بررسی عوامل مؤثر بر زمان سفر در سیستم حمل‌ونقل عمومی و پیش‌بینی زمان سفر مورد کاوی: سیستم اتوبوسرانی شهر تهران

محمدرضا امین‌ناصری*، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
وحید برادران، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
E-mail:amin_nas@modares.ac.ir
تاریخ دریافت: ۸۷/۱۰/٤ – تاریخ پذیرش: ۸۸/۵/۲

چکیده

با توسعه سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند، فرآیند برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی مانند اتوبوس و قطار شهری از حالت استاتیک (برنامه‌ریزی بر اساس داده‌های گذشته) به حالت پویا (برنامه‌ریزی براساس داده‌های گذشته و لحظه‌ای) تغییر کرده است. در هر دو فرآیند فوق، زمان سفر به عنوان مهم‌ترین پارامتر برنامه‌ریزی محسوب می‌شود. در بیشتر مطالعات گذشته حوزه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل عمومی، مبنای برآورد زمان سفر، استفاده از رویکرد توزیع‌های احتمالی بوده است. اما پیش‌بینی دقیق و صحیح زمان سفر نیازمند توسعه مدلهای پیش‌بینی متناسب با هر نوع فرآیند برنامه‌ریزی و بر اساس تأثیر متغیرهای مؤثر بر زمان سفر است.

در این مقاله با مطالعه سیستم حمل‌ونقل عمومی شهر تهران (اتوبوسرانی)، متغیرهای مؤثر بر زمان سفر، شناسایی شده و میزان تأثیر هر یک از آنها بر زمان سفر اندازه‌گیری شده است. دو مدل پیش‌بینی مبتنی بر رگرسیون خطی و شبکه‌عصبی پیش‌خوراند جهت پیش‌بینی‌زمان سفر وسایل نقلیه عمومی بین دو ایستگاه متوالی قابل استفاده در فرآیندهای برنامه‌ریزی استاتیک و پویا طراحی شده است. مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای متغیر زمان سفر در شبکه اتوبوسرانی شهر تهران، در مدل رگرسیون حدود ۷۵٪ و در مدلهای شبکه عصبی حدود ۹٤٪ بوده است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی زمان سفر، برنامه‌ریزی سیستم اتوبوسرانی، شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون خطی

۱. مقدمه

حمل‌ونقل عمومی در شهرها یکی از مهم‌ترین بخشهای خدمت‌رسانی به شمار می‌آید [۱]. سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی نظیر حمل‌ونقل اتوبوسرانی و قطار شهری به دلیل هزینه‌های کم راه‌اندازی، انعطاف پذیری مطلوب در عمل، توان قابل ملاحظه در جابجایی مسافران و هزینه‌های ناچیز سفر، نقش ویژه‌ای در جابجایی ساکنان شهرها و حل مشکلات شهرهای بزرگ دارند.

افزایش رضایت استفاده‌کنندگان و استفاده بهینه از تسهیلات موجود در سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی بدون برنامه‌ریزی ممکن نخواهد بود. توزیع وسایل نقلیه در مسیرها، تنظیم جداول زمان‌بندی سفر، کنترل و اجرای برنامه‌های زمان‌بندی از فعالیتهای حوزه برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی درون‌شهری است.

فرآیند مرسوم برنامه‌ریزی در چنین سیستم‌هایی، شامل چهار مرحله طراحی مسیر، تنظیم جداول زمان‌بندی سفر، تخصیص وسایل نقلیه به سفرها و تخصیص رانندگان به وسایل است[۲]. در این فرآیند، فعالیتهای کوتاه مدت سیستم بر اساس داده‌های گذشته، در ابتدای هر ماه و در حالت خوش‌بینانه در ابتدای روز طرح‌ریزی و اجراء می‌شوند. به این جهت، برنامه‌ریزی در این حالت را برنامه‌ریزی استاتیک نیز می‌نامند. در بسیاری از سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، از جمله سیستم حمل‌ونقل اتوبوسرانی شهر تهران، از این نوع فرآیند برنامه‌ریزی که در آن برنامه‌ها در ماههای مختلف ثابت و بدون تغییر است، استفاده می‌شود. اما حضور سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS[۱]) و سیستم‌های پیشرفته مدیریت ترافیک (ATMS[۲])

* نویسنده مسئول

در مدیریت حمل‌ونقل شهرها، با در اختیار قراردادن اطلاعات مفیدی از وضعیت ترافیک خیابانها و موقعیت جغرافیائی وسایل نقلیه در هر لحظه، موجب تحوّل در فرآیند برنامه‌ریزی از حالت استاتیک به پویا شده‌اند.

زمان سفر مهم‌ترین پارامتر برنامه‌ریزی در هر دو فرآیند فوق است. بدون اطلاع از زمان سفرِ اتوبوسها بین ایستگاههای توقف و پیش‌بینی دقیق آن، برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی ناممکن و یا منجر به برنامه‌های غیرواقعی خواهد شد. همچنین از برآورد دقیق زمان سفر می‌توان برای مدیریت تقاضای مسافر و ترافیک از طریق سامانه‌های اطلاع‌رسانی و حتی برنامه‌ریزی سایر سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی مانند مترو، تاکسی و ... استفاده کرد.

در مطالعات گذشته، از توزیعهای احتمالی جهت برآورد زمان سفرِ اتوبوسها در یک بازه زمانی کوتاه استفاده شده است[۳،٤،۵]. دو دلیل برای استفاده از رفتار تصادفی زمان سفر در برآورد زمان سفر وجود دارد. برخی از مطالعات، جهت تسهیل در برآورد زمان سفر از توزیعهای احتمالی استفاده کرده‌اند، اما برخی دیگر بر اساس مطالعه تجربی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی مختلف و مشاهده رفتار تصادفی زمان سفر، استفاده از توزیع‌های احتمالی را جهت برآورد زمان سفر پیشنهاد کرده‌اند [۳]. اما تغییر پیوسته متغیرهای مؤثر بر زمان سفر مانند تغییر شرایط ترافیکی در یک مسیر، بر توزیع احتمالی آن تأثیر مستقیم دارد. بنابراین نمی‌توان با اطمینان در طول روز، یک توزیع احتمالی ثابت با پارامترهای مشخص برای متغیر زمان سفر در نظر گرفت. مطالعه زمان سفر در سیستم حمل‌ونقل شهر تهران در این تحقیق نشان می‌دهد، حتی با ثابت بودن شکل توزیع زمان سفر در ساعات اوج، پارامترهای توزیع آماری با تغییر شرایط تغییر می‌کنند. در نتیجه برآورد زمان سفر در یک مسیر از توزیع آماری ثابت بدون در نظر گرفتن تغییرات متغیرهای مؤثر بر آن، نتیجه‌ای غیر واقعی خواهد داشت.

طراحی مدلهای مناسبی که از دقت کافی در پیش‌بینی زمان سفر بر اساس متغیرهای مؤثر بر آن برخوردار باشند، به عنوان یک ضرورت در فرآیند برنامه‌ریزی حمل‌ونقل عمومی مطرح است. برخلاف برنامه‌ریزی استاتیک که در آن تنها از داده‌های گذشته استفاده می‌شود، در فرآیند برنامه‌ریزی پویا علاوه بر داده‌های گذشته دسترسی به داده‌های لحظه‌ای نیز وجود دارد. بنابراین بر این اساس می‌توان روشهای پیش‌بینی با عملکردهای متفاوت برای زمان سفر وسایل نقلیه عمومی که قابل استفاده در هر نوع فرآیند برنامه‌ریزی باشد، طراحی و اجراء کرد.

در این مقاله، متغیرهای مناسب برای اندازه‌گیری تأثیر عاملهای زمانی، ترافیکی و مکانی بر زمان سفرِ وسایل نقلیه عمومی در یک مسیر، تعریف شده و با بررسی سیستم اتوبوسرانی شهر تهران میزان تأثیر این متغیرها بر زمان سفر اندازه‌گیری شده است. دو مدل پیش‌بینی جهت برآورد زمان سفرِ وسایل نقلیه عمومی بین دو ایستگاه متوالی از یک مسیر و بر اساس متغیرهای مؤثر شناسایی شده طراحی شده است. ابتدا مدلی با استفاده از داده‌های گذشته و مبتنی بر رگرسیون خطی چندگانه طراحی شده که در آن، رابطه میان متغیر زمان سفر و متغیرهای مؤثر بر آن تشریح شده است. سپس با طراحی یک مدل شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خوراند[۳]، مدلی برای پیش‌بینی زمان سفر بر اساس داده‌های گذشته و لحظه‌ای که قابل استفاده در برنامه‌ریزی استایتک و پویا با دقت بیشتر باشد، ارایه شده است. در پایان دقت برآورد دو مدل در پیش‌بینی زمان سفر با یکدیگر مقایسه شده است.

بخش دوم به مرور ادبیات موضوع و روشهای پیش‌بینی زمان سفر اختصاص یافته است. در بخش سوم، علاوه بر معرفی سیستم حمل‌ونقل اتوبوسرانی شهر تهران، عوامل مؤثر بر زمان سفر معرفی و متغیرهایی برای اندازه‌گیری تأثیر هر یک از عوامل مؤثر بر زمان سفر تعریف شده است. در بخش چهارم مدلهای پیش‌بینی زمان سفر اتوبوسها طراحی و نتایج اجرای آنها ارایه شده است. بخش پایانی، مربوط به نتایج تحقیق و مقایسه نتایج دو مدل است.

