi pemandu dalam mentafsir rangkaian pengangkutan. Kesilapan ini menyebabkan pemandu meminimumkan apa yang mereka anggap sebagai kos perjalanan, bukan kos sebenar. Dalam pendekatan ini, kenderaan diagihkan ke laluan berbeza berdasarkan taburan kebarangkalian. Pada selang masa tertentu, kos perjalanan dikira semula dan sesetengah kenderaan mungkin menukar laluan semasa dalam perjalanan ke destinasi. Walau bagaimanapun, model ini tidak mengambil kira pembelajaran daripada pengalaman lalu, yang boleh menyebabkan ketidakseragaman dalam pemilihan laluan antara ulangan simulasi (Chin et al., 2025).

Kaedah keseimbangan pengguna dinamik pula ialah kaedah penugasan trafik yang menggunakan proses lelaran untuk mencapai keadaan keseimbangan pengguna. Pada peringkat awal, kenderaan memilih laluan tertentu, dan melalui proses lelaran, pilihan laluan dikemas kini berdasarkan maklumat yang diperolehi tentang keadaan rangkaian. Dengan setiap lelaran, proses ini berusaha menambah baik pemilihan laluan sehingga penumpuan tercapai. Penumpuan berlaku apabila, bagi setiap pasangan asalan-destinasi dan selang masa pelepasan, masa perjalanan yang dialami di semua laluan yang digunakan adalah sama dan minimum. Pada tahap ini, tiada pengguna boleh

mengurangkan masa perjalanan mereka dengan menukar laluan secara sepihak, menandakan bahawa rangkaian telah mencapai keseimbangan dinamik berdasarkan masa perjalanan (Gliebe & Bergman, 2011). Tidak seperti model pemilihan laluan stokastik, trajektori kenderaan individu dalam model keseimbangan pengguna dinamik tidak diwakili atau dapat dijejaki secara eksplisit. Secara ringkasnya, pada akhir setiap selang masa pelepasan yang ditetapkan oleh pengguna, model pemilihan laluan stokastik mengenal pasti laluan berkos paling rendah dan mengagihkan kenderaan merentasi laluan tersebut serta laluan berkos paling rendah yang dikenal pasti sebelum ini, menggunakan fungsi pemilihan diskret. Sebaliknya, model keseimbangan pengguna dinamik beroperasi melalui proses lelaran yang bertujuan mencapai keadaan di mana, bagi setiap pasangan asal-destinasi dan selang masa pelepasan, semua kenderaan yang berlepas serentak mengalami masa perjalanan yang minimum dan seragam. Algoritma penugasan ini berbeza dari segi sejauh mana ia meniru akses kepada maklumat masa perjalanan. Walaupun kedua-dua kaedah pemilihan laluan stokastik dan keseimbangan pengguna dinamik menawarkan nilai yang signifikan, kaedah pemilihan laluan stokastik mempunyai kelebihan ketara dari segi kecekapan pengiraan dan kebolehsuaian skala, menjadikannya sangat sesuai untuk simulasi rangkaian berskala besar dan aplikasi praktikal dalam perancangan serta operasi pengangkutan (Ashfaq et al., 2021). Walaupun model keseimbangan pengguna dinamik telah lama digunakan dalam perancangan pengangkutan strategik, peningkatan penggunaan kaedah pemilihan laluan stokastik dalam operasi trafik telah menjadi pemangkin utama kepada kajian ini.

Kajian-kajian terdahulu telah menekankan bahawa pendekatan pemodelan trafik di Malaysia masih banyak bergantung kepada kaedah statik dan deterministik, yang secara asasnya mempunyai keterbatasan dalam menggambarkan perubahan mengikut masa serta sifat dinamik aliran dan permintaan trafik (Zou et al., 2013; Ali et al., 2019; Al-Bahr, 2021). Sebagai contoh, kajian oleh Ali et al. (2019) dan Al-Bahr (2021) menyorot kebergantungan berterusan terhadap model empirikal dan statik dalam analisis rangkaian jalan raya bandar di Malaysia, sambil menggesa agar pendekatan yang lebih dinamik dan berasaskan simulasi diterapkan bagi mencerminkan keadaan trafik dunia sebenar dengan lebih tepat. Kebergantungan ini menyerlahkan keperluan mendesak untuk Malaysia beralih kepada teknik pemodelan dinamik yang lebih canggih, yang mampu menangani kerumitan sistem pengangkutan yang semakin meningkat. Di Malaysia, perisian "SIDRA Intersection", iaitu perisian penugasan trafik statik, digunakan secara meluas oleh perunding trafik dalam kajian impak trafik kerana sifatnya yang ringkas, pantas dalam pengiraan, dan mematuhi model analitik yang telah ditetapkan. Ia sangat berkesan dalam menilai persimpangan terasing di bawah senario permintaan tipikal atau purata, dengan menggunakan fungsi isipadu-kelambatan yang diperoleh daripada data empirikal (Ranjitkar et al., 2014). Namun, sifat deterministik SIDRA mengehadkan keupayaannya untuk mewakili aspek dinamik dan stokastik dalam aliran trafik dunia sebenar. Ia tidak mengambil kira interaksi antara kenderaan dari semasa ke semasa, tingkah laku penukaran lorong, dan pengalihan laluan. Tambahan pula, SIDRA tidak dapat mensimulasikan kesan di seluruh rangkaian yang berpunca daripada perubahan corak trafik semasa waktu puncak atau di bawah senario pertumbuhan trafik masa hadapan. Keterbatasan ini boleh menyebabkan ramalan yang tidak tepat, terutamanya dalam persekitaran bandar yang sesak dan kompleks.

Dengan demikian, walaupun digunakan secara meluas, SIDRA mempunyai beberapa kelemahan utama apabila diaplikasikan dalam persekitaran trafik yang rumit. Meskipun SIDRA mampu melakukan analisis seluruh rangkaian, ia tidak dapat menganalisis peruntukan trafik dalam rangkaian jalan raya dan oleh itu tidak mengambil kira pengagihan semula trafik dalam pemodelan pemilihan laluan. Tambahan pula, tidak seperti model mikrosimulasi, SIDRA hanya beroperasi berdasarkan input permintaan asal-destinasi yang tetap, menjadikannya tidak berkesan dalam menangkap variasi waktu puncak, tingkah laku pemandu secara rawak, atau gangguan seperti kerja jalan atau insiden trafik yang boleh membawa kepada penilaian prestasi trafik keseluruhan yang mengelirukan. Satu lagi kelemahan SIDRA ialah kebergantungannya terhadap panjang kitaran isyarat dan corak ketibaan kenderaan yang telah ditetapkan, yang gagal menggambarkan turun naik ketibaan kenderaan secara rawak atau kesan penyelarasan isyarat adaptif. Selain itu, SIDRA juga tidak dapat diintegrasikan dengan sistem pengurusan trafik moden seperti kenderaan bersambung dan autonomi (CAV) serta pengoptimuman trafik berasaskan kecerdasan buatan (AI) (Helbing et al., 2002). Tidak seperti model mikrosimulasi, SIDRA tidak memodelkan interaksi antara kenderaan secara individu, yang bermaksud ia tidak dapat mensimulasikan tingkah laku penukaran lorong, penerimaan jurang, atau kesan pergerakan berkumpulan kenderaan seperti yang boleh dilakukan dalam perisian mikroskopik. Kekurangan ini menyerlahkan jurang penting dalam kajian impak trafik, terutamanya di kawasan bandar yang sedang pesat membangun di mana ramalan yang tepat dan pengurusan trafik yang berkesan adalah sangat penting. Berbanding penugasan trafik statik, penugasan trafik dinamik mengenal pasti laluan berkos paling rendah yang sepadan dengan masa pelepasan tertentu. Oleh itu, model penugasan trafik dinamik semakin mendapat tempat kerana keupayaannya menangkap dinamika aliran

dan permintaan trafik yang berubah mengikut masa (Ozbay et al., 2006). Dalam penugasan trafik dinamik, permintaan trafik ditakrifkan dalam bentuk matriks asal-destinasi mengikut pecahan masa dan jenis kenderaan tertentu. Apabila sesuatu kenderaan dijana di lokasi asalnya, ia akan diperuntukkan kepada salah satu laluan yang tersedia, yang menghubungkan lokasi asal tersebut dengan destinasi kenderaan berkenaan. Laluan-laluan ini dikira semasa simulasi bermula dan akan dikira semula pada selang masa pemilihan laluan.

