پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال چهارم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹٤
صص. ۱۰۳-۹۰

شبیه‌سازی و تحلیل دبی‌های حداکثر لحظه‌ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های هیدرومتری هفت‌حوض، سولقان، قلاک و مقصودبیک در کلان‌شهر تهران)[1]

اسماعیل نجفی*– دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران
امیر صفاری– دانشیار گروه ژئومورفولوژی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران
عزت‌الله قنواتی– دانشیار گروه ژئومورفولوژی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران
امیر کرم – دانشیار گروه ژئومورفولوژی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۴/۲۱

چکیده

از مهمترین عوامل تصمیم‌گیری و مورد بحث در احداث سازه‌های رودخانه‌ای، مکان‌یابی و احداث پل‌ها، آگاهی از میزان دبی‌های حداکثر لحظه‌ای، شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها با استفاده از داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری است. این تحقیق با رویکردی توصیفی-تحلیلی، با هدف شبیه‌سازی و تحلیل دبی‌های حداکثر لحظه‌ای و به‌کارگیری تکنیک شبکه عصبی مصنوعی در راستای پل‌سازی و نگهداری بهینه آن‌ها، با استفاده از داده‌های دبی ایستگاه‌های هیدرومتری هفت-حوض، سولقان، قلاک و مقصودبیک در کلان‌شهر تهران انجام گرفته است. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Excel نمودار دبی‌های حداکثر لحظه‌ای هرکدام از ایستگاه‌های هیدرومتری ترسیم گردید. سپس برای ساختن شبکه عصبی در نرم‌افزارNeroSlution5، از پیش‌فرض پرسپترون چند لایه(MLPS) جهت شبیه‌سازی و تحلیل داده‌های دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه‌های مورد مطالعه، استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در همه ایستگاه‌های مورد بررسی، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر لحظه‌ای با استفاده از داده‌های دبی حداکثر روزانه و ماهانه از کارایی بالایی برخوردار است. مقادیرشبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر واقعی(اندازه‌گیری شده) تقریباً مطلوب بوده و ضریب همبستگی آنها دارای مقدار مناسب(R=0.66) می‌باشد. همچنین باتوجه نوسان زیاد دبی حداکثر لحظه‌ای در ایستگاه‌های هفت حوض(درکه) و قلاک(دارآباد) می‌توان استنباط کرد که پل‌های ساخته شده بر روی این رودخانه‌ها و مسیل‌ها دارای ریسک سیلاب و احتمالاً ناپایدارند. بنابراین در مکان‌یابی، احداث و نگهداری چنین سازه‌هایی، تمهیدات لازم باید اندیشده شود و ضمن توجه به ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیک حوضه‌های بالادست، دوره‌های بازگشت سیلاب، مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی، دبی‌های حداکثر لحظه‌ای، شبکه عصبی مصنوعی، ایستگاه‌های هیدرومتری، کلان‌شهر تهران.

---

[1] . این مقاله برگرفته از رساله دکتری، با عنوان" مدل‌سازی ژئومورفولوژیکی احداث پل‌ها در مسیل‌های شهری (مطالعه موردی : کلان‌شهر تهران)" می‌باشد.

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۸۹۴۳۰۳۸۷ E-mail: najafi.geo@gmail.com

مقدمه

تحلیل‌های عددی و آماری پیشرفته، هیدرولوژی را به یک علم دقیق تبدیل نموده است. امروزه این علم در طراحی سازه‌های هیدرولیکی نظیر سدهای ذخیره‌ای و انحرافی، احداث کانال‌های آبیاری و زهکشی و پل، مهندسی رودخانه و مهار سیلاب، آبخیزداری، جاده‌سازی، فاضلاب شهری و صنعتی و برنامه‌ریزی‌های محیطی و جغرافیای طبیعی به‌طور گسترده‌ای مورداستفاده قرار می‌گیرد. ازاین‌رو نقش هیدرولوژی در ارزیابی صحیح و دقیق معیارهای طراحی پروژه‌های آبی و حفاظت از آن‌ها بسیار حساس خواهد بود، زیرا که بسیاری از این پروژه‌ها به علت عدم‌تشخیص صحیح و محاسبات غلط این علم با شکست مواجه شده‌اند. به‌عنوان‌مثال محاسبه رواناب یا برآورد نادرست دبی اوج سیلاب عامل خرابی پل‌ها، بندها و سدهای خاکی است یا محاسبه نامناسب ظرفیت سرریز باعث تخریب سدهای خاکی شده است(طاهری،۱۳۸۸، ۶).

دبی حداکثر لحظه‌ای حداکثر دبی‌ای است که برای چند لحظه تداوم می‌یابد و در هر ایستگاه ثبت می‌شود. این نوع اطلاعات در علوم آب کاربرد گسترده‌ای دارد. دبی‌های حداکثر لحظه‌ای، بیشترین دبی لحظه‌ای در طی یک سال می‌باشد که از دبی حداکثر سالانه بیشتر است. دبی‌های حداکثر لحظه‌ای در طی سال‌های مختلف، سری‌های آماری را جهت تعیین دبی حداکثر لحظه‌ای با دوره‌های بازگشت متفاوت تشکیل می‌دهند که کاربرد فراوانی در تعیین ابعاد سازه‌های مختلف مانند ابعاد کانال‌ها و سرریز سدها، ابعاد پل‌ها و سازه‌های تثبیت کناره رودخانه دارند(مهدوی،۱۳۸۴، ۳۱۸). پارامترهای فیزیکی حوضه‌های ازجمله مساحت، محیط، ارتفاع، شیب، طول آبراهه اصلی، تراکم زهکشی و شکل حوضه روابط همبستگی مناسبی با دبی‌های حداکثر لحظه‌ای در دوره‌های بازگشت مختلف دارند(تلوری و اسلامی،۱۳۸۲). در اغلب ایستگاه‌های هیدرومتری داده‌های دبی میانگین روزانه طولانی‌تر از دبی پیک لحظه‌ای است و کاربرد این آمار در مطالعات سیل منجر به تخمین کمتر از مقدار واقعی سیل طرح و درنتیجه افزایش احتمال خطر می‌گردد(تاگ وس و همکاران[1]، ۲۰۰۸). در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی به‌ویژه روندیابی سیل در مخازن یا کانال‌ها نیاز به کاربرد هیدروگراف سیل است. یک ورودی مهم در برآورد این هیدروگراف دبی پیک لحظه‌ای است(باکیولا و همکاران[2]، ۲۰۰۳). در طراحی سازه‌هایی مانند پل‌ها، آب‌بندها، خاکریزها و سدها دانستن حداکثر دبی لحظه‌ای سیل لازم است، زیرا این تأسیسات عمدتاً در مقابل حداکثر دبی سیل حساس هستند. با توجه به موارد گفته‌شده، از مهم‌ترین عوامل تصمیم‌گیری و موردبحث در احداث سازه‌های رودخانه‌ای، مکان‌یابی و احداث پل‌ها، آگاهی داشتن از میزان دبی-های حداکثر لحظه‌ای، شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها در ایستگاه‌های هیدرومتری است.

