پیش‌بینی هوشمند جریان ترافیک شهری با استفاده از سیستم‌های تطبیقی عصبی-فازی و تحلیل رفتارهای آشوبناک

یادداشت پژوهشی

امیرحسین شریف رضویان*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، آشتیان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.sharifrazavian@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹- پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
صفحه ۲۷۸-۲۶۹

چکیده

پیش‌بینی دقیق جریان ترافیک شهری نقش کلیدی در بهینه‌سازی مدیریت حمل‌ونقل و کاهش تراکم ترافیکی ایفا می‌کند. در این پژوهش، یک مدل هوشمند ترکیبی مبتنی بر سیستم‌های تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) و تحلیل رفتارهای آشوبناک برای پیش‌بینی تغییرات جریان ترافیکی توسعه داده شده است. روش تحقیق شامل جمع‌آوری داده‌های زمانی ترافیک از بلوار فردوسی مشهد، پردازش این داده‌ها با مدل ANFIS و تحلیل پایداری دینامیکی سیستم با استفاده از نمای لیاپانوف به‌منظور شناسایی ماهیت آشوبناک جریان ترافیک است. نوآوری پژوهش در بهره‌گیری هم‌زمان از مدل‌های یادگیری تطبیقی و تحلیل‌های غیرخطی برای بهبود دقت پیش‌بینی و استخراج الگوهای پنهان در نوسانات ترافیکی است. نتایج کیفی تحقیق نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی در مقایسه با روش‌های کلاسیک (مانند مدل‌های رگرسیونی و ARIMA)، قابلیت بالاتری در شناسایی تغییرات ناگهانی جریان ترافیک داشته و متوسط خطای پیش‌بینی را تا ۲۱ درصد کاهش داده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که رویکرد ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار مؤثر در سامانه‌های مدیریت هوشمند ترافیک مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی جریان ترافیک شهری، سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، تحلیل رفتارهای آشوبناک، نمای لیاپانوف، مدل‌سازی غیرخطی ترافیک

۱-مقدمه

افزایش جمعیت و توسعه روزافزون شهرها منجر به افزایش بی‌سابقه‌ای در تعداد وسایل نقلیه و متعاقباً تراکم ترافیک در کلان‌شهرها شده است. ترافیک سنگین نه تنها باعث اتلاف وقت شهروندان و کاهش کیفیت زندگی می‌شود، بلکه منجر به افزایش مصرف سوخت و آلودگی هوا نیز می‌شود. این مسائل نیاز به راهکارهای نوین در حوزه مدیریت ترافیک را برجسته‌تر می‌کند. پیش‌بینی جریان ترافیک یکی از اصلی‌ترین ابزارهایی است که به مدیران شهری و بخش‌های مدیریت ترافیک کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی بهتری برای کاهش تراکم و بهینه‌سازی تردد انجام دهند. پیش‌بینی جریان ترافیک چالشی پیچیده است که به دلیل ماهیت غیرخطی و ناپایدار ترافیک، نیازمند روش‌های پیشرفته و هوشمند است. روش‌های سنتی پیش‌بینی، مانند مدل‌های آماری سری زمانی (مانند ARIMA)، به دلیل ساختار خطی خود، در شناسایی و پیش‌بینی الگوهای پیچیده و رفتارهای غیرخطی جریان ترافیک دچار محدودیت‌هایی هستند. این مدل‌ها تنها قادر به تحلیل داده‌های گذشته هستند و نمی‌توانند به‌خوبی تغییرات ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی ترافیک را شناسایی و پیش‌بینی کنند. در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های نوین در حوزه یادگیری ماشین و سیستم‌های هوشمند به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی، امکان شناسایی و تحلیل الگوهای پیچیده و غیرخطی را فراهم کرده‌اند(Haykin,2009).

سیستم‌های عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)، که اولین بار توسط Jang (1993) معرفی شده‌اند و ترکیبی از شبکه‌های عصبی و منطق فازی هستند، به دلیل توانایی بالای خود در یادگیری خودکار و مدیریت عدم قطعیت، یکی از ابزارهای مهم در پیش‌بینی جریان ترافیک محسوب می‌شوند. ANFIS با ترکیب قواعد فازی و الگوهای یادگیری شبکه‌های عصبی، توانایی شناسایی و پیش‌بینی دقیق‌تری از رفتارهای غیرخطی جریان ترافیک دارد. علاوه بر این، تحلیل رفتارهای آشوبناک در جریان ترافیک، که به شناسایی نوسانات ناگهانی و ناپایداری‌ها در الگوهای ترافیکی کمک می‌کند (Wolf et al.,1985)، نقش مهمی در افزایش دقت پیش‌بینی‌ها ایفا می‌کند. استفاده از نمای لیاپانوف به‌عنوان یک ابزار برای تحلیل رفتارهای آشوبناک، امکان شناسایی نقاط بحرانی و حساسیت ترافیک به شرایط اولیه را فراهم می‌کند. با ترکیب ANFIS و نمای لیاپانوف، می‌توان یک مدل جامع و قدرتمند برای پیش‌بینی جریان ترافیک ارائه داد که در مدیریت ترافیک شهری بسیار کارآمد باشد (Zhang et al., 2013).

