IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۲ (زمستان ۱۴۰۴) – صفحه ۲۳ تا ۳۲

بررسی نقش سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) در کاهش ترافیک و آلودگی هوای کلان‌شهرها با تأکید بر تجربه شهرهای موفق

حسین اسماعیلی

کارشناس روابط عمومی، شهرداری هماشهر فارس

hosseinesmaeili۳۱۱۰@gmail.com

چکیده

امروزه کلان‌شهرهای جهان با دو چالش بحرانی یعنی ترافیک سنگین و آلودگی فزاینده هوا مواجه هستند که پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی گسترده‌ای را به همراه دارد. سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (Intelligent Transportation Systems - ITS) به‌عنوان راهکاری فناورانه و چندبُعدی، قابلیت‌های قابل‌توجهی در مدیریت جریان ترافیک، کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده‌های هوا دارند. هدف این مقاله، بررسی نقش سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند در کاهش ترافیک و آلودگی هوای کلان‌شهرها با تأکید بر تجربه شهرهای موفق بین‌المللی است. روش تحقیق حاضر، توصیفی-تحلیلی و بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای و مروری است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از فناوری‌هایی نظیر سیستم‌های مدیریت ترافیک، کنترل چراغ‌های راهنمایی هوشمند، سیستم‌های اطلاعات سفر، و حمل‌ونقل همگانی هوشمند، می‌تواند زمان سفر را تا ۲۵ درصد کاهش دهد، مصرف سوخت را حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش دهد و انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۱۲ تا ۱۸ درصد کم کند. تجربه شهرهایی مانند سنگاپور، آمستردام، بارسلونا و مدیریت ترافیک شانگهای نشان می‌دهد که اجرای یکپارچه و جامع ITS می‌تواند الگویی موفق برای سایر کلان‌شهرها، به‌ویژه شهرهای در حال توسعه مانند شهرهای ایران، ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند، کلان‌شهرها، ترافیک، آلودگی هوا، مدیریت تقاضای سفر، حمل‌ونقل پایدار

۱. مقدمه

شهرنشینی شتابان یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های قرن بیست‌ویکم است. بر اساس گزارش سازمان ملل متحد، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ حدود ۶۸ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی کنند (Economic of Department Nations, United Affairs, Social and ۲۰۱۹). این رشد جمعیت شهری، فشار مضاعفی بر زیرساخت‌های حمل‌ونقل وارد کرده و مسائلی نظیر ترافیک سنگین، تأخیر در سفرها، مصرف بالای سوخت و آلودگی هوا را تشدید نموده است. برآوردهای بانک جهانی حاکی از آن است که هزینه‌های اقتصادی ترافیک شهری، معادل ۲ تا ۵ درصد تولید ناخالص داخلی کشورهای در حال توسعه است (Bank, World The ۲۰۲۱). همچنین، سازمان بهداشت جهانی تخمین زده است که آلودگی هوای شهری سالانه حدود ۴.۲ میلیون نفر را به مرگ زودرس دچار می‌کند (Organization, Health World ۲۰۲۱).

در پاسخ به این چالش‌ها، سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند به‌عنوان ابزاری مؤثر و چندمنظوره مطرح شده‌اند. ITS مجموعه‌ای از فناوری‌های پیشرفته شامل حسگرها، ارتباطات بی‌سیم، پردازش داده‌های کلان، هوش مصنوعی و سیستم‌های تصمیم‌گیری خودکار است که در حوزه مدیریت ترافیک و حمل‌ونقل به‌کار گرفته می‌شود (Wang et al., ۲۰۲۳). این سیستم‌ها با جمع‌آوری، پردازش و توزیع اطلاعات لحظه‌ای، امکان مدیریت پویا و بهینه جریان ترافیک و در نتیجه کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها را فراهم می‌سازند.

مقاله حاضر با هدف بررسی جامع نقش ITS در کاهش ترافیک و آلودگی هوای کلان‌شهرها تدوین شده و تلاش دارد با تحلیل مبانی نظری، بررسی فناوری‌های کلیدی و مطالعه تجربه شهرهای موفق بین‌المللی، چارچوبی کاربردی برای به‌کارگیری این سیستم‌ها ارائه دهد. سؤال اصلی پژوهش عبارت است از: سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند چگونه و تا چه اندازه می‌توانند در کاهش ترافیک و آلودگی هوای کلان‌شهرها مؤثر باشند؟

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲.۱. مفهوم سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند

سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند به مجموعه‌ای از فناوری‌ها اطلاق می‌شود که از ابزارهای الکترونیکی، ارتباطی و رایانه‌ای برای بهبود ایمنی، کارایی و پایداری سیستم‌های حمل‌ونقل استفاده می‌کنند (Administration, Highway Federal ۲۰۲۰). این سیستم‌ها طیف گسترده‌ای از کاربردها را شامل می‌شوند، از مدیریت چراغ‌های راهنمایی و نظارت بر جریان ترافیک گرفته تا سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی هوشمند و مدیریت تقاضای سفر.