شبکه عصبی مصنوعی[3] نامی نوین در علوم مهندسی است که به‌طور ابتدایی و آغازین درسال ۱۹۶۲ توسط فرانک روزن بلات و در شکل جدی و تأثیرگذار در سال ۱۹۸۶ توسط رومل‌هارت و مک‌کلند با ابداع و ارائه مدل پرسپترون بهبودیافته به جهان معرفی شد. این شیوه از ساختاری نرونی و هوشمند با الگوبرداری مناسب از نرون‌های موجود در مغز انسان سعی می‌کند تا از طریق توابع تعریف‌شده ریاضی رفتار درون‌سلولی نرون‌های مغز را شبیه‌سازی کند و از طریق وزن‌های محاسباتی موجود در خطوط ارتباطی نرون‌های مصنوعی، عملکرد سیناپسی را در نرون‌های طبیعی به مدل درآورد. ماهیت و ذات تجربی و منعطف این روش باعث می‌شود تا در مسائلی مانند مقوله پیش‌بینی که یک چنین نگرشی در ساختار آن‌ها مشاهده می‌شود و از رفتاری غیرخطی و لجام‌گسیخته برخوردار هستند، به‌خوبی قابل‌استفاده باشد(شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان،۱۳۸۴). شبکه عصبی مصنوعی درواقع مدل ساده‌شده‌ای از مغز انسان می‌باشد که قادر به نشان دادن ترکیبات غیرخطی برای ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های هر سیستمی است. این شبکه طی مراحل

1-Taguas et al
2- Bocchiola et al
3- Artificial Neural Network

یادگیری آموزش‌دیده و برای پیش‌بینی در آینده مورداستفاده قرار می‌گیرد.گسترش وسیع استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان مدل تجربی و کارآمد در علوم مختلف ازجمله هیدرولوژی نشان‌دهنده ارزش بالای مطالعه این مدل‌ها است. ساختار عادی شبکه عصبی مصنوعی از سه لایه متفاوت تشکیل‌شده است که شامل لایه ورودی،لایه‌های میانی(مخفی) و لایه خروجی است. در داخل هر لایه تعدادی نرون قرار دارد که با اتصالات وزن‌دار به هم مربوط می-شوند که تعداد این نرونها بستگی به تعداد متغیرهای ورودی و خروجی مدل دارد، ولی انتخاب تعداد نرون‌های لایه میانی به‌صورت سعی و خطا تعیین می‌شود. آخرین لایه یا لایه خروجی شامل مقادیر پیش‌بینی‌شده به‌وسیله شبکه می-باشد و خروجی مدل را معرفی می‌کند، لایه‌های میانی که از گره‌های پردازشگر تشکیل‌شده، محل پردازش داده‌ها است (خزایی و میرزایی،۱۳۹۲، ۷۵). حوزه کاربرد این شبکه‌ها آن‌چنان گسترده است که از کاربردهای طبقه‌بندی گرفته تا کاربردهایی نظیر درون‌یابی، تخمین، آشکارسازی را شامل می‌شود. شاید مهم‌ترین مزیت این شبکه‌ها، توانایی وافر در کنار سهولت استفاده از آن‌ها باشد. در این پژوهش شبیه‌سازی و تحلیل دبی حداکثر لحظه‌ای از طریق تکنیک شبکه عصبی مصنوعی در راستای پل‌سازی، در ایستگاه‌های هیدرومتری هفت‌حوض، سولقان، قلاک، مقصودبیک در کلان‌شهر تهران موردبررسی و تحلیل واقع گردیده است. در این زمینه می‌توان به تحقیقاتی که توسط توکار و جانسون[1](۱۹۹۹) و ایمری و همکاران[2](۲۰۰۰) انجام‌گرفته است، اشاره کرد. ایشان کارایی شبکه عصبی مصنوعی را به‌طور نسبتاً محدودی در پیش‌بینی جریان آبراهه‌ای و جریان سیلابی موردنقد و بررسی قرارداده و نتایج دست آمده حاکی از عملکرد مناسب آن بوده است. زنگ وگوین داراجو[3](۲۰۰۳) با طراحی یک شبکه عصبی سه لایه بر اساس خصوصیات فیزیو گرافی دو حوضه آبریز در هند، هیدروگراف واحد جریان را شبیه‌سازی نمودند و ضریب تشخیص بالاتر این روش را عامل ارجحیت آن نسبت به روش معمول محاسبه ابعاد هیدروگراف برشمردند و ضمن معرفی روش شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان روش مطلوب به ویژگی‌های آن ازجمله قابلیت به‌کارگیری داده‌های ژئومورفولوژیکی حوضه در برآورد جریان مستقیم حوضه اشاره نمودند. داوسون و همکاران[4](۲۰۰۶) در مقاله‌ای به برآورد دبی سیلاب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و خصوصیات ژئومورفولوژیک دریکی از حوضه‌های آبریز کشور ایرلند اقدام کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی بر مدل‌های رگرسیون چند متغیره ارجحیت دارد. ساهو و رآی[5] (۲۰۰۶) جهت پیش‌بینی جریان با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی از دو سری داده استفاده کرد. در این دو سری داده، عرض و سطح مقطع جریان مورداستفاده قرار گرفت و از سرعت میانگین در یک سری از ایستگاه‌ها استفاده نمود. نتایج نشان داد که در هر دو سری داده شبکه‌های عصبی به‌خوبی قادر به پیش‌بینی جریان می‌باشد. شفیعی و همکاران(۱۳۸۵) در مقاله‌ای، کاربرد مدل منطقه‌ای سیلاب توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین دبی‌های حداکثر لحظه‌ای سیلاب با دوره برگشت‌های مختلف در حوضه آبریز ماسال در استان گیلان و مقایسه آن با مدل رگرسیونی را بررسی کرده‌اند، نتایج نشان‌دهنده برتری شبکه‌های عصبی مصنوعی است. نصیری و یمانی(۱۳۸۸) به تجزیه‌وتحلیل شبکه‌های عصبی مصنوعی ژئومورفولوژیکی در برآورد رواناب مستقیم در زیر حوضه امامه پرداخته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از مدل شبکه‌ای مذکور با اطلاعات حاصل از مشاهدات مستقیم به‌منظور نشان دادن کارایی آن مقایسه شده است. ارزیابی نتایج، حاکی از عملکرد بسیار خوب ($R2=۰/۹۷$) مدل شبکه ژئومورفولوژیکی در تعیین پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه موردمطالعه است. بدین‌وسیله، برتری مدل مذکور بر روش‌های رایج و معمول نشان داده‌شده است.

1- Tokar and Johnson
2- Imrie et al
3- Zhang and Govindaraju
4- Dawsonn et al
5- Sahoo and Ray

شادمانی و همکاران(۱۳۹۰)، در مقاله‌ای کارایی روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در برآورد دبی سیلاب ۹۰ زیر حوضه استآن‌همدان(با زمان‌های تمرکز کمتر از ۲۴ساعت)، با توجه به آمار ۱۶ ساله مربوط به ۱۷ ایستگاه آب‌سنجی موجود در منطقه مورد ارزیابی قرارداده‌اند. نتایج بیانگر آن بوده است که روش شبکه عصبی مصنوعی ابزاری مناسب برای مدل‌سازی دبی سیلابی، به‌ویژه در هنگام نبود داده‌ها یا کمبود ایستگاه‌های آب‌سنجی می‌باشد. سلیمی‌کوچی و قوهستانی(۱۳۹۰)، به بررسی کاربرد تکنیک شبکه عصبی مصنوعی در برآورد دبی پیک سیلابی در ۱۲ ایستگاه منتخب در سطح کشور با استفاده از دبی پیک لحظه‌ای و دبی روزانه پرداخته‌اند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که تکنیک شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش‌های تجربی در برآورد دبی پیک لحظه‌ای با استفاده از آمار دبی حداکثر روزانه، برتری دارد. بر اساس این نتایج می‌توان مشکل کوتاه بودن دوره آماری مربوط به داده‌های دبی حداکثر لحظه‌ای در ایستگاه‌ها را بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده دبی روزانه و با روش شبکه عصبی مصنوعی برطرف کرد، که این مسئله تأثیر قابل‌توجهی در بهینه‌سازی طراحی‌ها و برآوردهای مرتبط خواهد داشت. همچنین خزایی و میرزایی(۱۳۹۲)، در مقاله‌ای به مقایسه کارایی پیش‌بینی دبی ماهانه با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و سری‌های زمانی در برآورد دبی ماهانه در حوضه آبخیز طالقان برای یک دوره ۳۰ ساله پرداخته‌اند. مقایسه این دو مدل، شبکه عصبی مصنوعی دقت بیشتری در پیش‌بینی دبی نشان داده است.