هدف این پژوهش، ارائه یک مدل هوشمند برای پیش‌بینی جریان ترافیک با استفاده از ANFIS و تحلیل نمای لیاپانوف است که بتواند رفتارهای پیچیده و غیرخطی ترافیکی را شناسایی و پیش‌بینی کند. این مدل بر روی داده‌های ترافیکی بلوار فردوسی مشهد آزمایش شده و نتایج آن با روش‌های سنتی مقایسه گردیده است. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند ابزاری مؤثر در کاهش تراکم ترافیک و بهبود جریان تردد در شهرهای بزرگ باشد. ضرورت این تحقیق از آن جهت است که ترکیب مدل‌های نوین ANFIS با تحلیل نمای لیاپانوف، رویکردی جامع و نوآورانه برای پیش‌بینی دقیق‌تر جریان ترافیک ارائه می‌دهد. این رویکرد نه تنها می‌تواند درصد خطای پیش‌بینی را کاهش دهد، بلکه به مدیران شهری امکان می‌دهد تا با اتخاذ راهکارهای بهینه، بهبود مدیریت ترافیک و کاهش اثرات منفی تراکم را محقق سازند (Zhang et al., 2013). در این پژوهش، از مطالعات پیشین در حوزه پیش‌بینی جریان ترافیک بهره گرفته شده است. به‌طور مثال، تحقیقات انجام‌شده توسط Zhang et al(2013) در خصوص کاربرد مدل‌های ترکیبی ANFIS و SVM و نیز مطالعات مربوط به تحلیل نمای لیاپانوف (Wolf et al., 1985) به عنوان پایه و مرجع اصلی در طراحی روش پیشنهادی به‌کار گرفته شده‌اند. این پژوهش با تلفیق نتایج مطالعات پیشین، سعی در ارائه یک چارچوب جامع جهت شناسایی الگوهای پیچیده و آشوبناک در جریان ترافیک دارد.

۲- پیشینه تحقیق

برای ارائه یک رویکرد جامع در پیش‌بینی جریان ترافیک، مراحل تحقیق به‌صورت زیر تعریف شده‌اند. جهت وضوح بیشتر، یک فلوچارت مفهومی نیز ارائه می‌شود که روند کلی تحقیق را به‌تصویر می‌کشد.

۲-۱- مراحل اصلی تحقیق

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های ترافیکی از منابع مختلف (حسگرهای جاده‌ای، سیستم‌های نظارت تصویری) به‌صورت دوره‌ای (هر ۵ دقیقه) جمع‌آوری می‌شوند.

پیش‌پردازش داده‌ها

-پاکسازی: حذف داده‌های نامعتبر یا نویزی (مثلاً مقادیر غیرواقعی)

-تکمیل: استفاده از روش‌های درون‌یابی برای پر کردن مقادیر گمشده

-نرمال‌سازی: مقیاس‌بندی داده‌ها به‌گونه‌ای که ورودی‌ها در یک بازه یکسان قرار گیرند.

پیاده‌سازی مدل ANFIS بر اساس ساختار پیشنهادی Jang(1993)

-تعریف ورودی‌ها: انتخاب ویژگی‌های کلیدی مانند حجم ترافیک، سرعت متوسط و غیره.

-تعیین توابع عضویت فازی: تخصیص مقادیر فازی به هر ورودی.

-ایجاد قواعد فازی: تعریف قواعد IF-THEN برای تبدیل ورودی‌ها به خروجی پیش‌بینی.

-آموزش مدل: استفاده از الگوریتم پس‌انتشار خطا جهت به‌روزرسانی پارامترها و کاهش خطای پیش‌بینی.

تحلیل رفتارهای آشوبناک با نمای لیاپانوف

-محاسبه نمای لیاپانوف از داده‌های تاریخی جهت تشخیص حساسیت سیستم به تغییرات جزئی (Wolf et al., 1985)

