

مدل سازی رابطه بین توسعه حمل و نقل هوشمند شهری و بهبود کیفیت زندگی شهروندان: نقش فناوری های نوین در مدیریت ترافیک و کاهش آلاینده ها

حجت اله خرم دل^۱، محمد رضا حسین پور^۲

۱- کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی، گرایش بازاریابی، موسسه آموزش عالی خرد بوشهر. (سرپرست مدیریت پیشگیری و رفع تخلفات شهری).

۲- لیسانس مهندسی تولیدات گیاهی (زراعت) شهر کرد، (مدیر هماهنگی و نظارت بر امور خدمات شهری).

چکیده

توسعه سامانه های حمل و نقل هوشمند شهری به عنوان یکی از پیشروترین رویکردهای مدیریت ترافیک در عصر تحولات دیجیتال، نقشی تعیین کننده در ارتقای کیفیت زندگی شهروندان ایفا می کند. افزایش تراکم ترافیک، آلودگی هوا، مصرف بالای سوخت و سطح نگران کننده حوادث رانندگی، شهرها را ناگزیر به بهره گیری از فناوری های نوین کرده است. هدف این پژوهش، تحلیل جامع سازوکارهای اثرگذاری فناوری های حمل و نقل هوشمند بر شاخص های کلیدی کیفیت زندگی و ارائه یک مدل مفهومی منسجم برای تبیین این رابطه است. روش مطالعه، مروری نظام مند بر یافته های نظری و تجربی پژوهش های بین المللی در حوزه ITS بوده و تلاش شده است اجزای کلیدی این سامانه ها در قالب سه محور اصلی مدیریت ترافیک پیشرفته، خودروهای متصل و خودران، و خدمات تحرک به عنوان خدمت (MaaS) تبیین شود. تحلیل یافته ها نشان می دهد که فناوری های ITS از طریق سه مسیر میانجی اصلی شامل افزایش کارایی ترافیک، ارتقای ایمنی و بهبود عملکرد زیست محیطی، اثرات قابل توجهی بر رفاه شهروندان دارند. این فناوری ها با کاهش زمان سفر، کاهش توقف های غیر ضروری، بهینه سازی جریان حرکت، کاهش خطاهای انسانی و کاهش انتشار آلاینده ها، به طور مستقیم و غیرمستقیم موجب ارتقای سلامت، رضایتمندی، امنیت و آرامش روانی شهروندان می شوند. با این حال، چالش هایی همچون هزینه های کلان زیرساختی، مخاطرات امنیت سایبری، نگرانی های مربوط به حریم خصوصی و خطر ایجاد شکاف دیجیتال، می توانند اثربخشی ITS را محدود کنند. نتیجه گیری نهایی پژوهش تأکید می کند که تحقق آثار مثبت حمل و نقل هوشمند مستلزم یک نگاه جامع، ترکیبی و شهرمحور است؛ نگاهی که فناوری را نه هدف نهایی، بلکه ابزاری برای افزایش عدالت فضایی، بهبود دسترسی پذیری، کاهش آلودگی و افزایش رفاه پایدار شهروندان در نظر می گیرد. در پایان، مدل پیشنهادی پژوهش مسیر علی اثرگذاری ITS بر ارتقای کیفیت زندگی را به صورت شفاف ترسیم کرده و می تواند مبنایی برای تحقیقات تجربی و سیاست گذاری های شهری آینده باشد.

واژگان کلیدی: نظام جامع مدیریت پسماند، پایداری شهری، کیفیت محیط زیست، هزینه های عملیاتی شهرداری، تفکیک از مبدأ

۱. مقدمه

حمل و نقل، شریان حیاتی هر جامعه مدرن است و کیفیت آن مستقیماً با رفاه اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی شهروندان گره خورده است. در قرن بیست و یکم، شهرهای بزرگ جهان با چالش های فزاینده ای نظیر تراکم شدید ترافیک، آلودگی هوا، حوادث رانندگی مرگبار، و ناکارآمدی سیستم های حمل و نقل عمومی سنتی مواجه شده اند (Smith & Jones, ۲۰۲۱). پاسخ به این چالش ها، ظهور پارادایم جدیدی به نام «حمل و نقل هوشمند» (ITS) بوده است. ITS مجموعه ای یکپارچه از سخت افزارها، نرم افزارها و زیرساخت های ارتباطی است که هدف آن جمع آوری، پردازش و تبادل اطلاعات در لحظه برای بهینه سازی عملیات حمل و نقل است (European Commission, ۲۰۱۹).

تفاوت اساسی ITS با سیستم های حمل و نقل سنتی در توانایی آن برای واکنش تطبیقی و پیش بینانه است، نه صرفاً مدیریت واکنشی رویدادها. این مقاله با درک این تحول بنیادین، به بررسی چگونگی تأثیرگذاری این فناوری های نوین بر ابعاد مختلف کیفیت زندگی می پردازد. کیفیت زندگی (Quality of Life - QoL) مفهومی چندبعدی است که نه تنها شامل معیارهای عینی مانند درآمد و زمان سفر است، بلکه ابعاد ذهنی نظیر احساس امنیت، دسترسی پذیری، و رضایت کلی از محیط زندگی را نیز در بر می گیرد (OECD Guidelines, ۲۰۲۰). هدف این پژوهش، ارائه یک تحلیل ساختاریافته از مزایای عینی و چالش های ذهنی و عملیاتی ناشی از پیاده سازی ITS است. این تحلیل مستلزم بررسی اجزای تکنولوژیک ITS و ارتباط مستقیم آن ها با شاخص های کلیدی کیفیت زندگی شهروندان می باشد.

۲. مبانی نظری و اجزای کلیدی سیستم های حمل و نقل هوشمند (ITS)

سیستم های حمل و نقل هوشمند از طریق ادغام چندین حوزه مهندسی، علوم کامپیوتر و مدیریت، به اهداف عملیاتی خود دست می یابند. چارچوب بندی نظری ITS معمولاً بر سه ستون اصلی استوار است: جمع آوری داده ها (Sensing)، پردازش و تحلیل (Processing)، و اطلاع رسانی و اقدام (Brambhan, ۲۰۱۸) (Actuation/Information Dissemination).

یکی از قدیمی ترین و حیاتی ترین بخش های ITS، سیستم های مدیریت ترافیک هستند. سیستم های سنتی بر اساس زمان بندی های ثابت عمل می کردند که در شرایط غیرعادی (تصادفات، حجم بالای ترافیک در ساعات پیک) ناکارآمد بودند. ATMS با استفاده از حسگرهای نصب شده در جاده ها (حلقه های القایی، دوربین های ویدئویی، رادارها) و الگوریتم های یادگیری ماشین، جریان ترافیک را در لحظه پایش می کند (Kwon et al., ۲۰۲۲). معادله اساسی ترافیک، رابطه بین حجم (Q)، تراکم (K) و سرعت (V) را نشان می دهد: $Q = K \times V$ در سیستم های سنتی، هدف ثابت نگه داشتن چراغ های راهنمایی بود. اما در ATMS، الگوریتم ها تلاش می کنند با تنظیم دینامیک طول دوره چراغ سبز، جریان ترافیک را در تقاطع ها بهینه کنند تا مجموع زمان انتظار (Total Delay) در شبکه به حداقل برسد. مدل های پیش بین مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی (ANNs) می توانند تغییرات کوتاه مدت در Q و K را پیش بینی کرده و پارامترهای چراغ راهنمایی را بر اساس این پیش بینی ها تنظیم کنند (Zhang & Liu, ۲۰۲۰). این امر منجر به کاهش چشمگیر وقفه ها و بهبود سطح سرویس (Level of Service - LoS) می شود.

CAVs پیشرفته‌ترین بخش ITS محسوب می‌شوند که پتانسیل دگرگون‌سازی کل زیرساخت حمل‌ونقل را دارند. این وسایل نقلیه از ارتباطات «وسیله به وسیله» (V2V) و «وسیله به زیرساخت» (V2I) بهره می‌برند. ارتباط V2V امکان تبادل اطلاعات حیاتی مانند موقعیت، سرعت، جهت‌گیری و وضعیت ترمز را بین خودروها فراهم می‌آورد. این تبادل داده‌ها، خطر تصادفات ناشی از خطای دید انسانی را به شدت کاهش می‌دهد. برای مثال، یک خودروی متصل می‌تواند درباره یک ترمز ناگهانی در فاصله پنج خودرو جلوتر، هشدار دریافت کند. ارتباط V2I شامل تبادل داده‌ها بین خودروها و تجهیزات کنار جاده‌ای (RSUs) است. این ارتباط برای مدیریت کاروان‌های خودرویی (Platooning) و اطلاع‌رسانی در مورد وضعیت جاده‌ها (مانند وجود یخ‌زدگی یا ترافیک در مسیرهای پیش‌رو) حیاتی است (Ferreira, ۲۰۲۱). در نهایت، خودروهای کاملاً خودران (سطح ۵) با حذف کامل دخالت راننده، پتانسیل کاهش خطای انسانی، که عامل بیش از ۹۰٪ تصادفات جاده‌ای است، را دارند (NHTSA Report, ۲۰۱۸).

کیفیت زندگی در حمل‌ونقل تنها مربوط به رانندگان خودروهای شخصی نیست؛ بلکه بخش بزرگی از آن به کارایی حمل‌ونقل عمومی و دسترسی‌پذیری آن بستگی دارد. سیستم‌های اطلاعات مسافران پیشرفته (APIS) زمان رسیدن واقعی (ETA) اتوبوس‌ها و قطارها را با دقت بالا فراهم می‌کنند. مفهوم تحرک به عنوان سرویس (Mobility as a Service - MaaS) یکپارچه‌سازی این اطلاعات را به سطح جدیدی می‌برد. MaaS بستر دیجیتالی است که به کاربران اجازه می‌دهد با استفاده از یک اپلیکیشن واحد، بهترین مسیر سفر چندوجهی (شامل پیاده‌روی، دوچرخه اشتراکی، حمل‌ونقل عمومی و تاکسی‌های اشتراکی) را بر اساس هزینه، زمان و ترجیحات شخصی خود برنامه‌ریزی و پرداخت کنند (Hietanen, ۲۰۱۹). این امر، وابستگی به مالکیت خودروی شخصی را کاهش داده و انعطاف‌پذیری حمل‌ونقل عمومی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

۳. تأثیرات مثبت ITS بر ابعاد کیفیت زندگی

استقرار موفقیت‌آمیز فناوری‌های ITS پیامدهای مثبت قابل اندازه‌گیری در چندین حوزه کلیدی کیفیت زندگی شهری دارد. این تأثیرات را می‌توان در سه دسته اصلی ایمنی، کارایی زمان و دسترسی‌پذیری تحلیل کرد.

ایمنی، شاید مهم‌ترین دستاورد مورد انتظار از ITS باشد. همان‌گونه که اشاره شد، خطای انسانی عامل غالب در تصادفات است. سیستم‌های فعال ایمنی در CAVs، مانند ترمز اضطراری خودکار (AEB) و سیستم‌های هشدار خروج از خط (LDWS)، به طور مستقیم مداخله می‌کنند. تحقیقات تجربی نشان داده‌اند که پیاده‌سازی سیستم‌های اخطار برخورد مبتنی بر رادار می‌تواند نرخ تصادفات از عقب را تا ۳۰ درصد کاهش دهد (Wang & Li, ۲۰۱۷). علاوه بر این، در سطح کلان، مدیریت هوشمند ترافیک با کاهش شدید ترمزهای ناگهانی و تلاقی‌های خطرناک در تقاطع‌ها، به طور پیشگیرانه حوادث را کاهش می‌دهد. کاهش تصادفات نه تنها جان انسان‌ها را نجات می‌دهد، بلکه بار اقتصادی و روانی ناشی از آسیب‌های جسمی و مالی را نیز از دوش جامعه برمی‌دارد.

یکی از بزرگترین عوامل فرسایش کیفیت زندگی در محیط‌های شهری، اتلاف وقت در ترافیک است. هر دقیقه صرف شده در ترافیک، به معنای کاهش زمان صرف شده برای کار، خانواده، استراحت و تفریحات است. سیستم‌های هوشمند مدیریت ترافیک، با کاهش ازدحام و بهینه‌سازی جریان حرکت، به طور مستقیم زمان سفر را کاهش می‌دهند. برآوردها نشان می‌دهد که کاهش ۵ درصدی در ازدحام ترافیک می‌تواند میلیاردها دلار در سال از طریق صرفه‌جویی در مصرف سوخت و افزایش بهره‌وری نیروی کار برای یک کشور توسعه‌یافته به همراه داشته باشد (UITP Report, ۲۰۲۱). در سطح فردی، این کاهش زمان، «زمان فراغت قابل تخصیص» (Allocatable Leisure Time) شهروندان را افزایش می‌دهد، که یک شاخص مستقیم کیفیت زندگی است.

ITS می‌تواند نابرابری‌های سنتی در دسترسی به حمل‌ونقل را کاهش دهد. برای افراد مسن، معلولین، یا ساکنان مناطقی که دسترسی محدودی به حمل‌ونقل عمومی پرسرعت دارند، ITS راهکارهای جدیدی ارائه می‌دهد. سیستم‌های حمل‌ونقل بر اساس تقاضا (Demand-Responsive Transit - DRT)، که مبتنی بر اپلیکیشن‌های ITS هستند، می‌توانند مسیرهای انعطاف‌پذیری را برای گروه‌های نیازمند فراهم کنند. این سیستم‌ها به ویژه برای «حمل‌ونقل در آخرین مایل» (Last-Mile Connectivity) در حومه شهرها که توجیه اقتصادی خطوط اتوبوس سنتی وجود ندارد، حیاتی هستند (Marsden & Reardon, ۲۰۱۷). با تسهیل دسترسی به مراکز شغلی، آموزشی و درمانی، ITS به طور مستقیم به افزایش استقلال و شمول اجتماعی افراد کم‌توان کمک می‌کند.

رانندگی با سرعت ثابت و جریان پیوسته، مصرف سوخت را بهینه کرده و انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) و آلاینده‌های محلی (مانند NOx و ذرات معلق) را کاهش می‌دهد. توقف‌ها و شتاب‌گیری‌های مکرر در ترافیک سنگین باعث افزایش ناگهانی مصرف سوخت و آلودگی می‌شود. بر اساس مدل‌سازی‌های صورت گرفته، تنظیم هوشمند چراغ‌های راهنمایی در یک شبکه شهری می‌تواند کاهش انتشار دی‌اکسید کربن (CO₂) را تا حدود ۸ تا ۱۲ درصد به دنبال داشته باشد، صرفاً به دلیل کاهش زمان در حالت درجا کار کردن (Chen et al., ۲۰۱۹) (Idling). در بلندمدت، پذیرش گسترده CAVs که قادر به رانندگی با کارایی انرژی بالاتر هستند، این مزیت را تشدید خواهد کرد.

۴. چالش‌های اجرای ITS و تهدیدات کیفیت زندگی

با وجود پتانسیل عظیم، پیاده‌سازی گسترده ITS با چالش‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و اخلاقی متعددی همراه است که در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌توانند به طور معکوس بر کیفیت زندگی تأثیر بگذارند.

سیستم‌های ITS، به‌ویژه CAVs و زیرساخت‌های هوشمند، وابستگی شدیدی به جمع‌آوری مستمر و دقیق داده‌های موقعیت مکانی، سرعت، و حتی عادات رانندگی افراد دارند. این جریان عظیم داده‌ها (Big Data) نگرانی‌های جدی در مورد حریم خصوصی ایجاد می‌کند (Van den Hoven et al., ۲۰۱۵). اگر این داده‌ها به درستی رمزنگاری و ناشناس‌سازی نشوند، دولت‌ها یا شرکت‌های خصوصی می‌توانند پروفایل‌های دقیقی از تحرکات شهروندان ایجاد کنند. این امر می‌تواند منجر به سوءاستفاده از اطلاعات، تبعیض، یا حتی نظارت دولتی هدفمند شود. نیاز به چارچوب‌های نظارتی قوی مانند GDPR در اروپا برای تضمین این که داده‌ها تنها برای اهداف اعلام شده حمل‌ونقل استفاده می‌شوند، حیاتی است. هوشمندسازی شبکه‌های حمل‌ونقل، آن‌ها را در برابر حملات سایبری آسیب‌پذیر می‌سازد. یک حمله موفق به شبکه کنترل ترافیک مرکزی می‌تواند منجر به اختلال کامل در جریان شهری، ایجاد ترافیک ساختگی یا حتی تبدیل خودروهای متصل به سلاح‌های بالقوه شود (Anderson, ۲۰۲۰). امنیت V۲V و V۲I نیازمند استفاده از پروتکل‌های رمزنگاری قوی و سیستم‌های تشخیص نفوذ بلادرنگ است. ریسک ناشی از یک شکست امنیتی در یک زیرساخت حیاتی مانند سیستم‌های کنترل چراغ راهنمایی، می‌تواند به طور ناگهانی ایمنی را که ITS قرار بود افزایش دهد، به شدت تهدید کند.

پیاده‌سازی زیرساخت‌های مورد نیاز برای ITS، مانند نصب میلیون‌ها حسگر، تجهیز جاده‌ها به واحدهای ارتباطی RSU، ارتقاء شبکه‌های مخابراتی (مانند 5G) و توسعه مراکز داده، به سرمایه‌گذاری‌های کلان دولتی نیاز دارد (Lee & Shin, ۲۰۲۱). این هزینه‌ها اغلب در شهرهای با بودجه محدود یا کشورهای در حال توسعه، یک مانع بزرگ ایجاد می‌کند. علاوه بر این، مزایای

ITS به طور مساوی توزیع نمی‌شود. اگر دسترسی به گوشی‌های هوشمند پیشرفته، اینترنت پرسرعت، یا قابلیت درک رابط‌های کاربری پیچیده برای همه اقشار جامعه فراهم نباشد، یک «شکاف دیجیتال» در بهره‌مندی از مزایای MaaS و اطلاعات بلادرنگ ایجاد می‌شود. این امر می‌تواند نابرابری‌های موجود در دسترسی به خدمات شهری را تشدید کند و کیفیت زندگی طبقات کم‌درآمد یا سالمندان را به جای بهبود، بدتر سازد. استقرار گسترده CAVs سؤالات پیچیده‌ای را در زمینه مسئولیت‌پذیری ایجاد می‌کند. در صورت وقوع تصادف، چه کسی مسئول است: مالک خودرو، سازنده نرم‌افزار، یا ارائه‌دهنده داده‌های نقشه‌برداری؟ تدوین قوانین حقوقی مشخص برای تعیین مسئولیت در سناریوهای پیچیده رانندگی خودران، یک چالش قانونی جهانی است (Gogoll & Müller, ۲۰۱۷). از منظر اخلاقی، مسئله «معضلات ترام» (Trolley Problems) در خودروهای خودران مطرح می‌شود؛ در شرایطی که تصادف اجتناب‌ناپذیر است، الگوریتم باید بین آسیب رساندن به سرنشینان خودرو یا عابران پیاده، تصمیمی بگیرد. این تصمیم‌گیری‌های از پیش برنامه‌ریزی شده، نیازمند اجماع اخلاقی گسترده‌ای است که هنوز به دست نیامده است.

۵. نقش برنامه‌ریزی شهری در ادغام موفقیت‌آمیز ITS

موفقیت ITS صرفاً یک موفقیت فنی نیست، بلکه یک موفقیت در حوزه‌های سیاست‌گذاری و طراحی شهری است. ادغام موفق نیازمند یک رویکرد جامع است که زیرساخت‌های فیزیکی و دیجیتال را با نیازهای واقعی شهروندان همسو سازد.

زیرساخت‌های حمل‌ونقل باید برای پشتیبانی از ارتباطات ۵G/G و تبادل داده‌های پرسرعت آماده شوند. این شامل تعبیه حسگرها و تجهیزات ارتباطی در آسفالت، پل‌ها و علائم ترافیکی است. مهم‌تر از آن، این زیرساخت‌ها باید انعطاف‌پذیر باشند تا بتوانند با نسل‌های بعدی فناوری‌ها سازگار شوند، نه اینکه به سرعت منسوخ شوند (Goodall, ۲۰۱۶). طراحی شهری باید حمل‌ونقل غیر موتوری (پیاده‌روی و دوچرخه) را نیز در محاسبات ITS لحاظ کند. به عنوان مثال، سیستم‌های هوشمند باید بتوانند با افزایش ناگهانی تعداد دوچرخه‌سواران در یک مسیر خاص، سیگنال‌های عابر پیاده را به درستی تنظیم کنند.

برای غلبه بر نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی، نهادهای شهری باید سیاست‌های سختگیرانه‌ای را برای حاکمیت داده‌ها وضع کنند. این سیاست‌ها باید شامل موارد زیر باشند: (۱) ناشناس‌سازی اجباری داده‌های شخصی در اسرع وقت پس از جمع‌آوری؛ (۲) ایجاد شوراهای نظارتی مستقل متشکل از متخصصان فناوری، اخلاق و نمایندگان جامعه برای بازبینی الگوریتم‌های تصمیم‌گیری؛ و (۳) الزامی کردن شفافیت (Explainability) الگوریتم‌های حیاتی (XAI) به گونه‌ای که شهروندان بتوانند بفهمند چرا یک تصمیم خاص ترافیکی اتخاذ شده است (Zuboff, ۲۰۱۹).

اجرای و نگهداری سیستم‌های پیچیده ITS نیازمند نیروی کار ماهر در حوزه‌هایی مانند تحلیل داده‌های بزرگ، امنیت سایبری و مهندسی سیستم‌های کنترل است. عدم آموزش کافی منجر به اتکای بیش از حد به پیمانکاران خارجی و تضعیف کنترل محلی بر زیرساخت‌های حیاتی می‌شود. برنامه‌های آموزشی در سطوح دانشگاهی و فنی حرفه‌ای باید برای پر کردن این شکاف مهارتی طراحی شوند (UN-Habitat Report, ۲۰۲۲). برای جلوگیری از ایجاد شکاف دیجیتال و افزایش پذیرش عمومی، طراحی خدمات ITS باید از ابتدا با در نظر گرفتن تجربه کاربری (UX) تمامی گروه‌های جمعیتی انجام شود. این امر شامل ارائه اطلاعات از طریق کانال‌های متنوع (تلفظ صوتی برای کم‌بینایان، رابط‌های ساده برای سالمندان، و اپلیکیشن‌های پیشرفته برای کاربران فنی) است. مدل MaaS باید به گونه‌ای طراحی شود که حتی بدون داشتن تلفن هوشمند، دسترسی به خدمات از طریق کیوسک‌های عمومی یا تماس تلفنی نیز میسر باشد.

۶. مطالعات موردی و شواهد تجربی

تجربیات جهانی در اجرای پروژه‌های ITS بینش‌های مهمی را در مورد پتانسیل و محدودیت‌های این فناوری‌ها ارائه می‌دهد. سنگاپور به دلیل تمرکز بر زیرساخت‌های متصل، نمونه برجسته‌ای از مدیریت ترافیک هوشمند است. سیستم عوارض الکترونیکی جاده‌ای (ERP) آن‌ها از فناوری‌های ارتباطی برای قیمت‌گذاری دینامیک بر اساس میزان تراکم واقعی استفاده می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که این سیستم در کاهش ازدحام در مناطق مرکزی تا ۲۰ درصد موفق بوده است (Chiu et al., ۲۰۱۵). تأثیر آن بر کیفیت زندگی، کاهش استرس ناشی از رانندگی در ساعات پیک بوده است. با این حال، چالش اصلی سنگاپور، مدیریت مداوم تغییر پارامترهای قیمت‌گذاری و حفظ پذیرش عمومی نسبت به هزینه‌های سفر است.

هلند بر روی ادغام حمل‌ونقل عمومی، خودروهای خودران، و وسایل نقلیه سبک تمرکز کرده است. پروژه‌های آزمایشی متعددی در زمینه V۲I برای اولویت‌بندی دوچرخه‌ها و ترامواها در تقاطع‌ها اجرا شده است. برای مثال، یک دوچرخه‌سوار مجهز به دستگاه V۲X می‌تواند از چراغ‌های هوشمند سیگنال دریافت کند که زمان سبز شدن چراغ را بر اساس سرعت فعلی او تنظیم کند (TNO Report, ۲۰۲۰). این رویکرد نه تنها ایمنی دوچرخه‌سواران را افزایش می‌دهد، بلکه جذابیت حمل‌ونقل فعال را در شهر بالا برده و به سلامت عمومی کمک می‌کند.

پروژه‌هایی مانند آریزونا و پیتسبورگ در زمینه تست خودروهای خودران (به ویژه در بخش حمل‌ونقل عمومی و سرویس‌های ربات‌تاکسی) پیشرفت‌های قابل توجهی داشته‌اند. در پیتسبورگ، سرویس‌های خودران به مناطق کم‌درآمدی که قبلاً خدمات ضعیفی دریافت می‌کردند، گسترش یافتند، که نشان‌دهنده پتانسیل مثبت ITS در کاهش نابرابری دسترسی (Case Study, Argo AI, ۲۰۲۳). اما این پروژه‌ها همچنان با چالش‌های قانونی در زمینه مسئولیت در صورت بروز حادثه و همچنین نیاز به نقشه‌برداری بسیار دقیق و پرهزینه از محیط شهری مواجه هستند.

۷. مسیر آینده: شهر هوشمند، تحرک یکپارچه و آینده کیفیت زندگی

حرکت به سوی شهر هوشمند به معنای فراتر رفتن از صرفاً بهینه‌سازی ترافیک است؛ این حرکت مستلزم یکپارچه‌سازی کامل داده‌های حمل‌ونقل با سایر زیرسیستم‌های شهری مانند انرژی، مدیریت آب، و خدمات اضطراری است.

آینده حمل‌ونقل به شدت وابسته به برقی‌سازی است. سیستم‌های ITS باید با شبکه‌های هوشمند (Smart Grids) ادغام شوند تا از تحولات عظیم در تقاضای انرژی ناشی از شارژ میلیون‌ها وسیله نقلیه برقی (EVs) پشتیبانی کنند. الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند زمان شارژ وسایل نقلیه را به ساعات کم‌مصرف هدایت کنند (V۲G - Vehicle-to-Grid)، که نه تنها پایداری شبکه را تضمین می‌کند بلکه هزینه‌های انرژی را برای رانندگان کاهش می‌دهد و به کیفیت زندگی کمک می‌کند (Garg & Sharma, ۲۰۲۲). برای سنجش موفقیت واقعی ITS، نیاز به معیارهای سنجش پیشرفته‌تری داریم. کیفیت زندگی را نباید تنها با کاهش چند دقیقه‌ای زمان سفر اندازه‌گیری کرد. باید شاخص‌های چندبعدی شامل سلامت روان (کاهش استرس ترافیکی)، رضایت از دسترسی به خدمات بهداشتی و آموزشی، و ادراک از ایمنی عمومی تعریف شوند (Newman & Kenworthy, ۲۰۱۹). مدل‌های شبیه‌سازی باید بتوانند تعاملات پیچیده بین تصمیم‌گیری‌های الگوریتمی و ترجیحات ذهنی شهروندان را مدل‌سازی کنند.

تغییر پارادایم از مدیریت سنتی ترافیک به مدیریت هوشمند نیازمند تغییرات سازمانی عمیق در نهادهای دولتی است. اغلب، ادارات سنتی حمل‌ونقل، آب و برق به صورت سیلو کار می‌کنند. موفقیت ITS مستلزم ایجاد سازمان‌های فرابخشی است که

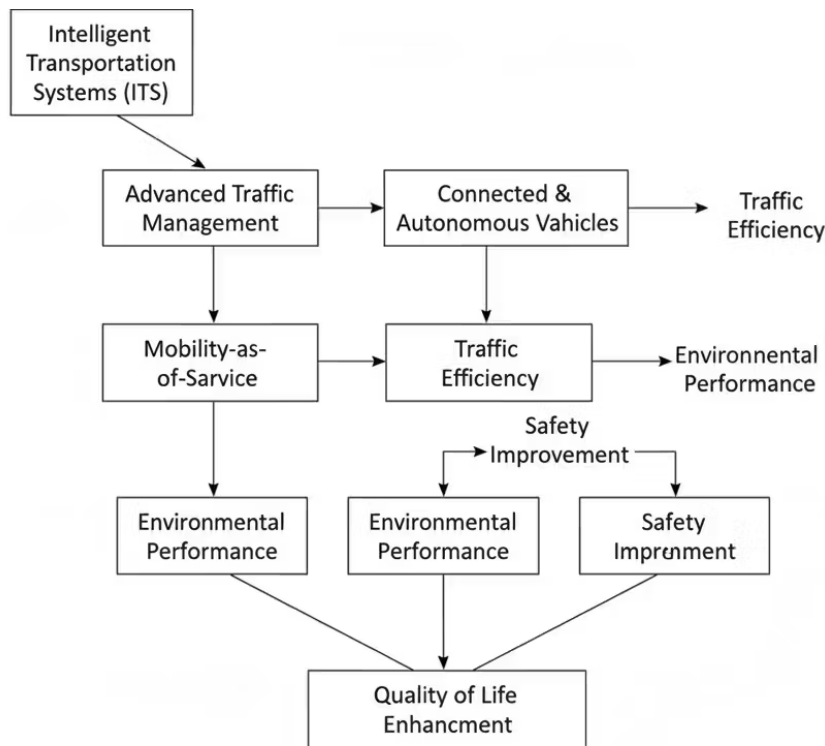
داده‌ها را به اشتراک بگذارند و پروتکل‌های عملیاتی هماهنگی داشته باشند. بدون این هماهنگی سازمانی، بهترین نرم‌افزارها نیز در اجرای موفق شکست خواهند خورد (Brotchie, ۲۰۱۸).

۸. ارائه مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی این پژوهش با هدف تبیین چگونگی اثرگذاری سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند شهری بر بهبود کیفیت زندگی شهروندان ارائه شده است. در این مدل، فرض بر آن است که تحول در فناوری‌های حمل‌ونقل، نه تنها یک تغییر عملیاتی در مدیریت ترافیک محسوب می‌شود، بلکه به عنوان یک سازوکار فراگیر، مجموعه‌ای از پیامدهای اجتماعی، زیست‌محیطی و ایمنی را نیز در سطح شهر رقم می‌زند. بنابراین، مدل پیشنهادی به صورت یک ساختار چندمرحله‌ای طراحی شده که از «حمل‌ونقل هوشمند» آغاز می‌شود و در نهایت به «ارتقای کیفیت زندگی» ختم می‌گردد.

در نخستین سطح این مدل، «سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند» به سه مؤلفه بنیادی تفکیک شده‌اند که نقش ستون‌های اصلی در ایجاد دگرگونی‌های حمل‌ونقلی را بر عهده دارند: مدیریت پیشرفته ترافیک، خودروهای متصل و خودران، و خدمات نوین جابه‌جایی مبتنی بر تقاضا یا همان «تحرک به عنوان خدمت». مدیریت پیشرفته ترافیک با تکیه بر کنترل هوشمند چراغ‌ها، تحلیل لحظه‌ای جریان حرکت، و تخصیص مسیرهای بهینه، امکان کاهش تراکم، کاهش زمان سفر و توزیع متعادل تر جریان عبور و مرور را فراهم می‌کند. خودروهای متصل و خودران نیز با حذف تدریجی خطاهای انسانی، تعامل هوشمند با زیرساخت‌ها، و واکنش سریع به شرایط محیطی، زمینه‌ای برای افزایش ایمنی و کاهش خطرات جاده‌ای ایجاد می‌کنند. در کنار این دو، خدمات MaaS با هدایت سفرها از طریق پلتفرم‌های دیجیتال، تجمیع انواع شیوه‌های حمل‌ونقل، و فراهم‌سازی انتخاب‌های متنوع برای کاربران، سهم مهمی در افزایش دسترسی و کاهش وابستگی شدید به خودروهای شخصی ایفا می‌کند.

در مرحله دوم مدل، این سه مؤلفه اصلی، اثرات خود را از طریق سه سازوکار میانجی اعمال می‌کنند: کارایی ترافیک، بهبود ایمنی، و عملکرد زیست‌محیطی. بهبود کارایی ترافیک مستقیماً از طریق کاهش توقف‌ها، روان‌سازی جریان حرکت و کاهش زمان سفر شکل می‌گیرد. ارتقای ایمنی نیز محصول افزایش توان عملکردی فناوری‌ها در پیش‌بینی شرایط خطر، واکنش سریع و کاهش تصمیم‌گیری‌های خطا دار است. همچنین، عملکرد زیست‌محیطی هنگامی بهبود می‌یابد که کاهش تراکم، کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌ها به صورت هم‌زمان اتفاق بیفتد. این سه مسیر میانجی نقش پل ارتباطی میان فناوری‌های حمل‌ونقل هوشمند و اثرات کلان شهری را بر عهده دارند. در مرحله سوم و نهایی، این سه مسیر میانجی با یکدیگر هم‌افزایی پیدا می‌کنند و مجموعه‌ای از پیامدهای مثبت را تولید می‌کنند که نهایتاً به «بهبود کیفیت زندگی شهروندان» منجر می‌شود. هنگامی که کارایی ترافیک بهبود یابد، افراد وقت بیشتری برای فعالیت‌های شخصی، شغلی و اجتماعی خواهند داشت و فشار روانی ناشی از ترافیک کاهش می‌یابد. ارتقای ایمنی نیز حس امنیت در رفت‌وآمد و کاهش خسارات انسانی و مالی را به دنبال دارد. همچنین، بهبود کیفیت هوا و کاهش آلودگی‌های صوتی و محیطی، احساس زیستن در یک محیط سالم‌تر و پایدارتر را برای شهروندان تقویت می‌کند. به این ترتیب، مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که حمل‌ونقل هوشمند تنها یک ابزار فناورانه نیست، بلکه یک اهرم توسعه شهری است که از طریق سازوکارهای هماهنگ و چندلایه، کیفیت زندگی را در ابعاد گوناگون ارتقا می‌دهد.



شکل ۱. مدل مفهومی پیشنهادی پژوهش برای تبیین مسیرهای اثرگذاری سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند شهری (ITS) بر ارتقای کیفیت زندگی؛ شامل نقش سه مؤلفه اصلی ITS (مدیریت پیشرفته ترافیک، خودروهای متصل و خودران، و خدمات تحرک به‌عنوان خدمت) و سه سازوکار میانجی (کارایی ترافیک، عملکرد زیست‌محیطی و بهبود ایمنی) که در نهایت به بهبود کیفیت زندگی شهروندان منتهی می‌شوند.

مدل تصویری ارائه‌شده در شکل مربوطه، این مسیرهای علی را در قالب یک ساختار شفاف، شبکه‌ای و سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد. در این نمودار، نقطه آغازین «سامانه حمل‌ونقل هوشمند» است که به سه مسیر اصلی منشعب می‌شود. سپس این مسیرها در قالب سه اثر میانجی با یکدیگر ارتباط پیدا کرده و در نهایت، همگی به نقطه پایانی یعنی «ارتقای کیفیت زندگی» ختم می‌شوند. این مدل ضمن سادگی در نمایش، ظرفیت بالایی برای آزمون در پژوهش‌های آینده و تبدیل شدن به یک چارچوب تحلیلی در مطالعات مدیریت شهری دارد.

نتیجه‌گیری

سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) نماینده یک جهش کوانتومی در توانایی ما برای مدیریت محیط‌های شهری پیچیده هستند. این فناوری‌ها، از طریق مدیریت ترافیک تطبیقی، وسایل نقلیه متصل و پلتفرم‌های MaaS، وعده بهبود چشمگیر ایمنی، کارایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی را می‌دهند که همگی مؤلفه‌های اصلی افزایش کیفیت زندگی شهروندان هستند. توانایی کاهش زمان هدر رفته در ترافیک و افزایش دسترسی‌پذیری برای گروه‌های محروم، ارزش اجتماعی غیرقابل انکاری به همراه دارد. با این حال، این مقاله به وضوح نشان داد که پتانسیل مثبت ITS به شدت توسط چالش‌های اجرایی و اخلاقی تهدید می‌شود. نگرانی‌های جدی پیرامون امنیت سایبری، حفظ حریم خصوصی داده‌ها و خطر ایجاد شکاف‌های دیجیتالی باید در

هسته سیاست‌گذاری‌ها قرار گیرند. اجرای موفق نیازمند یک رویکرد چندوجهی است که شامل سرمایه‌گذاری‌های سنگین در زیرساخت‌های دیجیتال، تدوین چارچوب‌های قانونی قوی برای حاکمیت داده‌ها، و طراحی خدمات کاربر محور با تأکید بر شمول اجتماعی باشد. در نهایت، آینده حمل‌ونقل هوشمند به نحوه پاسخگویی ما به این دوگانگی بستگی دارد: پتانسیل بی‌نظیر برای بهینه‌سازی در برابر خطرات ناشی از اتکای بیش از حد به فناوری‌های متمرکز و آسیب‌پذیر. شهرهای آینده‌نگر باید ITS را نه صرفاً به عنوان مجموعه‌ای از ابزارهای تکنولوژیک، بلکه به عنوان یک ابزار کلیدی برای دستیابی به عدالت اجتماعی و رفاه پایدار در نظر بگیرند، با ارجاع دقیق به نیازها و نگرانی‌های شهروندان (Daly, ۲۰۲۱).

منابع

- Anderson, R. (۲۰۲۰). Security in Connected Vehicles: Threats and Mitigation Strategies. SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, ۲(۱), ۱-۱۵.
- Brambhan, S. (۲۰۱۸). Intelligent Transportation Systems: An Overview. CRC Press.
- Brotchie, J. (۲۰۱۸). Cities in the ۲۱st Century: New Approaches to Urban Management. Routledge.
- Case Study, Argo AI. (۲۰۲۳). Impact of Autonomous Ride-Sharing on Urban Mobility. Internal Publication.
- Chen, H., Wang, Y., & Zhao, P. (۲۰۱۹). Emissions reduction potential by adaptive traffic signal control systems in urban road networks. Transportation Research Part D: Transport and Environment, ۷۱, ۱۱۲-۱۲۵.
- Chiu, Y. C., Huang, W. C., & Lu, S. S. (۲۰۱۵). Evaluation of Electronic Road Pricing Scheme in Singapore: A Case Study on Central Expressway. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, ۲۵۰۷(۱), ۱-۹.
- Daly, H. E. (۲۰۲۱). Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development. Beacon Press
- European Commission. (۲۰۱۹). Intelligent Transport Systems Directive (ITS Directive) Implementation Report. Directorate-General for Mobility and Transport.
- Ferreira, L. (۲۰۲۱). Vehicle-to-Everything (V2X) Communication: Principles and Applications. Wiley-IEEE Press.
- Garg, P., & Sharma, V. (۲۰۲۲). Integration of Electric Vehicles with Smart Grids: Challenges and Opportunities for Sustainable Cities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۵۹, ۱۱۲۲۱۰.
- Gogoll, J., & Müller, J. (۲۰۱۷). Autonomous Cars: In Favor of a Mandatory Ethics of Care. Science and Engineering Ethics, ۲۳(۳), ۶۸۱-۷۰۰.
- Goodall, N. (۲۰۱۶). Smart Cities and Connected Infrastructure. Taylor & Francis.
- Hietanen, S. (۲۰۱۹). Mobility as a Service (MaaS): A New Paradigm for Urban Transport. MDPI Books.
- Kwon, Y., Lee, S., & Kim, J. (۲۰۲۲). Deep Reinforcement Learning for Adaptive Traffic Signal Control Based on Real-Time Traffic Flow Prediction. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, ۲۳(۵), ۴۲۰۱-۴۲۱۲.
- Lee, J. H., & Shin, Y. (۲۰۲۱). Infrastructure Investment Strategies for Next-Generation ITS Deployment in Metropolitan Areas. Journal of Urban Planning and Development, ۱۴۷(۴), ۰۴۰۲۱۰۱۸.

- Marsden, G., & Reardon, L. (۲۰۱۷). The Potential of Demand Responsive Transport to Improve Accessibility for Vulnerable Groups. *Transport Policy*, ۵۴, ۱۲۱-۱۲۹.
- Newman, P., & Kenworthy, J. (۲۰۱۹). *The End of Automobile Dependence: How Cities are Moving Beyond Car-Based Planning*. Island Press.
- NHTSA Report. (۲۰۱۸). *Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey*. National Highway Traffic Safety Administration.
- OECD Guidelines. (۲۰۲۰). *Well-being Framework and Indicators for Urban Policy*. OECD Publishing.
- Smith, A., & Jones, B. (۲۰۲۱). Urbanization and Traffic Congestion: A Global Perspective on the Need for Intelligent Solutions. *Journal of Transport Geography*, ۹۱, ۱۰۲۹۹۰.
- TNO Report. (۲۰۲۰). *V2X Applications for Enhancing Cycling Safety and Flow in the Netherlands*. TNO Publications.
- UITP Report. (۲۰۲۱). *The Economic Value of Reduced Traffic Congestion in European Cities*. International Association of Public Transport.
- UN-Habitat Report. (۲۰۲۲). *Skills Gap Analysis in Smart City Infrastructure Management*. United Nations Human Settlements Programme.
- Van den Hoven, J., Blom, J. H., & van de Poel, I. (۲۰۱۵). The Ethical Dilemma of Big Data in Smart Cities. *Cities*, ۴۳, ۳۵-۴۳.
- Wang, M., & Li, X. (۲۰۱۷). Effectiveness of Forward Collision Warning Systems on Reducing Rear-End Collisions: A Meta-Analysis. *Accident Analysis & Prevention*, ۱۰۰, ۱۵-۲۴.
- Zhang, W., & Liu, Y. (۲۰۲۰). Traffic Signal Control Optimization Using Deep Learning for Urban Arterial Corridors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, ۱۱۷, ۱۰۲۶۹۸.
- Zuboff, S. (۲۰۱۹). *The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power*. PublicAffairs.