مدل‌سازی جریان ترافیک نامنظم: گذار از رویکردهای یک‌بعدی به دوبعدی

مقاله علمی – پژوهشی

مهدی رفعتی فرد*، استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی شهر هوشمند، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

افشین شریعت مهیمنی، استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی ترافیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rafati@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵– پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

صفحه ۳۶-۲۱

چکیده

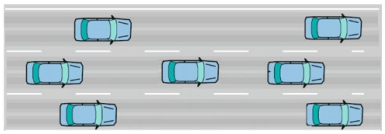
سیستم‌های نامنظم ترافیک به سیستم‌هایی اشاره دارند که در آن‌ها خطوط عبوری مشخص نبوده و یا نظمی در خطوط عبوری قابل‌مشاهده نیست. در جریان نامنظم ترافیک، وسایل نقلیه به جای حرکت در خطوط موازی، به‌طور تصادفی در سطح جاده توزیع شده و موقعیت جانبی خود را به‌طور مکرر تغییر می‌دهند. در این شرایط، مسیر حرکت وسایل نقلیه در امتداد عرض جاده ناپایدارتر و غیرقابل پیش‌بینی‌تر از جریان‌های منظم ترافیک است این خصوصیت جریان‌های نامنظم ایجاب می‌کند که مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای تحلیل این جریان‌ها، نه‌تنها ُبعد طولی بلکه ُبعد جانبی را نیز در نظر بگیرند. مشاهدات نشان می‌دهند که مشخصات هندسی معابر نظیر عرض معبر و قوس‌های افقی، فارغ از منظم یا نامنظم بودن جریان ترافیک در آن‌ها، تأثیر بسزایی بر رفتار جریان ترافیک دارند. این یافته‌ها بر لزوم استفاده از مدل‌های دوبعدی در توصیف جریان ترافیک تأکید دارند. بااین‌حال، بسیاری از نظریه‌های موجود در توصیف جریان ترافیک به‌صورت یک‌بعدی و با تمرکز بر ُبعد طولی ارائه شده‌اند. با توجه به اهمیت موضوع به‌ویژه در کشور ایران به دلیل جریان ترافیک نامنظم ناشی از عدم رعایت خطوط عبوری توسط رانندگان و همچنین ناهمگنی وسایل نقلیه، این پژوهش ضمن بررسی رویکردهای کلان نگر و خردنگر مدل‌سازی جریان ترافیک، بر لزوم تقویت رویکردهای دوبعدی که هنوز در مراحل ابتدایی تحقیق و توسعه خود هستند، تأکید می‌نماید. با در نظر گرفتن پیشرفت‌های چشمگیر اخیر در توان محاسباتی، تکنیک‌های مدل‌سازی و توسعه ابزارهای فناورانه جهت جمع‌آوری داده، لازم است مدل‌های دوبعدی معتبری برای تحلیل دقیق‌تر جریان‌های ترافیک توسعه، کالیبره و اعتبارسنجی شوند.

واژه‌های کلیدی: جریان ترافیک نامنظم، عدم رعایت خطوط عبوری، خردنگر، کلان نگر، مدل دو بعدی

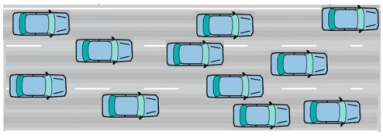
۱- مقدمه

خصوصیات جریان ترافیک در بسیاری از اقتصادهای در حال توسعه، ازجمله ایران و برخی از کشورهای جنوب و جنوب شرق آسیا، به‌طور قابل‌توجهی با خصوصیات جریان ترافیک در بیشتر کشورهای توسعه‌یافته اروپایی و آمریکایی متفاوت است. جریان ترافیک و معابر در این کشورها، که توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل در آن‌ها چه از نظر کمی و چه از نظر کیفی هنوز به سطح مطلوب خود نرسیده است، دارای مشخصه‌هایی ازجمله عدم رعایت خطوط عبوری، تنوع زیاد در مشخصات هندسی معابر و مواجهه مکرر با تداخلات جانبی ناشی از فعالیت‌های کنار جاده‌ای و حرکت عابران پیاده به‌ویژه در معابر شهری، ناهمگنی در ترکیب وسایل نقلیه که در آن انواع مختلفی از وسایل نقلیه با ابعاد متفاوت (به‌ویژه در جهت عرضی) و خصوصیات عملکردی گوناگون در جریان ترافیک حضور دارند و همچنین قبول فرصت گام‌به‌گام که وسایل نقلیه ممکن است برای انجام مانور خود مجموعه‌ای از فرصت‌های کوچک‌تر را به‌تدریج قبول کنند، می‌باشد. تمامی این عوامل موجب ایجاد جریان ترافیک

نامنظمی می‌شوند که در آن وسایل نقلیه به‌صورت پراکنده و تصادفی در سطح معبر در حرکت هستند. همان‌گونه که در شکل ۱ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است، این بی‌نظمی ظاهری برخلاف جریان ترافیک منظم یا خط مبنا که در آن خطوط منظمی از وسایل نقلیه مشاهده می‌شود، می‌باشد.



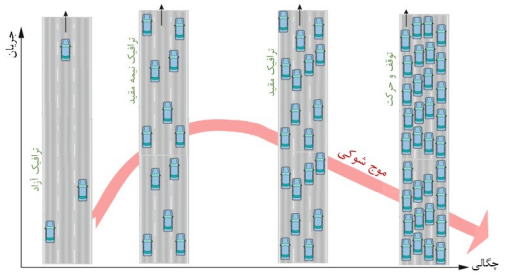
الف) جریان ترافیک منظم



ب) جریان ترافیک نامنظم

شکل ۱. جریان ترافیک الف) منظم ب) نامنظم

درجه بی‌نظمی در این سیستم‌های نامنظم به شرایط ترافیکی و ترکیب جریان ترافیک وابسته است. به‌طوری‌که برای ترکیب جریان همگن، همان‌گونه که در شکل۲ نشان داده‌شده است، در سطوح سرویس بالا درجه بی‌نظمی ناچیز بوده و رانندگان تمایل به رعایت خطوط عبوری داشته و عملاً تفاوتی با جریان ترافیک منظم وجود ندارد. با افزایش تراکم ترافیک درجه بی‌نظمی افزایش‌یافته و قبل از ازکارافتادگی جریان ترافیک به بیشترین میزان خود می‌رسد. سپس با افزایش بیشتر تراکم ترافیک و تشکیل صف درجه بی‌نظمی کاهش می‌یابد.



شکل۲. چگونگی حرکت خودروها در یک سیستم ترافیکی نامنظم در شرایط ترافیکی مختلف (Rafati Fard, 2019)

مدل‌سازی چنین جریان ترافیکی نیازمند تغییری اساسی در رویکرد مدل‌سازی و حرکت از مدل‌های یک‌بعدی موجود به سمت مدل‌های دوبعدی است. به طور سنتی، مدل‌سازی جریان ترافیک با این فرض انجام می‌شود که وسایل نقلیه عمدتاً در جهت طولی حرکت کرده و هر از چند گاهی از طریق انجام مانور تغییرخط عبوری تغییراتی در موقعیت جانبی خود ایجاد می‌نمایند. بااین‌حال، هنگامی‌که مشخصه‌های ذکرشده در جریان ترافیک وجود داشته باشند، دیگر نمی‌توان جریان ترافیک را به‌عنوان سیستمی یک‌بعدی که در آن وسایل نقلیه تنها در جهت طولی با یکدیگر تعامل دارند در نظر گرفت. از این‌رو لازم است مدل‌هایی با فرض واکنش راننده به محیط پیرامونی و این‌که وسایل نقلیه با ویژگی‌های هندسی معبر در جهت عرضی و همچنین یکدیگر در هر دو جهت طولی و عرضی تعامل دارند، توسعه یابد. چنین چارچوب‌های دوبعدی همچنین این امکان را فراهم می‌کنند که ابعاد متنوع وسایل نقلیه در جریان ترافیک، مانند آنچه که عمدتاً در نواحی مرکزی شهرها در ایران مشاهده می‌شود نیز قابل مدل‌سازی باشد(Rafati Fard, 2019). پژوهش‌های انجام‌شده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که در جریان‌های منظم ترافیک (خط مبنا) نیز اندرکنش‌های جانبی بین وسایل نقلیه‌ای که در یک جهت و در خطوط مجاور در حال حرکت هستند، وجود دارد (B. Li, 2024; Ponnu & Coifman, 2015). علاوه بر این، تأثیرپذیری جریان ترافیک حتی جریان منظم از ویژگی‌های هندسی مانند عرض خطوط، فاصله جانبی، قوس افقی و قائم بر رفتار رانندگی در ادبیات موضوع به‌خوبی شناخته شده و پذیرفته شده است (Han, Ma, Liang, Yang, & Wu, 2024; Vikram, Mittal, & Chakroborty, 2022; Yu, Zhou, Wang, Wang, & Cui, 2021).

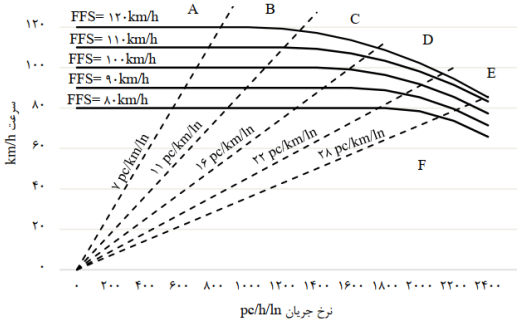
راهنماهای مرتبط با ترافیک بزرگراهی، مانند "راهنمای ظرفیت بزرگراه" در ایالات‌متحده، از نمودارها و فرمول‌های به‌دست‌آمده تجربی برای بیان این تأثیرات استفاده می‌نمایند. حتی پس از تقریباً هشت دهه تحقیق بر روی جنبه‌های مختلف رفتار جریان ترافیک (برای ترافیک‌های منظم)، مهندسان همچنان مجبورند برای پیش‌بینی ظرفیت و کیفیت تردد تحت شرایط مختلف هندسی، به نتایج کاملاً تجربی تکیه کنند. دلیل اصلی این موضوع، نبود یک مدل معتبر و مناسب از جریان ترافیک است که هم اندرکنش‌های جانبی و هم اندرکنش‌های طولی را شامل شود. توسعه مدل‌های استوار دوبعدی جریان ترافیک می‌تواند نیاز به اتکا بیش‌ازحد به فرمول‌ها و نمودارهای تجربی برای طراحی معابر را برطرف نماید. علاوه بر این، نگاه یک‌بعدی به جریان ترافیک نیاز به تفکیک فعالیت رانندگی به وظایف مختلف و مستقل از هم را ایجاد می‌نماید که در اغلب موارد این تفکیک‌ها غیرواقعی بوده و در عمل چنین تفکیک وظایفی وجود ندارد. به عنوان مثال تعقیب خودرو و تغییر خط عبوری به‌عنوان دو فعالیت مختلف و مستقل از هم در نظر گرفته می‌شوند.