۲. مرور ادبیات

به طور کلی زمان سفر وسایل نقلیه در یک مسیر با دو دسته روش مستقیم و غیرمستقیم تعیین می‌شود[٦]. در روشهای مستقیم با استفاده از فنآوری‌های ردیابی وسایل نقلیه، موسوم به شناسه‌گرهای خودکار وسایل نقلیه[٤] مانند خواندن پلاک خودروها از طریق دوربینها و نرم افزارهای پردازش تصویر، تکنولوژی RFID[۵]، سیستم‌های موقعیت‌سنج محلی (GPS[٦]) و یا تلفن همراه رانندگان، وسایل نقلیه خاص در دو نقطه از مسیر ردیابی می‌شوند و زمان واقعی سفر آنها در فاصله‌ای از مسیر در هر لحظه از روز اندازه‌گیری می‌شود. اما در روشهای غیرمستقیم، زمان سفر با اندازه‌گیری متغیرهای مؤثر بر آن نظیر متغیرهای ترافیکی با استفاده از سنسورهای ترافیکی و یا دوربینهای ویدیویی در خیابانها و بزرگراهها و استفاده از مدلهای پیش‌بینی، تخمین زده می‌شود. برآورد زمان سفر در روشهای غیرمستقیم به دلیل هزینه‌ها و

مشکلات کمتری که نسبت به روشهای مستقیم دارند مورد توجه بسیاری از مطالعات بوده است [۷، ۸].

تکنیکهای پیش‌بینی زمان سفر از جنبه‌های مختلفی نظیر؛ نحوه محاسبه زمان سفر، نحوه جمع‌آوری داده‌ها، مدل پیش‌بینی و نوع داده‌های استفاده شده قابل دسته‌بندی است. جدول ۱ خلاصه‌ای از انواع حالتهای مختلف هر معیار را نشان می‌دهد.

جدول۱. انواع معیارها و حالتهای هر معیار در دسته‌بندی تکنیکهای پیش‌بینی زمان سفر

معیار	حالتها
نحوه محاسبه زمان سفر	محاسبه کل مسیر یا محاسبه بخش- بخش مسیر
نحوه جمع‌آوری داده‌ها	روشهای مستقیم یا غیر مستقیم
مدل پیش‌بینی	سریهای زمانی، رگرسیون، هوش مصنوعی و ...
نوع داده‌های استفاده شده	داده‌های گذشته، داده‌های لحظه‌ای و یا ترکیبی از هر دو

از نظر نحوه محاسبه زمان سفر، مانند بسیاری از مطالعات حوزه برآورد زمان سفر، کل مسیر به بخشهای کوچک‌تر تقسیم شده و زمان سفر در هر بخش محاسبه می‌شود و در پایان از جمع زمان تخمینی بخشهای کوچک‌تر و متوالی زمان سفر کل مسیر محاسبه می‌شود [۸، ۹]. اما دسته دیگری از روشهای موسوم به تخمین کل، زمان سفر بین مبداء و مقصد را یکباره محاسبه می‌کنند.

از مدلهای پیش‌بینی گوناگونی در مطالعات گذشته جهت برآورد زمان سفر استفاده شده است. از جمله می‌توان به مدلهای سریهای زمانی [۸،۱۰،۱۱،۱۲]، رگرسیون [۹،۱۳،۱٤] ، شبیه‌سازی [۱۵،۱٦]، شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۷،۱۸] و فرآیندهای تصادفی [۱۹] اشاره کرد.

همان گونه که ذکر شد روشهای پیش‌بینی زمان سفر می‌توانند از داده‌های مختلفی به عنوان ورودی مدل پیش‌بینی استفاده کنند. دسته‌ای از مدلهای پیش‌بینیِ زمان سفر مانند مدلهای مبتنی بر سریهای زمانی و رگرسیون تنها از داده‌های گذشته جهت پیش‌بینی استفاده می‌کنند. اما دسته دیگری از مدلها، مانند مدلهای مبتنی بر سرعت [۱٤] با اندازه‌گیری مستقیم سرعت در هر لحظه از مسیر و استفاده از روابط ریاضی زمان سفر را محاسبه می‌کنند. این نوع مدلها تنها از داده‌های لحظه‌ای که معرف شرایط ترافیکی خیابانهاست جهت پیش‌بینی زمان سفر استفاده می‌کنند [۲۰].

مدلهایی مانند مدل چِین و کوچیپودی [۸] از داده‌های گذشته جهت ساخت مدل (تعیین روابط مدل و برآورد پارامترهای اولیه) و از داده‌های لحظه‌ای که از سنسورهای ترافیکی از سطح شهر جمع‌آوری می‌شوند به عنوان ورودی لحظه‌ای مدل، زمان سفر را بر اساس الگوریتمی به نام Kalman Filtering پیش‌بینی می‌کنند. رویکرد هوش مصنوعی بخصوص شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز از جمله مدلهایی هستند که در آنها از داده‌های گذشته و لحظه‌ای برای پیش‌بینی زمان سفر استفاده می‌شود. کیسگیورگی و ریلت [۲۱] مدلی مبتنی بر شبکه‌های عصبی SOM[۷] برای خوشه بندی داده‌های ورودی و شبکه عصبی پیش‌خوراند جهت پیش‌بینی زمان سفر و بر اساس داده‌های لحظه‌ای ترافیکی مانند سرعت، ضریب اشغال و حجم که از طریق سنسورهای ترافیکی جمع‌آوری می‌شوند، طراحی کردند. اینما [۱۷] نیز با طراحی یک شبکه عصبی مصنوعی پیش خوراند چند لایه، زمان سفر در بزرگراههای بین شهری را پیش‌بینی کرد. ون لینت [۱۸] چارچوبی برای پیش‌بینی زمان سفر در آزادراهها بر اساس داده‌های گذشته و لحظه‌ای با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی معروف به SSNN[۸] توسعه داد.

همان طور که قبلاً اشاره شد، عموماً زمان سفر وسایل نقلیه عمومی، براساس رفتار احتمالی آن برآورد می‌شود. به عنوان مثال اُسونا و نیوولِ [۲۲] در مسئله کنترل وسایل نقلیه عمومی، زمان سفر اتوبوسها را متغیرهای تصادفی مستقل و با توزیع یکسان و مشخص در نظر گرفته‌اند. بارنت و کلیتمن [۲۳] در ارایه برنامه کنترلی وسایل نقلیه عمومی، زمان سفر بین ایستگاههای متوالی مسیر را متغیر تصادفی با توزیع معلوم فرض کرده‌اند. هیکمن [۲٤] در مسئله توقف[۹]، زمان سفر را احتمالی فرض کرده و از متوسط و واریانس زمان سفر به عنوان برآورد زمان سفر استفاده کرده است. توزیعهای احتمالی چوله[۱۰] مانند نرمال لگاریتمی و گاما از معروف‌ترین توزیعهای احتمالی است که در ادبیات برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی استفاده شده است [۳].

اما مطالعاتی نیز جهت پیش‌بینی زمان رسیدن اتوبوس به ایستگاه (مقصد) با روشهایی غیر از رویکرد احتمالی انجام شده است. چونگ و چلبی [۲۵] با استفاده از روشهای میانگین متحرک و رگرسیون و داده‌های جمع‌آروی شده از سیستم‌های مکان‌یاب خودکار که بر روی سرویس مدارس نصب می‌شوند، اقدام به پیش‌بینی زمان رسیدن اتوبوسها به مقصد کردند. همچنین بین و همکاران [۲٦] با شبکه عصبی مصنوعی به نام SVM[۱۱] اقدام به پیش‌بینی زمان رسیدن وسیله به ایستگاه کردند.

۳. متغیرهای مؤثر بر اندازه‌گیری زمان سفر

به طور کلی در سیستم‌های حمل‌ونقل، زمان سفرِ وسایل نقلیه تحت تأثیر سه عامل؛ نیروی انسانی، وسیله نقلیه و عامل محیطی قرار دارد[۷]. اثر هر یک از عوامل ذکر شده بر زمان سفر با تعریف تعدادی متغیر قابل اندازه‌گیری ارزیابی می‌شود. دقت برآورد زمان سفر وسایل نقلیه وابسته به تعریف مناسب، اندازه‌گیری دقیق متغیرها و همچنین اندازه‌گیری تأثیر آنها بر زمان سفر است.

۳-۱ متغیرهای عمومی مؤثر بر زمان سفر

متغیرهایی مانند سن راننده، جنسیت راننده، سابقه رانندگی و ... از جمله متغیرهایی هستند که اثر خصوصیات راننده را بر زمان سفر نشان می‌دهند. نوع وسیله نقلیه، عمر وسیله، حداکثر سرعت آن و ... از جمله متغیرهایِ اندازه‌گیریِ تأثیر عامل وسیله نقلیه بر زمان سفر هستند. اما عامل محیطی را می‌توان به عوامل جزئی‌تری مانند شرایط زمانی و جوی، ترافیکی و مکانی تقسیم کرد که در ادامه متغیرهای اندازه‌گیری این شرایط نیز بیان شده‌اند.