مبانی نظری

شبکه‌های عصبی مصنوعی جزء آن دسته از سیستم‌های دینامیکی قرار دارد که با پردازش داده‌های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کند، به همین علت به آن سیستم‌ها هوشمندگویند. سیستم‌های مبتنی بر هوش محاسباتی سعی در مدل‌سازی ساختار نروسیناپتیکی مغز بشر دارند. شبکه‌های عصب (محاسبات نرونی)، منطق فازی(محاسبات تقریبی) و الگوریتم ژنتیک(محاسبات ژنتیکی) اجزای مهم و اساسی هوش محاسباتی می‌باشند که هر یک به‌نوعی مغز را الگو قرارداده‌اند. بدین ترتیب که شبکه‌های عصبی، ارتباطات سیناپسی و ساختار درونی، منطق فازی، استنتاجات تقریبی و الگوریتم ژنتیکی، محاسبات موتاسیون مغز را مدل می‌کنند. مغز کامپیوتری بسیار پیچیده و غیرخطی با سیستم پردازش موازی است. مغز توان سازمان‌دهی نرون‌ها برای انجام محاسبات خاص(مانند تشخیص الگو، درک و کنترل) به‌مراتب سریع‌تر از کامپیوترهای محاسباتی امروزی دارد(بلیانی،۱۳۸۹). شبکه عصبی مصنوعی یک فرایند پردازش اطلاعات کامپیوتری است که کارکرد مغز انسان را شبیه‌سازی می‌کند. مغز انسان شامل میلیون‌ها سلول به‌هم‌پیوسته است که نورون نامیده می‌شوند. نورون‌ها به‌طور طبیعی دانش و اطلاعات را ذخیره می‌کنند. شبکه‌های عصبی قادرند تا روابط خطی و غیرخطی را نمایش دهند و مستقیماً این روابط را از داده‌های مدل شده یاد بگیرند شبکه‌های عصبی بر اساس مراحل زیر کار می‌کنند:

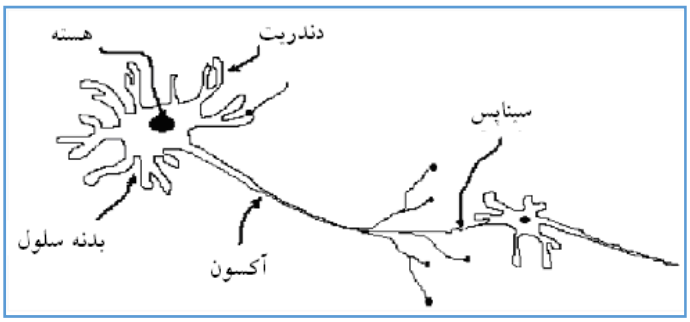
– یک شبکه عصبی در مدت یادگیری دانش را جمع‌آوری می‌کند.

– یک شبکه عصبی دانش را در اتصالات قوی بین نورونی که وزن‌های سیناپتیک [1] نامیده می‌شوند ذخیره می‌کند.

– هر مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند بر اساس معماری، پردازش و آموزش آن طبقه‌بندی شود. معماری توصیف‌کننده اتصالات عصبی است. پردازش توضیح می‌دهد که چگونه شبکه‌ها به ازای هر ورودی و وزن، خروجی را تولید می‌کنند و الگوریتم آموزش شرح می‌دهد که چگونه شبکه عصبی مصنوعی شامل سه قسمت است؛ لایه ورودی، لایه نهان، لایه خروجی.

1-Synaptic Weights

–لایه ورودی لایه‌ای است با پیوندهایی از جهان خارج، که اطلاعات را دریافت خواهد کرد. لایه‌های نهان، ارتباطی با جهان خارج ندارند بلکه فقط به لایه‌های ورودی و خروجی متصل می‌شوند، بعدازاینکه اطلاعات ورودی به‌وسیله شبکه پردازش شدند، لایه خروجی آن‌ها را به جهان خارج ارسال می‌کند. یک نرون بیولوژیک پس از دریافت سیگنال‌های ورودی از سلول‌های دیگر، آن سیگنال‌ها را با یکدیگر ترکیب کرده و پس‌ازآنجام یک عمل دیگر بر روی سیگنال ترکیبی، آن را به‌صورت خروجی ظاهر می‌سازد. نرون‌ها از چهار بخش اصلی ساخته‌شده‌اند (شکل۱): سوما[۱]، دندریت[۲]، اکسون[۳]، سیناپس[۴]. دندریت‌ها اجزایی هستند که به شکل رشته‌های طویل از مرکز سلول به اطراف پراکنده می‌شوند. دندریت‌ها نقش پل‌های ارتباطی را برای انتقال دادن سیگنال‌های الکتریکی به مرکز سلول بر عهده‌دارند. در انتهای دندریت‌ها، ساختار بیولوژیکی ویژه‌ای به نام سیناپس واقع‌شده است که نقش دروازه‌های اتصالی کانال‌های ارتباطی را ایفا می‌کند. درواقع سیگنال‌های گوناگون سیناپس‌ها و دندریت‌ها به مرکز سلول منتقل می‌شوند و در آنجا با یکدیگر ترکیب می‌شوند. عمل ترکیب که به آن اشاره شد، می‌تواند یک عمل جمع جبری ساده باشد. اگر چنین نیز نباشد، در مدل‌سازی ریاضی می‌توان آن را یک عمل جمع معمولی در نظر گرفت که پس‌ازآن تابع ویژه‌ای بر روی سیگنال اثر داده می‌شود و خروجی به شکل سیگنال الکتریکی متفاوتی از طریق آکسون به سلول‌های دیگر انتقال داده می‌شود (مارتین و همکاران، ۱۳۹۰).



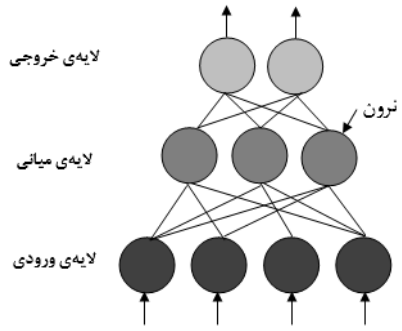
شکل(۱): ساختار نرون(اینگلبرت[۵]، ۲۰۰۷)

عموماً هر شبکه عصبی از سه لایه، لایه ورودی[۶] که شامل چند نرون است، لایه پنهان[۷]، شامل تعدادی نرون متغیر است که تعداد بهینه آن‌ها برای حداقل شدن خطا، از طریق آزمایش و تکرار تعیین می‌گردد و لایه خروجی[۸]، که برای افزایش سرعت شبکه در این لایه، از تابع فعال‌ساز[۹] استفاده می‌شود تا با استفاده از آن‌هم سرعت یادگیری افزایش یابد و هم مقادیر خروجی بدون تغییر به شبکه ارائه‌شده، درنهایت خروجی مطلوب را بسازد، تشکیل‌شده است. چهار نوع معماری شبکه عصبی مصنوعی که به‌طورمعمول مورداستفاده قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از: شبکه یک‌لایه، پرسپترون چندلایه، شبکه هاپفیلد و شبکه کوهنن. شبکه تک لایه، یک معماری شبکه عصبی مصنوعی است که لایه نهان ندارد. ازآنجایی‌که لایه ورودی گاهی اوقات به‌عنوان لایه به‌حساب نمی‌آید، این معماری شبکه تک لایه نامیده می‌شود. ازآنجایی‌که اطلاعات در یک‌جهت، یعنی به سمت لایه خروجی، جریان می‌یابد، این شبکه می‌توان به‌عنوان یکANN

