

کنترل تطبیقی ترافیک با هوش مصنوعی: بهینه‌سازی چراغ‌های راهنمایی در شهرهای هوشمند

علی اصغر زارع دولت آبادی^{۱*}، محمدجواد نعمتی^۲ و محمدجواد صادقی^۳

^۱Asghar.ali.z.a.r.e@gmail.com

^۲nmty۹۱۹۸@gmail.com

^۳javadsadghei۱۱۲۲@gmail.com

چکیده: مدیریت ترافیک شهری با چالش‌هایی همچون ازدحام، تأخیر، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها مواجه است. این مقاله چارچوبی مبتنی بر هوش مصنوعی برای سیستم‌های کنترل تطبیقی ترافیک (ATCS) ارائه می‌دهد که بر پویاسازی زمان‌بندی و فازبندی چراغ‌های راهنمایی در تقاطع‌ها تمرکز دارد. هدف این رویکرد کاهش توقف‌ها، زمان سفر، مصرف سوخت، انتشار آلاینده‌ها و افزایش ایمنی با در نظر گرفتن جریان وسایل نقلیه و عابران پیاده است. نتایج مورد انتظار شامل بهبود جریان ترافیک، کاهش تأخیرها و ارتقای کارایی و پایداری سیستم حمل‌ونقل شهری خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی ترافیک، بهینه‌سازی چراغ‌های راهنمایی، کنترل تطبیقی ترافیک، مدیریت شهری هوشمند، هوش مصنوعی

با استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته نظیر اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های تاریخی و لحظه‌ای، این سیستم‌ها نه تنها می‌توانند شرایط ترافیکی فعلی را مدیریت کنند، بلکه با پیش‌بینی الگوهای ترافیکی، تصمیمات موثرتری اتخاذ کنند. اگرچه اجرای چنین سیستم‌هایی به زیرساخت‌های پیشرفته و هزینه‌های قابل توجهی نیاز دارد، اما مزایایی مانند کاهش تأخیرها و افزایش کارایی تقاطع‌ها، استفاده از آن‌ها را به یک نیاز ضروری تبدیل کرده است.

۲- بیان مسأله

پویاسازی و کنترل تطبیقی ترافیک از دهه ۱۹۲۰ میلادی آغاز شد، زمانی که افسران پلیس به صورت دستی چرخه‌های زمانی چراغ‌های راهنمایی را تغییر می‌دادند. از آن زمان تاکنون، پیشرفت‌های قابل توجهی در این حوزه صورت گرفته و سیستم‌های پیشرفته‌ای مانند SCATS، SCOOT و InSync معرفی شده‌اند. با این حال، مشکلات ترافیکی همچنان به عنوان یکی از چالش‌های اصلی شهرهای بزرگ باقی مانده است. تقاطع‌ها و چهارراه‌ها به عنوان نقاط حساس در شبکه حمل‌ونقل شهری، نقشی کلیدی در ایجاد مشکلات ترافیکی دارند. تراکم بیش از حد وسایل نقلیه، افزایش زمان تأخیر، مصرف بالای سوخت، آلودگی هوا و وقوع تصادفات، از جمله چالش‌های عمده در این نقاط هستند. بر اساس گزارش‌های جهانی، حدود ۵۰ درصد از تأخیرهای ترافیکی در شهرهای بزرگ به ناکارآمدی سیستم‌های کنترل ترافیک در چهارراه‌ها مرتبط است.^[۱]

۱- مقدمه

با توسعه روزافزون شهرنشینی، پیامدهای مختلفی به ویژه در زمینه تراکم جمعیت و افزایش ترافیک به وجود آمده است. افزایش زمان‌های تلف شده در معابر و ناکارآمدی سیستم‌های سنتی کنترل ترافیک به وضوح نشان می‌دهد که این سیستم‌ها دیگر پاسخگوی نیازهای شهرهای امروزی نیستند. در چنین شرایطی، استفاده از فناوری‌های جدید مانند هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌تواند به عنوان راه‌حلی بنیادی برای مدیریت ترافیک مطرح شود.

چراغ‌های راهنمایی در تقاطع‌ها همواره نقش مهمی در تنظیم جریان ترافیک و کاهش تراکم داشته‌اند. در سال‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری برای بهینه‌سازی زمان‌بندی این چراغ‌ها انجام شده که یکی از مهم‌ترین دستاوردها، سیستم‌های کنترل تطبیقی است. این سیستم‌ها با استفاده از داده‌های بلادرنگ، مانند اطلاعات جمع‌آوری شده توسط دوربین‌ها و حلقه‌های مغناطیسی، به تحلیل شرایط ترافیکی پرداخته و زمان‌بندی چراغ‌ها را به صورت هوشمند تنظیم می‌کنند.