۳-۱-۱ شرایط زمانی و جوی

تأثیر شرایط آب و هوایی و یا زمان انجام سفر توسط متغیرهایی مانند دمای محیط، فصل سال، روز هفته، روزهای خاص و یا وضعیت هوا (بارانی یا آفتابی‌بودن) قابل بیان است. اما این متغیرها در مطالعات محدودی در حوزه پیش‌بینی زمان سفر مانند مطالعه یون و همکاران [۱۹] که متغیرهای شرایط جوی در مدلهای پیش‌بینی وارد شده، در نظر گرفته شده است.

۳-۱-۲ شرایط ترافیکی

از میان عاملهای تأثیرگذار معرفی شده بر زمان سفر، شرایط ترافیکی مهم‌ترین بخش تغییرپذیر و تأثیرگذار بر زمان سفر است[۷]. سرعت وسایل نقلیه در یک مسیر، در کنار متغیرهای ترافیکی دیگر مانند تردد (جریان)، چگالی، حجم و یا ضریب اشغال، ازدحام و یا باز بودن مسیر را نشان می‌دهد. تعاریف و روابط متعددی برای محاسبه هر یک از متغیرهای ترافیکی ارایه شده است که بخشی از آنها عبارتند از [۲۷]:

الف- سرعت: تعاریف متعددی از سرعت در مهندسی ترافیک ارایه شده است. اما میانگین مکانی سرعت[۱۲] (SMS) و میانگین زمانی سرعت[۱۳] (TMS) که مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند، معیارهای مناسبی جهت محاسبه سرعت وسایل نقلیه عبوری در یک مسیر هستند.

$$SMS = \frac{nd}{\sum_{i=1}^{n} t_i} \qquad (۱)$$

$$TMS = \frac{n}{d}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{t_i} \qquad (۲)$$

در روابط بالا، پارامتر n معرف اندازه نمونه اخذ شده (انتخاب تعدادی از وسایل نقلیه عبوری در مسیر) است. پارامتر d طول ثابتی از مسیری است که سرعت در آن محاسبه می‌شود و t_i زمان سیر طول d توسط خودروی i ام از نمونه مورد بررسی است.

ب- تردد (جریان[۱۴]) : تردد عبارت است از تعداد خودروی عبوری از یک نقطه مسیر در طول زمانی ثابت. چنانچه M تعداد خودروی عبوری از یک نقطه مسیر در فاصله زمانی T باشد، میزان متغیر تردد (جریان) که با Q نشان داده می‌شود عبارت است از:

$$Q = \frac{M}{T} \qquad (۳)$$

ج- چگالی[۱۵]: تعداد خودروی در حال تردد (n) در طول ثابتی از مسیر (d) بیانگر متغیر چگالی(D) مسیر است. بر اساس تعاریف چگالی، تردد و میانگین مکانی سرعت، رابطه ٤ بین سه متغیر تعریف شده فوق برقرار است.

$$Q = D \times SMS \qquad (٤)$$

د- فاصله عبور: متوسط فاصله زمانی یا مسافتی بین دو وسیله نقلیه متوالی در حال حرکت در یک مسیر، فاصله عبور نامیده می‌شود. چنانچه x_i فاصله تاخیر زمانی خودروی i ام از خودروی جلویی خود باشد متغیر فاصله عبور، میانگین x_i ها برای n نمونه انتخاب شده در بازه زمانی اندازه‌گیری این متغیر خواهد بود.

اندازه‌گیری هر یک از متغیرهای ترافیکی معرفی شده با استفاده از داده‌هایی که از طریق سیستم‌های هوشمند حمل‌ونقل(ITS) و سیستم‌های پیشرفته مدیریت ترافیک (ATMS) فراهم می‌شود به آسانی در هر لحظه قابل محاسبه است.

۳-۱-۳ شرایط مکانی سفر

منظور از شرایط مکانی سفر (شرایط تسهیلات ثابت)، ویژگیهای خیابانها و مسیرهایی است که وسیله نقلیه در آنها تردد می‌کند. طول و عرض مسیرهای تردد، تعداد چراغهای راهنمایی در طول مسیر، تعداد تقاطعهای مسیر، اختلاف ارتفاع مقصد از مبدأ و نوع روسازی مسیر و ... از جمله متغیرهایی هستند که تأثیر ویژگیهای تسهیلات

ثابت را بر زمان سفر اندازه می‌گیرند. این دسته از متغیرها، بالقوه می‌توانند به طور مستقیم یا غیر مستقیم بر زمان سفر وسایل نقلیه تأثیر بگذارند. به عنوان مثال روسازی نامناسب خیابانها به طور غیرمستقیم با تأثیر بر سرعت وسایل نقلیه عبوری در مسیر باعث افزایش زمان سفر می‌شود و یا تعداد چراغهای راهنمایی طول مسیر به طور مستقیم بر زمان سفر تأثیر دارد.

۳-۲ متغیرهای بالقوه مؤثر بر زمان سفر اتوبوسها

با توجه به ماهیت مسئله پیش‌بینی زمان سفر در سیستم حمل‌ونقل عمومی، بخشی از عاملها و متغیرهای مؤثر بر زمان سفر که در حالت عام معرفی شدند، به جهت تغییرپذیری کمتری که در سیستم حمل‌ونقل عمومی دارند، از تأثیر کمتری بر زمان سفر وسایل نقلیه عمومی برخوردارند و می‌توان از درنظر گرفتن آنها در مدل پیش‌بینی چشم‌پوشی کرد.

پژوهشگرانی مانند؛ بارنت [۲۸] و هیکمن [۲٤] نیز تنها تعداد چراغهای راهنمایی در طول مسیرها و متغیرهای شرایط ترافیکی را از میان انواع متغیر بالقوه تأثیرگذار، مؤثر بر تغییرات زمان سفر وسایل نقلیه عمومی در یک مسیر می‌دانند.

مهارت و دقت مشابه رانندگان سیستم حمل‌ونقل عمومی با توجه به آموزشهای یکسانی که می‌بینند و مسئولیت یکسانی که رانندگان در قبال مسافران دارند، اثر متغیرهای معرف عامل نیروی انسانی را در زمان سفر کمتر می‌نماید. همچنین مشابهت فنی وسایل نقلیه عمومی در سیستم حمل‌ونقل اتوبوسرانی، اثر عامل وسیله نقلیه و متغیرهای مربوط به آن را بر زمان سفر ناچیز می‌کند. بنابراین تنها بخش مهم و تأثیرگذار بر زمان سفر اتوبوسها می‌تواند عامل سوم یعنی عامل محیطی و متغیرهای مربوط به آن باشد.

به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های متغیرهای جوی و زمان واقعی سفر در ایام مختلف سال، متغیرهای شرایط جوی در مدل پیش‌بینی این پژوهش در نظر گرفته نشده است. البته حذف متغیرهای شرایط جوی بر دقت مدل پیش‌بینی زمان سفر در بازه زمانی که داده‌ها گردآوری شده‌اند به جهت ثابت بودن شرایط دمایی و ... اشکالی وارد نمی‌کند. اما برای توسعه مدل جامعی که زمان سفر را در تمامی ایام سال با هر شرایط آب و هوایی پیش‌بینی کند، باید متغیرهای شرایط جوی به مدل این پژوهش اضافه شوند. اما زمان انجام سفر (صبح یا بعد از ظهر بودن) از میان متغیرهای شرایط زمانی و جوی، جهت بررسی تأثیر آن بر زمان سفر در مدل در نظر گرفته شده است.

از میان متغیرهای ترافیکی بیان شده، سه متغیر میانگین مکانی سرعت، تردد و فاصله زمانی عبور به عنوان متغیرهای بالقوه مؤثر بر زمان سفر وسایل نقلیه عمومی در نظر گرفته شده‌اند. در نظر گرفتن یکی از متغیرها به تنهایی میزان شلوغی مسیر را نشان نمی‌دهد. تصور کنید در خیابانی تمامی وسایل نقلیه با سرعت آهسته در حال حرکت باشند، در این حالت متغیر تردد مقدار کمی را نشان خواهدداد. این مقدار کم می‌تواند زمانی که خیابان خالی است و حرکتی در آن انجام نمی‌شود نیز اندازه‌گیری شود. چنین حالات خاصی برای سایر متغیرهای ترافیکی به تنهایی نیز ممکن است رخ دهد. اما اندازه‌گیری همزمان متغیرهای دیگر در کنارهم شلوغی و یا روانی جریان ترافیکی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، چنانچه متغیر تردد مقدار کمی باشد اما متغیر فاصله عبور زیاد باشد می‌توان نتیجه گرفت مسیر آزاد است و بالعکس با کوچک بودن همزمان مقدار متغیرهای فاصله عبور و تردد می‌توان ازدحام و شلوغی در خیابان را نتیجه گرفت.

هر چند در مدل پیش‌بینی زمان سفرِ وسایل نقلیه عمومی در یک مسیر ثابت، به جهت ثابت بودن متغیرهای شرایط مکانی سفر (شرایط تسهیلات ثابت) در طول مسیر، آنها نقش چندانی ندارند. اما چون در این پژوهش هدف توسعه یک مدل عام جهت استفاده در تمامی مسیرهای وسایل نقلیه عمومی است، بنابراین متغیرهایی نظیر شماره مسیر، عرض خیابان که عموماً بین دو ایستگاه متوالی ثابت است، تعداد چراغهای راهنمایی، تعداد تقاطعهای ورودی و خروجی به مسیر و اختلاف ارتفاع مقصد از مبداء بین دو ایستگاه متوالی به عنوان متغیرهای بالقوه مؤثر جهت بررسی میزان تأثیر آنها بر زمان سفر در این مقاله درنظر گرفته شده‌اند.