1- Soma (Cell Body)
2- Input Cell (Dendrite)
3- Output Cell (Axon)
4- Synapse
5- Engelbrecht
6- Input layer
7 - Hidden layer
8- Output layer
9 - Activation function
10-Hornik et al

پیشرو طبقه‌بندی شود. پرسپترون چندلایه، معمول‌ترین معماری است. پرسپترون چندلایه برخلاف پرسپترون تک لایه همواره دارای یک‌لایه نهان است. ساده‌ترین شکل پرسپترون چندلایه دارای سه لایه است: لایه ورودی، لایه نهان و لایه خروجی. هنوز بهترین روش برای تعیین تعداد لایه‌های نهان و تعداد نورون‌های هر لایه نهان وجود ندارد، معمولاً این تعداد به‌صورت ابتکاری یافت می‌شوند.

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، یکی از انواع شبکه‌های عصبی، پرسپترون می‌باشد و به‌صورت‌های پرسپترون تک لایه و پرسپترون چندلایه موجود هستند. شبکه‌های عصبی پرسپترون ازجمله شبکه‌های عصبی پیش‌خور طبقه‌بندی می‌شوند. انتخاب شبکه عصبی مورداستفاده معمولاً به نوع کار و نیز کارآیی آن شبکه در موارد موردنیاز بستگی دارد. پرسپترون تک لایه فقط طبقاتی را می‌تواند تفکیک کند که بتوان آن‌ها را به‌وسیله یک فوق صفحه از یکدیگر جدا ساخت. در این نوع شبکه‌ها از یک‌لایه ورودی جهت اعمال ورودی‌های مسئله، یک یا چندلایه پنهان و یک‌لایه خروجی که نهایتاً پاسخ مسئله را ارائه می‌نماید، استفاده می‌شود.گره‌هایی که در لایه ورودی هستند، نرون‌های حسی و گره‌های لایه خروجی، نرون پاسخ‌دهنده هستند. در لایه پنهان نیز، نرون‌های پنهان وجود دارند. شبکه‌های عصبی پرسپترون به‌ویژه پرسپترون چندلایه در زمره کاربردی‌ترین شبکه‌های عصبی می‌باشند. این شبکه‌ها می‌توانند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی که اغلب زیاد هم نیستند، می‌تواند هر رابطه غیرخطی بین الگوی ورودی و خروجی را توصیف و انجام دهد(شکل۲). این نوع همچنین با هر تعداد لایه ساخته و بکار گرفته شوند، ولی قضیه‌ای که در اینجا بدون اثبات پذیرفته می‌شود بیان می‌کند که یک شبکه پرسپترون سه لایه قادر است هر نوع فضایی را تفکیک کند. این قضیه که قضیه کولموگوروف نامیده می‌شود، بیانگر مفهوم بسیار مهمی است که می‌توان در ساخت شبکه‌های عصبی از آن استفاده کرد(رستم‌نیا، ۱۳۹۳) به نقل از (منهاج، ۱۳۹۲).

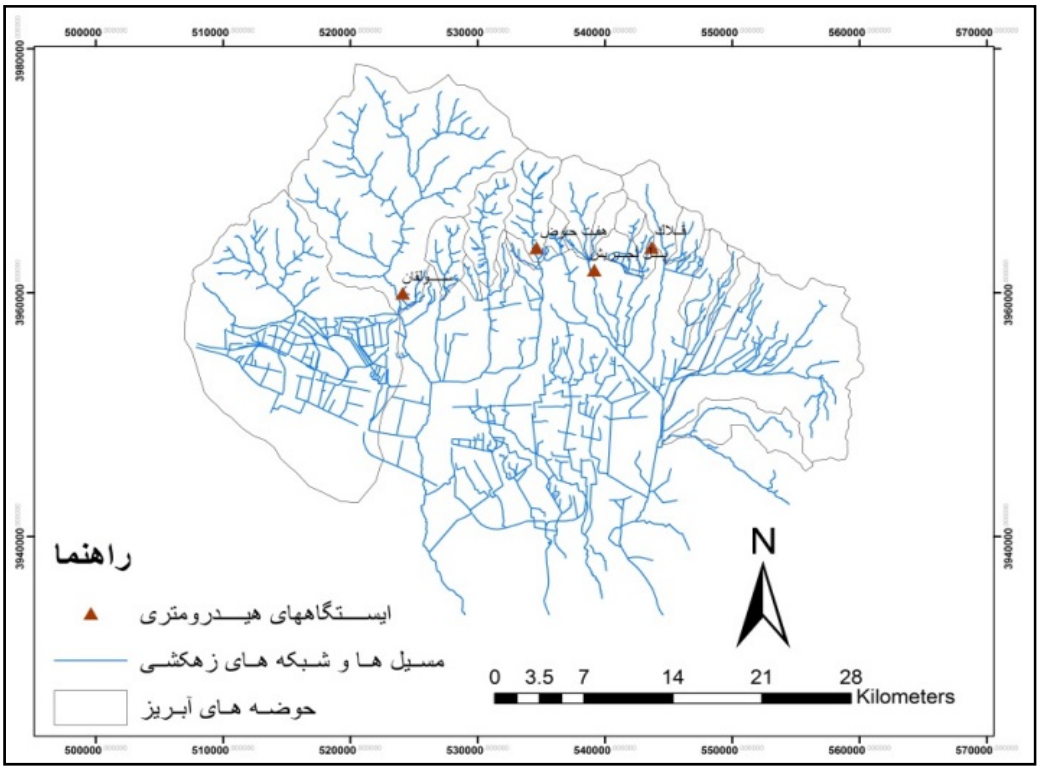


(شکل۲): شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با یک‌لایه میانی با اندکی تغییر(هورنیک و همکاران[1]، ۱۹۸۹)

روش تحقیق

روش انجام تحقیق، توصیفی- تحلیلی است. برای شبیه‌سازی و تحلیل دبی‌های حداکثر لحظه‌ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، ابتدا داده‌های مربوط به دبی ایستگاه‌های هیدرومتری هفت‌حوض(درکه)، سولقان(کن)، قلاک(دارآباد)، مقصودبیک(دربند) از سازمان مدیریت منابع آب ایران (تماب) و سازمان آب منطقه‌ای تهران اخذ گردید، شکل (۳) موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری موردمطالعه را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Excel نمودار دبی حداکثر لحظه‌ای هرکدام ایستگاه‌های هیدرومتری ترسیم و تحلیل گردید. در ادامه داده‌های مربوط به ماه دبی پیک، ماه بعد از ماه دبی پیک، دبی ماه قبل از ماه دبی پیک، دبی حداکثر یک‌روزه و کد ماه دبی پیک به‌عنوان ورودی شبکه و حداکثر دبی پیک لحظه‌ای به‌عنوان خروجی شبکه تعیین شد. برای ساختن شبکه عصبی در NeroSlution5 و از پیش‌فرض

پرسپترون چندلایه[1] (MLPs) استفاده‌شده است و بعد از برازش توابع مختلف از تابع انتقالی Bias Axon و قانون یادگیری Momentum به‌عنوان بهترین حالت شبکه در لایه پنهان و لایه خروجی استفاده شد که در ادامه آورده شده است. همه عملیات در محیط نرم‌افزاری NeuroSolutions 5 طراحی و اجراشده‌اند. پس‌ازاینکه داده‌های حاصله به محیط اکسل وارد شدند، برای جلوگیری از آموزش بیش‌ازحد شبکه که غالباً باعث یادگیری نامناسب مدل می‌شود، ۱۵ درصد از داده‌ها برای اعتبارسنجی، ۶۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد برای تست انتخاب و به مدل معرفی گردید.