درحالی‌که هر دو فعالیت در سطح برنامه‌ریزی تاکتیکی سفر و ناشی از لزوم کاهش زمان سفر با در نظرگیری ملاحظات مرتبط با ایمنی است. در مدل‌سازی یک‌بعدی جریان ترافیک، این تقسیم‌بندی وظایف اجتناب ناپذیر است. چراکه نظریه‌های تعقیب خودرو که حرکت وسایل نقلیه در یک خط عبور را مدل می‌کنند، نمی‌توانند بعد عرضی را در نظر بگیرند و درنتیجه قادر به نمایش خطوط عبوری و مدل‌سازی رفتار تغییر خط وسایل نقلیه نیستند. مدل‌های دوبعدی نیاز به چنین تقسیم‌بندی‌های غیرواقعی را از بین خواهند برد. این مدل‌ها قادر خواهند بود خط سیر وسایل نقلیه را به‌عنوان یک بیان از یک مدل جامع جریان ترافیک توسعه دهند.

به‌طور خلاصه، می‌توان گفت که تحقیقات گسترده و متمرکز در زمینه توسعه مدل‌های دوبعدی جریان ترافیک نه‌تنها برای درک جریان‌های ترافیکی ناهمگن و نامنظم، بلکه برای درک بهتر جریان‌های منظم یا مبتنی بر خط عبوری نیز ضروریست. این درک جامع و عمیق‌تر به کاهش وابستگی به فرمول‌های تجربی در طراحی کمک و درنهایت کیفیت تحلیل‌های ترافیکی را بهبود خواهد بخشید. بر این اساس، پژوهش حاضر به شش بخش تقسیم شده است. در بخش دوم به معرفی و توصیف برخی مشاهدات تجربی که نشان‌دهنده‌ی میزان تأثیر مشخصات هندسی بر حرکت وسایل نقلیه و بر کل جریان ترافیک است و همچنین حرکت دوبعدی وسایل نقلیه در شرایط رانندگی در ایران می‌پردازد. بخش سوم به بحثی مختصر در مورد درک ماهیت دوبعدی جریان‌های ترافیکی نامنظم و منظم اختصاص دارد. بخش‌های چهارم و پنجم به ترتیب به مدل‌سازی‌های خردنگر و کلان نگر انجام‌شده در ارتباط با جریان‌های ترافیکی نامنظم می‌پردازند. بخش آخر نیز به جمع‌بندی و تعیین نیازهای آتی در زمینه مدل‌سازی جریان ترافیک نامنظم می‌پردازد.

۲- برخی از جنبه‌های رفتار رانندگی و جریان ترافیک در ایران

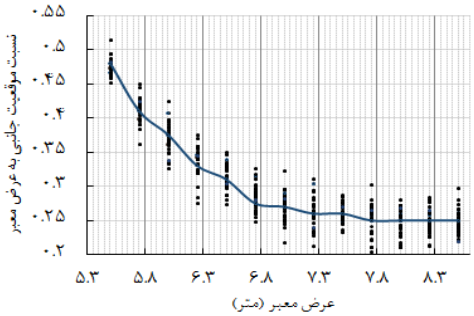
هدف از ارائه برخی مشاهدات تجربی در ارتباط با رفتار رانندگی و جریان ترافیک در این بخش، برجسته‌سازی ماهیت دوبعدی جریان‌های ترافیکی است. شکل (۱) تصویری از نمودار سرعت–جریان (v–q) از "راهنمای ظرفیت بزرگراه‌ها" منتشرشده در سال ۲۰۲۲ که در بسیاری از کشورها ازجمله ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای سرعت‌های جریان آزاد مختلف، که به‌طور ضمنی وابسته به مشخصات هندسی معابر هستند، رفتار جریان‌ها با توجه به نمودارهای v–q متفاوت است. اگرچه این وابستگی رفتار جریان به مشخصات هندسی معابر از دهه‌ها پیش شناخته شده و پذیرفته شده است، بااین‌وجود، چارچوب‌های مدل‌سازی همچنان به‌طور عمده یک‌بعدی باقی مانده‌اند و درنتیجه امکان ادغام تأثیر مشخصات هندسی معابر در مدل‌های رفتاری جریان ترافیک وجود ندارد. لازم به ذکر است، نمودارهای سرعت–جریان نشان داده‌شده در شکل ۳ با توجه به داده‌های مرتبط با جریان‌های ترافیکی در ایالات‌متحده امریکا که جریان‌های منظم و خط مبنا هستند، ایجاد شده است.



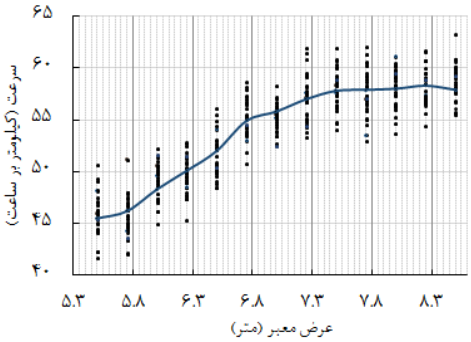
شکل ۳. رابطه سرعت جریان

شکل ٤ تأثیر مشخصات هندسی به‌ویژه عرض معبر بر حرکت وسایل نقلیه در جریان ترافیک غیر خط مبنا را برای تعدادی معبر دوطرفه، دوخطه و بدون جداکننده میانی با عرض متفاوت در شهر تهران را نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت جانبی وسایل نقلیه (اندازه‌گیری شده از لبه راست معبر) به‌صورت کسری از عرض معبر و همچنین سرعت دلخواه رانندگان در یک عرض مشخص رسم شده است.

همان‌گونه که در شکل ۲–الف مشاهده می‌شود، یک وسیله نقلیه تقریباً از وسط کل معبر ($\frac{\text{موقعیت جانبی}}{\text{عرض معبر}} \approx ۰,۵$) برای عرض ٦ متر به تقریباً وسط نیمه راست معبر ($\frac{\text{موقعیت جانبی}}{\text{عرض معبر}} \approx ۰,۲۵$) برای عرض ۸ متر حرکت می‌کند. همچنین میانگین سرعت جریان آزاد وسایل نقلیه با افزایش عرض معبر افزایش می‌یابد (شکل ۲–ب).



الف) موقعیت جانبی خودرو



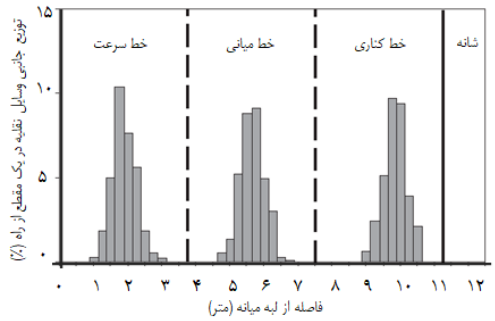
ب) سرعت جریان ترافیک

شکل ٤. تأثیر عرض معبر بر روی الف) موقعیت جانبی خودرو و ب) سرعت جریان ترافیک

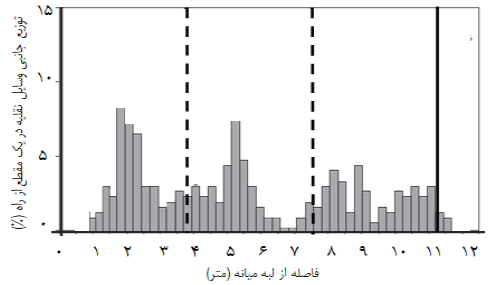
توزیع نامنظم ترافیک در سطح جاده یکی از مهم‌ترین نشانه‌های عدم رعایت خطوط عبوری می‌باشد. به‌عنوان مثال، شکل ۵، موقعیت جانبی خودروهای عبوری از یک مقطع از بزرگراهی در آلمان (شکل ۵- الف) و بزرگراه شهید همت (شکل ۵-ب) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در کشور آلمان که جریان ترافیک خط مبنا بوده و رانندگان خطوط عبوری را رعایت می‌نمایند، خودروها به‌صورت جانبی درون خطوط عبوری خود بر اساس یک توزیع نرمال قرار دارند. درحالی‌که در ایران با توجه به عدم رعایت خطوط عبوری توسط رانندگان، همان‌گونه که مشاهده می‌شود، خودروها به شکل نامنظمی در عرض توزیع شده و درصد قابل‌توجهی از خودروها روی خطوط عبوری حرکت کرده یا حتی بر روی شانه راه رانندگی می‌نمایند.

شکل ٦ خط سیر جانبی تعدادی از خودروها در یک جریان ترافیک نامنظم و غیرخط مبنا در شهر تهران (بزرگراه همت) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در بهترین حالت تنها می‌توان رفتار رانندگی تعداد اندکی از وسیله نقلیه را در یک چارچوب یک‌بعدی مدل‌سازی کرد. مسیر حرکت بیشتر وسایل نقلیه به‌وضوح نشان‌دهنده تغییرات قابل‌توجهی در موقعیت جانبی آن‌ها است که نمی‌توان آن‌ها را در مدل‌سازی نادیده گرفت. علاوه بر این همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این تغییرات جانبی گذرا و موقتی نبوده و در مدت‌زمان کوتاه رخ نمی‌دهند.

لذا با توجه به تأثیر مشخصات هندسی و اندرکنش جانبی بین وسایل نقلیه به‌ویژه در جریان ترافیک نامنظم، تمرکز باید به سمت توسعه مدل‌های دوبعدی تغییر یابد.