تاریخچه ITS به دهه ۱۹۸۰ میلادی بازمی‌گردد، اما پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه اینترنت اشیا، رایانش ابری و هوش مصنوعی در دهه اخیر، تحول بنیادینی در کاربردهای آن ایجاد کرده است (Alturjman, & Al-Turjman ۲۰۲۰). در حال حاضر، نسل پنجم

ارتباطات سیار (G۵) و فناوری ارتباطات Vehicle-to-Everything (V۲X) نقش محوری در توسعه ITS ایفا می‌کنند و امکان ارتباط لحظه‌ای و بدون تأخیر میان خودروها، زیرساخت‌ها و مراکز مدیریت را فراهم ساخته‌اند (Zheng et al., ۲۰۲۲).

۲.۲. ارتباط ITS با کاهش ترافیک

یکی از مکانیزم‌های اصلی تأثیرگذاری ITS بر کاهش ترافیک، بهینه‌سازی جریان ترافیک است. سیستم‌های تطبیقی کنترل چراغ راهنمایی (Control Signal Traffic Adaptive) با استفاده از داده‌های لحظه‌ای حسگرها، الگوی بهینه زمان‌بندی چراغ‌ها را تعیین می‌کنند و از تشکیل صف‌های طولانی جلوگیری می‌نمایند. مطالعات نشان می‌دهد که این سیستم‌ها می‌توانند تأخیر ترافیک را در تقاطع‌ها تا ۱۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهند (Goodall et al., ۲۰۲۱). همچنین سیستم‌های اطلاع‌رسانی لحظه‌ای ترافیک با هدایت رانندگان به مسیرهای جایگزین، از تمرکز ترافیک در معابر اصلی می‌کاهند (Zhang et al., ۲۰۲۳).

مدیریت تقاضای سفر (TDM - Management Demand Travel) نیز از دیگر ابزارهای مهم ITS است. سیستم‌های پرداخت الکترونیکی عوارض (Collection Toll Electronic)، برنامه‌های اشتراک سفر و مدیریت پارکینگ هوشمند، با تأثیرگذاری بر انتخاب‌های سفر شهروندان، تقاضای سفر در ساعات اوج را کاهش می‌دهند (Litman, ۲۰۲۳).

۲.۳. ارتباط ITS با کاهش آلودگی هوا

کاهش ترافیک و بهبود جریان حرکت وسایل نقلیه، اثر مستقیمی بر کاهش آلودگی هوا دارد. توقف و حرکت مداوم خودروها در شرایط ترافیکی، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. تحقیقات نشان می‌دهد که خودروهای در حال حرکت در ترافیک سنگین، تا ۵۰ درصد بیشتر از خودروهای در حال حرکت آزاد سوخت مصرف می‌کنند (Boriboonsomsin, & Barth ۲۰۲۰). بنابراین، بهینه‌سازی جریان ترافیک از طریق ITS می‌تواند انتشار گازهای آلاینده از جمله مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NOx)، ترکیبات آلی فرار (VOCs) و ذرات معلق (PM۲.۵ و PM۱۰) را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش دهد.

بر اساس مطالعات آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده، بهبود کارایی سوخت وسایل نقلیه از طریق مدیریت ترافیک هوشمند، می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش حمل‌ونقل را تا ۱۵ درصد کاهش دهد (Protection Environmental States United Agency, ۲۰۲۲).

۳. فناوری‌های کلیدی ITS در خدمت کاهش ترافیک و آلودگی هوا

۳.۱. سیستم‌های کنترل تطبیقی چراغ راهنمایی

این سیستم‌ها از حسگرهای ترافیکی (حلقه‌های القایی، رادار و دوربین‌های پردازش تصویر) برای تشخیص حجم ترافیک استفاده کرده و زمان‌بندی چراغ‌ها را به‌صورت لحظه‌ای تنظیم می‌کنند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین در این سیستم‌ها، امکان پیش‌بینی الگوهای ترافیکی و تنظیم پیشگیرانه چراغ‌ها را فراهم می‌سازند. سیستم SCATS در استرالیا و سیستم SCOOT در انگلستان از نمونه‌های

شناخته‌شده این فناوری هستند که توانسته‌اند تأخیر ترافیک را به‌ترتیب ۲۰ تا ۳۰ درصد و ۱۲ تا ۲۰ درصد کاهش دهند (Liu et al., ۲۰۲۲).