شکل(۳): موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری موردمطالعه

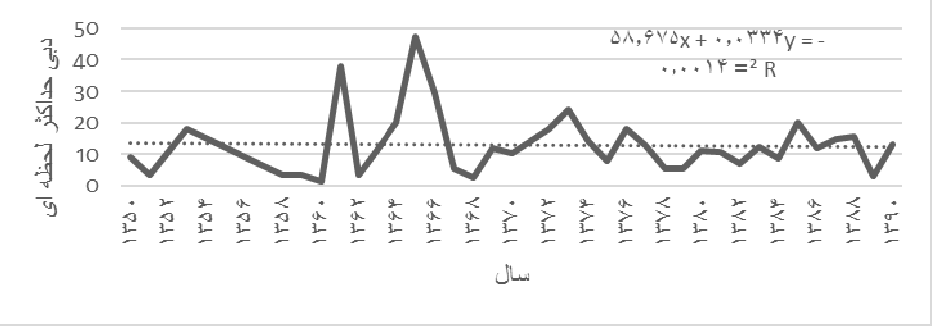
بحث و یافته‌ها

-بررسی دبی‌های حداکثر لحظه‌ای

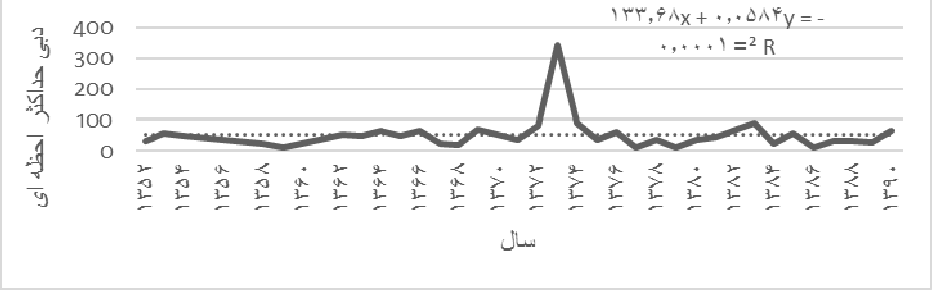
بارش سالانه در محدوده تهران عمدتاً متأثر از تغییرات ارتفاعی محدوده شهر بوده و بین حداکثر ۴۲۲ میلیمتر در شمال تهران تا ۱۴۵ میلیمتر در جنوب شرق تهران متغیر است. در محدوده کلان‌شهر تهران، دمای سالانه بین ۱۵ تا ۱۸ درجه متغیر بوده و با توجه به ناهموار بودن محدوده شهر، میانگین سالانه در مناطق مختلف آن حدود ۳ درجه سانتیگراد اختلاف دما دارند. این اختلاف در مورد میانگین دماهای حداقل دوره سرد سال و حداکثر دوره گرم سال نیز کم‌وبیش حفظ می‌شود(اطلس کلان‌شهر تهران، ۱۳۸۹، ۵۱). همان‌طوری که در شکل‌های(۴-۷) نمایش داده‌شده است، نمودارهای استخراج‌شده از داده‌های دبی پیک لحظه‌ای، مربوط به دوره آماری(۱۳۵۰-۱۳۹۰)، آورده شده است. در این نمودارها روند تغییرات خطی آن‌ها در اطراف خط میانگین آورده شده است. به‌طور مثال در شکل(۴) در ایستگاه هفت‌حوض کمترین میزان دبی در ایستگاه هفت حوض مربوط به سال ۱۳۶۰ و بیشترین دبی متعلق به سال۱۳۶۵ بوده است و روند تغییرات میزان دبی آن نوسان زیاد داشته است. می‌توان گفت در ایستگاه‌های هفت حوض و قلاک نوسان زیاد بوده است ولی در سولقان و مقصودبیک روند دبی حداکثر لحظه‌ای نوسان کمی داشته و در حدود میانگین بوده است. باتوجه نوسان زیاد

1-Multi-layer perceptron

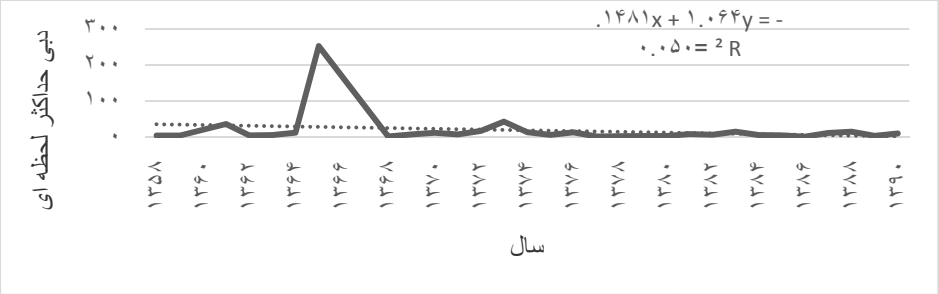
دبی حداکثر لحظه‌ای در ایستگاه‌های هفت حوض(درکه) و قلاک(دارآباد) می‌توان استنباط کرد که پل‌هایی که بر روی این رودخانه‌ها و مسیل‌ها احداث‌شده یا می‌شود(به‌ویژه پل‌های تک دهانه‌ای کوچک)، دارای ریسک سیلاب بوده و احتمالاً ناپایدار گردند و باید در مکان‌یابی، احداث و نگهداری چنین سازه‌هایی تمهیدات لازم اندیشده شود و ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیک حوضه‌های بالادست (مطالعه و بررسی ویژگی‌های مورفومتریک و فیزیوگرافیک حوضه‌های آبریز شامل؛ بررسی شاخصه‌های، مساحت و محیط، شاخص‌های شکل حوضه(ضریب گراویلیوس، هورتون و میلر)، فرم شبکه-های زهکشی، شاخص مستطیل معادل، توزیع ارتفاعی حوضه‌ها، طول آبراهه‌های اصلی، شیب و جهات شیب، زمان تمرکز و فرآیندها و فرم‌های ژئومورفولوژیک و مخاطرات ناشی از آن‌ها) و دوره‌های بازگشت سیلاب را موردتوجه قرارداد.