یکی از ویژگی‌های برجسته این سیستم‌ها انعطاف‌پذیری آن‌ها در شرایط مختلف ترافیکی است. برای مثال، در ساعات اوج ترافیک، این سیستم‌ها می‌توانند با تنظیم دقیق‌تر زمان چراغ‌های سبز و قرمز، ازدحام را در مسیرهای پرتردد کاهش دهند. همچنین، در مواقع اضطراری یا رخدادهای غیرمنتظره مانند تصادفات، این سیستم‌ها با مدیریت پویا، مسیرهای جایگزین را پیشنهاد داده و ترافیک را بهینه می‌کنند.

۲-۱- پیامدهای مشکلات ترافیکی

ترافیک نه تنها جریان حمل و نقل را مختل می کند، بلکه پیامدهای اقتصادی، زیست محیطی و بهداشتی قابل توجهی نیز به همراه دارد:

- هدر رفت زمان: رانندگان زمان قابل توجهی از زندگی خود را در ترافیک از دست می دهند. برای مثال، در ملبورن استرالیا، هر راننده به طور متوسط سالانه ۹۲ ساعت در ترافیک سپری می کند [۲].
- مصرف غیرضروری سوخت: توقف خودروها در ترافیک سبب اتلاف سوخت می شود. در تهران، سالانه حدود ۱۲ میلیون لیتر بنزین به دلیل ترافیک هدر می رود [۳].
- افزایش آلودگی هوا: تراکم خودروها در ترافیک، غلظت آلاینده های هوا را تا ۲۹ برابر نسبت به جاده های باز افزایش می دهد.
- هزینه های اقتصادی: در گزارش اقتصاد شهری ایران در سال ۹۵، ترافیک در تهران سالانه ۸ همت هزینه دربر دارد که بخش عمده ای از آن مربوط به تأخیرها و مصرف سوخت است [۴].

این چالش ها نشان می دهند که سیستم های کنونی برای مدیریت ترافیک کافی نیستند و به راهکارهای هوشمندتر و کارآمدتر نیاز داریم. ترکیب فناوری های نوین مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشینی و اینترنت اشیا می تواند نقشی کلیدی در طراحی و پیاده سازی سیستم های تطبیقی ایفا کند. چنین سیستم هایی باید علاوه بر افزایش کارایی و انعطاف پذیری، به پایداری محیطی و بهبود کیفیت زندگی شهری نیز کمک کنند.

۲-۲- محدودیت های سیستم های موجود

با وجود توسعه سیستم های کنترل ترافیک، فناوری های فعلی همچنان با محدودیت های متعددی روبه رو هستند:

- انعطاف پذیری محدود: بیشتر سیستم های کنونی نمی توانند به سرعت با شرایط لحظه ای ترافیک سازگار شوند.
- هزینه های بالا: پیاده سازی سیستم هایی مانند SCATS و SCOOTs به زیرساخت های پیشرفته و هزینه های قابل توجهی نیاز دارد که امکان اجرای آن ها در تمام مناطق وجود ندارد.

- عدم هماهنگی بین سیستمی: در بسیاری از شهرها، سیستم های کنترل ترافیک به صورت مستقل عمل می کنند و هماهنگی کافی میان آن ها وجود ندارد.

- عدم اولویت بندی برای عوامل خاص: سیستم های کنونی معمولاً به نیازهای عوامل خاص، مانند وسایل نقلیه عمومی، آمبولانس و آتش نشانی یا عابرین پیاده، توجه کافی ندارند.

این محدودیت ها نشان می دهند که سیستم های کنترل ترافیک موجود نیازمند بازنگری و به روزرسانی های عمده هستند. راهکارهای هوشمند مبتنی بر فناوری های نوین، به ویژه هوش مصنوعی، می توانند این کمبودها را برطرف کرده و سیستم هایی با انعطاف پذیری، کارایی، و پایداری محیطی بیشتر ارائه دهند. طراحی و توسعه چنین سیستم هایی می تواند نقش مؤثری در کاهش مشکلات ترافیکی و بهبود کیفیت زندگی در شهرهای شلوغ ایفا کند.