جدول ۲ ویژگیهای ده متغیر بالقوه مؤثر بر زمان سفر اتوبوسها که در این پژوهش تعریف شده و تأثیر آنها بر زمان سفر ارزیابی می‌شود را نشان می‌دهد.

٤. جمع‌آوری داده‌ها

در این بخش، با مطالعه سیستم حمل‌ونقل عمومی شهر تهران، میزان تأثیر هر یک از متغیرهای مؤثر (از میان متغیرهای بالقوه مؤثر تعریف شده در جدول۲) بر زمان سفر اندازه‌گیری می‌شود. در زیر بخشهای بعدی این بخش، ویژگیهای جامعه آماری، نمونه تصادفی اخذ شده و روشهای جمع‌آوری داده‌ها بیان می‌شود.

٤-١ جامعه و نمونه آماری

سیستم حمل‌ونقل عمومی شهر تهران (اتوبوسرانی) با ناوگانی حدود ۵۹۰۰ وسیله نقلیه فعال در ۲۸۸ خط بطول تقریبی ۲۷۰۰ کیلومتر روزانه حدود ٤ میلیون مسافر را در شهر تهران جابجا می‌کند[۲۹]. انواع خدمات این سیستم حمل‌ونقل که در قالب خطوط ویژه، تندرو و عادی است، توسط دو بخش دولتی و خصوصی ارایه می‌شود. بیشتر خدمات سیستم حمل‌ونقل مورد مطالعه را خطوط عادی سرویس‌دهی که شامل تردد وسایل نقلیه در خیابانهای دوجهته و توقف در ایستگاههای متوالی است، تشکیل می‌دهند. بنابراین به جهت عمومیت این نوع سرویس‌دهی و با توجه به محدودیتهای جمع‌آوری اطلاعات، ٦ مسیر از مسیرهای عادی به طور تصادفی از نقاط مختلف شهر تهران (شمال، جنوب، شرق، غرب هرکدام یک مسیر و مرکز دو مسیر) طی یک هفته در اسفندماه سال ١٣٨٦ انتخاب شده و زمان سفر در آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس نظر سو و همکاران [٦] که قدرت مدلهای پیش‌بینی زمان سفر را پیش‌بینی در ساعات اوج ترافیک می‌دانند، داده‌های زمان سفر در دو بازه ساعت اوج ترافیک صبح و بعد از ظهر (۷ الی ۱۰ و ۱۵ الی ۱۸) روزهای مطالعه جمع‌آوری شده‌اند. چن و چِین [۳۰] در مطالعه خود نشان دادند مدلهای برآورد زمان سفر که زمان بین مبداء و مقصد را یکباره تخمین می‌زنند دقت بیشتری نسبت به مدلهای بخش-بخش (جدول۱) دارند[۱۱]. در این مطالعه نیز بر مبنای برآورد یکباره زمان سفر بین دو ایستگاه متوالی (زمان سیر بین ایستگاه مبداء و مقصد) داده‌ها جمع‌آوری و تحلیل شده‌اند.

نمونه‌های اخذ شده شامل اندازه‌گیری زمان سفر بین ایستگاه مبداء و مقصد هر مسیر و متغیرهای مؤثر بر آن بین دو ایستگاه مسیر در طول زمان انجام سفر است. در طول مدت مطالعه ۲۵۱ مشاهده از زمان سفر و متغیرهای مؤثر آن ثبت شده است.

٤-٢ روشهای جمع‌آوری داده‌ها

هر چند استفاده از فنآوری‌های نوظهور در سیستمهای حمل‌ونقل، جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز را آسان‌تر کرده است، اما به دلیل محدودیت در استفاده از آنها، جمع‌آوری داده‌ها به صورت دستی انجام شده است.

اندازه‌گیری زمان سفر اتوبوسها در مسیرهای مورد بررسی، با نصب دوربینهای فیلم‌برداری در موقعیت‌های مناسب ایستگاه انجام شده است. ضبط وقایع درون ایستگاههای متوالی از یک مسیر به طور همزمان و محاسبه اختلاف زمانی بین ورود یک وسیله نقلیه خاص به ایستگاههای متوالی، زمان سفر را نتیجه می‌دهد.

همزمان با حرکت وسیله نقلیه از ایستگاه مبداء، زمانِ (t_i) طی کردن طول ۵ متر (d=5) از مسیر برای ۵ وسیله نقلیه (n=5) به طور جداگانه اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه ۱ متوسط سرعت در مسیر، در فاصله حرکت اتوبوس از ایستگاه مبداء تا رسیدن به ایستگاه مقصد محاسبه شده است.

جدول۲. متغیرهای بالقوه مؤثر بر زمان سفر وسایل نقلیه عمومی

نام متغیر	نام عامل	نوع یا واحد اندزه‌گیری	نماد نمایش	تعریف متغیر
زمان سفر	زمانی و جوی	اسمی (صفر و یک)	Time	صبح یا بعد ازظهر بودن زمان سفر
میانگین مکانی سرعت	ترافیکی	متر بر ثانیه	SMS	میانگین سرعت
فاصله عبور	ترافیکی	ثانیه	TBar	اختلاف فاصله زمانی بین عبور دو وسیله نقلیه متوالی از یک نقطه مسیر
تردد	ترافیکی	وسیله بر ثانیه	Q	تعداد وسیله نقلیه عبوری در واحد زمان
مسیر سفر	مکانی	اسمی	Track	شماره مسیری که وسیله در آن تردد می‌کند
عرض مسیر	مکانی	متر	Width	عرض خیابان
تعداد تقاطع‌های مسیر	مکانی	شمارشی	Line in-off	تعداد تقاطعهای ورودی و خروجی مسیر
تعداد چراغهای راهنمایی مسیر	مکانی	شمارشی	Intersection	تعداد چراغهای راهنمایی
اختلاف ارتفاع مقصد از مبدأ	مکانی	متر	Height	اختلاف ارتفاع ایستگاه مبدأ و مقصد
طول مسیر	مکانی	متر	Distance	مسافت بین ایستگاه مبدأ و مقصد

جهت محاسبه متغیر تردد در مسیر، تعداد خودروهایی که از جلو دوربین نصب شده در مسیر طی یک دقیقه (T=60) عبور می کنند شمرده شده (M)، سپس با استفاده از رابطه ۳ متغیر تردد اندازه‌گیری شده است.

با بازبینی فیلم دوربینی که در مسیر بین ایستگاه مبداء و مقصد نصب شده و زمان سنجی فاصله زمانی بین ۱۰ زوج خودروی متوالی عبوری از جلو دوربین و محاسبه میانگین فاصله زمانی اندازه‌گیری شده، متغیر فاصله عبور محاسبه شده است.

سایر متغیرهای جدول ۲، شامل؛ زمان انجام سفر، تعداد چراغهای راهنمایی مسیر، تعداد تقاطعهای مسیر، شماره مسیر با بازدید از مسیرها و یا مشاهده زمان فیلمهای ضبط شده در ایستگاهها اندازه‌گیری شده‌اند. دو متغیر طول مسیر و اختلاف سطح دو ایستگاه مبداء و مقصد با مطالعه نقشه‌های جغرافیایی مسیر و عکسهای هوایی مسیر به طور دقیق اندازه گرفته شده‌اند.

٤-٣ تحلیل آماری داده‌ها

آزمون تحلیل واریانس[16] اثر مسیر بر زمان سفر (پیوست۱) نشان می‌دهد، میانگین زمان سفر در مسیرهای مختلف با یکدیگر متفاوت است. همچنین بررسی آزمون تحلیل واریانس زمان انجام سفر (صبح یا بعد از ظهر بودن) در هر مسیر در سطح اطمینان ۹۰٪ نیز نشان می‌دهد که میانگین زمان سفر در هر مسیر، در ساعت اوج تقاضای صبح و بعد از ظهر با یکدیگر متفاوت است. بنابراین از نتایج هر دو آزمون آماری فوق می‌توان نتیجه گرفت دو متغیر زمان و مسیر انجام سفر بر زمان سفر تأثیر دارند. همچنین بالا بودن ضرایب همبستگی و پایین بودن آزمون صفر بودن ضریب همبستگی متغیرهای دیگر جدول ۲ و زمان سفر (پیوست۲) نشان دهنده تأثیر تمامی آنها بر زمان سفر است و بنابراین هیچ یک از آنها متغیرهای زائد و بی‌تأثیری بر زمان سفر نیستند.

بررسی ضرایب همبستگی (پیوست۲) و آزمونهای معنی‌دار بودن ضرایب بین متغیرهای ترافیکی با یکدیگر نشان می‌دهد، متغیر جریان با متغیرهای سرعت و فاصله عبور وابستگی خطی نسبتاً بالایی دارد یعنی اندازه‌گیری دو متغیر در هر مسیر به نحوی متغیر جریان را نیز اندازه‌گیری می‌نمایند. از طرفی از ناچیز بودن وابستگی خطی متغیرهای سرعت و فاصله عبور می‌توان نتیجه گرفت برای اندازه‌گیری عملکرد ترافیکی هر مسیر، اندازه‌گیری همزمان دو متغیر سرعت و فاصله عبور ضروری است.