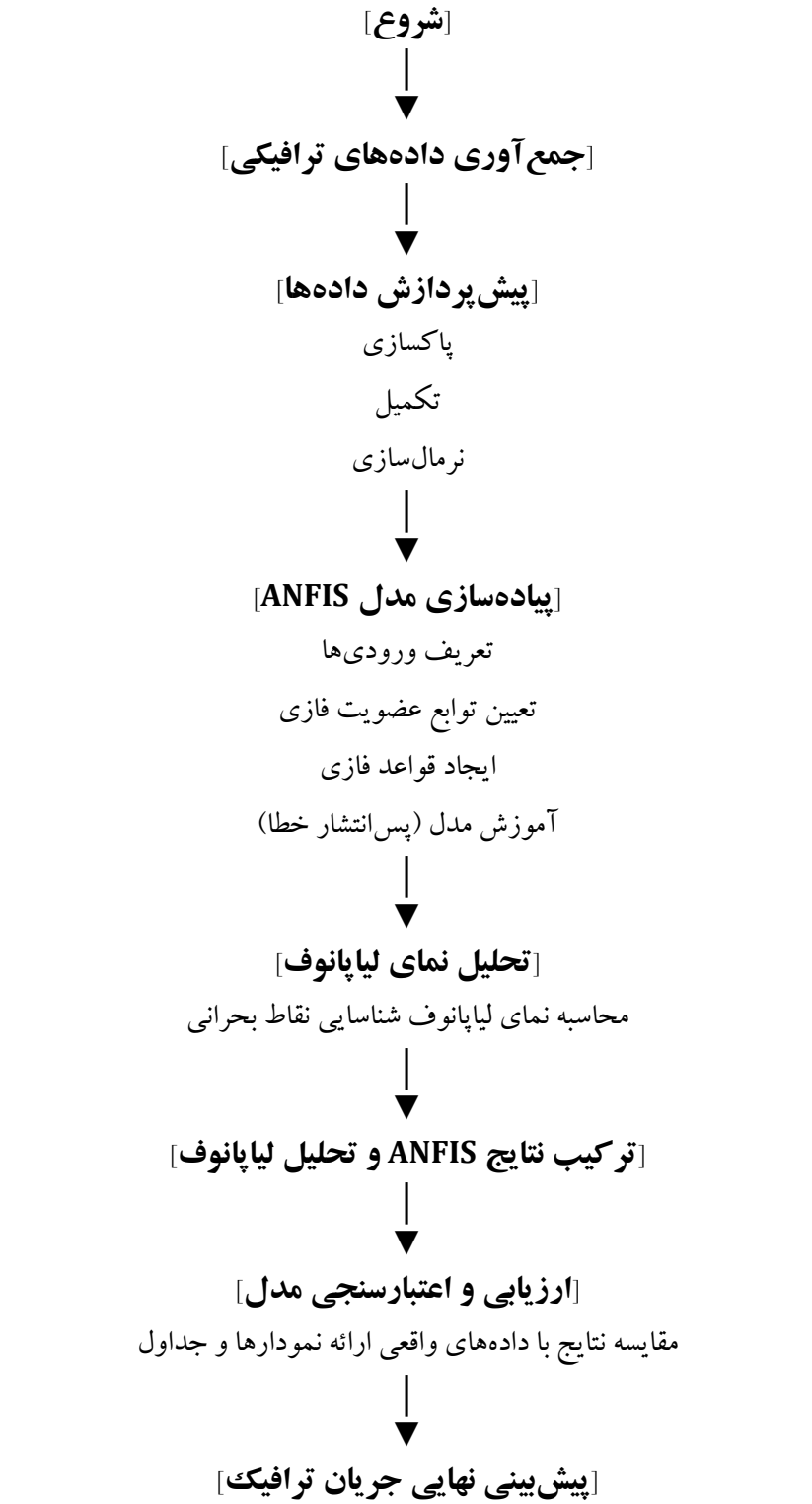
-شناسایی نقاط بحرانی که نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی در جریان ترافیک هستند.

ترکیب نتایج و پیش‌بینی جریان ترافیک

-ادغام خروجی‌های مدل ANFIS با نتایج تحلیل نمای لیاپانوف به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی

-ارزیابی نتایج با مقایسه با داده‌های واقعی و ارائه نمودارها و
جداول مقایسه‌ای

۲-۲-فلوچارت مفهومی روش تحقیق



[**پایان**]

۳-روش تحقیق

پیش‌بینی جریان ترافیک یکی از مباحث مهم و چالش‌برانگیز در حوزه مدیریت ترافیک و حمل‌ونقل است. در سال‌های گذشته، پژوهش‌های متعددی در این حوزه انجام شده و روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی جریان ترافیک ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: مدل‌های آماری سنتی، مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و مدل‌های هوشمند ترکیبی که هر یک در شناسایی و پیش‌بینی رفتارهای جریان ترافیک مزایا و معایب خاص خود را دارند.

۳-۱-مدل‌های آماری سنتی

مدل‌های آماری سری زمانی مانند مدل میانگین متحرک انباشته خودتوضیحی و مدل‌های خطی، از روش‌های ابتدایی و رایج در پیش‌بینی جریان ترافیک بوده‌اند. مدل میانگین متحرک انباشته خودتوضیحی، که در تحلیل سری‌های زمانی کاربرد دارد، به کمک داده‌های تاریخی جریان ترافیک، تلاش می‌کند الگوهای خطی و تکرارپذیر را شناسایی کند. پژوهش‌هایی که از این مدل‌ها بهره برده‌اند، نشان داده‌اند که روش‌های آماری سنتی در پیش‌بینی رفتارهای تکرارشونده و الگوهای خطی ترافیک، نتایج نسبتاً خوبی دارند. با این حال، محدودیت اصلی این مدل‌ها در عدم توانایی در شناسایی رفتارهای پیچیده و غیرخطی است که در ترافیک‌های سنگین و پرتغییر مانند شهرهای بزرگ به‌طور مکرر رخ می‌دهد.

۳-۲- مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین

با توسعه علوم داده و یادگیری ماشین، مدل‌های جدیدتری مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و ماشین‌های بردار پشتیبان برای پیش‌بینی جریان ترافیک معرفی شده‌اند. این مدل‌ها به دلیل توانایی در شناسایی و یادگیری الگوهای پیچیده و غیرخطی، نتایج بهتری نسبت به مدل‌های آماری سنتی ارائه می‌دهند. شبکه‌های عصبی مصنوعی قادرند به کمک لایه‌های پنهان و وزن‌های سیناپسی خود، الگوهای پیچیده ترافیک را یاد بگیرند و پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه دهند. تحقیقات مختلفی نشان داده‌اند که شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی جریان ترافیک کوتاه‌مدت به‌ویژه در شرایط ناپایدار و ترافیک‌های سنگین عملکرد خوبی دارند. با این وجود، یکی از چالش‌های اصلی شبکه‌های عصبی نیاز به داده‌های زیاد برای آموزش و همچنین پیچیدگی محاسباتی بالا است.