Perisian yang menggunakan penugasan trafik dinamik seperti AIMSUN, ISSIM, Cube, Dynameq, dan TransModeler direka bentuk untuk menangani kerumitan trafik bandar dengan tahap kedalaman simulasi yang berbeza (Downling et al., 2004; Sloboden, 2012). AIMSUN menyerlah kerana keupayaannya menggabungkan penugasan statik dan dinamik dalam satu rangka kerja bersepadu (Hasanpour et al., 2017), serta menawarkan simulasi berbilang tahap, pemprosesan data masa nyata, sokongan pelbagai mod pengangkutan, dan antara muka pengguna yang mesra serta intuitif (Baza-Solares et al., 2022). Tambahan pula, ia memberikan margin ralat yang rendah dalam ramalan aliran trafik, kelajuan, dan jarak perjalanan (Rahimi et al., 2021). Secara ringkasnya, AIMSUN mengaplikasikan pendekatan penugasan trafik dinamik berasaskan mikrosimulasi. Ia mensimulasikan pergerakan individu kenderaan, penggunaan lorong, dan interaksi dengan isyarat trafik pada resolusi tinggi mengikut masa (Barcelo et al., 2024). AIMSUN berupaya mensimulasikan kesan kerjasama antara kenderaan, sifat dan tahap agresif pemandu, dan tingkah laku tidak berasaskan lorong yang merupakan ciri-ciri yang amat relevan dalam persekitaran trafik heterogen seperti di Malaysia, di mana motosikal merupakan sebahagian besar pengguna jalan raya. Walaupun SIDRA lebih sesuai untuk penilaian trafik konvensional dan statik kerana kesederhanaan serta penerimaannya dalam amalan pengawalseliaan, AIMSUN menyediakan gambaran yang lebih terperinci dan realistik terhadap prestasi rangkaian trafik di bawah pelbagai keadaan. Ini menjadikan AIMSUN lebih sesuai untuk aplikasi lanjutan seperti ujian senario, pemodelan tingkah laku pemandu, dan penilaian strategi mitigasi dalam jangka masa yang lebih luas. Oleh itu, penggabungan model penugasan trafik dinamik berasaskan simulasi seperti AIMSUN dalam kajian impak trafik dapat melengkapi kaedah statik yang digunakan dalam perisian seperti SIDRA, sekali gus menawarkan pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap dinamik trafik dan menyokong keputusan perancangan bandar yang lebih baik.

Matlamat utama kajian ini adalah untuk mempertingkatkan pemahaman dan aplikasi model penugasan trafik dinamik dalam konteks kajian impak trafik. Kajian ini menilai keberkesanan model penugasan trafik dinamik berasaskan AIMSUN dalam kajian impak trafik dengan membandingkan output prestasi di persimpangan seperti kelengahan, tahap perkhidmatan (LOS) dan nisbah isipadu terhadap kapasiti (v/c), dengan output yang dihasilkan oleh SIDRA, iaitu perisian yang lazim digunakan dalam amalan kajian impak trafik konvensional di Malaysia.

KAEDAH KAJIAN

Perbezaan asas dalam andaian antara model penugasan statik dan dinamik memainkan peranan yang signifikan dalam menjelaskan variasi yang diperhatikan dalam output masing-masing. SIDRA menggunakan teori perbarisan deterministik dan bergantung kepada parameter trafik tetap seperti isipadu aliran dan konfigurasi kawalan untuk menghasilkan satu set metrik prestasi bagi tempoh puncak yang telah ditentukan. Ia mengandaikan ketibaan trafik yang seragam dan tidak mengambil kira kepelbagaian dalam tempoh tersebut. Akibatnya, ia hanya mampu memberikan gambaran ringkas tentang prestasi persimpangan tanpa mengambil kira aliran trafik yang dinamik merentasi masa dan ruang.

Sebaliknya, AIMSUN beroperasi melalui rangka kerja simulasi mikroskopik, di mana setiap kenderaan dimodelkan dengan tingkah laku tersendiri seperti penukaran lorong, pengekalan jarak, dan pemilihan laluan. Dalam analisis agregat, AIMSUN menyediakan ringkasan prestasi trafik sepanjang keseluruhan tempoh analisis, yang walaupun lebih dinamik berbanding SIDRA, masih dapat mempermudah kesan turun naik temporal dengan memberikan nilai purata. Analisis siri masa pula dapat membahagikan tempoh analisis kepada selang masa yang lebih halus iaitu setiap 15 minit, membolehkan jurutera trafik memerhati bagaimana kelengahan, LOS, dan nisbah v/c berubah sepanjang tempoh tersebut. Ini membolehkan pengenalan yang lebih tepat terhadap lonjakan kesesakan jangka pendek dan corak pelepasan trafik yang amat penting dalam penilaian trafik yang lebih terperinci.

Seterusnya, bagi menilai aplikasi penugasan trafik dinamik berasaskan simulasi dalam kajian impak trafik konvensional, model rangkaian jalan yang sama telah dibangunkan menggunakan perisian SIDRA Intersection, iaitu perisian penugasan trafik statik yang digunakan secara meluas dalam amalan di Malaysia. Model SIDRA ini diselaraskan dengan rangkaian AIMSUN dari segi geometri, permintaan trafik dan komposisi kenderaan bagi membolehkan perbandingan merentas platform yang sah. Output simulasi seperti kelengahan, LOS, dan nisbah v/c telah diekstrak daripada kedua-dua platform, dengan

hasil AIMSUN disediakan dalam format agregat dan siri masa. Output-output ini kemudiannya dibandingkan secara sistematik. Analisis perbandingan ini telah memberikan pandangan penting terhadap keterbatasan pemodelan statik dan menyerlahkan kelebihan penggunaan penugasan trafik dinamik dalam kajian impak trafik yang lebih responsif dan peka terhadap konteks setempat.

Kawasan Kajian

Dalam kajian ini, Bertam telah dipilih sebagai kawasan kajian kerana lokasinya yang strategik di Kepala Batas, Pulau Pinang, Malaysia, serta potensinya untuk memberi impak pembangunan yang ketara terhadap rangkaian jalan raya berdasarkan pembangunan yang telah dirancang. Pemilihan ini memberikan perspektif baharu dalam kajian impak trafik, memandangkan Bertam sedang melalui peralihan sosioekonomi daripada kawasan pertanian kepada pembangunan guna tanah bercampur, yang membawa kepada corak trafik dan cabaran yang berbeza.

Persekitaran ini memberikan peluang untuk menambah baik usaha penentuan bagi kawasan yang sedang pesat membangun, sekali gus menunjukkan kebolehsuaian dan keberkesanan model peruntukan trafik dinamik dalam menangani isu setempat. Peralihan daripada guna tanah pertanian kepada pembangunan bercampur bukan sahaja menyediakan konteks unik untuk menganalisis dinamik trafik, tetapi juga meningkatkan pemahaman terhadap cabaran mobiliti bandar sambil membimbing perumusan strategi pengurusan trafik yang berkesan dan pendekatan perancangan bandar mampan di kawasan bandar yang sedang pesat berkembang. Rajah 1 menunjukkan rangkaian jalan raya di kawasan kajian bersama simpang yang dikaji dan pola guna tanah yang dikategorikan, termasuk kawasan kediaman, komersial, institusi, perindustrian, dan rekreasi. Taburan guna tanah berhampiran simpang-simpang ini adalah sangat relevan kerana ia mempengaruhi kadar penjanaan trafik dan corak pergerakan. Kawasan kediaman menyumbang kepada aliran perjalanan harian, kawasan komersial menarik perjalanan berkaitan pembelian dan perkhidmatan, zon institusi menjana permintaan perjalanan tertumpu semasa waktu puncak sekolah atau pejabat, manakala kawasan perindustrian menambah komponen kenderaan berat dan pengangkutan barang. Kehadiran zon rekreasi turut menyumbang kepada lonjakan isipadu trafik secara berkala semasa hujung minggu atau cuti umum. Dengan menggabungkan rangkaian jalan dan ciri guna tanah, kawasan kajian ini menyediakan persekitaran yang realistik dan mencabar untuk menilai keberkesanan metodologi kajian impak trafik berasaskan simulasi.

Siasatan awal tapak telah dijalankan bagi menentukan sistem jalan raya di kawasan kajian. Maklumat seperti bilangan lorong, had laju, dan kapasiti jalan diperoleh melalui lawatan tapak, peta jalan, dan pelan cadangan yang dikemukakan. Seterusnya, satu sistem pengzonan khusus bagi kawasan kajian telah dibentuk berdasarkan maklumat guna tanah yang tersedia. Kawasan kajian ini dipilih secara khusus bagi menghadkan bilangan laluan alternatif bagi memudahkan proses peruntukan dalam penentuan parameter model pemilihan laluan. Data inventori rangkaian jalan tersebut kemudian digunakan untuk membina titik pusat zon asalan-destinasi, seksyen, dan persimpangan dalam perisian simulasi AIMSUN. Data aliran trafik kemudiannya digunakan untuk membangunkan matriks asas asalan-destinasi yang mewakili keadaan tanpa pembangunan yang dicadangkan. Eksperimen simulasi ini direka bentuk berasaskan laluan, di mana matriks asalan-destinasi dibina daripada data yang dikumpul dan disepadukan ke dalam model AIMSUN. Bagi memastikan konsistensi, matriks asalan-destinasi telah ditetapkan supaya isipadu permintaan yang sama digunakan dalam semua model peruntukan, memandangkan fokus kajian ini adalah untuk menilai aplikasi penugasan trafik dinamik dalam kajian impak trafik dan bukannya variasi isipadu permintaan.



Rajah 1: Rangkaian jalan raya di kawasan kajian

Pengumpulan Data

Pengumpulan data telah dijalankan bagi mendapatkan isipadu belokan mengikut kelas kenderaan di persimpangan utama serta data garisan saringan. Sepuluh persimpangan telah dikenal pasti untuk kajian ini, yang dikenali sebagai JA hingga JJ. Antara persimpangan tersebut, JA hingga JD merupakan persimpangan berlampu isyarat empat hala, JE ialah bulatan empat hala, JF ialah persimpangan tiga hala dengan masuk-kiri keluar-kiri, manakala JF hingga JI merupakan persimpangan tiga hala dengan kawalan henti, dan JJ ialah persimpangan berlampu isyarat tiga hala. Data isipadu trafik bagi persimpangan-persimpangan ini telah dikumpulkan dari hari Selasa, 23 Mei hingga Khamis, 25 Mei 2023, semasa tiga selang masa iaitu 0630–0930, 1130–1430, dan 1630–1930. Kiraan pergerakan belokan mengikut kelas kenderaan diperoleh menggunakan kamera video yang dipasang di lokasi strategik berhampiran persimpangan, membolehkan rakaman berterusan tanpa mengganggu aliran trafik. Video yang dirakam kemudiannya diteliti dan diekstrak secara manual bagi mengenal pasti kelas kenderaan, termasuk kereta penumpang, lori kecil, kenderaan berat, bas, dan motosikal. Data yang dikumpulkan seterusnya dianalisis untuk mengenal pasti aliran trafik waktu puncak yang paling kritikal untuk penilaian lanjut. Jadual 1 menunjukkan nilai setara kenderaan penumpang (pce) yang digunakan untuk menukar unit daripada kenderaan sejam (kend/j) kepada unit kenderaan penumpang sejam (ukp/j) berdasarkan nilai setara kereta penumpang yang ditetapkan.

Jadual 1: Nilai setara kenderaan penumpang

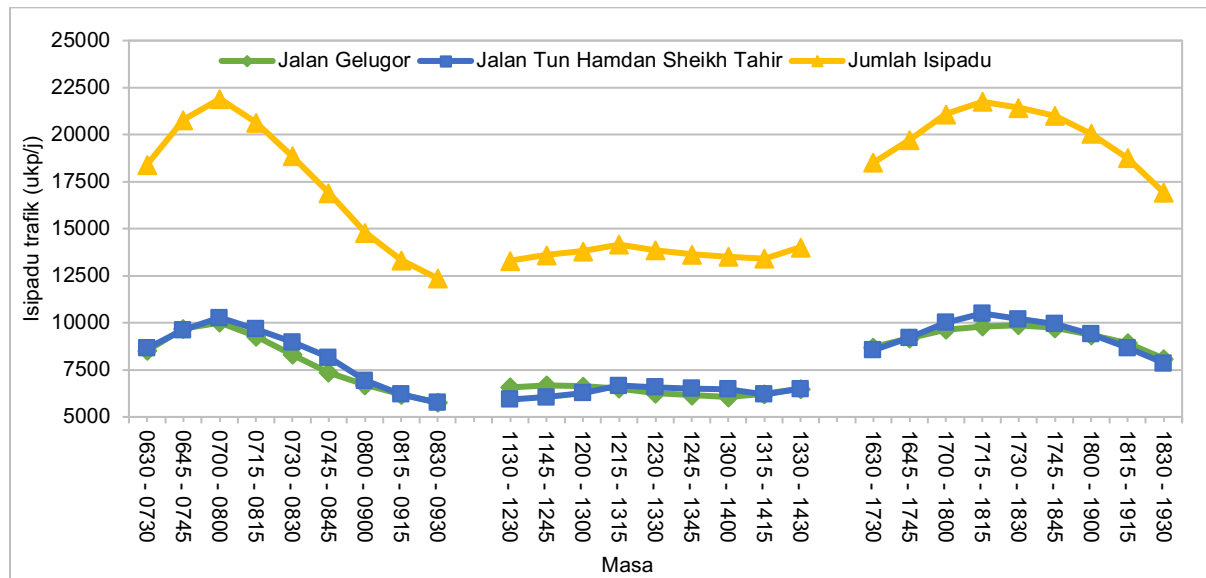
Kelas kenderaan	Nilai setara kenderaan penumpang
Kereta penumpang	1.00
Lori kecil dengan 2 gandar atau van besar	1.75
Kenderaan berat dengan 3 gandar atau lebih	2.25
Bas	2.25
Motosikal	0.33

HASIL DAN PERBINCANGAN

Isipadu Trafik

Data tinjauan trafik yang menunjukkan variasi isipadu trafik semasa waktu puncak pagi dan petang untuk kesemua persimpangan yang dikaji di sepanjang Jalan Tun Hamdan Sheikh Tahir dan Jalan Gelugor ditunjukkan dalam Rajah 2. Graf tersebut menunjukkan bahawa waktu puncak pagi berlaku

antara jam 0700 hingga 0800, manakala waktu puncak petang berlaku antara jam 1715 hingga 1815. Isipadu trafik adalah lebih tinggi pada waktu puncak pagi, mencapai 21,907 ukp/j, berbanding 21,758 ukp/j pada waktu petang. Dalam kalangan semua persimpangan yang disiasat, JA mencatatkan isipadu trafik tertinggi pada kedua-dua waktu puncak iaitu 3,694 ukp/j, yang dikaitkan dengan lokasinya yang berhampiran dengan kawasan berpenduduk padat dan zon penjana perjalanan utama. Sebaliknya, JF mencatatkan isipadu trafik terendah, iaitu 719 ukp/j pada waktu pagi dan 855 ukp/j pada waktu petang, kemungkinan disebabkan oleh keterhubungan yang terhad dan kurangnya kemudahan yang menarik perjalanan. Memandangkan kebanyakan persimpangan mencatatkan aliran trafik yang lebih tinggi pada waktu puncak petang berbanding pagi, hanya kadar aliran waktu puncak petang yang digunakan dalam kajian ini.

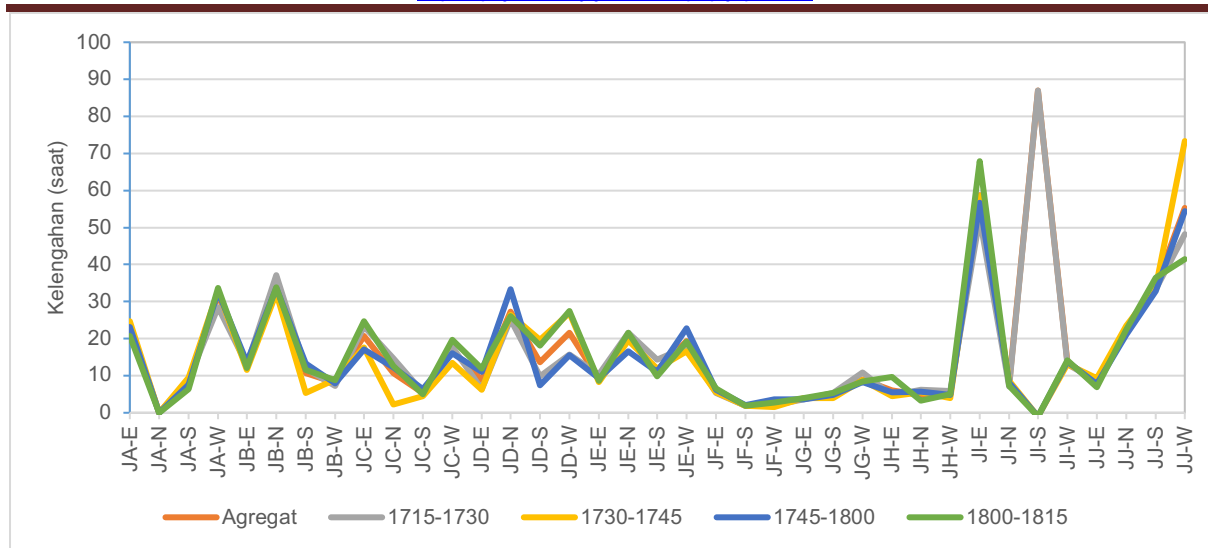


Rajah 2: Variasi isipadu trafik waktu puncak pagi dan petang

Perbandingan antara AIMSUN (Agregat) dengan AIMSUN (Siri Masa)

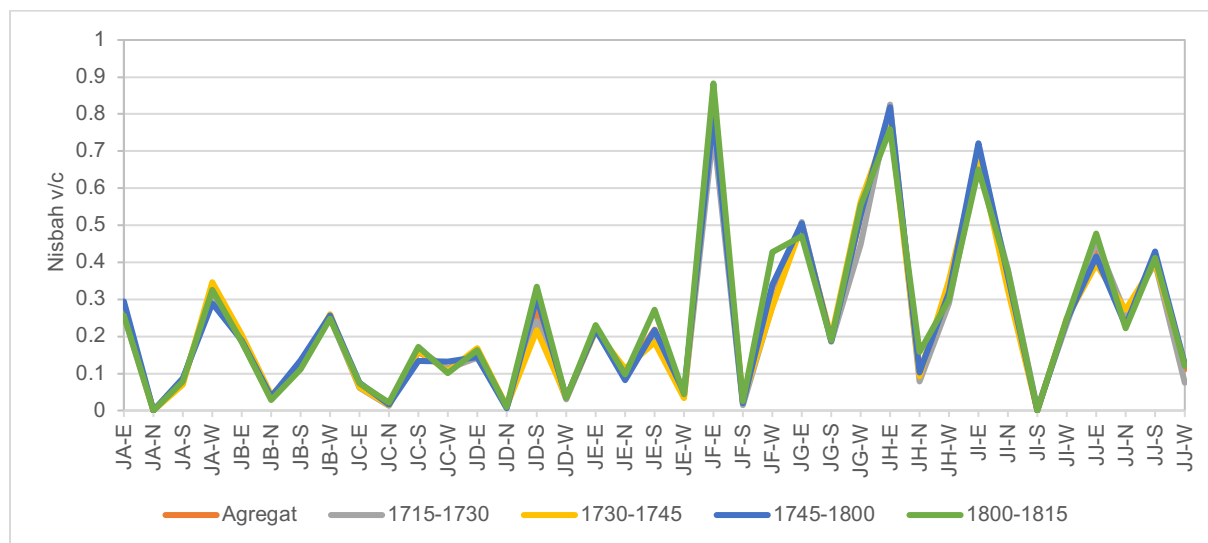
Walaupun hasil AIMSUN Agregat memberikan gambaran prestasi persimpangan yang boleh dipercayai, output dalam siri masa menawarkan pemahaman yang lebih mendalam terhadap turun naik trafik mengikut masa yang mungkin tidak kelihatan dalam analisis agregat. Perbezaan ini amat penting apabila menilai keadaan trafik semasa waktu puncak atau dalam situasi yang mempunyai tahap variasi yang tinggi. Tiga metrik prestasi utama telah dianalisis bagi menilai output model secara menyeluruh, iaitu kelengahan, LOS, dan nisbah v/c.

Kelengahan kekal sebagai penunjuk utama kecekapan sesuatu persimpangan. Rajah 3 menunjukkan analisis perbandingan nilai kelengahan yang diplot berdasarkan output AIMSUN agregat dan siri masa. Bagi persimpangan yang stabil seperti laluan masuk dari arah barat persimpangan JA (JA-W), AIMSUN agregat melaporkan kelengahan sebanyak 31.92 saat, manakala output siri masa berbeza sedikit antara 28.58 hingga 33.62 saat. Julat yang sempit ini mengukuhkan kebolehpercayaan output agregat dalam konteks aliran trafik yang konsisten. Namun, di persimpangan dengan corak permintaan yang lebih tidak menentu, output siri masa menunjukkan variasi yang ketara. Sebagai contoh, laluan masuk dari arah utara JC (JC-N) mengalami kelewatan antara 2.24 hingga 14.72 saat, menunjukkan lonjakan kesesakan yang berlaku secara berselang-seli. Perbezaan seperti ini menyerlahkan kelemahan data agregat, yang mungkin menyembunyikan kesesakan waktu puncak yang penting untuk perancangan operasi dan kajian impak trafik. Begitu juga, JJ-W mencatatkan kemuncak kelengahan sehingga 73.3 saat pada jam 5.30 petang, jauh melebihi nilai agregatnya iaitu 55.2 saat, sekali lagi menekankan keterbatasan penilaian berdasarkan nilai purata terutama untuk persimpangan dengan aliran trafik yang tidak stabil. Oleh itu, LOS, yang merupakan fungsi kepada kelengahan, turut memaparkan corak yang selari. Di banyak laluan dengan keadaan aliran yang konsisten, kedua-dua output agregat dan siri masa menunjukkan gred LOS yang stabil. Sebagai contoh, JA-W dan JB-E mengekalkan LOS C secara menyeluruh, menunjukkan prestasi yang seragam.



Rajah 3: Analisis perbandingan kelengahan berdasarkan AIMSUN (agregat) dan AIMUN (siri masa)

Analisis perbandingan bagi nisbah v/c yang ditunjukkan dalam Rajah 4 turut mengesahkan perbezaan dalam dinamik permintaan trafik. Persimpangan dengan nisbah v/c yang rendah dan stabil, seperti JA-S (agregat = 0.0786 dan julat siri masa = 0.07–0.086), menunjukkan variasi masa yang tidak ketara, sekali gus menyokong ketepatan penggunaan nilai agregat. Namun begitu, laluan dengan aliran trafik yang tinggi seperti JF-E (agregat = 0.81 dan julat siri masa = 0.75–0.88) menunjukkan ketepuan sementara pada selang masa tertentu. Situasi ini amat penting dalam analisis v/c , kerana pelampauan ambang kapasiti secara bersifat sementara boleh mengakibatkan kesan barisan kenderaan yang ketara, walaupun nisbah agregat kelihatan masih boleh diterima. Oleh itu, analisis v/c menggunakan output siri masa menjadi sangat penting dalam perancangan proaktif, khususnya dalam keadaan trafik yang hampir mencapai kapasiti maksima.

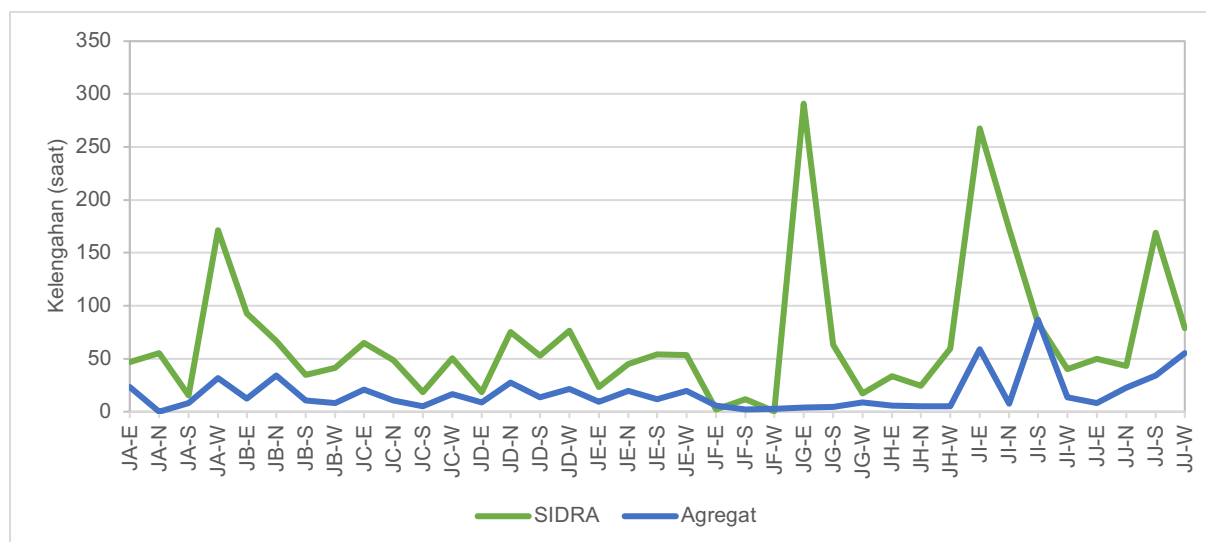
Rajah 4: Analisis perbandingan nisbah v/c berdasarkan AIMSUN (agregat) dan AIMUN (siri masa)

Secara keseluruhannya, dapatan ini mengukuhkan nilai tambah yang signifikan bagi output siri masa dalam model penugasan trafik dinamik berasaskan simulasi. Walaupun output agregat berguna untuk tujuan perancangan umum dan pelaporan, ia mungkin menyembunyikan isu prestasi sementara yang penting bagi pengurusan operasi. Analisis siri masa membolehkan perancang mengenal pasti ketidakefisienan semasa waktu puncak, mengesan gangguan trafik yang bersifat sementara pada masa tertentu, dan merangka strategi mitigasi yang paling sesuai untuk keadaan trafik yang paling sesak. Tahap perincian ini amat penting dalam kajian impak trafik, di mana respons bersifat setempat dan sensitif terhadap masa sering menjadi faktor penentu dalam kelulusan projek dan penerimaan orang awam.

Perbandingan antara SIDRA dengan AIMSUN (Agregat)

Analisis perbandingan antara output SIDRA dan AIMSUN agregat secara konsisten menunjukkan perbezaan ketara dalam anggaran metrik prestasi utama, sekali gus menunjukkan keterbatasan model statik dalam mencerminkan dinamik trafik dunia sebenar. Dalam kesemua persimpangan yang dikaji, SIDRA secara konsisten menghasilkan anggaran kelengahan yang lebih tinggi berbanding AIMSUN agregat, terutamanya dalam senario trafik sederhana hingga tinggi, di mana kesan interaksi trafik dinamik adalah lebih ketara.

Seperti yang dinyatakan sebelum ini, masa kelengahan merupakan salah satu penunjuk paling kritikal dalam menilai prestasi persimpangan, dan ia jelas menunjukkan perbezaan ketara antara dua pendekatan pemodelan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5. Sebagai contoh, di JI-E, SIDRA menganggarkan kelengahan sebanyak 267.50 saat, manakala AIMSUN menunjukkan nilai yang lebih sederhana iaitu 58.80 saat. Perbezaan yang amat ketara juga dapat dilihat di JG-E, di mana SIDRA menganggarkan kelengahan yang sangat tinggi sebanyak 291 saat, berbanding hanya 3.78 saat dalam output AIMSUN agregat. Perbezaan ini berpunca daripada keterbatasan metodologi model statik dalam mewakili dinamik trafik yang kompleks dalam keadaan sesak. Dalam senario terlebih tepu seperti di JG-E, di mana aliran trafik mencecah 1,900 kenderaan/jam, model trafik statik SIDRA menganggap permintaan adalah tetap dan tidak mengambil kira tingkah laku pemandu yang adaptif. Sebaliknya, AIMSUN mensimulasikan interaksi yang berubah mengikut masa, membolehkan kenderaan menukar laluan, melaraskan jarak antara kenderaan, atau diagihkan semula dalam rangkaian, sekaligus dapat mengurangkan kesesakan di JG-E dan menghasilkan nilai kelengahan yang jauh lebih rendah. Namun begitu, perbezaan antara kedua-dua model adalah kurang ketara dalam senario beraliran rendah, di mana aliran trafik lebih stabil dan penyesuaian dinamik memainkan peranan yang lebih kecil. Sebagai contoh, di JF-E, AIMSUN dan SIDRA memberikan anggaran kelengahan yang hampir sama, masing-masing 5.90 saat dan 2.20 saat. Keputusan ini menunjukkan bahawa model statik mungkin gagal menangkap tingkah laku adaptif pemandu seperti penukaran laluan atau penggunaan jurang. Salah tafsir terhadap keadaan di persimpangan terlebih tepu ini mengukuhkan lagi nilai penggunaan alat dinamik dalam persekitaran trafik yang kompleks.



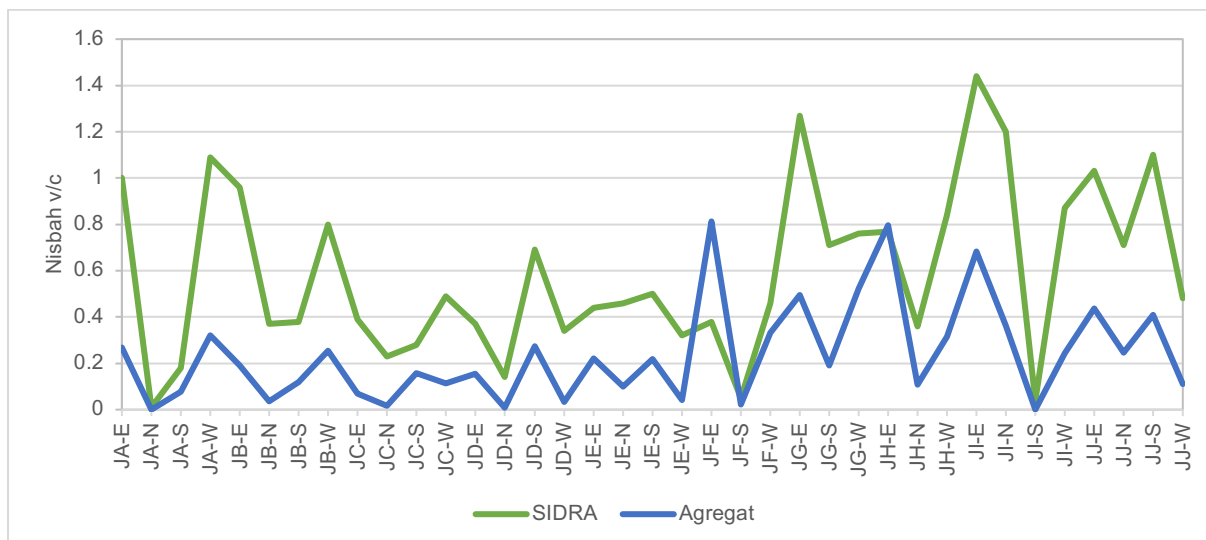
Rajah 5: Analisis perbandingan kelengahan berdasarkan SIDRA dan AIMSUN (agregat)

Selain itu, gred LOS, yang memberikan ukuran kualitatif terhadap kecekapan persimpangan berdasarkan kelengahan, turut menunjukkan perbezaan antara kedua-dua model. SIDRA sering memberikan gred LOS yang lebih rendah, sering kali E atau F di pelbagai persimpangan, manakala hasil daripada AIMSUN menunjukkan julat gred yang lebih meluas, dengan beberapa persimpangan masih mencapai LOS C atau D walaupun di bawah keadaan permintaan yang serupa. Sebagai contoh, JA-N telah diberi LOS A oleh AIMSUN, manakala SIDRA mengklasifikasikannya sebagai LOS E, walaupun nilai v/c dan kelengahan adalah minimum, menunjukkan kemungkinan berlakunya lebihan anggaran terhadap kekangan operasi dalam model SIDRA. Begitu juga, JJ-S menerima LOS F dalam SIDRA, tetapi hanya LOS E dalam AIMSUN, dengan masa kelengahan yang dilaporkan menunjukkan keadaan trafik yang lebih sederhana dalam model dinamik tersebut.

Satu perbezaan penting turut ditemui dalam penganggaran nisbah v/c , yang mengukur tahap ketepuan di sesuatu persimpangan. Nisbah v/c melebihi 1.0 menunjukkan bahawa permintaan melebihi kapasiti, yang lazimnya membawa kepada keadaan aliran trafik yang tidak stabil dan kelengahan yang

berlebihan. SIDRA kerap menganggarkan nisbah v/c menghampiri atau melebihi 1.0, sering kali mencadangkan keadaan terlebih tepu walaupun dalam senario yang mana AIMSUN menunjukkan keadaan trafik yang masih terkawal. Sebagai contoh, berdasarkan hasil yang ditunjukkan dalam Rajah 6, di JG-E, SIDRA menghasilkan nisbah v/c setinggi 1.27, manakala AIMSUN menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah iaitu 0.4959. Corak yang sama dapat dilihat di JI-E, dengan SIDRA melaporkan nilai v/c yang tinggi iaitu 1.44 berbanding dengan 0.6829 oleh AIMSUN. Perbezaan ini mencadangkan bahawa SIDRA berpotensi mendorong kepada reka bentuk berlebihan, dengan mencadangkan penambahbaikan infrastruktur yang tidak diperlukan seperti penambahan lorong atau penaiktarafan sistem isyarat, yang boleh meningkatkan kos projek secara tidak wajar. Sebaliknya, nilai v/c yang lebih rendah dalam AIMSUN mencerminkan keupayaannya untuk memodelkan pengagihan semula trafik, yang membolehkan pengurangan ketepuan setempat melalui penyesuaian di peringkat rangkaian. Keupayaan dinamik ini memastikan penilaian yang lebih tepat tentang bila dan di mana kesesakan benar-benar menghalang aliran trafik, sekali gus membolehkan pelaksanaan intervensi yang lebih berfokus dan kos efektif.

Perbezaan ini turut dipengaruhi oleh pendekatan SIDRA yang mengagregatkan prestasi pada tahap laluan persimpangan, yang sama ada mengaburkan atau membesar-besarkan kesan dinamik spesifik lorong. Sebaliknya, AIMSUN menjalankan analisis terperinci mengikut lorong, yang lebih berkesan dalam menilai variasi sebenar di lapangan terutamanya dalam persekitaran dengan tingkah laku pemandu yang heterogen. Ini membolehkan pemahaman yang lebih kontekstual tentang di mana dan bagaimana kelengahan berlaku, menjadikan AIMSUN lebih sesuai untuk menilai persimpangan bandar yang kompleks.



Rajah 6: Analisis perbandingan nisbah v/c berdasarkan SIDRA dan AIMSUN (agregat)

Secara keseluruhannya, dapatan ini menunjukkan bahawa walaupun SIDRA mampu memberikan gambaran luas dan konservatif mengenai prestasi persimpangan, ia tidak memiliki ketepatan yang diperlukan untuk penilaian trafik terperinci dalam persekitaran yang dinamik. AIMSUN, dengan keupayaan untuk memodelkan interaksi kenderaan dan perubahan trafik mengikut masa walaupun dalam hasil agregat, menyediakan asas yang lebih tepat dan realistik untuk perancangan infrastruktur dan proses membuat keputusan yang berasaskan data.

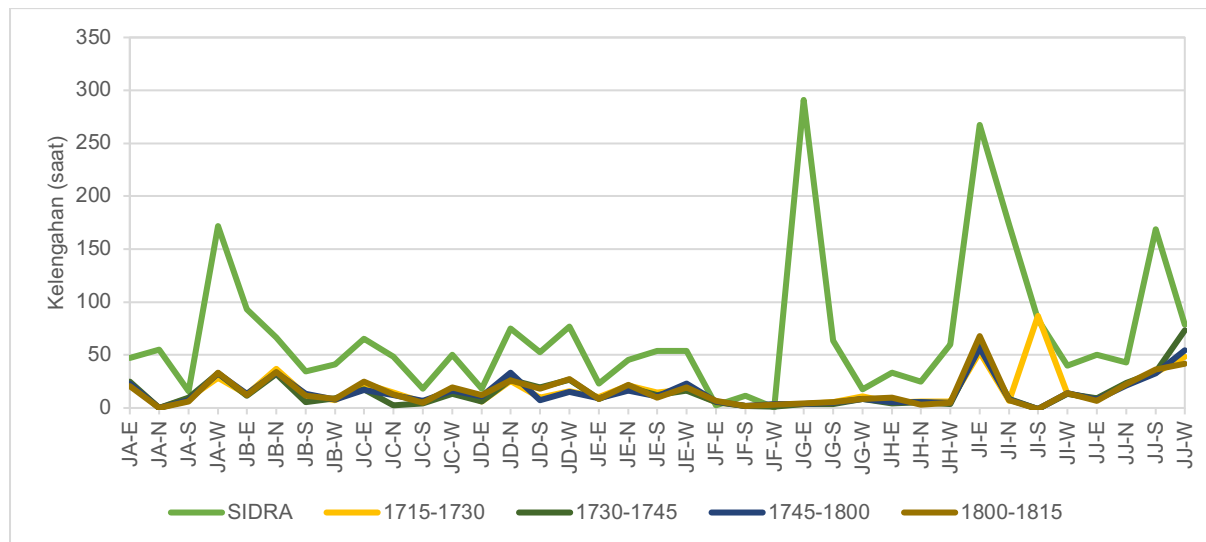
Perbandingan antara SIDRA dengan AIMSUN (Siri Masa)

Output AIMSUN dalam siri masa turut mengukuhkan lagi keterbatasan pemodelan statik SIDRA. Tidak seperti SIDRA yang hanya menyediakan satu set nilai tetap bagi keseluruhan tempoh analisis, output siri masa daripada AIMSUN menunjukkan peralihan keadaan trafik dari semasa ke semasa, sekali gus membolehkan penilaian yang lebih terperinci dan peka terhadap konteks setempat.

Dalam perbandingan output kelengahan, SIDRA secara konsisten melaporkan nilai kelengahan yang lebih tinggi berbanding dengan output siri masa AIMSUN seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 7. Sebagai contoh, laluan masuk dari arah timur persimpangan JI (JI-E), SIDRA mencatatkan kelengahan sebanyak 267.5 saat, manakala output siri masa AIMSUN melaporkan julat kelengahan yang jauh lebih rendah, iaitu antara 52.6 hingga 67.9 saat. Corak yang sama turut diperhatikan di JA-W, di mana SIDRA mencatatkan 171.6 saat, berbanding hanya 28.6 hingga 33.6 saat dalam output siri masa AIMSUN. Perbezaan ini mungkin berpunca daripada pendekatan SIDRA

dalam memodelkan aliran tepu dan barisan kenderaan dalam keadaan terlebih tepu, yang sering mengandaikan ketibaan berkumpul secara tetap dan masa isyarat yang sama. Sebaliknya, AIMSUN mengambil kira tingkah laku dan interaksi kenderaan individu, menghasilkan anggaran kelengahan yang lebih dinamik dan kadangkala lebih optimistik. Namun begitu, di persimpangan yang kurang sesak, perbezaan antara kedua-dua model menjadi lebih kecil. Sebagai contoh, JD-E mencatatkan kelengahan 18.4 saat dalam SIDRA berbanding 6.36 hingga 11.90 saat dalam output siri masa AIMSUN, menunjukkan tahap keselarasan yang lebih munasabah dalam keadaan aliran bebas atau isipadu rendah.

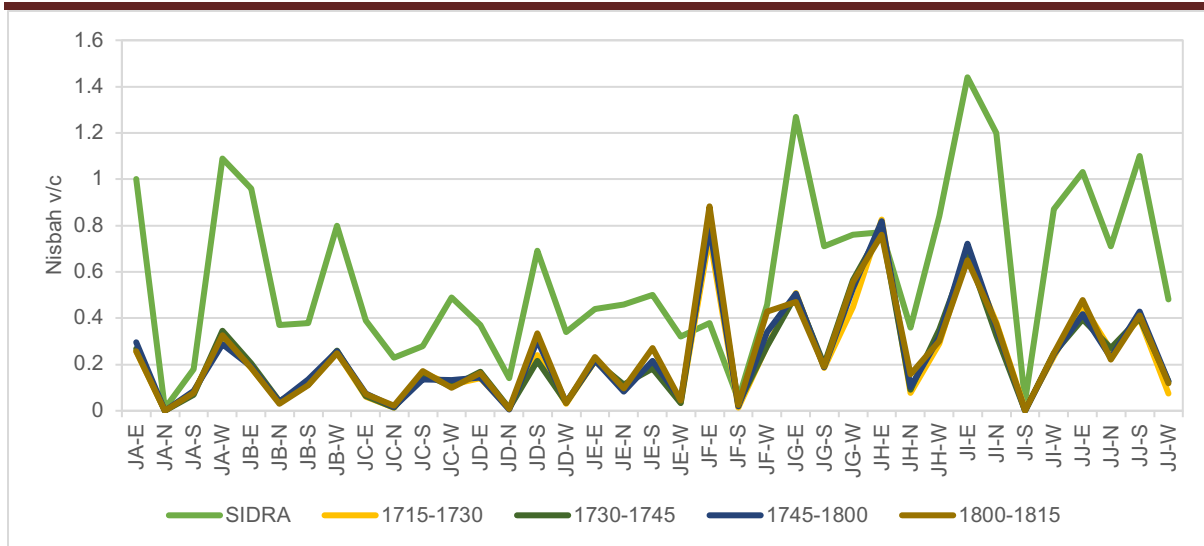
Walau bagaimanapun, terdapat beberapa laluan masuk persimpangan yang menunjukkan keputusan yang selaras dalam kedua-dua model. Sebagai contoh, JD-W dinilai sebagai LOS E (SIDRA) dan LOS F (AIMSUN) sepanjang tempoh analisis, menandakan persetujuan terhadap tahap kesesakan yang kritikal. Perbezaan dan persamaan ini menekankan kepentingan perbandingan antara model, khususnya apabila ambang LOS digunakan sebagai asas bagi keputusan perancangan atau pematuhan peraturan. Variasi LOS mengikut masa dalam AIMSUN turut mendedahkan perubahan prestasi yang lebih terperinci sepanjang waktu puncak yang tidak dapat dimodelkan oleh SIDRA kerana sifatnya yang statik. Lebih penting lagi, output siri masa AIMSUN turut menunjukkan perubahan LOS dalam satu jam puncak, contohnya di JE-E, di mana LOS menurun daripada LOS B kepada LOS D secara berperingkat. Perubahan ini memberikan gambaran yang lebih tepat terhadap kemerosotan prestasi trafik mengikut masa, yang tidak dapat ditunjukkan oleh LOS tetap dalam SIDRA disebabkan oleh sifat pemodelannya yang statik dan tidak responsif terhadap variasi temporal.



Rajah 7: Analisis perbandingan kelengahan berdasarkan SIDRA dan AIMSUN (siri masa)

Namun demikian, perbezaan dalam nisbah v/c adalah lebih ketara di hampir kesemua hala masuk persimpangan, terutamanya di persimpangan yang mengalami tahap kesesakan lebih tinggi. Rajah 8 menunjukkan analisis perbandingan kelengahan yang diperoleh daripada SIDRA berbanding hasil daripada AIMSUN. Berdasarkan graf tersebut, sebagai contoh, JJ-E mencatatkan nilai v/c 1.03 dalam output SIDRA berbanding hanya 0.22 hingga 0.48 dalam output siri masa AIMSUN, menunjukkan kemungkinan kurang penalti diberikan dalam keadaan terlebih tepu dalam AIMSUN, atau sebaliknya, SIDRA mungkin memberikan penalti berlebihan terhadap keadaan tersebut. Walau bagaimanapun, AIMSUN mampu memodelkan fasa pelepasan sementara atau penyuraian trafik antara kitaran isyarat, sekali gus memberikan gambaran yang lebih realistik terhadap dinamik aliran tepu mengikut masa.