همچنین بررسی آزمون زیبندگی توزیع آماری[17] بر داده‌های مسیرهایی که تعداد داده‌های آنها به اندازه کافی بزرگ است (حداقل ۳۰ نمونه) در بازه‌های زمانی صبح و بعد از ظهر نشان می‌دهد متغیر زمان سفر عموماً در هر مسیر و هر بازه زمانی از تابع توزیع نرمال یا لگنرمال پیروی می‌کند.

۵. پیش‌بینی زمان سفر

دو روش پیش‌بینی بر اساس نوع داده‌های ورودی و نوع مدل استفاده شده، جهت پیش‌بینی زمان سفر وسایل نقلیه عمومی در این بخش توسعه داده شده است. ابتدا روشی مبتنی بر داده‌های گذشته و بر اساس مدل رگرسیونی به منظور استفاده در فرآیند برنامه‌ریزی استاتیک و با اندکی خطای بیشتر در فرآیند برنامه‌ریزی پویای حمل‌ونقل عمومی (اتوبوسرانی) ارایه شده است. اما روش دوم با هدف استفاده در فرآیند برنامه‌ریزی پویا، بر اساس داده‌های گذشته و لحظه‌ای و مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی توسعه داده شده است. در روش اخیر ساختار شبکه با استفاده از داده‌های گذشته طراحی و آموزش داده می‌شود و بر اساس ورود داده‌های لحظه‌ای که از طریق حسگرهای ترافیکی و داده‌های سیستم‌های پیشرفته مدیریت ترافیک دریافت می‌شود، زمان سفر برآورد شده و به عنوان متغیر خروجی از شبکه دریافت می‌شود.

۵-۱ افراز داده‌ها

قبل از استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده، آنها به دو دسته داده‌های آموزش و داده‌های اعتبار تقسیم‌بندی شده‌اند. از داده‌های آموزش برای تعیین معماری، ضرایب و پارامترهای هر یک از مدلهای پیش‌بینی رگرسیون و شبکه عصبی استفاده می‌شوند و از داده‌های اعتبار جهت ارزیابی توانایی برآورد هر مدل و مقایسه دقت برآوردهای دو روش بایکدیگر استفاده می‌شوند. اگرچه قانونی برای تقسیم داده‌ها به داده‌های آموزش و اعتبار وجود ندارد، اما مانند بسیاری از تحقیقات تقسیم داده‌ها بر اساس نسبت ۸۰ به ۲۰ (۲۰۰ مشاهده آموزش و ۵۱ مشاهده اعتبار) و به صورت تصادفی انجام شده است.

۵-۲ مدل رگرسیون چندگانه

متغیر زمان سفر (TT) به عنوان متغیر پاسخ (وابسته) و متغیرهای جدول ۲ به عنوان متغیرهای مستقل در مدل رگرسیونی در نظر

گرفته شده است. مدل رگرسیونی خطی کامل که در آن زمان سفر رابطه خطی مطابق رابطه ۸ با متغیرهای مستقل دارند بر داده‌های آموزش برازش شده است.

$$TT = \beta_0 + \beta_1 Time + \beta_2 SMS + \beta_3 TBar + \beta_4 Q + \beta_5 Track + \beta_6 Width + \beta_7 Line\ \ in-off + \beta_8 Intersection + \beta_9 Height + \beta_{10} Distance \quad (۵)$$

جدول۳ نتایج آنالیز واریانس رگرسیونی که توسط نرم افزار Minitab اجراء شده را نشان می‌دهد. کوچک بودن مقدار p-value آنالیز واریانس و بالا بودن ضرایب R-Square و R-Square(Adjusted) که به ترتیب ۷۹/۹ درصد و ۷۸/۹ درصد برآورد شده، صحت برازش مدل بر داده‌های آموزش را نشان می‌دهد.

جدول ٤، برآورد ضرایب رگرسیونی و نتایج آزمونهای آماری اعتبارسنجی ضرایب را در مدل رابطه ۸ نشان می‌دهد.

بالا بودن مقدار P-value آزمون صفر بودن ضریب متغیر جریان (Q) در رابطه ۸ یعنی ضریب β_4 در جدول٤ که برابر ۰/۹۸۸برآورد شده و تحلیل همبستگی این متغیر با سایر متغیرهای ترافیکی (پیوست۲) نشان از تأثیر ناچیز این متغیر در برآورد زمان سفر دارد. پس از حذف متغیر تردد از میان ۱۰ متغیر بالقوه مؤثر بر زمان سفر، مجدداً ضرایب رگرسیونی محاسبه شده که در ستون پایانی جدول ٤ مقادیر جدید نشان شده است. ضرایب جدید رگرسیونی با مقادیر ضرایب قبل از حذف متغیر تردد تغییر چندانی ندارند. همچنین مثبت بودن آزمونهای معنی‌دار بودن ضرایب مشخص می‌کند مابقی متغیرها بر زمان سفر تأثیر مستقیم دارند و امکان حذف آنها از مدل وجود ندارد.

جدول ۳. جدول آنالیز واریانس رگرسیون خطی کامل

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مربعات میانگین	آماره F	P-Value
رگرسیون	۱۰	٦٣٩٤٠١٩	٦٣٩٤٠٢	۷۵/۳۰	۰/۰۰۰
باقی‌مانده‌ها	۱۸۹	١٦٠٤٩٠٥	٨٤٩٢		
جمع	۱۹۹	۷۹۹۸۹۲۷			

جدول ٤. ضرایب رگرسیونی و نتایج آزمون معنی‌دار بودن ضرایب

نام متغیر مستقل	نماد متغیر	پارامتر	ضریب	انحراف معیار	آماره آزمون	P-value	ضرایب جدید
ضریب ثابت	Constant	β_0	۸۹۸/۲	۱۵۱/٦	۵/۹۳	۰/۰۰۰	۸۹۸/۹
زمان انجام سفر	Time	β_1	-۳۸/٦	۱۷/٦۲	-۲/۱۹	۰/۰۳۰	-۳۸/۵۵
میانگین مکانی سرعت	SMS	β_2	-۳/٦۰۵	۱/۸۵۸	-۱/۹٤	۰/۰۵٤	-۳/٦۰۷
فاصله عبور	TBar	β_3	۲۳/۱٦۳	۷/۲۱۲	۳/۲۱	۰/۰۰۲	۲۳/۱۸۸
تردد	Q	β_4	-۰/۰۰۷٤	۰/٤۸۸	-۰/۰۲	۰/۹۸۸	—
مسیر سفر	track	β_5	-٤۸۹/۳۷	۸۳/٤۸	-۵/۸٦	۰/۰۰۰	-٤۹۰/۱۳
عرض مسیر	Width	β_6	۱۲/۳۱۵	۵/۱۳۳	۲/٤۰	۰/۰۱۷	۱۲/۳۳٤
تعداد تقاطع‌های مسیر	Line in-off	β_7	۱۰٦۸/۰	۱٦۳/۰	٦/۵۵	۰/۰۰۰	۱۰٦۹/٤
تعداد چراغهای راهنمایی مسیر	Intersection	β_8	-٦٤۱/۳	۱۰٦/۱	-٦/۰۵	۰/۰۰۰	-٦٤۲/۰۸
اختلاف ارتفاع مقصد از مبدأ	Height	β_9	-۱۰/۷٤۰	۱/٦۵۹	-٦/٤۷	۰/۰۰۰	-۱۰/۷٤۰
طول مسیر	Distance	β_{10}	-۰/۱٤۷۹٦	۰/۰٦	-۲/٤٦	۰/۰۱۲	-۰/۱۳۸۰

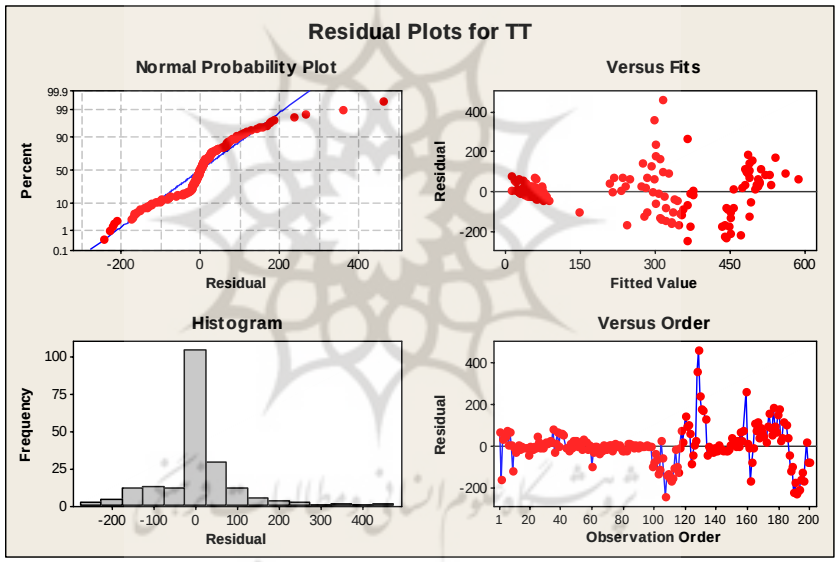
همچنین برقراری شرایط استفاده از رگرسیون، مانند نرمال بودن باقی‌مانده‌ها، صفر بودن میانگین باقی مانده‌ها، ثابت بودن واریانس مشاهدات و استقلال مشاهدات بر اساس شکل ۱ قابل بررسی و تایید است.