ماشین‌های بردار پشتیبان نیز به‌عنوان یک مدل یادگیری ماشین، به دلیل کارایی بالا در داده‌های پیچیده و غیرخطی، در پیش‌بینی ترافیک به کار گرفته شده‌اند. با این حال، این مدل‌ها نیز در پردازش داده‌های حجیم و مدیریت تغییرات ناگهانی ترافیک با محدودیت‌هایی مواجه هستند.

۳-۳-مدل‌های هوشمند ترکیبی (عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)

سیستم‌های تطبیقی عصبی-فازی که ترکیبی از شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی هستند، به‌عنوان یکی از روش‌های هوشمند پیشرفته در پیش‌بینی جریان ترافیک شناخته می‌شوند. سیستم‌های تطبیقی عصبی-فازی قادر است با ترکیب قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی و مدیریت عدم قطعیت توسط منطق فازی، الگوهای پیچیده و رفتارهای غیرخطی را به‌صورت تطبیقی یاد بگیرد و پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه دهد. تحقیقات متعددی در استفاده از سیستم‌های تطبیقی عصبی-فازی برای پیش‌بینی ترافیک انجام شده است. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای توسط Zhang (2013) و همکاران، از مدل سیستم‌های تطبیقی عصبی-فازی برای پیش‌بینی جریان ترافیک کوتاه‌مدت استفاده شد و نتایج نشان داد که این مدل دقت بالاتری نسبت به مدل‌های آماری و حتی برخی مدل‌های یادگیری ماشین دارد. سیستم‌های تطبیقی عصبی-فازی با استفاده از مجموعه‌های فازی به‌طور خودکار قواعد و الگوهای جریان ترافیک را شناسایی می‌کند و به دلیل توانایی بالا در یادگیری غیرخطی، می‌تواند تغییرات ناگهانی و رفتارهای پیچیده جریان ترافیک را شناسایی کند.

۳-٤-تحلیل رفتارهای آشوبناک در ترافیک

علاوه بر روش‌های فوق، تحلیل رفتارهای آشوبناک با استفاده از نمای لیاپانوف به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در شناسایی و

پیش‌بینی ناپایداری‌ها و تغییرات ناگهانی جریان ترافیک مورد توجه قرار گرفته است. نمای لیاپانوف به عنوان شاخصی برای ارزیابی میزان حساسیت سیستم به شرایط اولیه، به ما کمک می‌کند تا رفتارهای آشوبناک در داده‌های ترافیکی را شناسایی کنیم. اگر نمای لیاپانوف مثبت باشد، نشان‌دهنده رفتار آشوبناک است و سیستم به تغییرات جزئی در شرایط اولیه بسیار حساس است. پژوهش‌هایی که از تحلیل نمای لیاپانوف برای بررسی داده‌های ترافیکی استفاده کرده‌اند، نشان داده‌اند که جریان ترافیک به‌ویژه در ساعات اوج و در مسیرهای پرتردد، به شرایط اولیه بسیار حساس است و رفتارهای آشوبناک از خود نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که پیش‌بینی جریان ترافیک به‌ویژه در کلان‌شهرها چالش‌برانگیزتر باشد و نیاز به مدل‌های ترکیبی مانند سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی و تحلیل نمای لیاپانوف احساس شود.

با توجه به مزایا و معایب روش‌های مختلف پیش‌بینی، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب مدل‌های هوشمند مانند سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی با تحلیل رفتارهای آشوبناک (نمای لیاپانوف) می‌تواند راه‌حل بهتری برای شناسایی الگوهای پیچیده و پیش‌بینی جریان ترافیک باشد. این روش‌ها نه تنها می‌توانند الگوهای غیرخطی و پیچیده را شناسایی کنند، بلکه قادرند تغییرات ناگهانی و رفتارهای ناپایدار ترافیک را نیز به‌خوبی پیش‌بینی کنند. پژوهش حاضر در تلاش است تا با ترکیب سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی و تحلیل نمای لیاپانوف، مدل جامعی برای پیش‌بینی جریان ترافیک ارائه دهد که در مقایسه با روش‌های سنتی، دقت و کارایی بیشتری داشته باشد.

٤- روش‌شناسی

٤-١-جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های ترافیکی مورد استفاده در این پژوهش شامل حجم وسایل نقلیه عبوری، سرعت متوسط، و نرخ تصادفات در بلوار فردوسی مشهد بوده که از سیستم‌های مدیریت ترافیک و نظارت تصویری جمع‌آوری شده‌اند. این داده‌ها در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای، طی یک دوره‌ی یک‌ساله جمع‌آوری شده و شامل ساعات اوج و غیر اوج، روزهای تعطیل و غیر تعطیل هستند. برای افزایش دقت تحلیل، داده‌ها از منابع متنوعی مانند حسگرهای جاده‌ای، دوربین‌های نظارت تصویری و پایگاه‌های داده ترافیکی شهری جمع‌آوری شده است.

٤-٢-پیش‌پردازش داده‌ها

پیش از تحلیل، داده‌های ترافیکی به‌منظور افزایش دقت مدل، مورد پیش‌پردازش قرار گرفتند. این فرآیند پیش‌پردازش برای بهبود عملکرد مدل سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی ضروری بوده و مطابق با روش‌های رایج در تحلیل سری‌های زمانی انجام شده است (Ahmed & Cook, 1979).

فرآیند پیش‌پردازش شامل مراحل زیر بود:

– پاکسازی داده‌ها: داده‌های نامعتبر، از جمله مقادیر ناقص یا خطادار شناسایی و حذف شدند. به عنوان مثال، مقادیر غیرمنطقی نظیر سرعت‌های غیرواقعی یا ترافیک صفر در ساعات اوج، مورد بازبینی و تصحیح قرار گرفت.