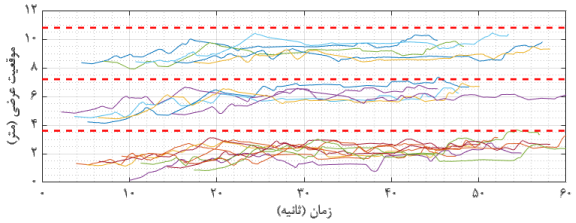


الف) کشور آلمان



ب) کشور ایران

شکل ۵. نمایش رعایت و عدم رعایت خطوط عبوری الف) کشور آلمان و ب) کشور ایران (بزرگراه شهید همت)



شکل ٦. نمونه‌ای از خط سیر جانبی خودروها در بزرگراه شهید همت تهران (Rafati Fard, 2019)

۳- مدل‌سازی جریان ترافیک

از دیدگاه کلان، جریان‌های ترافیک با سه متغیر کلیدی؛ جریان (q)، سرعت (v) و تراکم (k) مشخص می‌شوند. در یک نمای یک‌بعدی، تراکم به‌عنوان تمرکز خطی وسایل نقلیه (بیان‌شده به واحدهایی مانند وسایل نقلیه در هر کیلومتر) تعریف می‌شود، درحالی‌که سرعت، همان‌طور که از نامش پیداست، به‌عنوان یک کمیت عددی (اسکالر) در نظر گرفته می‌شود، زیرا تنها در یک بعد فضایی (جهت طولی) وجود دارد. از دیدگاه خردنگر، مدل‌های جریان ترافیک عمدتاً مبتنی بر نظریه‌های تعقیب خودرو

هستند. این مدل‌ها درواقع به‌عنوان اساس و پایه نظریه جریان ترافیک شناخته می‌شوند. این مدل‌ها حاصل تلاش‌هایی برای ایجاد یک بنیان نظری به‌منظور توصیف رفتار دینامیکی وسایل نقلیه در یک خط عبوری بزرگراه، بدون مانورهای سبقت و بر اساس الگوهای رفتاری انسانی هستند(Herman, 1992). ممکن است این استدلال مطرح شود که چارچوب یک‌بعدی جریان‌های ترافیک -که در ذهن بنیان‌گذاران نظریه علم ترافیک مطرح شده است- تنها یک ساده‌سازی اولیه جهت مدل‌سازی جریان ترافیک بوده است. اما واقعیت این است که این چارچوب مدل‌سازی به همین شکل برای دهه‌ها باقی مانده است. این دیدگاه یک بعدی حتی در پژوهش‌هایی مانند پژوهش انجام‌شده توسط گونِی (Gunay, 2007) که به‌صراحت تأثیر اندرکنش‌های جانبی در مدل‌های تعقیب خودرو را مورد توجه قرار داده و سعی در ادغام این اندرکنش‌ها در مدل‌های تعقیب خودرو دارند نیز وجود دارد. چرا که در این مدل‌ها همچنان رفتار تعقیب خودرو از طریق موقعیت‌های طولی خودروی دنبال‌کننده و سرعت آن به‌صورت یک کمیت عددی (و نه سرعت به‌عنوان کمیتی برداری که باید در یک چارچوب دوبعدی مطرح شود) در نظر گرفته می‌شود. اتکای مشابهی به مفاهیم یک‌بعدی در مدل‌های پیوسته کلان نگر نیز مشاهده می‌شود. به‌عنوان نمونه موهان و رامادورای (Mohan & Ramadurai, 2017) مفهومی به نام "سطح اشغال" را جهت مدل‌سازی اندرکنش جانبی بین خودروها معرفی نمودند. بااین‌وجود، همچنان نمایش یک‌بعدی از معادله پیوستگی و معادله شتاب را مورد استفاده قرار دادند. علیرغم محبوبیت گسترده دیدگاه یک‌بعدی نسبت به جریان ترافیک، برخی از محققان تلاش نمودند تا رانندگی و جریان‌های ترافیکی را در یک چارچوب دوبعدی یا فضایی توصیف نمایند. چاکرابورتی و همکاران (Chakroborty, Agrawal, & Vasishtha, 2004) بیان نمودند که رانندگی به‌طورکلی نتیجه دو نیروی متضاد در ذهن انسان؛ یکی نگرانی برای ایمنی و دیگری نیاز به صرفه‌جویی در زمان (یا فوریت) است. این پژوهشگران بر لزوم داشتن مدلی جامع از رفتار راننده در سطح خرد تأکید کردند. در مطالعاتی دیگر این پژوهشگران ضمن تأکید بر نیاز به مدل‌های دوبعدی جریان ترافیک، بیان نمودند که مدل‌های جریان نامنظم ترافیک می‌بایست به‌گونه‌ای توسعه یابند که بتوانند مدل‌های یک‌بعدی جریان‌های منظم و مبتنی بر خط عبوری را درون خود جای داده و ادغام نمایند(Chakroborty, 2006). در سال‌های اخیر تلاش‌های ارزشمندی جهت توسعه مدل‌های دوبعدی هم در سطح خرد جریان ترافیک (Delpiano, Herrera, Laval, & Coeymans, 2020; Kanagaraj & Treiber, 2018; Sharath & Velaga, 2020; Treiber & Chaudhari, 2024) و هم در سطح کلان جریان ترافیک (Delpiano et al., 2020; Krishna Nirmale, Rawoof Pinjari, & Chakroborty, 2024; Vikram et al., 2022) صورت گرفته است که در دو بخش بعدی به آن پرداخته شده است.

٤- مدل‌های خردنگر جریان ترافیک

همان‌طور پیش‌تر به آن اشاره شد، جریان ترافیک در بسیاری از کشورهای درحال‌توسعه، ازجمله ایران، به دلیل عدم رعایت خطوط عبوری، تغییرات مکرر در مشخصات هندسی معابر و ترکیب ناهمگون وسایل نقلیه، بی‌نظم است. مشخصات هندسی مرتبط معمولاً شامل عرض معبر، فاصله جانبی، خط‌کشی‌ها، افقی و قائم، وضعیت روسازی و موانع ثابت مانند وسایل نقلیه پارک شده و غیره می‌شوند. در چنین جریان‌های ترافیکی، وسایل نقلیه برای به حداقل رساندن زمان سفر و حداکثر کردن ایمنی خود، هر موقعیت (فضای) جانبی در دسترس را اشغال می‌کنند. علاوه بر این، رانندگان باید نه‌تنها سرعت خود (که می‌تواند از طریق شتاب‌گیری و کاهش شتاب تغییر کند) بلکه جهت حرکت خود را نیز (که از طریق زاویه فرمان قابل تنظیم است) به‌طور هم‌زمان تعیین نمایند. بنابراین، مدل‌های جریان ترافیک در سطح خردنگر برای چنین جریان‌هایی باید بتوانند در طول زمان، بردار سرعت (به‌جای کمیت اسکالر سرعت) وسایل نقلیه را بر اساس شرایط ترافیکی موجود پیش‌بینی نمایند.

اکثر مدل‌های خردنگر جریان ترافیک که در گذشته توسعه یافته‌اند، مدل‌های یک‌بعدی هستند. به این معنا که تنها اندرکنش‌های طولی بین وسایل نقلیه را در نظر می‌گیرند و تنها سرعت‌های (یا شتاب‌های) طولی را در طی زمان پیش‌بینی می‌کنند. اگرچه این مدل‌ها برای ترافیک‌های مبتنی بر خطوط عبوری مناسب هستند، اما حتی در چنین جریان‌هایی نیز نمی‌توانند تأثیر مشخصات هندسی معبر را در نظر گرفته و پیش‌بینی نمایند.

در این رویکردها، برای مدیریت تغییرات اتفاقی در موقعیت‌های جانبی (مانند مانورهای اختیاری یا اجباری تغییر خط)، ساختاری سلسله‌مراتبی از وظایف ایجاد می‌شود. به‌عنوان مثال، در این

رویکردها، فعالیت‌های تعقیب خودرو و تغییر خط به‌عنوان دو وظیفه جداگانه و مستقل از هم در نظر گرفته می‌شوند، نه به‌عنوان نتایج یک وظیفه واحد یعنی رانندگی. بااین‌حال، در سال‌های اخیر، تلاش‌های ارزشمندی برای توسعه مدل‌های جامع (یا دوبعدی) خردنگر رانندگی صورت گرفته است.

٤-١- مدل‌های تعقیب خودروی یک بعدی

در مدل‌های خردنگر جریان ترافیک، رفتار هر وسیله نقلیه (راننده) مدل شده و اقدام هر وسیله نقلیه بر اساس عملکرد وسیله نقلیه جلویی (خودروی پیشرو)، ویژگی‌های راننده و در بعضی از مواقع موقعیت وسایل نقلیه پیرامونی تعیین می‌شود. بیشتر مدل‌های رفتاری معتبر، به نظریه‌های تعقیب خودرویی مربوط می‌شوند که در آن راننده تنها با وسیله نقلیه جلویی خود به صورت طولی اندرکنش دارد (که به آن مدل تعقیب خودروی یک‌بعدی گفته می‌شود). نظریه تعقیب خودروی یک بعدی اولین بار توسط پایپس (Pipes, 1953) مطرح و طی سال‌ها توسط محققان مختلف توسعه یافت. مدل‌های تعقیب خودرو را در حالت کلی می‌توان به دو گروه مدل‌های مبتنی بر معادله و مدل‌های مبتنی بر داده تقسیم‌بندی نمود. در مدل‌های مبتنی بر معادله، رفتار تعقیب خودرو با استفاده از یک مدل ریاضی با فرم بسته توصیف می‌شود. مدل‌های مبتنی بر معادله بر اساس منطق بکار رفته در آن‌ها به؛ مدل‌های تحرک-پاسخ، مدل‌های فاصله امن، مدل‌های سرعت بهینه، مدل‌های روانی-فیزیکی و مدل‌های مبتنی بر قواعد (ازجمله مدل‌های اتوماتای سلولی) تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های مبتنی بر داده که در سال‌های اخیر به مقدار زیادی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، فاقد فرم مشخص ریاضی بوده و در آن‌ها از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی جهت مدل‌سازی رفتار تعقیب خودروی رانندگان استفاده شده است. (جهت مرور جامع از مدل‌های تعقیب خودرو به (Brackstone & McDonald, 1999; Y. Chen et al., 2024; Toledo, 2007; T. T. Zhang, Jin, McQuade, Bayen, & Piccoli, 2024) مراجعه نمایید.)

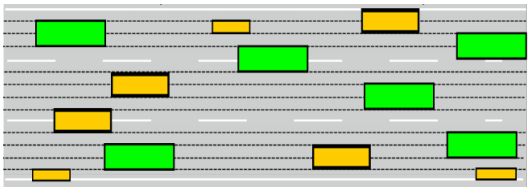
بیشتر مدل‌های اولیه، قادر به درک تفاوت‌های میان رانندگان و وسایل نقلیه نیستند. در ادامه، تلاش‌های پراکنده‌ای برای رفع محدودیت‌های این مدل‌ها صورت گرفت که برخی از آن‌ها در اینجا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سیوهی و کاسکو (Siuhi & Kaseko, 2016) به موضوع ناهمگونی وسایل نقلیه در مدل‌های تعقیب خودروی تحریک-پاسخ پرداختند.

گونِی (Gunay, 2007) روشی جهت اصلاح مدل تعقیب خودروی مبتنی بر رویکرد فاصله ایمنِ گیپس(Gipps, 1981) به منظور در نظرگیری اثرات جدایی جانبی (به‌عنوان یکی از بارزترین خصوصیات جریان ترافیک نامنظم) ارائه نمود.