۵-۳ عصبی مصنوعی

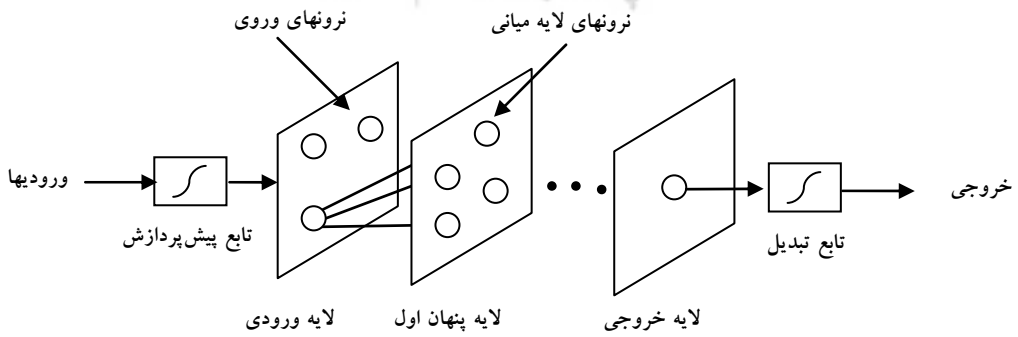
پس از تلاشهای راملهارت و همکاران (۱۹۸٦) در توسعه الگوریتم پس انتشار خطا[18] برای آموزش شبکه عصبی پیش‌خوراند[19]، شبکه‌های عصبی مصنوعی به صورت فزاینده‌ای در انواع مسائل مهندسی و پیش‌بینی مورد توجه و استفاده قرار گرفته‌اند[۳۱]. توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در کشف روابط غیرخطی متغیر پیش‌بینی و در نتیجه افزایش دقت پیش‌بینی مهم‌ترین مزیت استفاده از آنها بر استفاده از روشهای آماری نظیر رگرسیون و آنالیز سری‌های زمانی است [۳۲، ۳۳].

شبکه‌های عصبی مصنوعی الهام گرفته از شبکه‌های عصبی بیولوژیکی، دارای ساختار و انواع مختلفی هستند. نرون کوچک‌ترین واحد پردازش اطلاعات است که اساس عملکرد شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهد[۳٤]. هر شبکه از یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و تعدادی لایه میانی با تعدادی نرون درون هر لایه تشکیل شده است و نرونهای هر لایه با وزنهایی به نرونهای لایه بعد متصل شده‌اند. طی فرآیند آموزش این وزنها جهت دستیابی به شبکه‌ای با خطای پیش‌بینی کمتر پیوسته تغییر می‌کنند. همچنین خروجی‌های هر نرون بعد از عبور از توابع تبدیل[20] به نرونهای لایه بعد منتقل می‌شوند[۳۵].

در این تحقیق از شبکه‌های عصبی مصنوعی چند لایه پیش‌خوراند برای پیش‌بینی زمان سفر استفاده شده است. شکل ۲ نمایی ساده از یک شبکه عصبی پیش‌خوراند و اجزاء آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. کردار برقراری شرایط استفاده از مدل رگرسیون



شکل ۲. اجزاء یک شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خوراند

۵-۳-۱ طراحی معماری شبکه

طراحی معماری شبکه‌های عصبی یکی از بخشهای مهم و تأثیرگذار بر عملکرد و نتایج شبکه است. منظور از معماری شبکه عصبی تعیین پارامترهایی نظیر تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها در هر لایه و توابع انتقال و پیش‌پردازش در شبکه است.

جدول۵ پارامترهای طراحی و سطوح مختلف هر پارامتر را که در طراحی شبکه عصبی مورد نظر لحاظ شده، نشان می‌دهد و در ادامه هر یک از پارامترهای شبکه تشریح شده است.

جدول۵. اجراء و سطوح هر جزء شبکه عصبی پیش‌خوراند

پارامتر طراحی	سطوح مختلف پارامتر
تابع پیش‌پردازش	مینی- ماکس و نرمال سازی
تعداد لایه‌های پنهان	۱ تا ۲ لایه
تعداد نرونهای هر لایه	متغیر بین ۱ تا ۲۵ نرون
تابع تبدیل	LogSig و TanSig
تابع آموزش	Trainbfg[۲۱] و Trainlm[۲۲]

۱. تابع پیش‌پردازش:

نرمال‌سازی داده‌های ورودی، به معنی انجام یک عملیات ریاضی بر روی داده‌های ورودی قبل از آموزش شبکه عصبی جهت تسهیل در فرآیند یادگیری شبکه، اجتناب از پیچیدگی‌های محاسباتی و بهبود عملکرد شبکه است [۳۳، ۳٦]. از دو تابع مینی- ماکس و نرمال سازی به‌ترتیب مطابق روابط ۹ و ۱۰ که داده‌های ورودی را در بازه (۰/۱) منتقل می‌کنند به عنوان توابع پیش پردازش استفاده شده است.

$$X_n = \frac{X - X_{Min}}{X_{Max} - X_{Min}} \qquad (٦)$$

$$X_n = \frac{X - X_{Mean}}{StdDev} \qquad (٧)$$

۲. تعداد لایه‌های پنهان:

لایه‌های پنهان نقش مهمی در توصیف روابط غیرخطی حاکم بر ورودیها و خروجی شبکه دارند. محققین روابط مختلفی را برای تعداد لایه‌های پنهان پیشنهاد دادند اما هیچکدام از آنها برای تمام مسائل کارایی ندارند. بهترین روش برای تعیین تعداد لایه‌های پنهان استفاده از روش سعی و خطاست[۳٦] اما استفاده از یک و دو لایه پنهان در طراحی شبکه در بسیاری از تحقیقات پیشنهاد شده است[۳۳]. در این تحقیق نیز ارزیابی شبکه با یک و دو لایه پنهان آموزش داده شده تا بهترین نتیجه حاصل شود.

۳. تعداد نرونهای هر لایه:

محققین از روابط مختلفی برای تعیین تعداد نرونهای لایه‌های پنهان استفاده کرده‌اند که هیچکدام از روابط فوق برای تمامی مسائل کارآیی ندارد. بنابراین بهترین روش برای تعیین تعداد نرونهای هر لایه آزمون سعی و خطا پیشنهاد شده است[۳٤]. همچنین نشان داده شده که حداکثر 2n+1 نرون در هر لایه که در آن n تعداد نرون‌های لایه ورودی است در کاربردهای شبکه عصبی کافی به نظر می‌رسد [۳۳]. در این تحقیق، شبکه در حالتهای مختلف با حداکثر تعداد ۲۵ نرون در هر لایه آزمون شده است تا بهترین مقدار این پارامتر در شبکه حاصل شود.

٤. تابع تبدیل:

تابع تبدیل ارتباط بین ورودی و خروجی یک نرون و شبکه را تعیین می‌کند. از دو نوع تابع تبدیل لجستیک و هایپربولیک در لایه‌های پنهان و با توجه به محدوده تغییر متغیر خروجی از تابع خطی در لایه خروجی استفاده شده است.

۵. تابع آموزش:

آموزش شبکه عصبی مصنوعی یک بهینه‌سازی غیرخطی بدون محدودیت است که در آن اوزان در دفعات متعدد اصلاح می‌شوند تا میانگین و یا جمع مربعات خطای بین خروجی شبکه و مقادیر مورد انتظار به حداقل برسد. از دو تابع BFGS quasi-Newton backpropagation و Levenberg-Marquardt backpropagation در آموزش شبکه استفاده شده است.

۵-۳-۲ تعیین معماری مناسب شبکه عصبی

معیارهای ارزیابی عملکرد شبکه عصبی با معماری‌های مختلف تغییر می‌کند. اما این سوال مطرح می‌شود که شبکه عصبی با چه معماری (چه ترکیبی از سطوح مختلف هر پارامتر تأثیر گذار بر شبکه) نتایج بهتری در پیش‌بینی دارد؟ جهت دستیابی به معماری مناسب شبکه، تعدادی از سطوح مختلف پارامترهای طراحی که در جدول۵ معرفی شدند، جهت آزمون سعی و خطا انتخاب شده که در جدول ٦ نشان داده شده‌اند.

به ازای هر ترکیب مختلف از سطوح پارامترهای جدول ٦، شبکه عصبی پیش‌خوراندی طراحی شده و با داده‌های آموزش، آموزش داده شده است. با توجه به تعداد سطوح هر پارامتر در جدول٦، به طور کلی ۲×٦×۳×۲×۲=۱٤٤ شبکه مختلف قابل طرح است.

عملکرد شبکه‌های حاصل از هر ترکیب فوق، با معیار ضریب همبستگی (رابطه۵) بین مقدار خروجی شبکه و زمان واقعی سفر برای داده‌های آموزش ارزیابی شده است. جهت افزایش دقت اندازه‌گیری عملکرد هر شبکه، آموزش هر شبکه ۵ بار تکرار شده، یعنی در مجموع ۷۲۰=۵×۱٤٤ شبکه با ترکیبات مختلف اجرا و ضریب همبستگی خروجی شبکه و مقدار واقعی اندازه‌گیری شده است.