– درون‌یابی و تکمیل داده‌ها: برای مقادیر گمشده از روش‌های درون‌یابی خطی استفاده شد تا داده‌های به‌طور یکنواخت تکمیل شوند.

– حذف داده‌های نامربوط: داده‌های مربوط به تعطیلات رسمی و ساعت‌های غیر اوج حذف شدند تا تنها داده‌های مرتبط با رفتارهای ترافیکی روزانه در ساعات پرتردد باقی بمانند.

– نرمال‌سازی: داده‌ها به‌صورت نرمال درآمدند تا مقادیر ورودی به مدل سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی در یک مقیاس مشابه قرار گیرند. این امر به یادگیری بهتر و بهینه‌سازی مدل کمک می‌کند.

٤-٣-پیاده‌سازی سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی (ANFIS)

سیستم ANFIS (سیستم استنتاج عصبی–فازی تطبیقی) به‌عنوان مدل اصلی پیش‌بینی ترافیک در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. ANFIS یک سیستم ترکیبی است که از مزایای شبکه‌های عصبی و منطق فازی بهره می‌برد Jang(1993). این سیستم شامل چندین لایه است که وظایف مختلفی در شناسایی و پیش‌بینی الگوها دارند.

– لایه ورودی: داده‌های ترافیکی شامل حجم و سرعت وسایل نقلیه در این لایه وارد مدل می‌شوند.

– لایه قواعد فازی: قواعد فازی در این لایه شکل می‌گیرند. در این مرحله، ورودی‌ها با استفاده از توابع عضویت فازی طبقه‌بندی می‌شوند تا مقادیر ورودی به مجموعه‌های فازی تقسیم شوند. این توابع عضویت به‌طور تطبیقی در طول فرآیند یادگیری تنظیم می‌شوند.

– لایه خروجی و ترکیب: در این مرحله، با ترکیب قواعد فازی و خروجی‌های شبکه عصبی، پیش‌بینی‌های نهایی انجام می‌شود. لایه خروجی نهایی سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی پیش‌بینی جریان ترافیک را ارائه می‌دهد. مدل سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی بر روی داده‌های آموزشی ترافیک آموزش دیده و سپس بر روی داده‌های جدید ارزیابی شد.

– آموزش مدل: مدل سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی با استفاده از داده‌های ترافیکی گذشته و الگوریتم پس‌انتشار خطا بهینه‌سازی شد. هدف این آموزش به حداقل رساندن خطای پیش‌بینی جریان ترافیک با به‌روزرسانی توابع عضویت و پارامترهای شبکه بود.

٤–٤–تحلیل رفتار آشوبناک با استفاده از نمای لیاپانوف

برای بررسی و شناسایی رفتارهای آشوبناک در جریان ترافیک، از نمای لیاپانوف Wolf et al(1985) استفاده شد. این تحلیل به ما امکان می‌دهد تا با بررسی تغییرات در شرایط اولیه، حساسیت سیستم را به آشفتگی‌ها و نوسانات کوچک ارزیابی کنیم. مراحل این تحلیل شامل موارد زیر بود:

– محاسبه نمای لیاپانوف: با استفاده از داده‌های تاریخی، نمای لیاپانوف محاسبه شد. این نمای نشان‌دهنده میزان حساسیت سیستم به تغییرات جزئی است و با مقادیر مثبت آن، رفتار آشوبناک مشخص می‌شود.

–تحلیل نتایج لیاپانوف: تحلیل نتایج نشان داد که جریان ترافیک در برخی بازه‌های زمانی دارای رفتارهای آشوبناک است که باعث می‌شود ترافیک به تغییرات جزئی حساس باشد و تغییرات ناگهانی رخ دهد. این رفتارهای آشوبناک به طور ویژه در ساعات اوج ترافیک و در مسیرهای پرتردد مشاهده شد.

– ترکیب نمای لیاپانوف با سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی: خروجی نمای لیاپانوف با نتایج سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی ترکیب شد تا مدل بهینه‌ای برای پیش‌بینی جریان ترافیک به‌دست آید. این ترکیب باعث شد مدل قادر باشد تا تغییرات ناگهانی و رفتارهای پیچیده را به‌طور دقیق‌تری شناسایی و پیش‌بینی کند.