در پژوهشی دیگر، راوی‌شانکار و ماتیو (Ravishankar & Mathew, 2011) پارامترهای مرتبط با نوع وسیله نقلیه را به نسخه اصلاح‌شده‌ای از مدل تعقیب خودروی گیپس اضافه نمودند. در تلاشی دیگر برای در نظرگیری فاصله جانبی بین وسایل نقلیه که در اندرکنش باهم هستند، جین و همکاران (Jin, Wang, Tao, & Li, 2010) نسخه اصلاح‌شده‌ای از مدل تفاوت سرعت کامل را پیشنهاد دادند. مدل‌های اولیه مبتنی بر قواعد که عدم قطعیت ناشی از کنترل انسانی در رفتار تعقیب خودروی رانندگان را در نظر می‌گرفتند، توسط کیکوچی و چاکرابورتی (Kikuchi & Chakroborty, 1992) از طریق یک مدل فازی که فاصله نسبی، سرعت نسبی و شتاب وسیله نقلیه پیشرو را به‌عنوان داده‌های ورودی در نظر می‌گرفت، توسعه یافت. در سال‌های بعد پژوهشگران طیف گسترده‌ای از مدل‌های مبتنی بر قواعد را از طریق بکارگیری قواعد فازی و ترکیب با شبکه‌های عصبی توسعه دادند (G. Li & Zhu, 2019; J. Wang, Zhang, Lu, & Wang, 2015). گروه دیگری از مدل‌های مبتنی بر قواعد مدل‌های اتوماتای سلولی هستند که نسخه‌های اصلاح‌شده‌ای از این مدل‌ها جهت در نظرگیری ناهمگنی جریان ترافیک در ادبیات موضوع توسعه یافته است (Bham & Benekohal, 2004; Chakroborty & Maurya, 2008; Chen, Wang, Xiang, & Li, 2024; K.-P. Li & Gao, 2004; Luo et al., 2015; Z. Wang, Chen, Wang, & Li, 2024).

در انتهای این بخش، ضروری است به بحث در مورد مجموعه گسترده‌ای از ابزارها/مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر که به‌طور تجاری (به‌عنوان نمونه ایمسان و ویسیم) یا غیرتجاری (به‌عنوان نمونه سومو) در دسترس هستند و به نظر می‌رسد توانایی شبیه‌سازی جریان ترافیک نامنظم را هم دارا هستند، پرداخته شود. این ابزارها همچنان از مدل‌های یک‌بعدی تعقیب خودرو استفاده می‌کنند (و به همین دلیل تغییر خط را به‌عنوان یک وظیفه جداگانه در نظر می‌گیرند). این مدل‌های یک‌بعدی اغلب برای جریان‌های "نامنظم" با تقسیم خطوط عبوری به نوارهای طولی

مصنوعی باریک (یا در رویکردهای مبتنی بر اتوماتای سلولی، با استفاده از سلول‌های مصنوعی باریک) تطبیق داده می‌شوند. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در این مدل‌ها عرض هر خودرو با چندین نوار مشخص شده و یک خودرو در هرلحظه چندین نوار را اشغال می‌کند. بنابراین درحالی‌که حرکت طولی خودرو پیوسته است، حرکت جانبی خودروها به‌صورت گسسته (هر خودرو در هر گام زمانی تنها به اندازه یک نوار قادر به حرکت جانبی است) مدل می‌شود.



شکل ۷. ایده مدل‌های مبتنی بر نوارهای طولی مصنوعی

علاوه بر این، تلاش‌هایی توسط آراسان و کوشی (Arasan & Koshy Reebu, 2005) و همچنین ونکاتسان و همکاران (Venkatesan, Gowri, & Sivanandan, 2008) نیز جهت شبیه‌سازی جریان‌های نامنظم ترافیک انجام شده است که در آن‌ها از یک استراتژی مانور سبقت (که در آن مانور از طریق جابه‌جایی‌های جانبی آنی به فاصله‌های مناسب در سمت چپ یا راست وسیله نقلیه اصلی نمایش داده می‌شود) همراه با یک استراتژی تعقیب خودرو (که در آن سرعت وسیله نقلیه دنبال‌کننده با سرعت وسیله نقلیه جلویی در صورت امکان‌پذیر بودن سبقت، برابر می‌شود) برای نمایش اثر بی‌نظمی در جریان‌های ترافیکی استفاده شده است.

در ارتباط با نرم‌افزارهای شبیه‌ساز ترافیک، ذکر این نکته ضروری است که این نرم‌افزارها از تعداد زیادی پارامتر قابل تنظیم توسط کاربر جهت مدل‌سازی استفاده می‌نمایند. تعیین دقیق مقادیر بسیاری از این پارامترها از داده‌های دنیای واقعی اغلب دشوار (اگر نه غیرممکن) بوده و با پیچیدگی‌های زیادی هم از بعد نظری و هم از بعد کاربردی همراه است. برای بحث دقیق‌تر در مورد توانایی ابزارهای شبیه‌سازی در مدل‌سازی دو بعدی جریان ترافیک می‌توان به (Mahapatra, Maurya, & Chakroborty, 2018) مراجعه نمود.

۴-۲- مدل‌های خردنگر دو بعدی جریان ترافیک

مباحث عنوان‌شده در مورد مدل‌های یک‌بعدی تعقیب خودرو و اصلاحات آن‌ها (که در بخش قبلی ارائه شد) نشان می‌دهد که این مدل‌ها به‌طور بنیادی قادر به نمایش جریان‌های ترافیکی نامنظم نیستند. در چنین جریان ترافیکی، رانندگان به‌طور مداوم به دنبال فرصت‌های ممکن برای پیشروی از طریق فضاهای موجود هستند و درعین‌حال تلاش می‌کنند تا فاصله ایمن با وسایل نقلیه پیرامونی خود را حفظ نمایند. در این فرآیند، وسایل نقلیه موقعیت جانبی خود را به‌طور مداوم جهت استفاده از فرصت‌های موجود برای افزایش ایمن سرعت تغییر می‌دهند. از اینرو، مدل‌سازی چنین رفتار رانندگی نیازمند چارچوبی است که بتواند فرصت‌ها یا فواصل موجود را در یک فضای جستجوی دوبعدی جهت دستیابی به حداکثر سرعت ایمن جستجو نماید. اولین تلاش‌ها برای توسعه یک مدل خردنگر جامع دوبعدی برای جریان ترافیک نامنظم توسط چاکرابورتی و همکاران (Chakroborty et al., 2004) با استفاده از رویکرد مبتنی بر میدان نیرو یا میدان پتانسیل (که از برنامه‌ریزی حرکت ربات‌ها الهام گرفته شده بود) صورت گرفت. در این رویکرد، در هر سناریوی رانندگی، دو مدل پاسخ برای کنترل زاویه فرمان و شتاب وسایل نقلیه بکار رفته است. این مدل فرض می‌کند که هر هدف یا مقصد، پتانسیل جاذبه‌ای (یا منفی) ایجاد می‌کند، درحالی‌که سایر ویژگی‌های معبر (مانند وسایل نقلیه پارک شده، لبه‌های معبر، وسایل نقلیه در حال حرکت و غیره) به‌عنوان موانعی در نظر گرفته می‌شوند که پتانسیل دافعه‌ای (یا مثبت) دارند. فرض بر این است که پتانسیل کلی در یک نقطه نشان‌دهنده تهدید درک‌شده توسط راننده از آن نقطه است. ازآنجاکه سرعت تهدید درک‌شده را تشدید می‌کند، فرض شده است که هر چه پتانسیل در یک نقطه بالاتر باشد، سرعت قابل حفظ در آن نقطه کمتر خواهد بود. بنابراین، راننده مسیری با کمترین پتانسیل را انتخاب می‌کند. این مدل اگرچه در سناریوهای مختلف رانندگی عملکرد نسبتاً رضایت‌بخشی نشان می‌دهد. بااین‌حال، مهم‌ترین محدودیت‌های این مدل مربوط به ماهیت محاسباتی پیچیده آن و نبود چارچوب کالیبراسیون (بر اساس داده‌های میدانی) برای پارامترهای آن است.

در پژوهشی دیگر، مائوریا (Maurya, 2007) یک مدل جامع شبیه‌سازی ترافیک پیشنهاد داد که از تعاملات دوبعدی بین وسایل نقلیه بهره می‌برد. ماژول کنترل جانبی، بهترین مسیر حرکت (یعنی جهت) را بر اساس معیارهای مشخصی مانند فاصله موجود، میزان دشواری مانور بر اساس نیاز به زاویه فرمان، احتمال وقوع تعارض با وسایل نقلیه مجاور، حضور موانع و غیره

شناسایی می‌کند. ماژول کنترل طولی، سرعت ایمن را بر اساس ویژگی‌های وسایل نقلیه در نزدیکی مسیر شناسایی‌شده پیش‌بینی می‌کند. این دو ماژول کنترل، باهم سرعت ایمن و زاویه فرمان مناسب برای هر وسیله نقلیه را تعیین می‌کنند (به این معنا که این مدل‌ها سرعت‌های ایمن را در طول زمان پیش‌بینی می‌کنند). اگرچه این مدل تا حدودی قادر بازتولید رفتار جریان‌های ترافیکی نامنظم و ناهمگن می‌پردازد، اما هنوز نیاز به کالیبراسیون و اعتبارسنجی گسترده آن با استفاده از داده‌های واقعی ترافیک وجود دارد. کاناگاراج و تریبر (Kanagaraj & Treiber, 2018) یک مدل عمومی چند ذره‌ای برای نمایش جریان ترافیک بی‌نظم با استفاده از ایده ذرات پرسرعت خودران (وسیله نقلیه) پیشنهاد کردند. این مدل نیز مانند مدل‌های قبلی، مبتنی بر میدان نیرو بوده و به دلیل پیچیدگی و تعداد زیاد پارامتر، نیازمند کالیبراسیون و اعتبارسنجی گسترده با استفاده از داده‌های میدانی است.

در پژوهشی دیگر، رفعتی فرد (Rafati Fard, 2019) با استفاده از نظریه میدان‌های پتانسیل، مدلی جامع جهت شبیه‌سازی جریان ترافیک نامنظم و توصیف اندرکنش طولی و عرضی بین خودروها ارائه نمود. در این مدل بر اساس معیارهای مشخصی مانند فاصله‌های طولی و عرضی موجود، میزان دشواری حرکت بر اساس خصوصیات عملکردی وسیله نقلیه، احتمال وقوع تعارض با خودروهای پیرامونی، بردار سرعت ایمن را پیش‌بینی می‌نماید. مدل ارائه‌شده اگرچه با استفاده از داده‌های واقعی مربوط به بزرگراه همت در ایران کالیبره و اعتبار سنجی شده است، بااین‌وجود به دلیل پیچیدگی مدل ارائه‌شده و تعداد زیاد پارامترها، مدل ارائه‌شده نیازمند کالیبراسیون و اعتبارسنجی گسترده‌ای است. اخیراً نیز نیرمال و همکاران یک چارچوب مبتنی بر کلاس‌های پنهان برای مدل‌سازی رفتار رانندگی ارائه کردند که به‌منظور مدل‌سازی حرکات دوبعدی وسایل نقلیه، اهداف استراتژیک رانندگان و پیش‌بینی چندگانه وسایل نقلیه را در شرایط ترافیکی ناهمگن و نامنظم در نظر می‌گیرد.