شکل٤ میانگین معیار عملکرد شبکه یعنی ضریب همبستگی (محور عمودی کردارها) هر یک از سطوح پنج پارامتر جدول ٦ را در کل آزمونها نشان می‌دهد. به عنوان مثال میانگین ضریب همبستگی کل ۷۲۰ شبکه آموزش دیده زمانی که تابع پیش‌پردازش آن در سطح ۱ (تابع مینی- ماکس) باشد، برابر ۰/۹۳۵ است.

همان‌طور که از شکل٤ مشخص است، سه پارامتر تابع پیش‌پردازش، تابع انتقال و آموزش تأثیر قابل توجهی بر معیار اندازه‌گیری عملکرد شبکه ندارند، اما تعداد نرونهای هر لایه می‌تواند پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد شبکه باشد. بهترین عملکرد شبکه با معماری تابع پیش‌پردازش مینی- ماکس، تابع تبدیل تانژانت سیگموید (Tansig)، تابع آموزش Trainlm، تعداد ٦ نرون لایه پنهان دوم و ۲۰ نرون لایه اول حاصل خواهد شد.

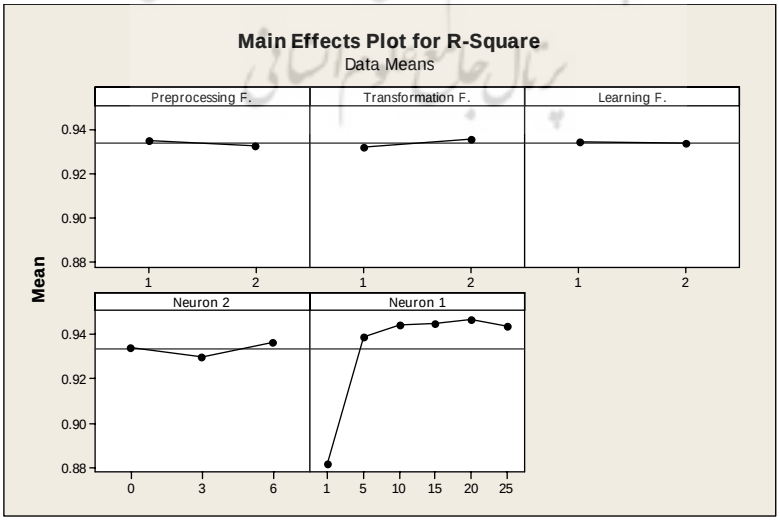
۵-۳-۳ اعتبارسنجی مدلهای پیش‌بینی زمان سفر

از داده‌های اعتبار که ۲۰ درصد کل داده‌های جمع آوری شده است جهت ارزیابی و مقایسه دقت مدلهای پیش‌بینی رگرسیون و شبکه عصبی طراحی شده در این مقاله استفاده شده است. هر یک از داده‌های آموزش (که قبلاً به مدل وارد نشده) به عنوان ورودی و به طور جداگانه به هر یک از مدلهای رگرسیون و شبکه عصبی وارد شده و مقدار پیش‌بینی متناظر آن به عنوان خروجی از مدلهای اخذ می‌شود. دقت پیش‌بینی هر مدل با سه معیار ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی، میانگین انحراف مطلق[۲۳] (MAE) و میانگین درصد انحراف مطلق[۲٤] (MAPE) مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آنها در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول٦. پارامترها و سطوح هر پارامتر در طراحی مناسب شبکه

نام پارامتر طراحی	کد اختصار پارامتر	تعداد سطوح هر پارامتر	نام و کد هر سطح
تابع پیش‌پردازش	A	۲	مینی- ماکس=۱ و نرمال سازی=۲
تعداد نرونهای لایه پنهان اول	B	٦	۱-۵-۱۰-۱۵-۲۰-۲۵
تعداد نرونهای لایه پنهان دوم	C	۳	۰*-۳-٦
تابع تبدیل	D	۲	LogSig =۱و TanSig=۲
تابع آموزش	E	۲	Trainbfg =۱ و Trainlm=۲

*منظور از سطح صفر در لایه دوم، عدم وجود لایه پنهان دوم است.



شکل ٤. کردار اثر پارامترهای طراحی بر عملکرد شبکه

هر سه معیار نشان می‌دهد شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خوراند طراحی شده، عملکرد بهتری در پیش‌بینی زمان سفر وسایل نقلیه عمومی بین دو ایستگاه متوالی نسبت به مدل رگرسیون خطی دارد.

جدول۷. نتایج اعتبارسنجی مدلهای پیش‌بینی

معیار ارزیابی	مدل رگرسیون خطی	مدل شبکه عصبی پیش‌خوراند
ضریب همبستگی (R-Square)	۰/۸۵۱۹	۰/۹۴۳۳
میانگین انحراف مطلق (MAE)	٦٢/٢٦	٣٨/٢٣
میانگین درصد انحراف مطلق (MAPE)	٪ ٣٤/٠٤ .	٪ ١٩/٥٠

٦. نتیجه‌گیری

زمان سفر نقش اساسی بر فرآیندهای برنامه‌ریزی استاتیک و پویای سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی دارد. هر یک از فرآیندهای برنامه‌ریزی استاتیک و پویا بر اساس نوع داده‌های ورودی (داده‌های گذشته و لحظه‌ای) نیازمند مدلهای متفاوتی با عملکردهای متفاوت جهت برآورد زمان سفر هستند. تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری شده از سیستم اتوبوسرانی شهر تهران نشان می‌دهد، زمان سفر اتوبوسها بین دو ابستگاه متوالی از یک مسیر از توزیعهای احتمالی نرمال و الگنرمال پیروی می‌کند. عواملی نظیر زمانی و جوی، ترافیکی و مکانی از جمله عوامل بالقوه‌ای هستند که بر زمان سفر وسایل نقلیه عمومی تأثیر می‌گذارند. برای اندازه‌گیری اثر هر یک از عاملهای فوق بر زمان سفر، نیاز به تعریف متغیرهای قابل اندازه‌گیری مناسب است. بررسی تأثیر متغیرهای این عاملها بر زمان سفر در سیستم حمل‌ونقل عمومی شهر تهران نشان می‌دهد، متغیرهای ترافیکی اثر قابل توجهی بر زمان سفر این نوع وسایل نقلیه در شرایطی که وسیله نقلیه خدمت عادی ارایه می‌دهد، دارد.

در این تحقیق دو مدل پیش‌بینی جهت برآورد زمان سفر بین دو ایستگاه متوالی توسعه داده شده است. ابتدا مدلی مبتنی بر رگرسیون خطی که بر اساس داده‌های گذشته ساخته می‌شود و عموماً در فرآیند برنامه‌ریزی استاتیک سیستم حمل‌ونقل عمومی از آن استفاده می‌شود، طراحی شده است. اما مدل دیگری با رویکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی که بر اساس داده‌های گذشته و لحظه‌ای زمان سفر را پیش‌بینی می‌کند، طراحی شده که از آن در فرآیند برنامه‌ریزی پویا می‌توان استفاده کرد. عملکرد شبکه‌های عصبی به معماری شبکه که شامل انتخاب ترکیب مختلف پارمترهای طراحی مانند تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرونها و ... است، بستگی دارد. معماری مناسب شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خوراندی که در این پژوهش استفاده شده با روش سعی و خطا تعیین شده است. مقایسه عملکرد شبکه برای داده‌های آموزش با دو مدل پیش‌بینی نشان می‌دهد، شبکه عصبی طراحی شده از نظر سه شاخص ضریب همبستگی، شاخص میانگین انحراف مطلق و شاخص میانگین درصد انحراف مطلق بهتر از مدل رگرسیون، زمان سفر را پیش‌بینی می‌کند.

نتایج این بخش از تحقیق نشان می‌دهد، مدل رگرسیونی طراحی شده حدود ۸۰ درصد تغییرات زمان سفر را پوشش می‌دهد (نتایج جدول۳) و ۲۰ درصد باقی مانده ناشی از خطای اندازه گیری، متغیرهای شناسایی نشده و یا خطای مدل پیش‌بینی رگرسیون است.