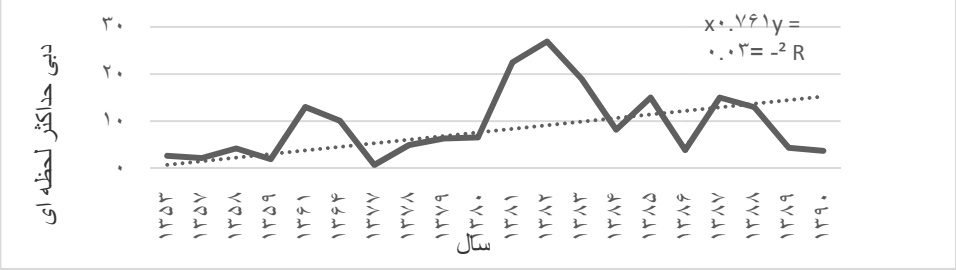
شکل(۴): نمودار دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه هفت حوض- رودخانه درکه



شکل(۵): نمودار دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه سولقان- رودخانه کن



شکل(۶): نمودار دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه مقصود بیک- رودخانه دربند



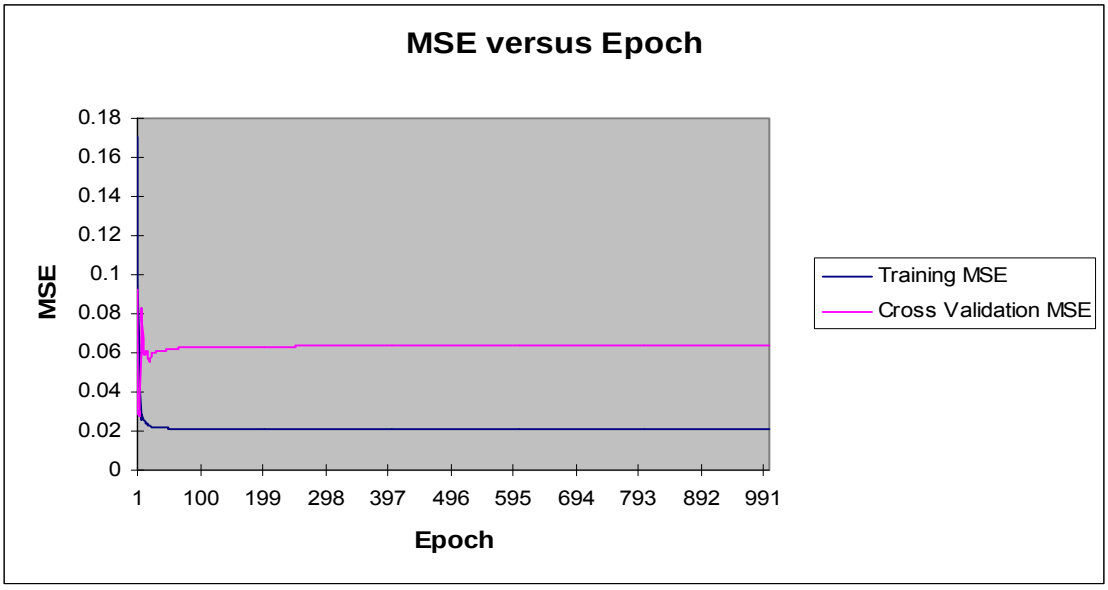
شکل(۷): نمودار دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه قلاک- رودخانه دارآباد

-شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر لحظه‌ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و نرم‌افزار NeroSlution5

در این تحقیق برای شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر لحظه‌ای ، از شبکه عصبی مصنوعی، نرم‌افزار NeroSlution5 و پیش‌فرض پرسپترون چندلایه استفاده‌شده است. با توجه به اینکه در شبکه‌های عصبی، عموماً داده‌ها به سه قسمت آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش تقسیم‌بندی می‌شوند، گزارش و نتایج حاصله از اجرای برنامه در مراحل مختلف مربوط به آموزش، آزمایش (تست) و آنالیز حساسیت شبکه در زیر آورده شده است.

-گزارش مربوط به مرحله آموزش

در این مرحله برای آموزش و معماری بهترین شبکه، تعداد حدود یک هزار دور(Epoch) برای یافتن بهترین حالت ممکن با میانگین خطای حداقل اختیار شد. چنانچه ملاحظه می‌شود در شکل(۸) و جدول (۱) میزان آن به سمت حداقل خطای ممکن(۰.۰۲) در بالاترین تعداد دورها(Epochs) که همان هزار دور بوده است را نشان می‌دهد و در دور۵۸۲ با میانگین مربعات خطای ۰.۰۲ شبکه همگرا شده است.



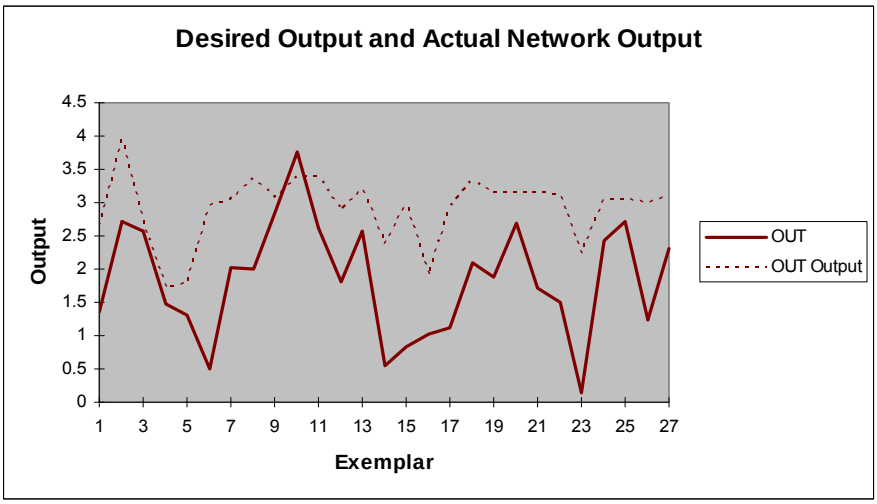
شکل(۸): نمودار مربوط به مرحله آموزش

جدول۱: اطلاعات مربوط به مرحله آموزش

Best Networks	*Training*	*Cross Validation*
Epoch #	582	4
Minimum MSE	0.021319596	0.027147241
Final MSE	0.021319596	0.063336725

-گزارش مربوط به مرحله تست

شکل(۹) و جدول (۲) مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده برای شبیه‌سازی دبی حداکثری با استفاده از شبکه عصبی در نرم‌افزار NeroSlution5 با به‌کارگیری پیش‌فرض پرسپترون چندلایه (MLPS) را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل زیر مشاهده می‌شود روند دبی حداکثر لحظه‌ای و تخمینی را نشان می‌دهد که تقریباً مقادیر مربوط به ورودی‌های ممکن برای انتخاب بهترین شبیه‌سازی داده‌های دبی معماری و آموزش شبکه مقایر را توانسته است تا حد مناسبی برآورد نماید. در این شکل خط ممتد مربوط به مقادیر روند دبی حداکثر لحظه‌ای و خطچین روند شبیه‌سازی‌شده مقادیر بر اساس ورودی‌های ممکن برای هدف موردنظر است.



شکل(۹): نمودار مربوط به مرحله تست

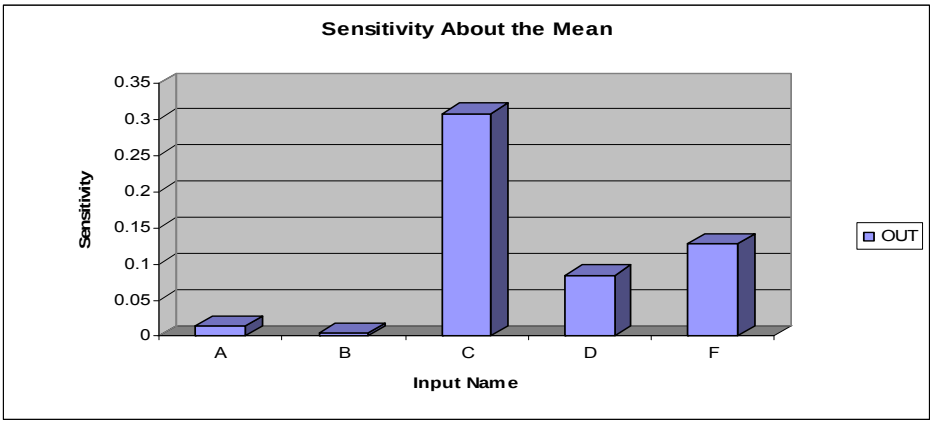
جدول۲: اطلاعات مربوط به مرحله تست

Performance	*OUT*
MSE(میانگین استاندار خطا)	1.598502964
NMSE(مجموع میانگین استاندار خطا)	2.279707798
MAE(میانگین قدر مطلق خطا)	1.093312527
Min Abs Error (حداقل قدر مطلق خطا)	0.137021789
Max Abs Error (حداکثر قدر مطلق خطا)	2.441164064
R(ضریب همبستگی)	0.662220