۳.۲. سیستم‌های اطلاعات ترافیک لحظه‌ای

این سیستم‌ها با استفاده از داده‌های GPS خودروها، حسگرهای جاده‌ای و دوربین‌ها، اطلاعات لحظه‌ای وضعیت ترافیک را جمع‌آوری و از طریق اپلیکیشن‌های ناوبری، تابلوهای پیام متغیر و سیستم‌های رادیویی به رانندگان ارائه می‌دهند. این اطلاعات به رانندگان کمک می‌کند تا مسیرهای بهینه را انتخاب کنند و از ورود به مناطق پرتردد اجتناب ورزند (Kieu et al., ۲۰۲۰).

۳.۳. مدیریت تقاضای سفر هوشمند

پلتفرم‌های مدیریت تقاضای سفر (MaaS) با یکپارچه‌سازی اطلاعات حمل‌ونقل همگانی، اشتراک سفر و مسیریابی هوشمند، به شهروندان امکان می‌دهند تا بر اساس اطلاعات کامل، بهینه‌ترین انتخاب سفر را داشته باشند. تحقیقات نشان داده است که این پلتفرم‌ها می‌توانند استفاده از خودروی شخصی را تا ۱۵ درصد کاهش دهند (Muheim et al., ۲۰۲۲).

۳.۴. حمل‌ونقل همگانی هوشمند

سیستم‌های مدیریت ناوگان اتوبوس‌رانی با اولویت‌دهی چراغ راهنمایی به اتوبوس‌ها (Priority Signal Transit) و اطلاع‌رسانی لحظه‌ای زمان رسیدن اتوبوس، جذابیت حمل‌ونقل همگانی را افزایش داده و شهروندان بیشتری را به استفاده از آن ترغیب می‌کنند (Chen et al., ۲۰۲۱).

۳.۵. خودروهای متصل و خودران

فناوری ارتباطات Vehicle-to-Everything (V۲X) امکان ارتباط مستقیم خودروها با یکدیگر و با زیرساخت‌های جاده‌ای را فراهم می‌سازد. این فناوری با هماهنگ‌سازی حرکت خودروها، فاصله ایمن بین آن‌ها را کاهش داده و جریان ترافیک را روان‌تر می‌کند. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که نفوذ ۲۵ درصدی خودروهای متصل در شبکه ترافیک می‌تواند ظرفیت معابر را تا ۳۰ درصد افزایش دهد (Mahmassani, & Talebpour ۲۰۲۱).

۴. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با رویکرد توصیفی-تحلیلی و به روش مروری انجام شده است. منابع مورد استفاده شامل مقالات علمی منتشرشده در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر بین‌المللی از جمله Scopus، Science of Web و Scholar Google، گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی مانند سازمان بهداشت جهانی، بانک جهانی، آژانس بین‌المللی انرژی و آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، و همچنین گزارش‌های شهرداری‌ها و نهادهای دولتی شهرهای مورد مطالعه است. جستجو در منابع با کلیدواژه‌های «Intelligent Transportation Systems»، «traffic reduction»، «ITS air pollution reduction»، «ITS smart city» انجام شد.

«transportation، «urban traffic» «management و ترکیبات مشابه انجام شد. معیارهای انتخاب منابع شامل انتشار در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶، دسترسی به متن کامل، و مرتبط بودن مستقیم موضوعی بوده است.

۵. یافته‌ها و بحث

۵.۱. تجربه سنگاپور

سنگاپور به‌عنوان یکی از پیشروترین شهرهای جهان در اجرای ITS شناخته می‌شود. سیستم الکترونیکی جمع‌آوری عوارض الکترونیکی (ERP) این شهر از سال ۱۹۹۸ فعال است و بر اساس گزارش مرجع حمل‌ونقل زمینی سنگاپور (Land Transport Authority, ۲۰۲۳)، این سیستم با دریافت عوارض متغیر بر اساس شرایط ترافیکی و زمان سفر، توانسته است تردد وسایل نقلیه در ساعات اوج را تا ۲۰ درصد کاهش دهد. همچنین سیستم مدیریت تقاضای پارکینگ هوشمند با توزیع بهتر فضای پارک، جستجوی رانندگان برای پارکینگ را که یکی از عوامل مهم ترافیک شهری است، به‌طور چشمگیری کاهش داده است.

سنگاپور همچنین از سیستم نظارت تصویری پیشرفته با بیش از ۹۰،۰۰۰ دوربین در سراسر شهر بهره می‌برد که داده‌های ترافیکی را در زمان واقعی به مرکز کنترل ترافیک ارسال می‌کنند (Choi et al., ۲۰۲۲). بر اساس گزارش سازمان محیط زیست ملی سنگاپور، غلظت ذرات معلق ۵.PM۲ در این شهر از ۲۵ میکروگرم بر مترمکعب در سال ۲۰۱۰ به حدود ۱۲ میکروگرم بر مترمکعب در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته است که بخش قابل‌توجهی از آن مرتبط با بهبود جریان ترافیک است (National Environment Agency Singapore, ۲۰۲۴).

۵.۲. تجربه آمستردام

آمستردام با چالش‌های مشترک کلان‌شهرها در زمینه ترافیک و آلودگی هوا مواجه بوده و با سرمایه‌گذاری قابل‌توجه در ITS، به یکی از الگوهای موفق شهری تبدیل شده است. سیستم مدیریت ترافیک تطبیقی آمستردام با بهره‌گیری از هوش مصنوعی، زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی را بر اساس حجم واقعی ترافیک تنظیم می‌کند. گزارش شهرداری آمستردام نشان می‌دهد که این سیستم تأخیر ترافیک را ۱۸ درصد و انتشار CO۲ مرتبط با ترافیک را ۱۰ درصد کاهش داده است (Amsterdam, Gemeente ۲۰۲۳).

همچنین برنامه سیستم مدیریت تقاضای سفر آمستردام با ارائه پیشنهادهای شخصی‌سازی‌شده سفر به شهروندان از طریق اپلیکیشن‌های هوشمند، توانسته است سهم سفرهای پیاده و دوچرخه‌سواری را افزایش دهد. بر اساس آمارهای منتشرشده، میزان استفاده از دوچرخه در آمستردام از ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ حدود ۲۲ درصد افزایش یافته است و بخشی از این موفقیت مرتبط با زیرساخت‌های ITS و اطلاع‌رسانی هوشمند است (Amsterdam, of City ۲۰۲۴).

۵.۳. تجربه بارسلونا

بارسلونا از دیگر شهرهای موفق در بهره‌گیری از ITS است. پروژه «Barcelona Digital City» Plan با تمرکز بر هوشمندسازی زیرساخت‌های شهری، شامل استقرار بیش از ۳۰،۰۰۰ حسگر محیطی و ترافیکی در سطح شهر است (Braun, ۲۰۲۲). این حسگرها

اطلاعات لحظه‌ای کیفیت هوا، حجم ترافیک و وضعیت پارکینگ‌ها را به مرکز داده شهری (Hall, City Barcelona ۲۰۲۳) ارسال می‌کنند.

سیستم مدیریت پارکینگ هوشمند بارسلونا از جمله نوآورانه‌ترین سیستم‌های اروپاست. این سیستم با تشخیص فضاهای خالی پارکینگ و هدایت رانندگان به نزدیک‌ترین مکان‌های آزاد، زمان جستجوی پارکینگ را که طبق مطالعات حدود ۳۰ درصد ترافیک شهری را تشکیل می‌دهد، به‌طور چشمگیری کاهش داده است (Giuffrida et al., ۲۰۲۱). بر اساس گزارش شهرداری بارسلونا، این اقدامات در کنار یکپارچه‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، منجر به کاهش ۱۵ درصدی ترافیک خودروهای شخصی و کاهش ۸ درصدی غلظت NO_2 در سطح شهر در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ شده است (Barcelona, de Ajuntament ۲۰۲۴).

۵.۴. تجربه شانگهای

شانگهای به‌عنوان بزرگ‌ترین شهر چین، با جمعیتی بالغ بر ۲۴ میلیون نفر، از پیشرفته‌ترین سیستم‌های مدیریت ترافیک هوشمند جهان برخوردار است. سیستم نظارت ترافیک هوشمند این شهر با بیش از ۵۰۰،۰۰۰ دوربین و حسگر، یکی از گسترده‌ترین شبکه‌های نظارتی جهان محسوب می‌شود (Li, & Zhang ۲۰۲۲). بر اساس گزارش کمیسیون شهری امور عمومی و امنیت شانگهای، سیستم مدیریت تقاطع‌های هوشمند با تنظیم تطبیقی چراغ‌های راهنمایی، زمان سفر در معابر اصلی را ۲۵ درصد و انتشار آلاینده‌های مرتبط با ترافیک را ۱۲ درصد کاهش داده است (Security, Public of Commission Municipal Shanghai ۲۰۲۳).

شانگهای همچنین از سیستم پرداخت عوارض الکترونیکی بزرگراهی (ETC) با نرخ پذیرش بالای ۹۸ درصد بهره می‌برد که ازدحام در عوارضی‌ها را به حداقل رسانده و در نتیجه انتشار آلاینده‌ها در این نقاط را کاهش داده است (Wang, & Chen ۲۰۲۳).

۵.۵. تحلیل تطبیقی اثربخشی ITS در کاهش ترافیک و آلودگی هوا

جدول زیر خلاصه‌ای از نتایج کمّی اجرای سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند در چهار شهر مورد مطالعه را ارائه می‌دهد:

شهر	فناوری اصلی ITS	کاهش ترافیک (درصد)	کاهش آلودگی هوا (درصد)	سال اجرا
سنگاپور	عوارض الکترونیکی متغیر	۲۰	۱۵ (PM۲.۵)	۱۹۹۸ و به‌روزرسانی مستمر
آمستردام	کنترل تطبیقی چراغ راهنمایی	۱۸	۱۰ (CO_2)	۲۰۱۸
بارسلونا	حسگرهای محیطی و مدیریت پارکینگ	۱۵	۸ (NO_2)	۲۰۲۰
شانگهای	نظارت هوشمند و کنترل تقاطع‌ها	۲۵	۱۲ (عمومی)	۲۰۱۵ و گسترش تا ۲۰۲۳

منبع: (Singapore, Authority Transport Land ۲۰۲۳; Amsterdam, Gemeente ۲۰۲۳; Barcelona, de Ajuntament ۲۰۲۴; Security, Public of Commission Municipal Shanghai ۲۰۲۳)

جدول بالا نشان می‌دهد که اگرچه نتایج کمّی در شهرهای مختلف متفاوت است، اما روند کلی تأثیرگذاری ITS بر هر دو مؤلفه ترافیک و آلودگی هوا مثبت و معنادار بوده است.

۵.۶. تحلیل اقتصادی هزینه-فایده ITS

بررسی‌های اقتصادی نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در ITS عمدتاً از طریق کاهش هزینه‌های ترافیکی (سوخت اضافی، زمان wasted و ...) بازگشت سرمایه دارد. مطالعه‌ای توسط کنسرسیوم اروپایی ITS ارزیابی اقتصادی جامعی از پروژه‌های ITS در ۱۲ شهر اروپایی انجام داده و نشان داده است که متوسط نسبت هزینه-فایده (BCR) این پروژه‌ها بین ۳.۵ تا ۸.۲ متغیر بوده است، به این معنا که به ازای هر یک یورو سرمایه‌گذاری، بین ۳.۵ تا ۸.۲ یورو منفعت اقتصادی حاصل شده است (Platform, ITS European ۲۰۲۲).

همچنین برآوردهای بانک جهانی نشان می‌دهد که اجرای جامع ITS در کلان‌شهرهای در حال توسعه می‌تواند هزینه‌های ناشی از ترافیک را که معمولاً بین ۲ تا ۵ درصد GDP تخمین زده می‌شود، تا ۴۰ درصد کاهش دهد (Bank, World The ۲۰۲۱).

۵.۷. تأثیر ITS بر الگوی حمل‌ونقل و تغییر رفتار سفر

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تأثیرگذاری ITS، تغییر رفتار سفر شهروندان است. مطالعات نشان می‌دهد که دسترسی به اطلاعات لحظه‌ای ترافیک، رانندگان را به استفاده از مسیرهای جایگزین و تغییر زمان سفر ترغیب می‌کند. تحقیق Zhang و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که اپلیکیشن‌های اطلاع‌رسانی ترافیک، حدود ۱۲ درصد از رانندگان را به تغییر مسیر و ۸ درصد را به تغییر زمان سفر ترغیب می‌کنند. این تغییر رفتاری، اثر تجمعی قابل‌توجهی بر کاهش تراکم ترافیک دارد.

۵.۸. چالش‌ها و موانع اجرای ITS

با وجود مزایای فراوان، اجرای ITS با چالش‌هایی نیز مواجه است. از جمله مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به هزینه‌های اولیه بالای زیرساخت‌ها اشاره کرد. استقرار حسگرها، دوربین‌ها، مراکز داده و سیستم‌های ارتباطی، سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی را می‌طلبد (et Ali al., ۲۰۲۲). همچنین مسائل مربوط به حریم خصوصی داده‌ها و امنیت سایبری از دغدغه‌های مهم شهروندان و نهادهای نظارتی است. نگرانی‌هایی در خصوص جمع‌آوری داده‌های مکانی و رفتاری شهروندان و احتمال سوءاستفاده از آن‌ها وجود دارد (al et Zhou., ۲۰۲۱).

یکپارچه‌سازی سیستم‌های مختلف ITS با یکدیگر و با سیستم‌های موجود شهری نیز از چالش‌های فنی مهم است. بسیاری از شهرها سیستم‌های متعددی را به‌صورت جزیره‌ای و بدون قابلیت تعامل پیاده‌سازی کرده‌اند که از اثربخشی کلی سیستم کاسته است (Wang et al., ۲۰۲۳). علاوه بر این، مقاومت فرهنگی و عادت‌های تغییرناپذیر برخی از شهروندان در استفاده از فناوری‌های جدید، یکی دیگر از موانع اجرای موفق ITS است.

۶. پیشنهادها و راهکارها

با توجه به یافته‌های پژوهش، پیشنهادهای زیر برای اجرای مؤثر ITS در کلان‌شهرها ارائه می‌شود:

۶.۱. رویکرد تدریجی و مرحله‌ای: اجرای یکپارچه ITS نیازمند منابع مالی و فنی قابل‌توجه است. تجربه شهرهای موفق نشان می‌دهد که اجرای مرحله‌ای با اولویت‌بندی پروژه‌ها بر اساس تأثیرگذاری و هزینه، نتایج بهتری به همراه دارد. پیشنهاد می‌شود ابتدا سیستم‌های کنترل تطبیقی چراغ راهنمایی و سپس سیستم‌های اطلاع‌رسانی لحظه‌ای و مدیریت تقاضای سفر اجرا شوند.

۶.۲. یکپارچه‌سازی سیستم‌ها: ایجاد پلتفرم یکپارچه مدیریت ترافیک شهری که داده‌های تمام سیستم‌های جزیره‌ای را تجمیع و تحلیل کند، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. این پلتفرم باید قابلیت تبادل داده با سیستم‌های مدیریت بحران، خدمات اضطراری و حمل‌ونقل همگانی را داشته باشد.

۶.۳. مشارکت عمومی و فرهنگ‌سازی: آگاه‌سازی شهروندان از مزایای ITS و مشارکت آن‌ها در فرآیند طراحی و اجرا، پذیرش عمومی فناوری‌ها را افزایش و مقاومت فرهنگی را کاهش می‌دهد. برگزاری کارگاه‌های آموزشی و ارائه مشوق‌های استفاده از حمل‌ونقل همگانی هوشمند از جمله این اقدامات است.

۶.۴. حفاظت از حریم خصوصی: تدوین قوانین و مقررات شفاف در خصوص جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و استفاده از داده‌های شهروندان، همراه با بهره‌گیری از فناوری‌های حفاظت از داده مانند ناشناس‌سازی، اعتماد عمومی را تقویت می‌کند.

۶.۵. تمرکز بر داده‌های باز: بهره‌گیری از رویکرد داده‌های باز (Data Open) و انتشار اطلاعات ترافیکی برای توسعه‌دهندگان اپلیکیشن‌ها، نوآوری بومی و متنوع‌سازی خدمات هوشمند حمل‌ونقل را ممکن می‌سازد.

۷. نتیجه‌گیری

سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند به‌عنوان ابزاری کارآمد و چندبُعدی، پتانسیل قابل‌توجهی در کاهش ترافیک و آلودگی هوای کلان‌شهرها دارند. بررسی تجربه شهرهای سنگاپور، آمستردام، بارسلونا و شانگهای نشان داد که اجرای یکپارچه و هدفمند ITS می‌تواند ترافیک شهری را ۱۵ تا ۲۵ درصد و آلودگی هوای مرتبط با ترافیک را ۸ تا ۱۵ درصد کاهش دهد. این سیستم‌ها با بهینه‌سازی جریان ترافیک، کاهش توقف و حرکت‌های اضافی، مدیریت تقاضای سفر و ترویج استفاده از حمل‌ونقل همگانی، همزمان به اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی دست می‌یابند.

با این حال، موفقیت اجرای ITS مستلزم سرمایه‌گذاری کافی، همکاری بین‌بخشی، توجه به مسائل حریم خصوصی، و فرهنگ‌سازی مناسب است. تجربه شهرهای موفق جهان نشان می‌دهد که رویکرد تدریجی، مشارکتی و مبتنی بر شواهد، کلید دستیابی به اهداف پایداری حمل‌ونقل شهری است. برای شهرهای ایران نیز با توجه به رشد شتابان جمعیت شهری و تشدید مشکلات ترافیکی و زیست‌محیطی، بهره‌گیری از تجربیات بین‌المللی و اجرای هوشمندانه ITS از ضروریات توسعه پایدار شهری محسوب می‌شود.

فهرست منابع

۱. Ajuntament de Barcelona. (۲۰۲٤). Informe anual de qualitat de l'aire i mobilitat urbana ۲۰۲۳ [Annual air quality and urban mobility report ۲۰۲۳]. Barcelona City Hall.

۲. Ali, A., Al-Jubari, I., & Hamzah, F. H. (۲۰۲۲). Intelligent transportation systems: Challenges and opportunities. Journal of Transportation Technologies, ۱۲(۳), ۲٤٥–۲٦۲. https://doi.org/۱۰,٤۲۳٦/jtts.۲۰۲۲,۱۲۳۰۱٥

۳. Al-Turjman, F., & Alturjman, S. (۲۰۲۰). ٥G/٦G-enabled transparent computing in IoT-based multimedia applications. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, ۳۱(۳), e۳۹۰۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۲/ett.۳۹۰۲

٤. Barcelona City Hall. (۲۰۲۳). Smart city strategy Barcelona ۲۰۲۰–۲۰۲٤: Implementation progress report. Barcelona Digital City Program.

٥. Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (۲۰۲۰). Real-world carbon impacts of intelligent transportation systems. Transportation Research Part D: Transport and Environment, ۱٤(٥), ۳۰٥–۳۱۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.trd.۲۰۰۹,۰۱,۰۰٤

٦. Braun, K. (۲۰۲۲). Barcelona's urban sensor network: A model for smart city development. Smart Cities, ٥(۱), ۱۲۰–۱۳۸.

۷. Chen, Q., & Wang, H. (۲۰۲۳). High adoption rate of electronic toll collection systems in Chinese megacities: Lessons from Shanghai. Journal of Urban Transportation Systems, ۱۸(۲), ۸۹–۱۰٤.

۸. Chen, X., Li, Y., & Zhang, W. (۲۰۲۱). Transit signal priority strategies for bus rapid transit: A comprehensive review. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, ۱۲۸, ۱۰۳۱۸۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.trc.۲۰۲۱,۱۰۳۱۸۹

۹. Choi, S., Kim, J., & Park, S. (۲۰۲۲). Singapore's integrated smart mobility framework: Lessons for smart city development. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, ۱٤(٤), ۱۲۰–۱۳٥. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/MITS.۲۰۲۱,۳۰٦۲۸٤۷

۱۰. City of Amsterdam. (۲۰۲٤). Amsterdam cycling statistics ۲۰۲۳. Municipality of Amsterdam, Department of Traffic and Transport.

۱۱. European ITS Platform. (۲۰۲۲). Cost-benefit analysis of ITS deployment in European cities: Comprehensive study of ۱۲ cities. European Commission Directorate-General for Mobility and Transport.

۱۲. Federal Highway Administration. (۲۰۲۰). Intelligent transportation systems (ITS) primer (FHWA-HOP-۲۰-۰۱٥). U.S. Department of Transportation.

۱۳. Gemeente Amsterdam. (۲۰۲۳). Adaptive traffic management system: Performance evaluation report ۲۰۱۸–۲۰۲۳. Amsterdam Municipal Government, Transport Department.