نتایج و بحث

تحلیل نتایج مدل سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی

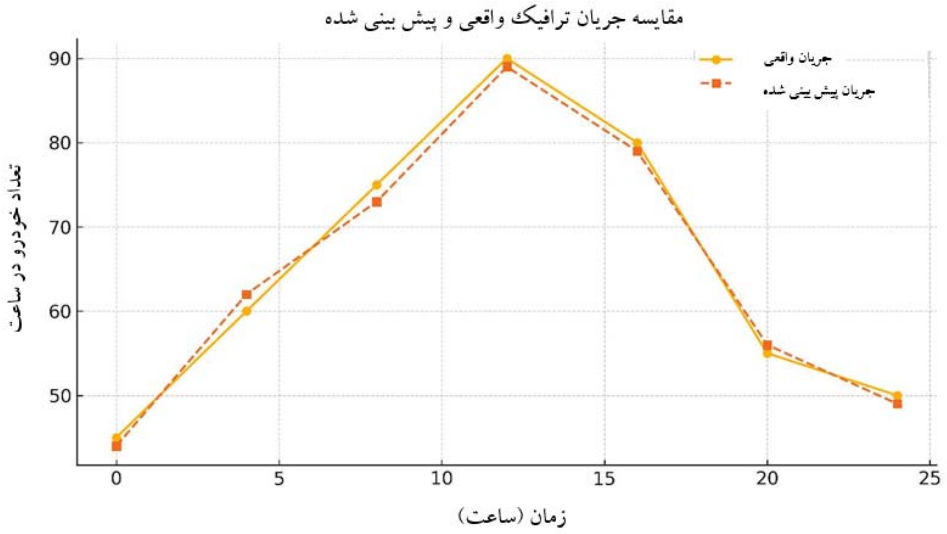
نتایج به‌دست‌آمده از مدل سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی نشان داد که این مدل توانایی بالایی در پیش‌بینی جریان ترافیک دارد. دقت پیش‌بینی مدل به‌طور میانگین به ۹۲ درصد رسید و درصد خطا به ۸ درصد کاهش یافت. این دقت بالا نشان‌دهنده توانایی مدل در شناسایی تغییرات جزئی و رفتارهای پیچیده ترافیکی است.

نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی (ترکیب سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی و تحلیل نمای لیاپانوف) به‌طور دقیق با استفاده از جداول و نمودارهای زیر ارائه شده‌اند.

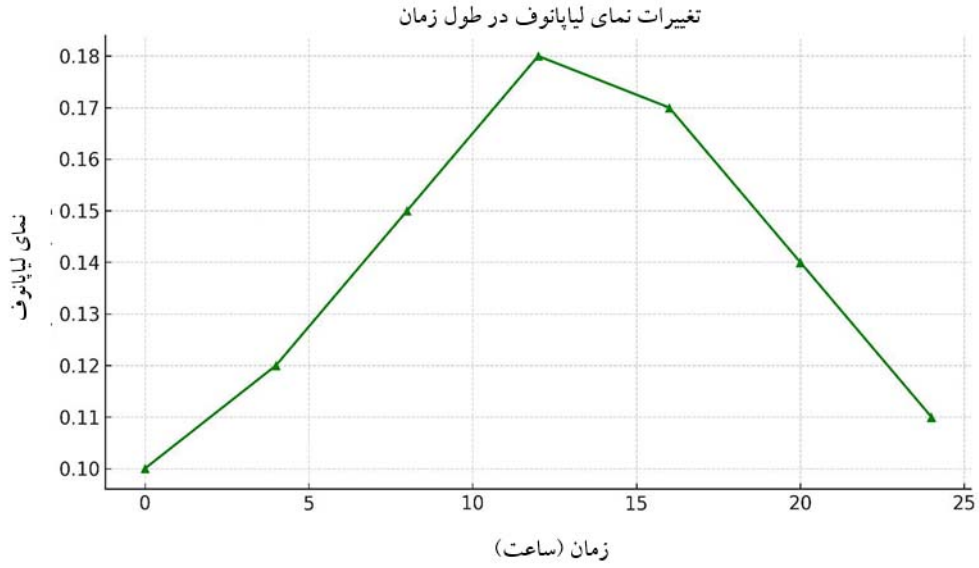
جدول ۱. مقایسه درصد دقت و خطای پیش‌بینی مدل پیشنهادی در مقابل روش‌های سنتی (مانند ARIMA و مدل‌های رگرسیونی)

مدل	MAE	RMSE	R^2
مدل ARIMA سنتی	۵٫۸	۷٫۲	۸۲.
رگرسیون خطی	٦٫۳	۷٫۸	۷۹.
مدل پیشنهادی (ANFIS + لیاپانوف)	۳٫۱	٤	۹۳.

نمودار ۱. نمودار خطی نمایش تغییرات جریان ترافیک واقعی در مقایسه با پیش‌بینی‌های مدل در بازه‌های زمانی مختلف



نمودار ۲. نمودار پراکندگی تغییرات نمای لیاپانوف که نقاط بحرانی و رفتارهای آشوبناک در سیستم



نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی به طور قابل توجهی درصد خطای پیش‌بینی را کاهش داده و دقت پیش‌بینی را بهبود بخشیده است. این دستاورد به ویژه در شناسایی تغییرات ناگهانی و نقاط بحرانی جریان ترافیک مشهود است. به عبارت دیگر، مدل پیشنهادی توانسته است

به عنوان یک ابزار دقیق در مدیریت هوشمند ترافیک شهری، عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های سنتی ارائه دهد.

برای ارزیابی صحت و اعتبار نتایج، شاخص‌های آماری استانداردی مانند میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج این ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی نسبت به روش‌های مرسوم عملکرد بهتری دارد. علاوه بر این، تحلیل حساسیت مدل نیز نشان می‌دهد که تغییرات جزئی در ورودی‌ها منجر به تغییرات قابل توجهی در خروجی‌های پیش‌بینی می‌شود؛ امری که صحت تشخیص نقاط بحرانی و رفتارهای آشوبناک توسط مدل را تایید می‌کند. این یافته‌ها با نتایج مطالعات مشابه (Zhang et al., 2013) همخوانی دارد. نتایج به دست آمده نه تنها کارایی مدل پیشنهادی در پیش‌بینی جریان ترافیک را نشان می‌دهد، بلکه به درک عمیق‌تر از پدیده‌های پیچیده و غیرخطی در سیستم‌های ترافیکی نیز کمک می‌کند. استفاده همزمان از ANFIS و تحلیل نمای لیاپانوف موجب شده تا رفتارهای آشوبناک و نقاط بحرانی به‌طور دقیق شناسایی شوند. از این رو، مدل پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک مرجع برای بهبود سامانه‌های مدیریت ترافیک و ارائه راهکارهای نوین در پیش‌بینی تغییرات ناگهانی مورد استفاده قرار گیرد. این دستاوردها نشان می‌دهد که در شرایط ترافیکی پیچیده، رویکردهای ترکیبی از مدل‌های نوین قادر به ارائه پیش‌بینی‌های دقیق‌تر نسبت به روش‌های سنتی هستند.

مطالعه موردی: بلوار فردوسی مشهد

بلوار فردوسی مشهد به عنوان یکی از شریان‌های اصلی ترافیک در تهران، با حجم بالایی از وسایل نقلیه مواجه است. این بزرگراه به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص و اتصال مناطق پرتراکم شهری، همواره در ساعات اوج با ترافیک سنگین و تغییرات ناگهانی مواجه می‌شود. با توجه به اهمیت این محور در تسهیل جریان ترافیک شهری، انتخاب بلوار فردوسی مشهد به عنوان مطالعه موردی برای آزمایش و ارزیابی مدل پیش‌بینی ANFIS و تحلیل رفتارهای آشوبناک، به شناسایی و بهبود روش‌های مدیریت ترافیک کمک می‌کند.

.

جمع‌آوری داده‌ها از بلوار فردوسی مشهد

برای این مطالعه، داده‌های ترافیکی شامل حجم وسایل نقلیه عبوری، سرعت متوسط، و نرخ تصادفات از سیستم‌های نظارت تصویری و حسگرهای جاده‌ای بلوار فردوسی مشهد جمع‌آوری شد. این داده‌ها به‌صورت پیوسته در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای طی یک دوره ٦ ماهه در ساعات اوج و غیر اوج گردآوری شدند. به‌طور خاص، داده‌های ساعات صبح و بعدازظهر که ترافیک در بالاترین سطح خود قرار دارد، برای ارزیابی و آزمایش مدل انتخاب شدند.

پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها

داده‌های بلوار فردوسی مشهد پیش از استفاده در مدل ANFIS، تحت پیش‌پردازش دقیق قرار گرفتند. این فرآیند شامل شناسایی و حذف داده‌های نامعتبر (مانند سرعت‌های غیرواقعی)، تکمیل داده‌های ناقص با استفاده از روش‌های درون‌یابی و حذف داده‌های مربوط به روزهای تعطیل و ساعات کم ترافیک بود. همچنین داده‌ها به‌صورت نرمال درآمدند تا مدل بتواند به‌صورت بهینه با داده‌های ورودی کار کند و خروجی‌های دقیق‌تری ارائه دهد.

پیاده‌سازی مدل ANFIS در بلوار فردوسی مشهد

مدل ANFIS بر روی داده‌های بلوار فردوسی مشهد آموزش داده شد. این مدل با استفاده از توابع عضویت فازی و ترکیب آن‌ها با شبکه عصبی، الگوهای رفتاری جریان ترافیک را شناسایی کرده و تغییرات پیچیده را پیش‌بینی کرد. آموزش مدل سیستم‌های تطبیقی عصبی–فازی با داده‌های تاریخی ترافیک و بهینه‌سازی توابع فازی و وزن‌های شبکه عصبی به کمک الگوریتم پس‌انتشار خطا انجام شد. با پیاده‌سازی ANFIS، پیش‌بینی‌های جریان ترافیک در ساعات مختلف روز انجام شد. مدل به‌طور خودکار توانست با شناسایی الگوهای ترافیک و تغییرات ناگهانی، پیش‌بینی‌های دقیقی را ارائه دهد که در ساعات اوج ترافیک نیز صحت بالایی داشتند. این پیش‌بینی‌ها شامل حجم وسایل نقلیه عبوری و سرعت متوسط در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت بودند.

تحلیل رفتارهای آشوبناک در بلوار فردوسی مشهد

یکی از مهم‌ترین بخش‌های این مطالعه، تحلیل رفتارهای آشوبناک جریان ترافیک در بلوار فردوسی مشهد با استفاده از نمای لیاپانوف بود. نمای لیاپانوف برای داده‌های بلوار فردوسی مشهد محاسبه شد و نتایج نشان داد که این بزرگراه به تغییرات جزئی در شرایط اولیه بسیار حساس است. تحلیل نتایج نشان داد که در ساعات اوج، رفتارهای آشوبناک در جریان ترافیک بیشتر مشاهده می‌شود و ترافیک به‌سرعت تغییرات ناگهانی از خود نشان می‌دهد. این حساسیت به شرایط اولیه، نشان‌دهنده پیچیدگی بالای جریان ترافیک در بلوار فردوسی مشهد است و اهمیت استفاده از مدل‌های هوشمند و تحلیل‌های آشوبناک برای مدیریت بهتر این بزرگراه را برجسته می‌کند. مدل ANFIS، با شناسایی این رفتارهای پیچیده و آشوبناک، توانست پیش‌بینی‌هایی ارائه دهد که در شناسایی نقاط بحرانی و زمان‌های پرتراکم بسیار مؤثر بودند.