آنالیز حساسیت شبکه

آنالیز حساسیت به‌منظور تجزیه‌وتحلیل یک رابطه یا در حقیقت یک مدل خاص است. با تجزیه‌وتحلیل روابط یا مدل‌ها می‌توان تأثیر هر یک از پارامترها یا متغیرها را در خروجی مدل ارزیابی کرد. با آنالیز حساسیت می‌توان به رابطه یا روابط بین پارامترها و فاکتورهایی پی برد که در خروجی مدل تأثیرگذار هستند. تأثیر هر یک از پارامترها در یک مدل شامل تأثیر آن‌ها به‌صورت منفرد و همچنین تأثیر جمعی آن‌ها در خروجی است(دستورانی و حیات‌زاده،۱۳۸۹، ۵). در حالت دوم میزان حساسیت مدل به تغییرات پارامترها، بسته به کنش و واکنش آن‌ها نسبت به هم متفاوت است. شکل(۱۰) و جداول(۳ و۴) آنالیز حساسیت بین داده‌های ورودی و خروجی حاصل از شبکه عصبی نمودار میزان تأثیر هرکدام از ورودی

ها را با ستون و مقدار مربوط به هر ستون در جدول زیر را نشان می‌دهد. طبق آن، کد C یا همان ماه دبی پیک بیشترین و میانگین دبی ماه قبل از ماه دبی پیک کمترین تأثیر را بر خروجی یا حداکثردبی پیک لحظه‌ای را داشته است. شکل(۱۱) نمودار شبیه‌سازی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های تخمین زده‌شده با استفاده از شبکه عصبی را نشان می‌دهد که همبستگی مناسبی(۰.۶۶) بین آن‌ها وجود دارد و برازش مطلوبی را نشان می‌دهد.



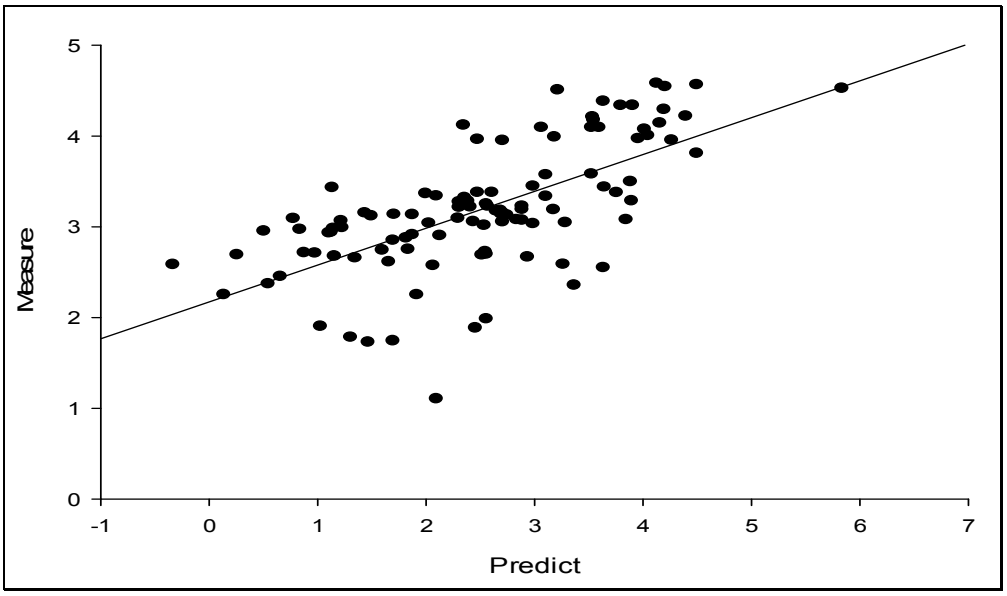
شکل(۱۰): میزان تأثیر بین داده‌های ورودی و خروجی شبکه در آنالیز حساسیت

جدول ۳: میزان تأثیر داده‌های ورودی و خروجی شبکه در آنالیز حساسیت

Sensitivity	OUT
A	0.013791342
B	0.004555775
C	0.307840117
D	0.08441201
F	0.127259017

جدول ۴: کدهای مربوط به ورودی‌های شبکه

A	میانگین دبی ماه بعد از ماه دبی پیک
B	میانگین دبی ماه قبل از ماه دبی پیک
C	ماه دبی پیک
D	دبی حداکثر یک‌روزه
F	کد ماه دبی پیک
OUT	حداکثردبی پیک لحظه‌ای



شکل (۱۱): نمودار شبیه‌سازی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های تخمین زده‌شده با استفاده از شبکه عصبی

نتیجه‌گیری

همان‌طورکه اشاره گردید در شبکه‌های عصبی، عموماً داده‌ها به سه قسمت آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش تقسیم‌بندی می‌شوند، لذا در این پژوهش نیز داده‌ها به سه قسمت ذکرشده تقسیم‌بندی شده‌اند، بر همین اساس نتایج گرافیکی که در شکل(۱۱) آمده است، نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی‌شده نسبت به مقادیر واقعی(اندازه‌گیری شده) تقریباً مطلوب هستند و ضریب همبستگی دارای مقدار مناسب ($R=0.66$) است و این میزان برای پروژه‌های عمرانی و مهندسی رودخانه می‌تواند مطلوب باشد. همچنین میانگین مربعات خطا ($MSE=1.59$) مقادیر داده‌های آزمایش نسبت به داده-های آموزش مطلوبیت کمتری را نشان می‌دهد. برعکس این مطلب، میانگین مربعات خطا ($MSE=0.02$) برای داده-های آموزش نسبت به تست مقدار پایین‌تری دارد و عملکرد بهتری نشان می‌دهد و بیانگر این نکته است که شبکه به نحو مطلوب و خوبی آموزش دیده است.

از آنجایی‌که ایستگاه‌های هیدرومتری، بیشتر در خروجی حوضه‌های آبریز ساخته می‌شوند و این ایستگاه‌ها آمار دبی‌های مختلف (دبی‌های حداکثر لحظه‌ای، دبی حداکثر یکروزه، ماهانه و سالانه) را ثبت می‌کنند، همچنین با توجه به آنالیز حساسیت بین داده‌های ورودی و خروجی حاصل از شبکه عصبی، میزان تأثیر ماه دبی پیک، بیشترین تأثیر را در خروجی یا حداکثردبی پیک لحظه‌ای داشته است، می‌توان اظهار داشت که استفاده از داده‌های مربوط به ماه دبی پیک، می‌تواند برای برنامه‌ریزی‌های محیطی و احداث سازه‌های تقاطعی مرتبط با حوضه‌های آبریز، از جمله احداث و مکان‌یابی و نگهداری بهینه پل‌ها و راههای ارتباطی نقشی تعیین کننده داشته باشد. نمودار شبیه‌سازی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های تخمین زده شده با استفاده از شبکه عصبی، نیز نشان دهنده همبستگی زیاد، بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت، با توجه به اینکه در محدوده مورد مطالعه(کلان‌شهر تهران) و با توجه آمارهای مربوط به دبی ایستگاه‌های هیدرومتری هفت‌حوض(درکه)، سولقان(کن)، قلاک(دارآباد)، مقصودبیک(دربند)، بیشترین فراوانی دبی‌های مربوط به ماه پیک و دبی‌های حداکثر لحظه‌ای در فصل بهار و ماههای(فرودین و اردیبهشت) رخ داده است، که علاوه بر بارش‌های مربوط به فصل بهار، به دلیل وجود ارتفاعات و دامنه‌های برف‌گیر، آب ذوب برف در حوضه‌های آبریز و محدوده مورد مطالعه، در میزان دبی نیز تأثیر گذار می‌باشد و بنابراین نیاز است که هرگونه برنامه‌ریزی

مربوط به این حوضه‌ها و مسیل‌ها، از جمله احداث سازه‌های رودخانه‌ای و مکان‌یابی و احداث پل بر آن‌ها، باید به مقادیر دبی در این دوماه و دوره‌های بازگشت آنها توجه شایانی گردد.