۴-۳- نقاط قوت و ضعف مدل‌های خردنگر

اصلاحات پراکنده و جزئی برای تطبیق مدل‌های یک‌بعدی جریان ترافیک با جریان‌های دوبعدی راه‌حل‌های ایده آلی نبوده و مدل‌های خردنگر جریان ترافیک برای جریان‌های نامنظم نیازمند رویکردی یکپارچه‌ای می‌باشند که بتواند اندرکنش دوبعدی بین وسایل نقلیه و نیز اندرکنش بین وسایل نقلیه و ویژگی‌های هندسی معابر را پیش‌بینی کند. نتایج شبیه‌سازی از مدل‌های جامع دوبعدی جریان ترافیک که در بخش‌های قبلی ارائه شد، امیدوارکننده است. این مدل‌ها عمدتاً فعالیت‌های مرتبط با کنترل طولی و جانبی (عرضی) وسیله نقلیه جهت پیش‌بینی سرعت (شامل سرعت و زاویه فرمان) را توأمان در نظر می‌گیرند. علیرغم این موضوع، مدل‌های جامع از تعداد زیادی پارامتر برای بازتولید رفتار دوبعدی مشاهده‌شده در جریان‌های ترافیکی استفاده می‌کنند. کالیبراسیون بیشتر این پارامترها با چالش‌های جدی همراه است. چراکه برخی از این پارامترها اندرکنش بالایی با یکدیگر دارند و برخی دیگر نیز ماهیت پنهانی داشته و اساساً از طریق برداشت‌های میدانی قابل برآورد نیستند. به‌عنوان‌مثال، کالیبراسیون توابع میدان پتانسیل (یا نیرو) برای انواع مختلف عناصر تأثیرگذار بر جریان ترافیک در مدل مدل‌های مبتنی بر میدان بسیار پیچیده است. علاوه بر این، هزینه‌های محاسباتی بالا در این مدل‌ها استفاده از آن‌ها برای شبیه‌سازی در سطح شبکه (شبیه‌سازی در مقیاس متوسط تا بزرگ) را محدود می‌نماید. با افزایش قدرت‌های محاسباتی به شکل تقریباً نمایی، مشکلات ناشی از نیازهای محاسباتی مدل‌های خردنگر دوبعدی به تدریج کاهش خواهند یافت. علاوه بر این، با توجه به موفقیت‌های اولیه مدل‌های خردنگر دوبعدی (به‌ویژه مدل‌های مبتنی بر میدان پتانسیل یا نیرو)، انعطاف‌پذیری این مدل‌ها در مدیریت ناهمگنی راننده، وسیله نقلیه و هندسه معبر، و همچنین سادگی آن‌ها در درک، انتظار می‌رود که بکارگیری این مدل‌ها در آینده افزایش یابد. با این حال، برای تحقق این هدف، چالش‌های مربوط به استفاده از تعداد زیادی پارامتر، کالیبراسیون پارامترها و دسترسی به داده‌های خردنگر باکیفیت در زمینه رفتار راننده (جهت کالیبراسیون) می بایست به شکل صحیحی حل شوند.

۴-۴-مدل‌های پیوسته جریان ترافیک

مدل‌های پیوسته جریان ترافیک به سه دسته؛ (۱) مدل‌های LWR (لایتهیل–ویتام–ریچاردز)، (۲) مدل‌های رفتاری یک‌بعدی (برای مثال، مدل‌های گرینبرگ (Greenberg, 1959)، پین (Payne, 1971)، آو و راسل (Aw & Rascle, 2000)، ژانگ (H. M. Zhang, 2002))، و (۳) مدل رفتاری دوبعدی (Agrawal, Kanagaraj, & Treiber, 2023) تقسیم می‌شوند. دو دسته اول از مدل‌های پیوسته، سرعت و جریان ترافیک در یک معبر را به‌عنوان کمیت‌های یک‌بعدی و تراکم را به‌صورت تراکم خطی در نظر

می‌گیرند. درحالی‌که دسته سوم، سرعت (در واقع بردار سرعت) و جریان را به‌عنوان کمیت‌های دوبعدی و تراکم را به‌عنوان تراکم سطحی تعریف می‌کند. بااین‌حال، سه ویژگی مشترک حفظ تعداد وسایل نقلیه در حال حرکت در معبر، استفاده از معادله بنیادی جریان ترافیک و توصیف رفتار جریان یا راننده در تمامی مدل‌های پیوسته جریان ترافیک وجود دارد.

مدل‌های یک‌بعدی مانند مدل LWR جریان ترافیک را از طریق معادله پیوستگی یک‌بعدی $\left(\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=0\right)$ که پایستگی تعداد وسایل نقلیه در معبر را نشان می‌دهند، رابطه بنیادی جریان ترافیک ($q=v\times k$) و یک معادله جبری که رابطه تعادلی بین v و k را نشان می‌دهد (به عنوان مثال $v=f(k)$) توصیف می‌نمایند. لازم به ذکر است، فرض‌های مختلف در مورد $f(k)$ منتج به ایجاد مدل‌های مختلف LWR می‌شوند.

مدل‌های رفتاری یک‌بعدی نیز جریان‌های ترافیکی را از طریق دو معادله اول توصیف می‌کنند، اما به‌جای آنکه جریان همواره از معادله تعادل پیروی کند، از یک معادله شتاب افزایشی/کاهشی (که رفتار راننده را توصیف می‌کند) برای مدل‌سازی دینامیک جریان ترافیک استفاده می‌شود. ساختار معادله شتاب افزایشی/کاهشی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial x}=g(k)\frac{\partial k}{\partial x} \qquad (۱)$$

که در آن $g(k)$ مؤلفه حساسیت بوده و معمولاً تابعی از تراکم (k) بوده و گرادیان مکانی (طولی) تراکم به‌عنوان محرک عمل می‌کند. لازم به ذکر است، اشکال مختلف معادله شتاب افزایشی/کاهشی مدل‌های رفتاری یک‌بعدی مختلفی را ایجاد می‌کند.

از سوی دیگر، مدل‌های رفتاری دوبعدی از یک فرم دوبعدی معادله پیوستگی برای نمایش حفظ تعداد وسایل نقلیه (قانون پایستگی) استفاده می‌نماید. در این مدل‌ها، معادله بنیادی جریان ترافیک به شکل $\vec{q}=k\times\vec{v}$ درمی‌آید که در آن برخلاف مدل‌های یک بعدی که سرعت و جریان به شکل اسکالر در نظر گرفته می‌شود، در مدل‌های دو بعدی به شکل بردار در نظر گرفته می‌شوند. رفتار راننده در این مدل‌ها با استفاده از دو معادله شتاب افزایشی/کاهشی یکی برای جهت طولی و دیگری برای جهت جانبی (عرضی) توصیف می‌شود.

با توجه به ماهیت معادلات دیفرانسیل جزئی که در مدل‌های پیوسته جریان ترافیک ایجاد می‌شوند، می‌توان استنباط کرد که تغییر هر یک از پارامترهای جریان ترافیک تحت شرایط خاص، می‌تواند منجر به ناپیوستگی‌هایی گردد که ممکن است در طی زمان جابجا شوند (به‌عبارت‌دیگر، موج‌های شوکی در جریان‌های ترافیکی رخ دهند). علاوه بر این، معادلات دیفرانسیل جزئی ایجادشده نیاز به حل عددی دارند. روش‌های عددی که بر پایه مشتقات باشند، ممکن است به دلیل وجود این ناپیوستگی‌ها، مناسب نباشد و برای جلوگیری از بروز پدیده گیبس، لازم است مؤلفه موج شوکی در روش حل در نظر گرفته شود (برای جزئیات بیشتر به (Vikram et al., 2022) مراجعه نمایید). علاوه بر این، با توجه به معادلات دیفرانسیل جزئی، می‌توان مشاهده کرد که مؤلفه سرعت (بردار سرعت) و تراکم به یکدیگر وابسته‌اند. این ارتباط توسعه یک روش عددی به منظور حل این معادلات را پیچیده می‌نماید. بااین‌حال، ویکرام و همکاران (Vikram et al., 2022) موفق به ابداع یک روش عددی بر پایه روش اجزاء محدود شدند که می‌تواند این چالش‌ها را برطرف نماید. در این روش، با استفاده از یک طرح مبتنی بر انتگرال‌گیری، مشکلات ناشی از ناپیوستگی‌ها و تداخل تراکم و سرعت مدیریت می‌شوند.

٤-٥-توسعه مدل‌های پیوسته (کلان نگر) یک بعدی

برای در نظر گرفتن تأثیر هندسه معبر بر جریان ترافیک، ویکرام و همکاران (Vikram et al., 2022) در پژوهشی اصلاح و توسعه مدل رفتاری یک‌بعدی را مورد بررسی قرار دادند که در آن تنها معادله شتاب افزایشی/کاهشی اصلاح شده بود. معادله اصلاح‌شده شامل گرادیان فضایی عرض معبر (و/یا انحنا) به عنوان محرک اضافی است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگر رابطه سرعت-چگالی برای یک معبر با مشخصات هندسی خاص مشخص باشد، می‌توان روابط سرعت-چگالی را برای معبر با مشخصات هندسی دیگر نیز تعیین نمود. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که مدل قادر به بازتولید پدیده‌هایی است که به‌صورت تجربی در معابر با مشخصات هندسی متغیر مشاهده می‌شوند. تلاش‌های دیگری نیز وجود دارد که محققان سعی کرده‌اند ناهمگنی جریان ترافیک را در نظر بگیرند. مدل‌های پیشنهادی در این مطالعات، توسعه‌هایی از مدل‌های LWR یا مدل‌های رفتاری یک‌بعدی هستند. در این مطالعات، معادله پیوستگی و معادله بنیادی جریان ترافیک برای هر کلاس از وسایل نقلیه به‌طور جداگانه در نظر گرفته شده‌اند.

البته مدل‌های پیشنهادی در توصیف رفتار راننده متفاوت هستند. در مدل‌هایی که توسعه‌هایی از مدل‌های LWR هستند، سرعت و نرخ جریان هر کلاس از وسایل نقلیه به‌طور مستقیم وابسته به ترکیبی خطی از چگالی‌های تمامی کلاس‌های وسایل نقلیه فرض می‌شود (Logghe & Immers, 2008; P. Nair, Abhiram Naidu, & Sreekumar, 2024; Wong & Wong, 2002). در مدل‌هایی که گسترش‌های مدل‌های رفتاری یک‌بعدی هستند، شتاب افزایشی/کاهشی هر کلاس از وسایل نقلیه وابسته به چگالی همان کلاس و همچنین به چگالی سایر کلاس‌ها فرض شده است (Jiang & Wu, 2004; Tang, Jiang, Wu, Wiwatanapataphee, & Wu, 2007; H. M. Zhang & Jin, 2002).

در پژوهشی، هرمان و پریگوژین (Herman & Prigogine, 1979) تلاش نمودند ناهمگنی سرعت در جریان ترافیک را با استفاده از یک مدل دو سیاله توصیف نمایند. برخی مطالعات بعدی مانند نایر و همکاران (R. Nair, Mahmassani, & Miller-Hooks, 2011) و فن و ورک (Fan & Work, 2015) تأثیر عبور وسایل نقلیه کوچک با سرعت بالا از میان وسایل نقلیه بزرگ با سرعت کم را بررسی کردند (هرچند که این مدل‌ها یک‌بعدی بوده و نمی‌توانند به‌طور دقیق عبور یا سبقت را مدل‌سازی کنند). این مدل‌های پیوسته یک‌بعدی در بهترین حالت می‌توانند به‌عنوان پایه‌هایی برای مدل‌سازی جریان‌های ترافیکی نامنظم در نظر گرفته شوند.

٤-٦-مدل‌های پیوسته (کلان نگر) دو بعدی

فرض پایه در مدل‌هایی که در بخش قبلی از طریق مرور برخی از مهم‌ترین مقالات مورد بحث و بررسی قرار گرفتند (ازجمله مدل‌هایی که تلاش می‌کنند تأثیر هندسه یا ناهمگنی را به نوعی در مدل‌سازی لحاظ نمایند) حرکت وسایل نقلیه تنها در جهت طولی بوده و در نتیجه نمایش یک‌بعدی جریان ترافیک است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، تأثیر هندسه معبر یا بی‌نظمی جریان ترافیک، نشان‌دهنده‌ی وجود تعاملات جانبی علاوه بر تعاملات طولی است. تعاملات جانبی را نمی‌توان در چارچوب یک‌بعدی توصیف نمود و مدل‌سازی آن‌ها نیازمند یک چارچوب دوبعدی است. اولین مدل پیوسته دوبعدی برای جریان ترافیک در سال ۲۰۱۵ در یک رساله دکتری (Vikram, 2015) ارائه گردید. در این مطالعه، جریان ترافیک به‌عنوان یک موجودیت دوبعدی در نظر گرفته شده است که حرکت آن در یک صفحه در جهت‌های طولی و جانبی (عرضی) انجام می‌شود. بنابراین، چگالی در این مدل نمی‌تواند به‌صورت چگالی خطی مورد استفاده در مدل‌های یک‌بعدی در نظر گرفته شود و لازم است چگالی صورت چگالی سطحی (تعداد وسایل نقلیه در واحد سطح معبر) بیان شود. علاوه بر این، برخلاف سرعت که در مدل‌های یک‌بعدی به‌عنوان یک کمیت اسکالر به کار می‌رود، در این مدل سرعت و نرخ جریان ترافیک به دو مؤلفه؛ یکی در جهت طولی، و دیگری در جهت عرضی (جانبی) معبر تقسیم می‌شود. برای حفظ تعداد وسایل نقلیه در حال حرکت بر روی معبر (پیوستگی جریان ترافیک)، در این مدل از یک معادله پیوستگی دوبعدی استفاده شده است. فرض بر این است که معادله‌ی بنیادی جریان ترافیک به‌طور جداگانه در هر دو جهت طولی و جانبی معتبر است. در این مدل توصیف رفتار راننده از طریق دو معادله‌ی شتاب افزایشی/کاهشی انجام می‌شود که هر یک مربوط به یکی از مؤلفه‌های طولی و جانبی حرکت جریان است. آزمایش‌های عددی انجام‌شده با استفاده از مدل ارائه‌شده، نشان‌دهنده ایجاد ویژگی‌های مختلفی مانند شوک‌های مورب هستند. این ویژگی‌ها مشابه آن‌هایی هستند که در جریان‌های با سرعت بالا در سیالات تراکم‌پذیری که تحت معادله ناویه-استوکس توصیف می‌شوند، مشاهده می‌شوند. وجود شوک‌های مورب در یک جریان ترافیکی، نشان‌دهنده ناپیوستگی در پارامترهای ترافیکی در آن محل است. علاوه بر این، شوک‌های مورب همیشه ایستا هستند و با تغییر ناگهانی سرعت وسایل نقلیه در آن موقعیت همراه‌اند. ویژگی‌های مختلف ایجادشده در جریان ترافیک شبیه‌سازی‌شده با استفاده از این مدل پیشنهادی، نشان‌دهنده این است که مدل ممکن است قادر به ثبت پدیده‌های مختلفی باشد که در دنیای واقعی مشاهده می‌شوند.

در همین راستا، هرتی و همکاران (Herty, Moutari, & Visconti, 2018) یک مدل کلان نگر (پیوسته) دوبعدی مرتبه اول با استفاده از داده‌های تجربی ترافیک از آلمان و ایالات‌متحده ارائه دادند. در این مدل، متغیرهای طولی و جانبی ترافیک پیوسته هستند. رابطه تعادل سرعت-تراکم با استفاده از خط رگرسیون بر روی نمودارهای بنیادی به دست می‌آید. بااین‌حال، دینامیک جانبی در این مدل نسبتاً ساده و غیرواقعی است. به‌عنوان مثال، همیشه منفی است (همواره به سمت راست اشاره دارد)، بسیار کوچک است و به گرادیان‌ها برای هدایت جریان ترافیک به سمت نواحی با تراکم کمتر وابسته نیست.

بنابراین، در شبیه‌سازی‌ها، دینامیک جانبی اساساً بدون تغییر باقی می‌ماند. در پژوهشی دیگر هرتی و همکاران (Herty, Fazekas, & Visconti, 2018) یک مدل دوبعدی پیوسته مرتبه دوم که رفتار تغییر خط را نیز شامل می‌شود، ارائه نمودند. در این پژوهش، خط عبوری به‌عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته شده و از این طریق پویایی ترافیک ناشی از تغییر خط در نظر گرفته می‌شود. بااین‌حال، با توجه به حداقل زمان شبیه‌سازی (۳ ثانیه) پیشنهادشده در این پژوهش، در عمل هیچ پویایی (دینامیک) جانبی در این مدل قابل‌مشاهده نیست. سوخینوا و همکاران (Sukhinova, Trapeznikova, Chetverushkin, & Churbanova, 2009) یک مدل پیوسته ترکیبی از مرتبه اول (در جهت جانبی) و مرتبه دوم (در جهت طولی) برای ترافیک چند خطه پیشنهاد دادند که عوامل شتاب افزایشی/کاهشی، گرادیان تراکم، تلاش راننده برای تغییر به خط سریع‌تر و سرعت خودرو را در نظر می‌گیرد. بااین‌حال، مدل ارائه‌شده به‌طور قابل‌توجهی پیچیدگی بالایی داشته و نیروهای دافعه مرزی نیز در آن وجود ندارد. در پژوهشی دیگر، ویکرام و همکاران (Vikram et al., 2022) مدل‌های مرتبه بالای دوبعدی برای ترافیک نامنظم ارائه دادند. در مدل مرتبه بالای پیشنهادی، شتاب طولی به‌عنوان تابعی از تراکم و گرادیان تراکم در جهت طولی و شتاب جانبی به‌عنوان تابعی از گرادیان تراکم در جهت جانبی در نظر گرفته شده است.

۵- نتیجه‌گیری

اصلاحات پراکنده و جزئی برای تطبیق مدل‌های یک‌بعدی جریان ترافیک با جریان‌های دوبعدی راه‌حل‌های ایده آلی نبوده و مدل‌های خردنگر جریان ترافیک برای جریان‌های نامنظم نیازمند رویکردی یکپارچه‌ای بوده که بتواند اندرکنش‌های دوبعدی بین وسایل نقلیه و نیز اندرکنش‌های بین وسایل نقلیه و ویژگی‌های هندسی معابر را پیش‌بینی نماید. نتایج شبیه‌سازی از مدل‌های جامع دوبعدی جریان ترافیک که در بخش‌های قبلی ارائه شد، امیدوارکننده است. این مدل‌ها عمدتاً فعالیت‌های مرتبط با کنترل طولی و جانبی (عرضی) وسیله نقلیه جهت پیش‌بینی سرعت (شامل سرعت و زاویه فرمان) را توأمان در نظر می‌گیرند. علیرغم این موضوع، مدل‌های جامع خردنگر از تعداد زیادی پارامتر برای بازتولید رفتار دوبعدی مشاهده‌شده در جریان‌های ترافیکی استفاده می‌کنند. کالیبراسیون بیشتر این پارامترها با چالش‌های جدی همراه است. چراکه برخی از این پارامترها اندرکنش بالایی با یکدیگر دارند و برخی دیگر نیز ماهیت پنهانی داشته و اساساً از طریق برداشت‌های میدانی قابل برآورد نیستند. به‌عنوان‌مثال، کالیبراسیون توابع میدان پتانسیل (یا نیرو) برای انواع مختلف عناصر تأثیرگذار بر جریان ترافیک در مدل مدل‌های مبتنی بر میدان بسیار پیچیده است. علاوه بر این، هزینه‌های محاسباتی بالا در این مدل‌ها استفاده از آن‌ها برای شبیه‌سازی در سطح شبکه (شبیه‌سازی در مقیاس متوسط تا بزرگ) را محدود می‌نماید. با افزایش قدرت‌های محاسباتی به شکل تقریباً نمایی، مشکلات ناشی از نیازهای محاسباتی مدل‌های خردنگر دوبعدی به تدریج کاهش خواهند یافت. علاوه بر این، با توجه به موفقیت‌های اولیه مدل‌های خردنگر دوبعدی (به‌ویژه مدل‌های مبتنی بر میدان پتانسیل یا نیرو)، انعطاف‌پذیری این مدل‌ها در مدیریت ناهمگنی راننده، وسیله نقلیه و هندسه معبر، و همچنین سادگی آن‌ها در درک، انتظار می‌رود که بکارگیری این مدل‌ها در آینده افزایش یابد. بااین‌حال، برای تحقق این هدف، چالش‌های مربوط به استفاده از تعداد زیادی پارامتر، کالیبراسیون پارامترها و دسترسی به داده‌های خردنگر باکیفیت در زمینه رفتار راننده (جهت کالیبراسیون) می‌بایست به شکل صحیحی حل شوند.

علاوه بر این، در حال حاضر، تعداد زیادی از پارامترها در مدل‌های ترافیکی به‌منظور ارائه راه‌حل‌های سریع برای مدل‌سازی رفتارهای ترافیک رانندگان معرفی شده‌اند. این پارامترها به‌عنوان راه‌حل‌های موقتی و پاسخگویی به چالش‌های خاصی در مدل‌ها به کار گرفته می‌شوند. بااین‌حال، با انجام تحقیقات متمرکزتر و سیستماتیک‌تر، نیاز به چنین راه‌حل‌های موقتی و در نتیجه، افزودن پارامترهای اضافی و غیرضروری کاهش خواهد یافت. این رویکرد به تدریج به مدل‌های بهینه‌تر، ساده‌تر و کارآمدتری منجر می‌شود که رفتارهای بنیادی را به‌طور مستقیم مورد بررسی قرار می‌دهند. همچنین با ورود تعداد بیشتری از مهندسان حمل‌ونقل به مرزهای دانش اقتصادسنجی و علم برآورد، امید است که ابزارهای اختصاصی برای کالیبراسیون پارامترها در این مدل‌ها توسعه یابند. درنهایت، با پیشرفت‌های چشمگیر در روش‌های جمع‌آوری داده‌ها برای مطالعه رفتار رانندگان در مقیاس خرد (از طریق وسایل نقلیه مجهز به حسگرهای ویژه یا پهپادهای مجهز به دوربین‌های با وضوح بالا) امید می‌رود که داده‌های باکیفیت و فراوانی برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی این مدل‌ها جمع‌آوری گردد.

برای جریان‌های ترافیک‌هایی که نظم خطی دارند و در معابری با هندسه نسبتاً ثابت حرکت می‌کنند، مدل‌های پیوسته یک‌بعدی ابزارهای ساده‌ای مانند تحلیل امواج شوکی جهت بررسی ایجاد و کاهش صف‌ها و ازدحام را برای مهندسان فراهم می‌کنند. این مدل‌ها امکان تجزیه‌وتحلیل عملکردی جریان ترافیک و چگونگی تغییرات آن را فراهم می‌آورند. با برخی تغییرات در معادله رفتاری، می‌توان برخی از اثرات تغییرات در هندسه و ناهمگنی‌ها بر رفتار جریان را شبیه‌سازی نمود. با این وجود، علی‌رغم این مزایا، مدل‌های یک‌بعدی در چارچوبی فعالیت می‌کنند که سیستم فیزیکی – در این مورد جریان ترافیک – را به شدت ساده‌سازی می‌نماید. این ساده‌سازی بیش‌ازحد منجر به مشکلاتی می‌شود که پیش‌تر هنگام توضیح مدل‌های یک‌بعدی مورد بحث قرار گرفته‌اند.

ناتوانی مدل‌های پیوسته یک‌بعدی در توصیف جریان‌های نامنظم انگیزه لازم برای توسعه مدل‌های پیوسته دوبعدی را فراهم آورد. یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های این مدل‌ها توانایی آن‌ها در پیش‌بینی روابط ترافیکی مانند روابط سرعت–جریان برای مشخصات هندسی مختلف است. با این شرط که یکی از این روابط برای هندسه‌ای خاص به‌عنوان ورودی (شرط مرزی) تعیین شده باشد. بااین‌حال، این مدل‌ها از نظر محاسباتی پیچیده هستند و نیاز به پردازش‌های قدرتمند دارند. در حال حاضر، استفاده از این مدل‌ها برای شبیه‌سازی جریان‌های بزرگ ترافیکی (مانند ترافیک در سطح شبکه) به شدت محدود است. یکی دیگر از ضعف‌های این مدل‌ها ناشی از این واقعیت است که مانند اکثر مدل‌های دیگر جریان ترافیک، ابعاد وسایل نقلیه را نادیده می‌گیرند. حتی اگر بتوان نادیده گرفتن طول وسیله نقلیه را در مدل‌های یک‌بعدی توجیه کرد، در مدل‌های دوبعدی نادیده گرفتن بُعد عرضی توصیه نمی‌شود. دلیل این امر آن است که عرض وسیله نقلیه در مقایسه با عرض معبر قابل‌چشم‌پوشی نیست و تنها چند وسیله نقلیه می‌توانند در عرض یک معبر قرار گیرند. ازآنجاکه این مدل‌ها ابعاد وسایل نقلیه را نادیده می‌گیرند، توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی تمامی جنبه‌های ترکیب وسایل نقلیه در یک جریان نیز محل تردید است.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مشکلات مربوط به مدل‌های دوبعدی که از نیازهای محاسباتی آن‌ها ناشی می‌شود، به تدریج کمتر خواهد شد. درنتیجه، بکارگیری آن‌ها در شبیه‌سازی جریان‌های بزرگ‌تر ترافیکی افزایش خواهد یافت. بااین‌حال، در آینده، مدل‌های کلان‌نگر دوبعدی جریان ترافیک باید قادر باشند تا ناهمگنی در ابعاد عرضی یک جریان مختلط را در نظر بگیرند.

علاوه بر این، ناهمگنی در قابلیت مانور و عملکرد وسایل نقلیه نیز می‌بایست در این مدل‌ها به‌نوعی در نظر گرفته شود.

به طور سنتی، بیشتر طراحی‌های ترافیکی با استفاده از فرمول‌ها و نمودارهای تجربی (که از داده‌ها و اطلاعات تاریخی استخراج می‌شوند) انجام شده و برای بررسی سناریوهای مختلف به طور معمول از همین منابع تجربی یا برنامه‌های شبیه‌سازی‌ای که با استفاده از مدل‌های یک‌بعدی جریان ترافیک منظم و مبتنی بر خطوط عبوری توسعه یافته‌اند، استفاده می‌شود. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در جریان ترافیک شهری، به‌ویژه در شرایط نامنظم ترافیک، پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهند که مدل‌های یک‌بعدی موجود قادر به ارائه توصیف دقیقی از رفتار ترافیکی نیستند. نتایج حاصل از این مطالعات بر اهمیت در نظر گرفتن مشخصات هندسی و تعاملات جانبی وسایل نقلیه در مدل‌سازی جریان ترافیک تأکید دارند.

مدل‌های یک بعدی سنتی، اگرچه برای شرایط ساده ترافیک مفید هستند، اما در نمایش حرکت جانبی وسایل نقلیه و تعاملات آن‌ها با محیط پیرامونی مناسب نیستند. برای رفع این کاستی‌ها، نیاز فزاینده‌ای به برنامه‌های شبیه‌سازی مبتنی بر مدل‌های دو بعدی وجود دارد. این مدل‌ها امکان تجزیه و تحلیل دقیق‌تر رفتار ترافیک در شرایط مختلف را فراهم می‌کنند و تصمیم‌گیری بهتر برای طراحی معابر، بهبود ایمنی و مدیریت ترافیک را امکان‌پذیر می‌سازند. با اتخاذ رویکردهای مدل‌سازی دو بعدی، محققان می‌توانند مدل‌های جامع‌تری را توسعه دهند که تعامل پویا بین وسایل نقلیه و محیط اطراف آن‌ها را در نظر می‌گیرند. با استفاده از چنین مدل‌هایی مهندسان ترافیک می‌توانند درک عمیق‌تری از دینامیک جریان ترافیک به دست آورند، راه‌حل‌های مؤثرتری برای مشکلات ترافیک ارائه دهند و در نهایت کارایی و پایداری سیستم‌های حمل‌ونقل را بهبود بخشند.

پیشرفت‌های اخیر در توان محاسباتی و تکنیک‌های مدیریت داده، همراه با افزایش دسترسی به داده‌های ترافیکی با وضوح بالا، فرصت بی‌نظیری را برای تحقق پتانسیل مدل‌سازی دو بعدی ترافیک فراهم آورده است.

٦- مراجع

-Agrawal, S., Kanagaraj, V., & Treiber, M. (2023). Two-dimensional LWR model for lane-free traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 625*, 128990.
doi:org/10.1016/j.physa.2023.128990

-Arasan, V. T., & Koshy Reebu, Z. (2005). Methodology for Modeling Highly Heterogeneous Traffic Flow. *Journal of Transportation Engineering, 131*(7), 544-551.
doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:7(544)

-Aw, A., & Rascle, M. (2000). Resurrection of "Second Order" Models of Traffic Flow. *SIAM Journal on Applied Mathematics, 60*(3), 916-938.
doi:10.1137/S0036139997332099

-Bham, G. H., & Benekohal, R. F. (2004). A high fidelity traffic simulation model based on cellular automata and car-following concepts. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 12*(1), 1-32.
doi:org/10.1016/j.trc.2002.05.001

-Brackstone, M., & McDonald, M. (1999). Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2*(4), 181-196.
doi:https://doi.org/10.1016/S1369-8478(00)00005-X

-Chakroborty, P. (2006). Models of vehicular traffic: An engineering perspective. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 372*(1), 151-161.
doi:org/10.1016/j.physa.2006.05.009

-Chakroborty, P., Agrawal, S., & Vasishtha, K. (2004). Microscopic Modeling of Driver Behavior in Uninterrupted Traffic Flow. *Journal of Transportation Engineering, 130*(4), 438-451.
doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:4(438)

-Chakroborty, P., & Maurya, A. K. (2008). Microscopic Analysis of Cellular Automata Based Traffic Flow Models and an Improved Model. *Transport Reviews, 28*(6), 717-734.
doi:10.1080/01441640802012813

-Chen, T., Wang, Z., Xiang, J., & Li, H. (2024). Analysis of mixed traffic flow characteristics based on cellular automata model under lane management measures. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 654*, 130177.
doi:org/10.1016/j.physa.2024.130177

-Chen, Y., Dong, C., Lyu, K., Shi, X., Han, G., & Wang, H. (2024). A review of car-following and lane-changing models under heterogeneous environments. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 654*, 130127.
doi:org/10.1016/j.physa.2024.130127

-Delpiano, R., Herrera, J. C., Laval, J., & Coeymans, J. E. (2020). A two-dimensional car-following model for two-dimensional traffic flow problems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 114*, 504-516.
doi:org/10.1016/j.trc.2020.02.025

-Fan, S., & Work, D. B. (2015). A heterogeneous multiclass traffic flow model with creeping. *SIAM Journal on Applied Mathematics, 75*(2), 813-835.

-Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological, 15*(2), 105-111.
doi:org/10.1016/0191-2615(81)90037-0

-Greenberg, H. (1959). An Analysis of Traffic Flow. *Operations Research, 7*(1), 79-85.