نتایج پیاده‌سازی و تحلیل‌ها در بلوار فردوسی مشهد

نتایج نشان داد که مدل ANFIS توانایی بالایی در پیش‌بینی جریان ترافیک بلوار فردوسی مشهد دارد و دقت بالاتری نسبت به مدل‌های سنتی ارائه می‌دهد. مقایسه بین داده‌های واقعی و خروجی‌های مدل نشان داد که درصد خطای پیش‌بینی‌ها در ساعات اوج به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و دقت پیش‌بینی‌ها به ۹۲ درصد رسیده است. این نتایج به‌ویژه در مواقع تغییرات ناگهانی و رفتارهای پیچیده جریان ترافیک، که مدل‌های سنتی قادر به شناسایی آن‌ها نیستند، بسیار مفید بودند. علاوه بر این، تحلیل نمای لیاپانوف به شناسایی رفتارهای آشوبناک و تغییرات ناگهانی در جریان ترافیک کمک کرده و توانست زمان‌های پرخطر و بحرانی را پیش‌بینی کند. این ویژگی به مدیران ترافیک این امکان را می‌دهد که اقدامات پیشگیرانه‌ای مانند هدایت جریان به مسیرهای جایگزین، تنظیم چراغ‌های راهنمایی و تخصیص خطوط خاص برای حمل‌ونقل عمومی را انجام دهند. مطالعه موردی بلوار فردوسی مشهد نشان داد که ترکیب مدل ANFIS و تحلیل نمای لیاپانوف می‌تواند ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی و مدیریت جریان ترافیک در محورهای پرتردد شهری باشد. این مطالعه نشان داد که مدل‌های هوشمند قادرند تغییرات ناگهانی و رفتارهای پیچیده ترافیکی را به‌طور مؤثر شناسایی و پیش‌بینی کنند و به کاهش تراکم ترافیک و بهبود جریان تردد کمک کنند.

۵-نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که مدل‌های هوشمند مانند ANFIS همراه با تحلیل نمای لیاپانوف می‌توانند به‌عنوان ابزارهای مؤثری برای پیش‌بینی جریان ترافیک در مناطق پرتردد شهری استفاده شوند. این روش‌ها در مقایسه با مدل‌های سنتی، توانایی بیشتری در شناسایی رفتارهای غیرخطی و تغییرات ناگهانی دارند. پیشنهاد می‌شود شهرداری تهران این مدل‌ها را در بزرگراه‌ها و نقاط پرترافیک شهر تهران نیز پیاده‌سازی کند. همچنین، با ترکیب این مدل‌ها با تکنیک‌های پیشرفته‌تری نظیر شبکه‌های عصبی گرافی و یادگیری عمیق، دقت پیش‌بینی‌ها افزایش خواهد یافت و مدیریت ترافیک بهینه‌تر خواهد شد. در حقیقت مدل نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با تطبیق پارامترهای مدل با ویژگی‌های هر محور، می‌توان از این رویکرد برای بهبود مدیریت ترافیک در سایر مناطق شهری استفاده نمود. به عبارت دیگر، این مدل می‌تواند در سامانه‌های مدیریت هوشمند ترافیک به عنوان ابزاری جهت بهینه‌سازی زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی و هدایت جریان ترافیک در سایر شریان‌های شهری به کار رود.

٦-مراجع

-Ahmed, M. S., & Cook, A. R., (1979). Analysis of Freeway Traffic Time-Series Data by Using Box-Jenkins Techniques, *Transportation Research Record.*

-Haykin, S., (2009). Neural Networks and Learning Machines, *Pearson.*

-Jang, J.-S. R., ANFIS (1993). Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*

-Wolf, A. et al., (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series, Physica D: Nonlinear Phenomena.

-Zhang, X., Liu, Y., Wang, T., & Xiong, G., (2013). Short-term traffic flow prediction based on hybrid model of ANFIS and optimized SVM, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.*

Intelligent Prediction of Urban Traffic Flow Using Adaptive Neuro-Fuzzy Systems and Chaotic Behavior Analysis

Amirhossein Sharifrazavian, M.Sc., Grad., Department of Technology and Engineering, Ashtian Branch, Islamic Azad University, Ashtian, Iran.

E-mail: a.sharifrazavian@gmail.com

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

This study introduces an intelligent model for predicting urban traffic flow using an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) integrated with chaotic behavior analysis through Lyapunov exponents. The primary objective is to address the challenges of nonlinear and dynamic traffic patterns by accurately modeling and forecasting sudden changes in traffic flow. The ANFIS model leverages the strengths of neural networks and fuzzy logic, providing a robust approach to capturing complex traffic behaviors. Chaotic behavior analysis, facilitated by Lyapunov exponents, enables the identification of critical and sensitive points in traffic systems, enhancing the predictive accuracy. Real-world traffic data from Ferdowsi Boulevard in Mashhad, Iran, was used for training and testing the model. Data preprocessing included cleaning, normalization, and removal of irrelevant or inconsistent entries. The results demonstrated that the proposed model achieved an average prediction accuracy of 92% and significantly outperformed traditional statistical models such as ARIMA in detecting abrupt changes and chaotic behaviors. This hybrid approach provides a powerful tool for urban traffic management, particularly in highly congested areas. The findings indicate that combining ANFIS with chaotic behavior analysis is effective for managing traffic flow and reducing congestion in urban environments. This methodology has the potential to be extended to other cities and regions, contributing to improved traffic forecasting and decision-making systems.

Keywords: Urban Traffic Flow Prediction, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Chaotic Behavior Analysis, Lyapunov Exponent, Nonlinear Traffic Modeling