Penggunaan output siri masa dalam kajian impak trafik membolehkan sela masa yang mana ambang prestasi yang telah melebihi had dapat dikenalpasti, sekali gus membolehkan pelaksanaan strategi mitigasi yang lebih bersasar. Ini berbeza dengan pendekatan umum SIDRA, yang mungkin mencadangkan intervensi berdasarkan andaian senario paling buruk yang tidak semestinya berterusan sepanjang tempoh puncak. Dengan demikian, analisis siri masa berperanan penting dalam memperkukuh asas pemahaman terhadap dimensi temporal isu trafik, sekali gus membolehkan keputusan dasar dan pelaburan dirumus secara lebih tepat dan kontekstual. Melalui pengecaman selang masa kritikal yang melebihi ambang prestasi, pendekatan ini menyokong pelaksanaan strategi mitigasi yang lebih fokus, berkesan dan sejajar dengan keperluan operasi sebenar rangkaian trafik.



Rajah 8: Analisis perbandingan nisbah v/c berdasarkan SIDRA dan AIMSUN (siri masa)

IMPLIKASI PRAKTIKAL KAJIAN IMPAK TRAFIK DI MALAYSIA: MERAPATKAN JURANG ANTARA KAEDAH STATIK DAN DINAMIK

Penemuan kajian ini menggariskan beberapa implikasi utama terhadap pelaksanaan kajian impak trafik dalam konteks Malaysia, khususnya apabila mempertimbangkan keterbatasan pemodelan penugasan trafik statik melalui perisian seperti SIDRA. Salah satu isu yang paling signifikan ialah sifat konservatif yang wujud secara intrinsik dalam model statik, yang cenderung melebihi anggaran tahap kesesakan akibat ketidakupayaan untuk memodelkan tindak balas trafik secara dinamik. Keadaan ini berpotensi menghasilkan penyelesaian kejuruteraan yang berlebihan, terutamanya dalam persekitaran bandar yang kompleks, di mana fleksibiliti pemandu, corak permintaan yang berubah-ubah, dan sistem kawalan isyarat adaptif merupakan elemen yang lazim. Kebergantungan terhadap model statik dalam menilai sistem trafik yang rumit boleh membawa kepada pelaburan infrastruktur yang tidak bersasar, sekali gus meningkatkan kos projek tanpa peningkatan yang setara dalam kecekapan operasi.

Sebaliknya, pengaplikasian kaedah penugasan trafik dinamik melalui perisian seperti AIMSUN menyediakan pendekatan yang lebih tepat dan peka terhadap konteks setempat, dengan keupayaan untuk mensimulasikan senario trafik masa hadapan secara lebih terperinci dan realistik. Keupayaan AIMSUN untuk menggabungkan faktor seperti permintaan yang berubah-ubah, aliran trafik yang turun naik akibat insiden, serta perubahan dasar seperti peluasan rangkaian jalan raya atau pembangunan guna tanah, meningkatkan lagi aplikasi dan keupayaan ramalan AIMSUN dalam pelaksanaan kajian impak trafik. Tambahan pula, analisis siri masa AIMSUN membolehkan jurutera trafik mengenal pasti corak kesesakan yang berlaku pada waktu tertentu, sekali gus memastikan cadangan yang dikemukakan adalah selaras dengan dinamik trafik sebenar dan bukannya berdasarkan andaian umum waktu puncak.

Walaupun model dinamik menawarkan pelbagai kelebihan, pertimbangan kos kekal sebagai faktor kritikal dalam pemilihan kaedah pemodelan. SIDRA masih berfungsi sebagai penyelesaian yang kos efektif bagi persimpangan yang ringkas dan bertrafik rendah, di mana kerumitan dinamik adalah minimum dan manfaat penugasan trafik dinamik mungkin tidak setimpal dengan sumber tambahan yang diperlukan. Namun demikian, bagi pembangunan berskala besar atau rangkaian bandar yang kompleks, keterbatasan pemodelan statik menjadi semakin ketara, dan penggunaan kaedah penugasan trafik dinamik bukan sahaja memberi kelebihan, malah menjadi keperluan asas bagi memastikan pengurusan trafik yang mampan dan berdaya tahan.

Memandangkan SIDRA masih merupakan perisian yang paling meluas digunakan dalam kalangan perunding trafik di Malaysia, terdapat keperluan mendesak untuk menggalakkan integrasi teknik pemodelan dinamik ke dalam amalan standard kajian impak trafik. Walaupun SIDRA berfungsi dengan baik dalam penilaian awal atau untuk analisis saringan, ia tidak seharusnya dijadikan satu-satunya rujukan untuk penilaian yang menyeluruh. Pendekatan progresif yang dicadangkan ialah dengan membuat penilaian berdasarkan output agregat AIMSUN terlebih dahulu bagi mewujudkan garis dasar yang lebih realistik dan mencerminkan interaksi dinamik antara kenderaan, diikuti dengan analisis yang diperhalusi melalui output siri masa AIMSUN bagi mengenal pasti variasi temporal yang kritikal untuk perancangan intervensi secara lebih tepat dan bersasar.

Selain itu, pihak berkuasa kawal selia wajar digalakkan untuk menerima pakai garis panduan yang mewajibkan atau memberi insentif kepada penggunaan model penugasan trafik dinamik,

khususnya bagi projek yang berimpak tinggi atau berkepentingan strategik. Peralihan ini akan memastikan bahawa kajian impak trafik menjadi lebih responsif terhadap kerumitan sistem trafik moden, sekali gus mengelakkan risiko reka bentuk berlebihan. Pendekatan ini turut membolehkan perancang memberi tumpuan kepada penyelesaian yang lebih terarah, berdaya kos, dan sejajar dengan keperluan serta cabaran trafik sebenar yang dikenal pasti melalui analisis empirikal. Dengan berbuat demikian, penggunaan model penugasan trafik dinamik akan menyokong pendekatan perancangan yang lebih menyeluruh di peringkat rangkaian, selari dengan aspirasi nasional ke arah mobiliti bandar yang mampan serta pembangunan infrastruktur pengangkutan yang lebih berdaya tahan.

KESIMPULAN

Kajian ini secara jelas membuktikan bahawa model penugasan trafik dinamik dapat menyediakan kerangka analisis yang lebih kukuh dan fleksibel bagi pelaksanaan kajian impak trafik dalam persekitaran bandar yang semakin kompleks dan dinamik. Analisis perbandingan antara SIDRA dan AIMSUN telah menunjukkan perbezaan ketara dalam penganggaran metrik prestasi utama seperti kelengahan, nisbah isipadu terhadap kapasiti (v/c), dan tahap perkhidmatan (LOS). Perbezaan ini menonjolkan risiko yang berpotensi berlaku sekiranya penilaian trafik terlalu bergantung kepada model statik seperti yang digunakan dalam perisian SIDRA, yang meskipun sesuai untuk penilaian asas atau persimpangan berkekompleksiti rendah, tetapi terhad dalam keupayaannya untuk memodelkan tingkah laku trafik yang berubah mengikut masa serta interaksi merentasi rangkaian jalan raya yang kompleks. Sebaliknya, kaedah analisis agregat dalam model penugasan dinamik AIMSUN berfungsi sebagai penghubung yang berkesan antara pendekatan statik dan dinamik dengan mewakili variasi trafik sepanjang tempoh waktu puncak, sekali gus memberikan gambaran prestasi rangkaian yang lebih realistik dan responsif berbanding SIDRA. Penggunaan output siri masa AIMSUN pula dapat meningkatkan tahap resolusi analisis dengan membolehkan pengenalan selang masa kritikal di mana prestasi trafik merosot, seterusnya menyokong pelaksanaan intervensi yang lebih bersasar dan berkesan. Tahap perincian ini memastikan bahawa keputusan perancangan tidak lagi bergantung kepada purata umum semata-mata, sebaliknya berdasarkan data empirikal yang sensitif terhadap masa dan konteks operasi sebenar.

Integrasi antara model statik dan dinamik menawarkan pendekatan hibrid yang bersifat strategik dan praktikal bagi perunding trafik di Malaysia. Walaupun SIDRA terus memainkan peranan dalam penilaian awal dan analisis persimpangan yang ringkas, khususnya apabila wujud kekangan sumber, penggunaannya wajar dilengkapi dengan model dinamik seperti AIMSUN, terutamanya bagi rangkaian trafik yang padat atau sedang mengalami pertumbuhan pesat. Pendekatan dua model ini membolehkan peruntukan sumber dilakukan secara lebih cekap, memastikan pelaburan infrastruktur sejajar dengan keperluan sebenar dan tidak berlebihan mahupun tidak mencukupi.

Seiring dengan kemajuan pembangunan bandar dan peningkatan kerumitan sistem trafik di Malaysia, terdapat keperluan mendesak untuk menjadikan pendekatan dinamik berasaskan data sebagai amalan standard dalam pelaksanaan kajian impak trafik. Dapatan kajian ini menyokong perubahan strategik ke arah penerapan model penugasan trafik dinamik secara lebih meluas dalam arus perdana bidang perundingan trafik, bagi menghasilkan keputusan yang lebih tepat, boleh dipercayai, dan mudah disesuaikan dengan perubahan dasar, gangguan operasi, serta pertumbuhan permintaan.

Sebagai rumusan, kajian ini telah memenuhi objektifnya dengan menyokong penggunaan model penugasan trafik dinamik secara meluas dalam meningkatkan ketepatan, kebolehpercayaan, dan keberkesanan praktikal kajian impak trafik di Malaysia. Dengan memanfaatkan kekuatan kedua-dua model SIDRA dan AIMSUN serta menyedari keterbatasan masing-masing, perancang dan jurutera trafik dapat merangka strategi pengurusan trafik yang lebih responsif dan berdaya tahan, sekali gus memastikan penilaian trafik berkembang seiring dengan realiti kompleks rangkaian pengangkutan bandar masa kini.

Penghargaan

Para penulis ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Universiti Sains Malaysia atas pembiayaan penyelidikan ini di bawah geran RUTeam, R502-KR-RUT001-0008580074-K134.

Rujukan

- Angkoso, A., Shofwan, M., & Cahyono, D. (2021). Civilla : Jurnal Teknik Sipil Universitas Islam Lamongan Volume 06 Number 2 Year 2021 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System For Forecasting Traffic Volume (Case Study Of National Road Km 41 Kamal). <https://doi.org/10.30736/cvl.v2i2>
- Al-Bahr, T. M. A. (2021). Modeling on the Effect of Geometric and Traffic Parameters on Speed-Flow-Geometry Relationship for Urban Roads in Johor Bahru Street Network [Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia]. <http://eprints.utm.my/102390/>

- Ali, M., Sheng, T. K., Yusof, K. M., Suhaili, M. R., Ghazali, N. E., & Ali, S. (2019). The dynamics of traffic congestion: A specific look into Malaysian scenario and the plausible solutions to eradicate it using machine learning. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 15(2), 1086–1094. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v15.i2.pp1086-1094>
- Ashfaq, M., Gu, Z., Waller, S. T., & Saberi, M. (2021). Comparing Dynamic User Equilibrium and Noniterative Stochastic Route Choice in a Simulation-Based Dynamic Traffic Assignment Model: Practical Considerations for Large-Scale Networks. *Journal of Advanced Transportation*. <https://doi.org/10.1155/2021/6667335>
- Barcelo, J., Casas, J., García, D. & Perarnau, J. (2005). Methodological Notes on Combining Macro-Meso and Micro Models for Transportation Analysis. *Proceedings of the Workshop on Modeling and Simulation*, Sedona, AZ, USA. https://www.researchgate.net/publication/242154775_METHODOLOGICAL_NOTES_ON_COMBINING_MACRO_MESO_AND_MICRO_MODELS_FOR_TRANSPORTATION_ANALYSIS
- Baza-Solares, N., Velasquez-Martínez, R., Torres-Bohórquez, C., Martínez-Estupiñán, Y., Poliziani, C. (2022). Traffic Simulation with Open-Source and Commercial Traffic Microsimulators: A Case Study. *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, 24(2), E49–62. <https://doi.org/10.26552/com.c.2022.2.e49-e62>
- Chin, W. A., Leong, L. V., Mohd Shafie, S. A., Al-Jameel, H. A., & Goh, W. C. (2025). Assessment of Route Choice Models for Dynamic Traffic Assignment using Microscopic Simulation. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 15(2), 20990–20997. <https://doi.org/10.48084/etasr.9854>
- Dowling, R., Skabardonis, A., Alexiadis, V. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. Washington, DC. Federal Highway Administration; FHWA-HRT-04-040. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/41797>
- Gliebe, J., & Bergman, A. (2011). Case Study Evaluation of Dynamic Traffic Assignment Tools. Interagency Agreement 24620. Work Order Contract #5. Produced by the Center for Urban Studies, Portland State University, for the Oregon Department of Transportation, Planning Analysis Unit. <https://files.core.ac.uk/download/pdf/37776064.pdf>
- Hasanpour, M.Z., Ahadi, M.R., Moghadam, A.S., Behzadi, G.A. (2017) Variable Speed Limits: Strategies to Improve Safety and Traffic Parameters for a Bottleneck. *Engineering, Technology and Applied Science Research (ETASR)*, 7(2), p 1535–1539. <https://doi.org/10.48084/etasr.831>
- Helbing, D., Hennecke, A., Shvetsov, V., & Treiber, M. (2002). Micro-and Macro-Simulation of Freeway Traffic. *Mathematical and Computer Modelling*, 35(5-6), 517–547. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(02\)80019-X](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(02)80019-X)
- Ismail, A. & Mokhtar, N.S. (2018) Traffic impact assessment on a new commercial development in the neighbourhoods of Ampang Town in Selangor. *Jurnal Kejuruteraan*, 1(5), 43–51. [https://dx.doi.org/10.17576/jkukm-2018-si1\(5\)-07](https://dx.doi.org/10.17576/jkukm-2018-si1(5)-07)
- Leong, L.V., Mahdi, M.B. & Chin, K.K. (2015) Microscopic simulation on the design and operational performance of diverging diamond interchange. In: Gastaldi M, editor. *Transportation Research Procedia*. Proceedings of the 4th International Symposium of Transport Simulation-ISTS'14; 2014 June 1-4 June; Corsica, France. Amsterdam: Elsevier, 198–212. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.03.016>
- Lu, Q., & Tettamanti, T. (2021). Traffic control scheme for social optimum traffic assignment with dynamic route pricing for automated vehicles. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 49(3), 301–307. <https://doi.org/10.3311/PPTR.18608>
- May, L.W., Rahman, R.A., Hassin, M.F., Md Diah, J., Mashros, N., Abdullah, M.E., et al. (2019). An Overview of the Practice of Traffic Impact Assessment in Malaysia. *International Journal Engineering Advanced Technology*, 8(5C), 914–921. <https://doi.org/10.35940/ijeat.E1130.0585C19>
- Ozbay, K., Mudigonda, S., Student, G., & Bartin, B. (2006). Microscopic Simulation and Calibration of an Integrated Freeway and Toll Plaza Model. Paper presented at: The Transportation Research Board 85th Annual Meeting, 2006 Jan 22-26; Washington DC
- Perveen, S., Yigitcanlar, T., Kamruzzaman, M., & Agdas, D. (2020). How can transport impacts of urban growth be modelled? An approach to consider spatial and temporal scales. *Sustainable Cities and Society*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102031>
- Rahimi, A.M., Dulebenets, M.A., Mazaheri, A. (2021). Evaluation of Microsimulation Models for Roadway Segments with Different Functional Classifications in Northern Iran. *Infrastructures*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/infrastructures6030046>
- Ranjitkar, P., Shahin, A., & Shirwahi, F. (2014). Evaluating Operational Performance of Intersections Using SIDRA. *The Open Transportation Journal* (Vol. 8). <https://doi.org/10.2174/1874447801408010050>
- Rojo, M. (2020). Evaluation of traffic assignment models through simulation. *Sustainability* (Switzerland), 12(14). <https://doi.org/10.3390/su12145536>
- Saxena N, Irannezhad E, & Soet W. (2021). An Overview of Dynamic Traffic Assignment Models for Practitioners. *Australasian Transport Research Forum*, Proceedings 8-10 December 2021, Brisbane, Australia. Publication website: <http://www.atrf.info>
- Sloboden, J. Lewis, J., Alexiadis, V. Chiu Y.C., & Nava, E. (2012). *Traffic Analysis Toolbox Volume XIV: Guidebook on the Utilization of Dynamic Traffic Assignment in Modeling*. <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop13015/index.htm>
- Venkatcharyulu, S., & Mallikarjunareddy, V. (2020). Traffic volume Analysis of Newly Developing semi-urban Road. *E3S Web of Conferences*, 184. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401116>
- Zou, M., Chen, X. (Michael), Yu, H., Tong, Y., Huang, Z., Li, M., & Zou, H. (2013). Dynamic Transportation Planning and Operations: Concept, Framework and Applications in China. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 2332–2343. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.262>