۳- راه حل پیشنهادی

۳-۱- فرآیند شناسایی ترافیک و تصمیم گیری الگوریتمی

فرآیند شناسایی ترافیک شامل جمع آوری داده هایی مانند حجم ترافیک و فاصله زمانی بین خودروها در هر سیکل ترافیکی از طریق سنسورهای است که در هر خط ترافیکی تعبیه شده اند. این داده ها سپس به الگوریتم ارسال می شوند که مسئول تصمیم گیری برای انتخاب بهترین ترکیب فازهای سیگنال ها در بازه زمانی مشخص است.

یک فاز سیگنال به مجموعه ای از حرکات اشاره دارد که در یک بازه زمانی مشخص می توانند همزمان انجام شوند. طراحی هر فاز به گونه ای انجام می شود که تداخل حرکات و ایمنی ترافیک حفظ شود. هنگام طراحی ترکیب فازها، فاکتورهای مختلفی باید در نظر گرفته شوند، از جمله حرکات مجاز، مدت زمان فعال بودن هر فاز و ترتیب فازها. علاوه بر این، هنگام تصمیم گیری درباره ترکیب فازها، باید به جریان ترافیک محلی و جمعی توجه شود.

جریان ترافیک جمعی به مفهوم "موج سبز" اشاره دارد که در آن چراغ های راهنمایی به گونه ای تنظیم می شوند که یک وسیله نقلیه بتواند بدون توقف یا با حداقل توقف از چندین تقاطع عبور کند [۵]. موج سبز معمولاً در مسیرهای پرتراffic برای

می‌شود. الگوریتم YOLO به‌عنوان یکی از مدل‌های پیشرفته شناسایی اشیاء، برای تشخیص و شمارش خودروها به‌کار گرفته می‌شود. این الگوریتم قادر است تصاویر را تحلیل کرده و خودروها را با استفاده از کانتورها شناسایی کند. برای بهبود دقت و شناسایی خودروهای خاص مانند آمبولانس‌ها یا خودروهای آتش‌نشانی، از فایل‌های تنظیمات YOLO بهره گرفته می‌شود که ویژگی‌های تصویری خاص این خودروها، مانند رنگ یا ساختار آن‌ها را مدنظر قرار می‌دهد.

شناسایی عابران پیاده نیز به‌طور همزمان با ترکیب الگوریتم‌های پردازش تصویر و فایل‌های YOLO انجام می‌شود. این شناسایی به‌طور خاص از داده‌های محیطی مانند دوربین‌ها و سنسورهای LiDAR برای افزایش دقت بهره می‌برد.

۲-۴- الگوریتم‌ها و مدل‌ها

برای پردازش تصویر و شناسایی الگوهای پیچیده، از تکنیک‌های مختلفی استفاده می‌شود. فیلتر کردن، تشخیص لبه‌ها، و تحلیل بافت از جمله تکنیک‌های پردازش تصویر هستند. در بخش دیپ لرنینگ، شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) برای تحلیل ویژگی‌های تصویری و شناسایی الگوهای پیچیده به‌کار می‌روند. YOLO، به‌عنوان یکی از مدل‌های پیشرفته، با لایه‌های عصبی خود ویژگی‌های مختلف تصویر را استخراج کرده و آن‌ها را شناسایی می‌کند.

۳-۴- دقت شناسایی در شرایط مختلف

دقت سیستم در شرایط مختلف محیطی و زمانی، مانند شب، آب‌وهوای بد یا ترافیک سنگین، ممکن است متغیر باشد. برای بهبود عملکرد سیستم، از داده‌های متنوع در فرآیند آموزش استفاده می‌شود. YOLO به‌دلیل توانایی شناسایی سریع و بلادرنگ خود، در شرایط چالش‌برانگیز مانند ترافیک سنگین یا شرایط جوی نامساعد، می‌تواند به کاهش خطا کمک کند.

۴-۴- سیستم کنترل چراغ‌های راهنمایی

برای مدیریت بهتر ترافیک، از سیستم کنترل تطبیقی چراغ‌های راهنمایی (ATCS) استفاده می‌شود. این سیستم بر اساس تحلیل داده‌ها و شرایط ترافیکی، بهترین فاز را برای چراغ‌های راهنمایی انتخاب می‌کند. عواملی همچون وزن خودروها، عابران پیاده، و مدت‌زمان توقف خودروها در تصمیم‌گیری‌ها تأثیر دارند. برای مثال، خودروهای اورژانسی مانند

کاهش توقفات، بهبود جریان ترافیک و کاهش زمان سفر به‌کار می‌رود.