-Gunay, B. (2007). Car following theory with lateral discomfort. *Transportation Research Part B: Methodological, 41*(7), 722-735.
doi:org/10.1016/j.trb.2007.02.002

-Han, X., Ma, M., Liang, S., Yang, J., & Wu, C. (2024). Improved Car-Following Model for Connected Vehicles on Curved Multi-Lane Road. *World Electric Vehicle Journal, 15*(3), 82.

-Herman, R. (1992). Technology, Human Interaction, and Complexity: Reflections on Vehicular Traffic Science. *Operations Research, 40*(2), 199-212. **doi:10.1287/opre.40.2.199**

-Herman, R., & Prigogine, I. (1979). A Two-Fluid Approach to Town Traffic. *Science, 204*(4389), 148-151.

-Herty, M., Fazekas, A., & Visconti, G. (2018). A two-dimensional data-driven model for traffic flow on highways. *Networks and Heterogeneous Media, 13*(2), 217-240. **doi:10.3934/nhm.2018010**

-Herty, M., Moutari, S., & Visconti, G. (2018). Macroscopic Modeling of Multilane Motorways Using a Two-Dimensional Second-Order Model of Traffic Flow. *SIAM Journal on Applied Mathematics, 78*(4), 2252-2278.
doi:10.1137/17M1151821

-Jiang, R., & Wu, Q.-S. (2004). Extended Speed Gradient Model for Mixed Traffic. *Transportation Research Record, 1883*(1), 78-84.
doi:10.3141/1883-09

-Jin, S., Wang, D., Tao, P., & Li, P. (2010). Non-lane-based full velocity difference car following model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 389*(21), 4654-4662.
doi:org/10.1016/j.physa.2010.06.014

-Kanagaraj, V., & Treiber, M. (2018). Self-driven particle model for mixed traffic and other disordered flows. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 509*, 1-11.
doi:org/10.1016/j.physa.2018.05.086

-Kikuchi, S., & Chakroborty, P. (1992). Car-following model based on fuzzy inference system. *Transportation Research Record*.

-Krishna Nirmale, S., Rawoof Pinjari, A., & Chakroborty, P. (2024). A two-dimensional, multi-vehicle anticipation, and multi-stimuli based latent class framework to model driver behaviour in heterogeneous, disorderly traffic conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 160*, 104458.
doi:org/10.1016/j.trc.2023.104458

-Li, B. (2024). Spacing-speed dependency on relative speeds to the adjacent lanes: a statistical test. *Transportmetrica A: Transport Science, 20*(2), 2154625. **doi:10.1080/23249935.2022.2154625**

-Ravishankar, K. V. R., & Mathew, T. V. (2011). Vehicle-Type Dependent Car-Following Model for Heterogeneous Traffic Conditions. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 137*(11), 775-781. **doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000273**

-Sharath, M. N., & Velaga, N. R. (2020). Enhanced intelligent driver model for two-dimensional motion planning in mixed traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 120*, 102780. **doi:.org/10.1016/j.trc.2020.102780**

-Siuhi, S., & Kaseko, M. (2016). Incorporating vehicle mix in stimulus-response car-following models. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 3*(3), 226-235. **doi:org/10.1016/j.jtte.2016.05.002**

-Sukhinova, A. B., Trapeznikova, M. A., Chetverushkin, B. N., & Churbanova, N. G. (2009). Two-dimensional macroscopic model of traffic flows. *Mathematical Models and Computer Simulations, 1*(6), 669-676. **doi:10.1134/S2070048209060027**

-Tang, C. F., Jiang, R., Wu, Q. S., Wiwatanapataphee, B., & Wu, Y. H. (2007). Mixed Traffic Flow in Anisotropic Continuum Model. *Transportation Research Record, 1999*(1), 13-22. **doi:10.3141/1999-02**

-Toledo, T. (2007). Driving Behaviour: Models and Challenges. *Transport Reviews, 27*(1), 65-84. **doi:10.1080/01441640600823940**

-Treiber, M., & Chaudhari, A. A. (2024, 2024). The Intelligent Agent Model—A Fully Two-dimensional Microscopic Traffic Flow Model. *Paper presented at the Traffic and Granular Flow '22,* Singapore.

-Venkatesan, K., Gowri, A., & Sivanandan, R. (2008). Development of microscopic simulation model for heterogeneous traffic using object oriented approach. *Transportmetrica, 4*(3), 227-247. **doi:10.1080/18128600808685689**

-Vikram, D. (2015). A two-dimensional continuum model of traffic flow. (Ph.D), *Indian Institute of Technology Kanpur, India.*

-Vikram, D., Mittal, S., & Chakroborty, P. (2022). Stabilized finite element computations with a two-dimensional continuum model for disorderly traffic flow. *Computers & Fluids, 232*, 105205. **doi:org/10.1016/j.compfluid.2021.105205**

-Wang, J., Zhang, L., Lu, S., & Wang, Z. J. J. I. F. S. (2015). Developing a car-following model with consideration of driver's behavior based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 30*, 461-466.

-Wang, Z., Chen, T., Wang, Y., & Li, H. (2024). A cellular automaton model for mixed traffic flow considering the size of CAV platoon. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 643*, 129822. **doi:org/10.1016/j.physa.2024.129822**

-Li, G., & Zhu, W.-x. (2019). The Car-Following Model Based on Fuzzy Inference Controller. *Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science Engineering.*

-Li, K. P., & Gao, Z.-Y. (2004). Cellular Automation Model of Traffic Flow Based on the Car-Following Model. *Chinese Physics Letters, 21*(11), 2120. **doi:10.1088/0256-307X/21/11/013**

-Logghe, S., & Immers, L. H. (2008). Multi-class kinematic wave theory of traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological, 42*(6), 523-541. **doi.org/10.1016/j.trb.2007.11.001**

-Luo, Y., Jia, B., Liu, J., Lam, W. H. K., Li, X., & Gao, Z. (2015). Modeling the interactions between car and bicycle in heterogeneous traffic. *Journal of Advanced Transportation, 49*, 29-47.

-Mahapatra, G., Maurya, A. K., & Chakroborty, P. (2018). Parametric study of microscopic two-dimensional traffic flow models: A literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering, 45*(11), 909-921. **doi:10.1139/cjce-2017-0686**

-Maurya, A. (2007). Development of a comprehensive microscopic model for simulation of large uninterrupted traffic streams without lane discipline. (PhD), Indian Institute of Technology Kanpur, India.

-Mohan, R., & Ramadurai, G. (2017). Heterogeneous traffic flow modelling using second-order macroscopic continuum model. *Physics Letters A, 381*(3), 115-123. **doi:org/10.1016/j.physleta.2016.10.042**

-Nair, P., Abhiram Naidu, M. N., & Sreekumar, M. (2024, 2024//). A Two-Class Continuum Traffic Flow Model Considering the Disordered Behavior at Nodes. *Paper presented at the Technologies for Sustainable Transportation Infrastructures, Singapore.*

-Nair, R., Mahmassani, H. S., & Miller-Hooks, E. (2011). A porous flow approach to modeling heterogeneous traffic in disordered systems. *Transportation Research Part B: Methodological, 45*(9), 1331-1345. **doi:org/10.1016/j.trb.2011.05.009**

-Payne, H. J. (1971). Model of freeway traffic and control. *Mathematical Model of Public System*, 51-61.

-Pipes, L. A. (1953). An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics, 24*(3), 274-281. **doi:10.1063/1.1721265 %J**

-Ponnu, B., & Coifman, B. (2015). Speed-spacing dependency on relative speed from the adjacent lane: New insights for car following models. *Transportation Research Part B: Methodological, 82*, 74-90. **doi:org/10.1016/j.trb.2015.09.012**

-Rafati Fard, M. (2019). *Driving Behavior Modeling For Disordered Traffic Systems.* (Ph.D Dissertation), Iran University of Science and Technology, Iran.

-Wong, G. C. K., & Wong, S. C. (2002). A multi-class traffic flow model – an extension of LWR model with heterogeneous drivers. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 36*(9), 827-841.
doi:org/10.1016/S0965-8564(01)00042-8
-Yu, B., Zhou, H., Wang, L., Wang, Z., & Cui, S. (2021). An extended two-lane car-following model considering the influence of heterogeneous speed information on drivers with different characteristics under honk environment. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 578*, 126022.
doi:org/10.1016/j.physa.2021.126022

-Zhang, H. M. (2002). A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior. *Transportation Research Part B: Methodological, 36*(3), 275-290.
doi:org/10.1016/S0191-2615(00)00050-3
-Zhang, H. M., & Jin, W. L. (2002). Kinematic Wave Traffic Flow Model for Mixed Traffic. *Transportation Research Record, 1802*(1), 197-204.
doi:10.3141/1802-22
-Zhang, T. T., Jin, P. J., McQuade, S. T., Bayen, A., & Piccoli, B. (2024). Car-Following Models: A Multidisciplinary Review. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1-26.
doi:10.1109/TIV.2024.3409468

Modeling Disordered Traffic Flow: A Shift from One-Dimensional to Two-Dimensional Approaches

Mehdi Rafati Fard, Assistant Professor, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Afshin Shariat Mohaymany, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: Rafati@eng.ikiu.ac.ir

Received: April 2025- Accepted: November 2025

ABSTRACT

Disordered traffic systems refer to those where traffic lanes are either undefined or lack observable lane discipline. In disordered traffic flow, vehicles are randomly distributed across the roadway rather than moving in parallel lanes. These vehicles, while traveling longitudinally, frequently change their lateral positions. Under such conditions, vehicle trajectories across the width of the road are more unstable and unpredictable compared to ordered traffic flows, where cars generally stay within designated lanes. This characteristic of disordered flows necessitates that mathematical models used for their analysis account for both longitudinal and lateral dimensions. Observations indicate that geometric features of roadways, such as road width and horizontal curves, significantly influence traffic flow behavior, regardless of whether the flow is ordered or disordered. These findings clearly underscore the necessity of employing two-dimensional models to describe traffic flow comprehensively. However, many existing traffic flow theories have been developed as one-dimensional models focusing primarily on the longitudinal movement aspects. Given the critical nature of this issue, particularly in Iran, where disordered traffic flow is prevalent due to the lack of lane discipline among drivers and the heterogeneity of vehicles, this research emphasizes the need to advance two-dimensional modeling approaches, which are still in their early stages of research and development. Considering recent advancements in computational power, data management capabilities, modeling techniques, and technological tools for high-resolution traffic flow observation, it is time to develop, calibrate, and validate robust and practical two-dimensional models for more accurate traffic flow analysis.

Keywords: Disordered Traffic Flow, Weak Lane Discipline, Microscopic, Macroscopic, Two-Dimensional Model