نتایج نشان‌دهنده این است که در همه ایستگاه‌های مورد بررسی، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی دبی پیک لحظه‌ای با استفاده از داده‌های دبی‌حداکثر روزانه و ماهانه از کارایی بالایی برخوردار است. همچنین می‌توان گفت در ایستگاه‌های هفت حوض و قلاک نوسان زیاد بوده ولی در ایستگاه‌های سولقان و مقصود بیک دارای نوسان اندک و اطراف میانگین بوده‌اند. با توجه نوسان زیاد دبی حداکثر لحظه‌ای در ایستگاه‌های هفت حوض(درکه) و قلاک(دارآباد) می‌توان استنباط کرد که پل‌هایی که بر روی این رودخانه‌ها و مسیل‌ها احداث شده یا می‌شود، دارای ریسک سیلاب و احتمالاً ناپایدار هستند و باید در مکان‌یابی، احداث و نگهداری چنین سازه‌هایی تمهیدات و ملاحظات لازم را درنظر گرفت و ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیک حوضه‌های بالادست و دوره‌های بازگشت سیلاب را مورد توجه قرار داد. همچنین با توجه به وجود رودخانه‌ها و مسیل‌های متعدد درکلان‌شهر تهران، شیب شمالی- جنوبی، تغییرات کاربری اراضی و دخل و تصرف در حریم کانال‌ها و مسیل‌ها، ایجاد حوضه‌های‌تلفیقی، ایجاد سطوح نفوذ ناپذیر و آسفالته شهری در طی چند دهه اخیر و همان‌طوری که در بالا اشاره گردید، به علت نوسانات دبی حداکثر لحظه‌ای در سال‌های مختلف و سابقه سیل‌خیزی (سیلاب ۱۳۶۶ تجریش و آب‌گرفتگی متروی تهران در سال‌های اخیر) رخداد سیلاب در تهران همیشگی می‌باشد. برای جلوگیری از بروز خسارت‌های جانی و مالی ناشی از وقوع سیلاب و افزایش رفاه و امنیت شهروندان، نیازمند مدیریتی جامع و بین رشته‌ای با رویکرد سیستمی(حوضه‌ای) است.

منابع و مآخذ

- اطلس کلان‌شهر تهران،۱۳۸۵، انتشارات شهرداری تهران (*www.atlas.tehran.ir*)
- تلوری، عبدالرسول و علیرضا اسلامی،۱۳۸۲، روش برآورد جریان حداکثر لحظه‌ای در حوضه‌های شمال کشور، فصلنامه پژوهش و سازندگی، جلد۱۶، شماره۱.
- خزایی، مجید و محمدرضا میرزایی،۱۳۹۲، مقایسه کارایی پیش‌بینی دبی ماهانه با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و سری‌های زمانی در برآورد دبی ماهانه، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۵، شماره۲.
- دستورانی، محمدتقی و مهدی حیات‌زاده،۱۳۸۹، بررسی مهم‌ترین عوامل مؤثر در دبی حداکثر سیلاب از طریق آنالیز حساسیت روابط تجربی، فصلنامه علمی- پژوهشی خشک‌بوم، سال اول ، شماره۱، پاییز۱۳۸۹، صص۱-۱۱.
- رستم نیا، علی،۱۳۹۳، پیش‌بینی نشست سد نساء کرمان با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های ابزار دقیق، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی.
- سلیمی‌کوچی، جمیله و سلیمان قوهستانی،۱۳۹۰، کاربرد تکنیک شبکه عصبی مصنوعی در برآورد دبی پیک سیلابی، ششمین کنـگره ملی مهنـدسی عمـران ۶ و ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰، دانشگاه سمنان.
- شادمانی، مجتبی و همکاران،۱۳۹۰، مدل‌سازی منطقه‌ای دبی سیلابی در استان همدان با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، جلد هجدهم، شماره چهارم.
- شفیعی، مجتبی،۱۳۸۵، تحلیل منطقه‌ای سیلاب توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی *(ANN)* مطالعه موردی حوضه ماسال استان گیلان،کنفرانس مدیریت منابع آب ایران ۱۳۸۵، بهمن ۱۳۸۵.
- طاهری، محمدرضا، ۱۳۸۸، بررسی استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیا در کنترل سیلاب‌های شهری، همایش و نمایشگاه ژئوماتیک.

- کیا، سیدمصطفی،۱۳۹۰، شبکه‌های عصبی در *Matlab*، ویرایش دوم. تهران، انتشارات کیان رایانه سبز.
- مارتین تی، هاگان، هاوارد بی، دیموث و مارک، بیل۱۳۹۰، طراحی شبکه‌های عصبی، ترجمه: مصطفی کیا، انتشارات کیان رایانه سبز.
- منهاج، محمدباقر ،۱۳۹۲، مبانی شبکه‌های عصبی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- مهدوی، محمد،۱۳۸۴، هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم.
- نصیری، علی و مجتبی یمانی،۱۳۸۸، تجزیه‌وتحلیل شبکه‌های عصبی مصنوعی ژئومورفولوژیکی در برآورد رواناب مستقیم حوضه جاجرود، زیر حوضه امامه، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال چهل و یکم، شماره ۶۸، صص۳۳-۴۴.
- *Bocchiola, D.,C.De Michele and R.Rosso., 2003. Review of recent advances in index flood estimation .J. Hydrology and Earth System Sciences.75 (3).283-296.*
- *Dawson, C.W., Abrahart, R.J., Shamseldin, A.Y., and Wilby, R.L., 2006. Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks. J. Hydrol. 319:391-409.*
- *Engelbrecht, A. P., 2007. Computational intelligence: an introduction. John Wiley & Sons.*
- *Hornik, K.M.,Stinchoombe, M., White, L. 1989. Multilayer Feedward Networks are Universal Approxinmator, Neural networks, Vol 2. No5, pp.359-366.*
- *Imrie, C.E., Durucan, S., and Korre, A., 2000. River flow prediction using artificial neural networks: generalisation beyond the calibration range. J. Hydrol. 233:138-153.*
- *Sahoo, G. B. and C. Ray., 2006, Flow forecasting for a Hawaii stream using rating curves and neural networks, Journal of Hydrolog,Volume 317, Issues 1-2, 5 February, Pages 63-80.*
- *Taguas, E.V.Ayuso, A.Pena,Y.Yuan, M.C.Sanchez, J.V.Giraldz,R.P., 2008. Testing the relationship between instantaneous peak flow and mean daily flow in a Mediterranean Area Southeast Spain. J. Catena. 75,129-137.*
- *Tokar, A. S., and Johnson, P. A., 1999. Rainfall-runoff modeling using Artificial Neural Network. J. Hydrol. Eng. 4:232-239.*
- *Zhang, B.and Govindaraju, R.S., 2003. Geomorphology-based artificial neural networks. (GANNs) for estimation of direct runoff over watersheds. Journal of Hydrology.273, 18-34.*