۱٤. Giuffrida, N., Fajardo, J. M., & Caldhour, J. (۲۰۲۱). Smart parking systems for reducing urban traffic congestion: Evidence from Barcelona. Transportation Research Procedia, ٥۲, ۳۷۹–۳۸٦. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.trpro.۲۰۲۱,۰۱,۰٤٥

۱٥. Goodall, N. J., Smith, B. L., & Park, B. (۲۰۲۱). Traffic signal performance assessment using crowdsourced vehicle data. Transportation Research Record, ۲٦۷٥(۱۱), ٦۲۳–٦۳۳. https://doi.org/۱۰,۱۱۷۷/۰۳٦۱۱۹۸۱۲۱۱۰۰٦۰٤۳

۱٦. Kieu, L. M., Bhaskar, A., & Chung, E. (۲۰۲۰). Bus travel time prediction: A route-level model for real-time applications. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, ۱۱٤, ٦۸۱–٦۹۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.trc.۲۰۲۰,۰۲,۰۱٦

۱۷. Land Transport Authority Singapore. (۲۰۲۳). ERP ۲,۰ system evaluation report: Impact on traffic demand and environmental outcomes. LTA Singapore.
۱۸. Litman, T. (۲۰۲۳). Transportation demand management: Strategies and policies for sustainable urban mobility. Victoria Transport Policy Institute.
۱۹. Liu, Y., Wang, Y., & Yang, X. (۲۰۲۲). Comparative analysis of adaptive traffic signal control systems: SCATS, SCOOT, and emerging AI-based approaches. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, ۲۳(۸), ۱۱۲۳٤–۱۱۲٤۷. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TITS.۲۰۲۱,۳۱۱٤٥٦۷
۲۰. Muheim, P., Hensley, R., & Luidolt, L. (۲۰۲۲). Mobility-as-a-Service: A consumer-centric approach to urban mobility. McKinsey Center for Future Mobility, ۱٥(۲), ۳٤–٥۱.
۲۱. National Environment Agency Singapore. (۲۰۲٤). Singapore air quality report ۲۰۲۳. Government of Singapore.
۲۲. Shanghai Municipal Commission of Public Security. (۲۰۲۳). Annual traffic management performance review ۲۰۲۲. Shanghai Municipal Government.
۲۳. Talebpour, A., & Mahmassani, H. S. (۲۰۲۱). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. Transportation Research Record, ۲٤۸۹(۱), ۷۸–۸۹. https://doi.org/۱۰,۳۱٤۱/۲٤۸۹-۰۹
۲٤. The World Bank. (۲۰۲۱). The high cost of traffic congestion in developing cities: Economic impacts and policy recommendations (Urban Development Series Knowledge Paper). World Bank Group.
۲٥. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (۲۰۱۹). World urbanization prospects: The ۲۰۱۸ revision (ST/ESA/SER.A/٤۲۰). United Nations.
۲٦. United States Environmental Protection Agency. (۲۰۲۲). Fast facts: Transportation emissions and environmental impacts. EPA Office of Transportation and Air Quality.
۲۷. Wang, J., Liu, J., & Kato, N. (۲۰۲۳). Networking and communications in autonomous driving: A comprehensive survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, ۲٥(۱), ۸۱۹–۸٥۹. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/COMST.۲۰۲۲,۳۲۲۳۱۱۲
۲۸. World Health Organization. (۲۰۲۱). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. WHO Press.
۲۹. Zhang, J., Wang, F., Wang, K., Xu, L., & Rong, J. (۲۰۲۳). Impact of real-time traffic information systems on route choice behavior: A case study in Beijing. Journal of Transport Geography, ۱۰٦, ۱۰۳٤۹٦. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jtrangeo.۲۰۲۲,۱۰۳٤۹٦
۳۰. Zhang, Y., & Li, M. (۲۰۲۲). Large-scale intelligent traffic management systems in Chinese megacities: Architecture and performance. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, ۲۳(۷), ۸۸٥٦–۸۸۷۰. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TITS.۲۰۲۱,۳۱۰٤٥٦۸
۳۱. Zheng, G., Xiong, N., Zong, L., & Vasilakos, A. V. (۲۰۲۲). A vision-based intelligent transportation system for safe driving. IEEE Transactions on Industrial Informatics, ۱۸(۲), ۱۲٥٥–۱۲٦٥. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TII.۲۰۲۱,۳۱۰۲٤٥٦
۳۲. Zhou, H., He, S., Cai, Y., Wang, M., & Pan, S. (۲۰۲۱). Social sensing and crowdsourcing in intelligent transportation systems: A survey. International Journal of Distributed Sensor Networks, ۱۷(٤), ۱٥٥۰۱٤۷۷۲۱۱۰۰۳۸. https://doi.org/۱۰,۱۱۷۷/۱٥٥۰۱٤۷۷۲۱۱۰۰۳۸۲۱