برای پیاده‌سازی موج سبز، داده‌های مربوط به هر چراغ راهنمایی باید ذخیره شده و با چراغ‌های راهنمایی دیگر به اشتراک گذاشته شود. در زمان تصمیم‌گیری، هر چراغ راهنمایی بررسی می‌کند که آیا درخواست جمعی از چراغ‌های مجاور دریافت کرده است یا خیر. اگر درخواست محلی بیشتر از درخواست جمعی باشد، چراغ به تصمیم‌گیری بر اساس وضعیت محلی ادامه می‌دهد، اما اگر درخواست جمعی بیشتر باشد، اولویت به مدیریت جریان جمعی داده می‌شود.

در واقع، الگوریتم تصمیم‌گیری مسئول انتخاب دینامیک فازها، ترکیب فازها و زمان‌بندی دینامیک است که تمامی عوامل تعیین‌شده از جمله Cycle Lengths و Offsets، Splits را در نظر می‌گیرد.

۲-۳- تکنولوژی‌های موردنیاز برای نظارت و کنترل ترافیک

برای ارزیابی وضعیت ترافیک و مدیریت آن در تقاطع‌ها، نیاز به تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای داریم. یکی از این تکنولوژی‌ها لوپ‌های القایی است که یک میدان مغناطیسی زیر زمین نصب می‌شود. هنگامی که یک وسیله نقلیه از روی آن عبور می‌کند، تغییراتی در میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود که می‌تواند تعداد خودروها را شبیه‌سازی کند.

تکنولوژی دیگری که در نظارت بر ترافیک و رفتار رانندگان در تقاطع‌ها کاربرد دارد، دوربین‌های پردازش تصویر هستند. این دوربین‌ها با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی اشیاء قادرند عابران پیاده، خودروها، موتورسیکلت‌ها و وسایل نقلیه خاص مانند آمبولانس‌ها و آتش‌نشانی‌ها را شناسایی کنند.

تمام این دستگاه‌ها و ابزارهایی که در کنترل ترافیک به‌کار می‌روند، باید به سیستم اینترنت اشیاء (IoT) متصل باشند تا امکان به‌اشتراک‌گذاری لحظه‌ای داده‌ها فراهم شود و سیستم ترافیکی به‌صورت هماهنگ و یکپارچه عمل کند.

۴-۴- فرآیند شناسایی خودروها و کاربران

۱-۴- شناسایی و پردازش تصویر

در این سیستم، شناسایی خودروها و عابران پیاده با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته پردازش تصویر و یادگیری عمیق انجام

آمبولانس‌ها یا آتش‌نشانی اولویت بیشتری خواهند داشت.

۴-۵- بهینه‌سازی جریان ترافیک

در سیستم‌های بهینه‌سازی ترافیک، دو رویکرد اصلی وجود دارد: الگوریتم‌های مبتنی بر قوانین و یادگیری تقویتی. الگوریتم‌های مبتنی بر قوانین، به‌طور ثابت زمان چراغ‌ها را تنظیم می‌کنند، در حالی که یادگیری تقویتی بر اساس تجربیات گذشته و پاداش/جریمه، تصمیمات بهینه را می‌آموزد. در روش یادگیری تقویتی، چراغ راهنمایی به‌عنوان عامل (Agent) و محیط شامل خودروها، عابران پیاده، و شرایط ترافیکی در نظر گرفته می‌شود. هدف این روش کاهش تأخیر و بهبود جریان ترافیک است.

۵- مزایای سیستم‌های کنترل ترافیک تطبیقی

استفاده از سیستم‌های کنترل ترافیک پویا مزایای زیادی دارد که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر کیفیت زندگی افراد، محیط‌زیست، و اقتصاد تأثیرگذار است^[۶]. در ادامه به برخی از مهم‌ترین مزایای این سیستم‌ها اشاره می‌کنیم:

- کاهش زمان سفر: با بهبود جریان ترافیک و کاهش ترافیک‌های سنگین، رانندگان قادر خواهند بود زمان کمتری را در جاده‌ها بگذرانند. این کاهش زمان سفر منجر به افزایش بهره‌وری و کاهش استرس رانندگان می‌شود، چرا که وقت اضافی در مسیرهای طولانی صرف نمی‌شود.
- کاهش مصرف سوخت: توقف و حرکت‌های مکرر خودروها در شرایط ترافیکی باعث مصرف بیشتر سوخت می‌شود. با کاهش ترافیک، حرکت روان‌تر می‌شود و این امر به کاهش مصرف سوخت و در نتیجه صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی می‌انجامد.
- کاهش آلودگی هوا: ترافیک‌های سنگین باعث افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا می‌شوند ***** به‌واسطه کاهش ترافیک، مصرف سوخت نیز کمتر می‌شود که این امر به کاهش آلودگی هوا و گازهای مضر کمک می‌کند و در نتیجه بر بهبود کیفیت هوا تأثیرگذار است.
- افزایش ایمنی جاده‌ها: کاهش ازدحام ترافیک موجب افزایش فاصله بین خودروها و کاهش احتمال تصادفات رانندگی می‌شود. این تغییر به‌ویژه در تقاطع‌ها و جاده‌های پررفت‌وآمد

می‌تواند ایمنی رانندگان و عابران پیاده را بهبود بخشد.

- کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خودرو: رانندگی در جریان‌های روان‌تر و بدون توقف‌های مکرر باعث کاهش سایش قطعات خودرو مانند لاستیک‌ها و ترمزها می‌شود. این امر در نهایت به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خودرو می‌انجامد و طول عمر مفید خودرو را افزایش می‌دهد.

این مزایا تنها بخشی از تأثیرات مثبت سیستم‌های کنترل ترافیک پویا هستند. علاوه بر آن‌ها، این سیستم‌ها می‌توانند به بهبود کیفیت زندگی شهری، کاهش هزینه‌های عمومی و ایجاد یک محیط ترافیکی ایمن‌تر و سالم‌تر منجر شوند.

۶- نتیجه‌گیری

در مدیریت ترافیک شهری همیشه یکی از چالش‌های اصلی شهرهای بزرگ بوده است. با توجه به رشد روزافزون جمعیت و افزایش تعداد خودروها، مشکلاتی نظیر ترافیک سنگین، تأخیر در سفرها و آلودگی هوا بیشتر از پیش به چشم می‌آید. در این شرایط، استفاده از سیستم‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند تحول بزرگی در کنترل ترافیک ایجاد کند. این سیستم‌ها توانایی دارند تا با تحلیل داده‌های واقعی و پیش‌بینی وضعیت ترافیکی در آینده، زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی را به‌طور اتوماتیک و بهینه تنظیم کنند.

یکی از بزرگ‌ترین مزایای این سیستم‌ها، انعطاف‌پذیری آنها در مواجهه با شرایط مختلف است. در ساعات اوج ترافیک یا مواقع بحرانی، این سیستم‌ها قادرند به‌سرعت واکنش نشان دهند و زمان‌بندی‌ها را تغییر دهند تا از ازدحام جلوگیری کنند. در نتیجه، علاوه بر کاهش تأخیر و هدررفت زمان، مصرف سوخت و آلودگی هوا نیز به شکل چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند.

اما پیاده‌سازی چنین سیستم‌هایی در شهرهای بزرگ با چالش‌هایی از جمله هزینه‌های بالا و نیاز به زیرساخت‌های مناسب مواجه است. با این حال، مزایای این سیستم‌ها در بهبود جریان ترافیک، کاهش تأخیرها و کاهش آلودگی هوا آن‌قدر زیاد است که به نظر می‌رسد این هزینه‌ها در بلندمدت قابل جبران باشند. برای موفقیت چنین سیستم‌هایی، همکاری نزدیک بین نهادهای مختلف و استفاده از فناوری‌های نوین بسیار حیاتی



[۲] Blair Jackson, Melbourne takes emissions top spot as most congested city, ۲۰۲۴

است.

[۳] اقتصاد ۲۴، "بررسی تراکم ترافیک و مصرف بنزین در تهران"، کد خبر ۲۵۸۹۶۳، مهر ۱۴۰۳.

[۴] پایگاه خبری عصر خودرو، "گزارش انجمن علمی اقتصاد شهری ایران"، بهمن ۱۳۹۵.

با توجه به تمامی این موارد، به نظر می‌رسد که سیستم‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند راه‌حل‌هایی مؤثر برای حل مشکلات ترافیکی و بهبود کیفیت زندگی شهری فراهم کنند.

[۵] "Green wave," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Green_wave. [Accessed: Jan. ۲۰۲۵].

[۶] Aleksandar Stevanovic, "Benefits of Adaptive Traffic Control Deployments -- A Review of Evaluation Studies," ۲۰۱۹.

مراجع

[۱] Stanislav Dimitrov, Optimal Control of Traffic Lights in Urban Area, *IEEE Conf. International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, ۲۰۲۰.