۷. پیوست‌ها

جدول پیوست۱. نتایج آنالیز واریانس اثر مسیر بر زمان سفر

مسیر	P-Value of ANOVA	R-Sq(adj)	R-Sq
٢	٠/٠٠٠	٪٢٣/٧٦	٢٤/٤٦
٣	٠/٠٠٠	٪٣٢/٢٥	٪٣٣/٧٣
٤	٠/٠٦٤	٪٧/٥٥	٪١٠/٣٥
٦	٠/٠٠٠	٪٧٩/٣٣	٪٧٩/٧٩

جدول پیوست۲. ماتریس ضرایب همبستگی و P-Value آزمون

	Travel Time	Distance	Q	Intersection	Line in-off	Height	SMS	t-bar
Distance	٠/٢٨٢ ٠/٠٠٠							
Q	-٠/٥٠٨ ٠/٠٠٠	-٠/١٥٥ ٠/٠١٣						
Intersection	٠/٦٧١ ٠/٠٠٠	٠/٣٠٣ ٠/٠٠٠	-٠/٣٥٧ ٠/٠٠٠					
Line in-off	٠/٧٥٩ ٠/٠٠٠	٠/١٧١ ٠/٠٠٠	-٠/٢٧٩ ٠/٠٠٠	٠/٤٥٩ ٠/٠٠٠				
Height	-٠/٤٦٠ ٠/٠٠٠	-٠/٢٩٥ ٠/٠٠٠	٠/٠٢٧ ٠/٦٦٧	-٠/٣٩٠ ٠/٠٠٠	٠/٦٠٣ ٠/٠٠٠			
SMS	-٠/٣٠٦ ٠/٠٠٠	٠/٠٦٠ ٠/٣٤٤	-٠/١٣٢ ٠/٠٣٦	-٠/٣٤٤ ٠/٠٠٠	-٠/٥٩٠ ٠/٠٠٠	٠/١٤٩ ٠/٠١٨		
t-bar	٠/٥٢٨ ٠/٠٠٠	٠/١٩٨ ٠/٠٠٢	-٠/٦٣٢ ٠/٠٠٠	٠/٢٢٩ ٠/٠٠٠	٠/٣٠٥ ٠/٠٠٠	٠/٠٦١ ٠/٣٣٦	-٠/٠٦٣ ٠/٣٢٤	
Width	-٠/٦٥٠ ٠/٠٠٠	-٠/٠٥٥ ٠/٣٥٥	٠/٢٦٠ ٠/٠٠٠	-٠/٤٥٥ ٠/٠٠٠	-٠/٣١١ ٠/٠٠٠	٠/٢٩٣ ٠/٠٠٠	٠/٤٥٢ ٠/٠٠٠	-٠/٣٩٨ ٠/٠٠٠

* مقدار ضریب همبستگی دو متغیر ** مقدار P-Value آزمون صفر بودن ضریب همبستگی

۸. پانویس‌ها

1 -Intelligent Transportation Systems
2 -Advanced Traffic Management Systems
3 -Feed Forward Artificial Neural Network
4 - Automatic Vehicle Identification
5 -Radio Frequency Identification
6 - Global Position Systems
7-Self-organizing Map
8 -State-Space Neural Network
9 -Holding Problem
10 -Skewed
11- Support Vector Machines
12 -Space Mean Speed
13-Time Mean Speed
14 -Flow
15 -Density
16 - Analysis of Variance
17- Goodness of Fit
18- Back Propagation Algorithm
19- Feed Forward
20-Transform Function
21-BFGS quasi-Newton backpropagation
22-Levenberg-Marquardt backpropagatio
23-Mean Absolute Error
24-Mean Absolute Percent Error

۹. مراجع

1. Bukkapatnam, S., Dessouky, M. and Zhao, J. (2003) "Distributed architecture for real-time coordination in transit networks", Department of Industrial and Systems Engineering, University of Southern California.

2. Haghani, A., Banihashemi, M. and Chiang, K.-H. (2003) "A comparative analysis of bus transit vehicle scheduling models" Transportation Research Part B, Vol. 37, No. 4, pp. 301-322.

3- Dessouky, M., Hall, R., Zhang L., Singh, A. (2003) "Real-time control of buses for schedule coordination at a terminal", Transportation Research Part A, Vol. 37, pp. 145-164.

4- Turnquist, M.A. (1978) "A model for investigating the effects of service frequency and reliability on bus passenger waiting times", Transportation Research Record, Vol. 663, pp. 70–73.

5- Strathman, J.G. and Hopper, J.R. (1993) "Empirical analysis of bus transit on-time performance" Transportation Research Part A, Vol. 27, No.2, pp. 93–100.

6- Su, l., J. Yang, and Mahmassani, H.(2008) "Travel time estimation on piecewise truncated quadratic speed trajectory", Transportation Research Part A, Vol. 24, pp. 173-186.

7- Lin, H.-E. and Zito., R. (2005) "A review of travel-time prediction in transport and logistics", In Proceeding of the Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, pp. 1433-1448.

8. Chien, S.I.J. and Kuchipudi, C.M.(2003) "Dynamic travel-time prediction with real-time and historic data", Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No.6, pp. 608-616.

9. Choi, K. and Chung, Y. (2002) "A data fusion algorithm for estimating link travel time", Intelligent Transportation Systems, Vol. 7, pp. 235-260.

10. Li, Y. (2008) "Short-term prediction of motorway travel time using ANPR and loop data", Journal of Forecasting, Vol. 27, No.6, pp. 507 - 517.

11. Sherif, H. and Haitham, A. D. (2002) "Performance evaluation of short-term time-series traffic prediction model", Journal of Transportation Engineering, Vol. 128, No.6, pp. 490-498.

12. Chien, S.I.J. and Kuchipudi, C.M. (2003) "Dynamic travel time prediction with real-time and historical data", Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No. 6, pp. 608- 616.

13. Zhang, X. and Rice, J.A.(2003) "Short-term travel time pPrediction", Tran sportation Research Part C, Vol. 11, pp. 187-210.

14. Lee, S.-H., Viswanathan, M., and Yang, Y.-K. (2006) "Fuzzy systems and knowledge discovery", A Hybrid Soft Computing Approach to Link Travel Speed Estimation, Vol. 4223, Springer Berlin / Heidelberg., pp. 794-802.

15. Hollander, Y. and Ronghui, L. (2008) "Estimation of the distribution of travel times by repeated simulations", Transportation Research Part C, Vol. 16, No. 2, pp. 212-231.

16. Anderson, M.D. and Souleyrette, R.R. (2002) "Pseudo-dynamic travel model application to assess traveler information", Transportation, Vol. 29, No. 3, pp. 307-319.

17. Innamaa, S. (2005), "Short-term prediction of travel time using neural networks on an interurban highway", Transportation, Vol. 32, pp. 649–669.

18- Van Lint, J.W.C. (2006) "Reliable real-time framework for short-term freeway travel time prediction", Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 12, pp. 921-932.

19.Yeon, J., Elefteriadou, L. and Lawphongpanich, S. (2008) "Travel time estimation on a freeway using discrete time Markov chains", Transportation Research Part B, Vol. 42, No. 4, pp. 325-338.

20- Yamane, K. I,. Yokota, T. and Fushiki, T. (2005) "Method of travel time estimation for wide-area traffic

information service", Systems and Computers in Japan, Vol. 36, No. 11, pp. 82-92.

21. Kisgyörgy, L. and Rilett, L.R. (2002) "Travel time prediction by advanced neural network", Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 46, No.1, pp. 15-32.

22. Osuna E.E., Newell, G.F.(1972) "Control strategies for an idealized public transportation system", Transportation Science, Vol. 6, pp. 376-404.

23.Barnett, A. and Kleitman, D.J. (1973) "Optimal scheduling policies for some simple transportation systems", Transportation Science, Vol. 7, pp. 85-99.

24. Hickman, M.D.(2001) "An analytic stochastic model for transit vehicle holding problem", Transportation Science, Vol. 35, No. 3, pp. 215-237.

25. Chung, E.-H. and Shalaby, A. (2007) "Expected time of arrival model for school bus transit using real-time global positioning system-based automatic vehicle location data", Journal of Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 157-167.

26. Bin, Y., Zhongzhen, Y. and Baozhen, Y. (2006) "Bus arrival time prediction using support vector machines", Journal of Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No.4, pp. 151-158.

۲۷. سیدحسینی، سید محمد (۱۳۸۱) "برنامه‌ریزی و مهندسی حمل‌ونقل و جابجایی مواد"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

28. Barnett, A. (1974) "On controlling randomness in transit operations", Transportation Science, Vol. 8, pp. 102-116.

29. www.ubct.ir.

30. Chen, M. and Chien, S.I.J. (2001) "Dynamic freeway travel-time prediction with probe vehicle data: link based versus path based", in 80th. Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, D.C.

۳۱ .حسنی، ابوالفضل، حیدری پناه، علی (۱۳۸۵)، "مدلسازی تأثیر درصد مصالح سنگی شکسته در مقاومت مارشال آسفالت با بکارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی"، پژوهشنامه حمل‌ونقل، سال سوم، شماره سوم، ص. ۱۷۹-۱۷۳

32. Amin-Naseri, M.R., Soroush, A.R., (2008) "Combined use of unsupervised and supervised learning for daily peak load forecasting", Energy Conversion and Management, Vol. 49, No. 6, pp. 1302-1308.

۳۳. امین ناصری، محمد رضا، کوچک‌زاده، احمد (۱۳۷۸) "طراحی بهینه معماری شبکه عصبی با استفاده از مدل طراحی آزمایشات"، مجله مدرس، تحت انتشار.

۳٤. نجفی، بهاءالدین،زیبایی، منصور،شیخی، محمد حسین، طرازکار، محمدحسن (۱۳۸٦) "پیش‌بینی برخی از محصولات زراعی در استان فارس : کاربرد شبکه‌های عصبی"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۱، شماره۱، ص. ۵۰۱-۵۱۱.

۳۵. پرورش‌ریزی، عاطفه، کوچک زاده، صلاح، امید، محمدحسین (۱۳۸۵) "براورد مشخصات پرش هیدرولیکی متحرک با کاربرد شبکه عصبی مصنوعی و روش تلفیقی شبکه عصبی"، الگوریتم شبکه مجله علوم کشاورزی، جلد ۳۷، شماره۱، ص. ۱۸۷-۱۹٦.

۳٦ . نجفی، بهاالدین، طرازکار، محمدحسن (۱۳۸۵) "پیش‌بینی میزان صادرات پسته ایران: کاربرد شبکه عصبی مصنوعی"، پژوهشنامه بازرگانی، جلد ۳۹، شماره۱۰، ص. ۱۹۱-۲۱٤.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی