



سال چهاردهم، شماره ۴۸
زمستان ۱۳۹۳، صفحات ۱۹۷-۱۸۱

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی

فرزان مهاجری^۱
سید مهدی ثاقبیان^۲
محمدعلی قربانی^۳
صابره دربندی^۴
اسماعیل اسدی^۵

تأثیر بارش نقطه‌ای و منطقه‌ای در برآورد رواناب حوضه بالخلوچای

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۱۰/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۱۲/۰۵

چکیده

در دهه‌های اخیر به دلیل اهمیت فرآیند بارش-رواناب توسعه مدل‌های مناسب برای تخمین رواناب از روی داده‌های بارش به مسأله ضروری تبدیل شده است. بارش یکی از مهم‌ترین داده‌های ورودی به سیستم‌های هیدرولوژیکی محسوب می‌شود که به دو صورت بارش منطقه‌ای و بارش نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب از مدل‌های هوشمندی که با پارامترهای ورودی و خروجی عملیات نگاشت را انجام می‌دهند و نتایج حاصل از دقت و صحت مناسبی برخوردار است، استفاده می‌شود. در این تحقیق برای تخمین رواناب خروجی حوضه بالخلوچای واقع در غرب استان اردبیل از مقادیر بارش پیشین و دبی پیشین تا سه روز قبل استفاده شده و بارش نیز در دو حالت بارش منطقه‌ای و بارش نقطه‌ای که مربوط به بارش ۶ ایستگاه باران‌سنجی بوده، در نظر

E- mail: farzan_mohajery@ yahoo.com

- ۱- کارشناس ارشد عمران، گرایش آب دانشگاه آزاد تهران مرکزی.
- ۲- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، گروه مهندسی عمران.
- ۳- دانشیار، دانشگاه تبریز دانشکده کشاورزی گروه مهندسی آب.
- ۴- استادیار، دانشگاه تبریز دانشکده کشاورزی گروه مهندسی آب.
- ۵- استادیار، دانشگاه تبریز دانشکده کشاورزی گروه مهندسی آب.

گرفته شده است. به منظور برآورد بارش-رواناب در حوضه بالخلوچای از مدل‌های هوشمند^۶ شبکه عصبی مصنوعی^۷ (ANN) و برنامه‌ریزی ژنتیک^۸ (GP) و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی^۹ (ANFIS) استفاده گردیده و نتایج توسط معیارهای ارزیابی مقایسه شده است. مقدار ضریب تعیین^{۱۰} (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا^{۱۱} (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف^{۱۲} (N-S) مربوط به دقیق‌ترین مدل‌های بارش منطقه‌ای برای داده‌های آزمون به ترتیب ۰/۸۵۴، ۰/۵۷۳، ۰/۹۳۵ و در دقیق‌ترین مدل بارش نقطه‌ای برای داده‌های آزمون به ترتیب ۰/۸۵۲، ۰/۵۷۸، ۰/۹۳۲ می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی یاد شده، به دلیل بیش‌تر بودن ضرایب تعیین و نش-ساتکلیف و هم‌چنین کم‌تر بودن مقدار جذر میانگین مربعات خطای بارش منطقه‌ای نسبت به بارش نقطه‌ای، بارش منطقه‌ای دارای نتایج دقیق‌تری نسبت به بارش نقطه‌ای می‌باشد.

کلید واژه‌ها: بارش-رواناب، بارش منطقه‌ای، بارش نقطه‌ای، حوضه بالخلوچای، مدل‌های هوشمند.

مقدمه

تخمین جریان رودخانه‌ها به منظور برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از مخازن سدها، طراحی تأسیسات آبی، کنترل فرسایش و رسوب رودخانه‌ها، هشدار سیل و غیره از دیرباز مورد توجه مهندسان آب بوده است. یکی از عوامل مهم تولید رواناب در اکثر حوضه‌های آبریز بارش است که با توجه به ویژگی‌های فیزیوگرافی و اقلیمی حوضه‌ها، به مقدار مشخصی رواناب تبدیل می‌شود. تعداد زیاد پارامترهای دخیل در تبدیل بارش به رواناب و عدم پایداری مشخصه‌های حوضه‌های آبریز و متغیر بودن مدل‌های بارش و غیرخطی بودن پدیده بارش-رواناب باعث پیچیده شدن تبدیل بارش به رواناب شده است. تعیین رواناب ناشی از بارندگی نه تنها برای پیش‌بینی سیلاب، بلکه برای شناخت اثرات ناشی از تغییرات مورد نظر در حوضه آبریز یا به‌طور کلی در مدیریت منابع آب مهم می‌باشد. در گذشته از انواع الگوهای مفهومی بارش-رواناب، الگوهای سری زمانی و روابط تجربی استفاده می‌شد که در بسیاری

-
- 6- Intelligent
 - 7- Artificial Neural Network
 - 8- Genetic Programming
 - 9- Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
 - 10- Coefficient of Determination
 - 11- Root Mean Squared Error
 - 12- Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient

از موارد مقادیر محاسبه شده با مقادیر مشاهده شده تطابق نداشته و در مواقعی نیز تفاوت زیادی با یکدیگر داشته‌اند، به همین دلیل نیاز به مدل‌هایی احساس می‌شد که با پارامترهای ورودی و خروجی عملیات نگاشت (انتقال اطلاعات از ورودی به خروجی جهت یادگیری پارامترهای مدل) را انجام داده و نتایج حاصل از دقت و صحت مناسبی برخوردار باشد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش شبکه عصبی مصنوعی، برنامه‌ریزی ژنتیک و سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی اشاره نمود. بارش به دو صورت بارش نقطه و بارش منطقه‌ای می‌باشد که در بارش نقطه‌ای بارش ایستگاه‌ها به صورت جداگانه در نظر گرفته شده و در بارش منطقه‌ای با رسم منحنی تیسن مساحت مربوط به هر ایستگاه لحاظ می‌شود. مطالعاتی در خصوص برآورد رواناب صورت گرفته که می‌توان به مواردی چند اشاره نمود. نصری و همکاران (۱۳۸۸) با مطالعه میزان رواناب خروجی روزانه حوضه آبریز پلاسجان زاینده‌رود، با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، نشان دادند که شبکه عصبی مصنوعی با چهار لایه مخفی دقت بیشتری در برآورد رواناب خروجی حوضه مورد مطالعه دارد. فربودفام و همکاران (۱۳۸۸) از روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی جریان رودخانه ليقوان استفاده کردند و با مقایسه نتایج نشان دادند که روش برنامه‌ریزی ژنتیک از دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی جریان رودخانه نسبت به شبکه عصبی مصنوعی برخوردار است. اسکندری‌نیا و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از بارش روزانه نقطه‌ای، تأثیر عامل بارش پیشین را در برآورد جریان خروجی رودخانه بختیاری توسط مدل شبکه عصبی مصنوعی بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن پارامتر بارش پیشین باعث افزایش دقت قابل‌توجهی در نتایج می‌شود. ویگهام و کراپر^{۱۳} (۲۰۰۱) با الگوسازی بارش-رواناب نشان دادند که پیش‌بینی رفتار بارش-رواناب در حوضه‌های آبریز به کمک برنامه‌ریزی ژنتیک سبب بروز خطاهای کم‌تری خواهد شد. آیتک^{۱۴} و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی ژنتیک به مدل‌سازی بارش-رواناب روزانه منطقه‌ای در حوضه رودخانه یونیا^{۱۵} در آمریکا پرداخته و با مقایسه نتایج نشان دادند که برنامه‌ریزی ژنتیک نتایج دقیق‌تری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی دارد. وانگ^{۱۶} و همکاران (۲۰۰۹) از برنامه‌ریزی ژنتیک و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی برای پیش‌بینی دبی ماهانه بر مبنای رواناب رودخانه لنکن‌جیانگ^{۱۷} و رودخانه ووجیانگ^{۱۸} در چین پرداختند و نشان دادند که برنامه‌ریزی ژنتیک و

13- Whigham and Crapper

14- Aytak

15- Juniata River

16- Wang

17- Lancangjiang River

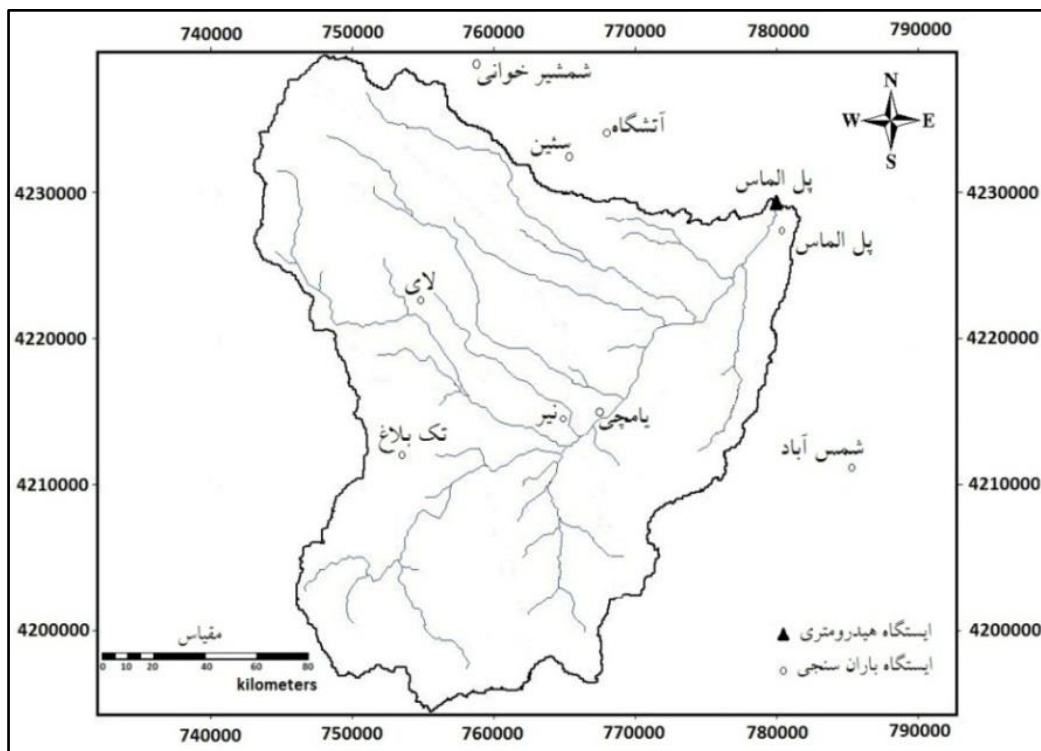
سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی از عملکرد مناسبی برخوردارند. گون^{۱۹} (۲۰۰۹) به منظور پیش‌بینی دبی جریان روزانه رودخانه شویل^{۲۰} در آمریکا از روش برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی استفاده نمود و نشان داد که هر دو روش نتایج قابل قبولی داشته، ولی برنامه‌ریزی ژنتیک از دقت نسبتاً بالاتری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی برخوردار است. دوروم^{۲۱} و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج عصبی-فازی و مدل‌گرسیون چندگانه به مدل کردن بارش-رواناب با استفاده از بارش ماهانه منطقه‌ای در حوضه سوسورلوک^{۲۲} در ترکیه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل استنتاج عصبی-فازی دارای نتایج دقیق‌تری می‌باشد. شافی^{۲۳} و همکاران (۲۰۱۱) از مدل شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی برای پیش‌بینی رواناب رودخانه کلانگ^{۲۴} در مالزی بر پایه داده‌های ماهانه استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی دارای دقت بالا و خطای کم‌تری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. کومار^{۲۵} و همکاران (۲۰۱۲) از سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی برای مدل کردن بارش-رواناب توسط بارش روزانه نقطه‌ای در منطقه ناگوان^{۲۶} در هندوستان استفاده کردند و نشان دادند که مدل استنتاج عصبی-فازی تطبیقی همانند سایر مدل‌های هوشمند از دقت خوبی برخوردار است. با توجه به اهمیت مبحث پیش‌بینی رواناب خروجی حوضه‌ها، در این تحقیق با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، برنامه‌ریزی ژنتیک و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی به پیش‌بینی رواناب خروجی حوضه بالخلوچای به عنوان تامین کننده حجم اصلی مخزن سد یامچی پرداخته شده است، شایان ذکر است که این سد تامین کننده آب شرب شهرستان‌های اردبیل و سرعین می‌باشد که این خود دلیلی بر اهمیت این حوضه آبریز است. هدف از تحقیق حاضر، تخمین رواناب خروجی حوضه با استفاده از رواناب پیشین و بارش‌های نقطه‌ای و منطقه‌ای با کمک روش‌های ذکر شده در بالا و مقایسه نتایج مدل‌ها در حوضه آبریز مورد مطالعه بالخلوچای، واقع در استان اردبیل می‌باشد.

-
- 18- Wujiang River
 - 19- Guven
 - 20- ShevellRiver
 - 21- Dorum
 - 22- Susurluk
 - 23- Shafie
 - 24- Klang River
 - 25- Kumar
 - 26- Nagwan

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

حوضه بالخلوچای در غرب استان اردبیل بین عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ}51'27''$ تا $38^{\circ}15'19''$ شمالی و $53^{\circ}46'18''$ تا $54^{\circ}12'42''$ شرقی واقع شده است. در پایین‌دست حوضه مورد مطالعه سد یامچی وجود دارد که محل تامین آب شرب شهرستان‌های اردبیل و سرعین می‌باشد. مساحت حوضه بالخلوچای ۱۰۴۴ کیلومترمربع و طول رودخانه ۶۸ کیلومتر است. دوره آماری رواناب خروجی روزانه ایستگاه پل الماس و بارش روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده دوره زمانی ۹ ساله از اول سال ۱۳۷۹ شمسی برابر با اواخر مارچ سال ۲۰۰۱ میلادی تا پایان سال ۱۳۸۷ شمسی برابر با اواخر ماه مارچ سال ۲۰۰۹ می‌باشد. در شکل شماره ۱ نمای کلی حوضه آبریز، ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت شبکه آبراه‌های حوضه بالخلوچای و ایستگاه هیدرومتری پل الماس و ایستگاه‌های باران‌سنجی

در جدول شماره ۱ مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده در این تحقیق بیان شده است.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های بارش و رواناب مورد استفاده در تحقیق

ردیف	ایستگاه	پارامتر	مساحت حاصل از منحنی تیسن (km ²)	حداقل	حداکثر	میانگین	واریانس
۱	پل الماس	رواناب	-	۰	۳۳	۲/۲۲۶	۴/۹۲
۲	شمشیر خوانی	بارش	۲۸/۰۹	۰	۴۸	۱/۱۰۸	۱۲/۱۲۸
۳	آتشگاه	بارش	۸/۵۷	۰	۴۶/۵	۱/۲۱۲	۱۳/۳۸۶
۴	سئین	بارش	۸۵/۸۳	۰	۵۰	۱/۲۲۶	۱۳/۰۷۴
۵	پل الماس	بارش	۷۹/۳۵	۰	۴۲	۰/۷۵۵	۸/۸۰۳
۶	لای	بارش	۲۵۵/۷۵	۰	۴۴	۱/۱۰۱	۹/۹۷۱
۷	شمس آباد	بارش	۸/۶۸	۰	۴۶	۰/۷۵۱	۸/۱۸۲
۸	تک بلاغ	بارش	۲۴۹/۹۹	۰	۵۷	۱/۲۹۴	۲۰/۰۸۹
۹	نیر	بارش	۱۶۲/۳۶	۰	۴۷/۵	۱/۰۱۳	۱۰/۱۶
۱۰	یامچی	بارش	۱۶۵/۳۹	۰	۴۷/۵	۰/۹۵۶	۱۰/۹۷۹

معیارهای ارزیابی

برای مقایسه نتایج حاصل از مدل‌ها از چهار معیار ارزیابی ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطای مدل (RMSE) و ضریب نش ساتکلایف (N-S) استفاده شده است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(Q_{mi} - \bar{Q}_m) \times (Q_{pi} - \bar{Q}_p)]}{(\sum_{i=1}^N (Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2)^{0.5} \times (\sum_{i=1}^N (Q_{pi} - \bar{Q}_p)^2)^{0.5}} [1]$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Q_{mi} - \bar{Q}_{pi})^2}{N}} [2]$$

$$N - S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{mi} - Q_{pi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2} [3]$$

در این روابط Q_{pi} و Q_{mi} به ترتیب مقادیر رواناب مشاهداتی و محاسباتی هستند و \bar{Q}_p و \bar{Q}_m متوسط رواناب مشاهداتی و محاسباتی می‌باشند و N برابر با تعداد داده‌های مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد (دوروم، ۲۰۱۰).

یافته‌ها و بحث

در این مطالعه ایستگاه پل الماس واقع در خروجی حوضه بالخلوچای به دلیل دارا بودن آمار دقیق و مطمئن، به عنوان نقطه کنترل جهت مقایسه مقادیر مشاهداتی و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل‌ها انتخاب شده است. برای برآورد مقدار رواناب خروجی حوضه در ایستگاه پل الماس ابتدا فقط از داده‌های بارش به عنوان ورودی استفاده شده ولی به دلیل عدم توانایی شبکه در مدل‌سازی، پارامترهای دبی پیشین مربوط به یک، دو و سه روز قبل به عنوان ورودی‌های به مدل‌ها معرفی گردیدند. مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول Q_t و Q_{t-1} به ترتیب بیانگر دبی روزانه امروز و یک روز قبل ایستگاه پل الماس می‌باشد و به همین ترتیب الگوهای ورودی تا ۳ روز قبل در نظر گرفته شده است. R_t و R_{t-1} به ترتیب بارش امروز و یک روز قبل بوده به همین ترتیب الگوهای ورودی تا ۳ روز قبل در نظر گرفته شده است. در حالت بارش منطقه‌ای R_t مولفه میانگین بارش حوضه بوده و از منحنی تیسن به دست آمده است.

جدول ۲- ورودی مدل‌ها جهت استفاده در تحقیق

نام مدل	تابع ورودی‌های مدل
M1	$Q_t=f(R_t)$
M2	$Q_t=f(R_t, R_{t-1})$
M3	$Q_t=f(R_t, R_{t-1}, R_{t-2})$
M4	$Q_t=f(Q_{t-1})$
M5	$Q_t=f(Q_{t-1}, Q_{t-2})$
M6	$Q_t=f(Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3})$
M7	$Q_t=f(R_t, Q_{t-1})$
M8	$Q_t=f(R_t, R_{t-1}, Q_{t-1})$
M9	$Q_t=f(R_t, Q_{t-1}, Q_{t-2})$
M10	$Q_t=f(R_t, Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3})$
M11	$Q_t=f(R_t, R_{t-1}, Q_{t-1}, Q_{t-2})$
M12	$Q_t=f(R_t, R_{t-1}, R_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2})$
M13	$Q_t=f(R_t, R_{t-1}, Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3})$

دوره آماری رواناب خروجی روزانه ایستگاه پل الماس و بارش روزانه ایستگاه‌های باران‌سنج مورد استفاده متعلق به دوره‌ای ۹ ساله با تعداد کل ۳۲۸۸ عدد می‌باشد که داده‌های ۷ سال اول (حدود ۷۸ درصد داده‌ها) برای آموزش و ۲ سال آخر (حدود ۲۲ درصد داده‌ها) برای آزمون مدل‌ها استفاده شده است.

نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک در حالت ورودی بارش منطقه‌ای

به منظور مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب بر اساس برنامه‌ریزی ژنتیک از نرم‌افزار GeneXproTools 4.0 و عملگرهای $\{+, -, *, /, (x)^2, (x)^3, (x)^{1/3}, \exp(x), \ln(x), (x)^{0.5}, \sin(x), \cos(x), \arctan(x)\}$ استفاده شده است. نتایج حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک در جدول ۳ نشان داده شده است. مدل‌هایی که فقط شامل مولفه بارش می‌باشند، به عنوان نمونه مدل M3 با ضریب تعیین ۰/۰۱۵، نشان‌دهنده دقت کم و جذر میانگین مربعات خطای ۱/۷۴ بیانگر خطای زیاد می‌باشد. با توجه به معیارهای ارزیابی مدل M5 که متشکل از دبی دیروز و دبی دو روز قبل بوده با ضریب تعیین ۰/۸۴۶، جذر میانگین مربعات خطای ۰/۵۸۳ و ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۹۲۶ دقیق‌ترین مدل می‌باشد.

جدول ۳- نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برای مدل‌های مختلف

مدل	تعداد ورودی	واستجی (آموزش)			صحت سنجی (آزمون)		
		R ²	RMSE ((m ³ /sec	N-S	R ²	RMSE ((m ³ /sec	N-S
M1	۱	۰/۰۱۷	۲/۳۲۲	۰/۰۱۷	۰/۰۰۲	۱/۷۶۲	۰/۳۰۱
M2	۲	۰/۰۳۸	۲/۲۹۸	۰/۰۳۸	۰/۰۱	۱/۷۵۶	۰/۳۰۶
M3	۳	۰/۰۴۶	۲/۲۸۸	۰/۰۴۶	۰/۰۱۵	۱/۷۴	۰/۳۲
M4	۱	۰/۸۴۴	۰/۹۲۴	۰/۸۴۴	۰/۸۳۸	۰/۶۰۶	۰/۹۱۷
M5	۲	۰/۸۸۶	۰/۷۹۳	۰/۸۸۵	۰/۸۴۶	۰/۵۸۳	۰/۹۲۶
M6	۳	۰/۸۶۱	۰/۸۷۲	۰/۸۶۱	۰/۸۲۱	۰/۶۵۲	۰/۹۰۴
M7	۲	۰/۸۳۸	۰/۹۴۳	۰/۸۳۸	۰/۸۳۱	۰/۵۸	۰/۹۲۴
M8	۳	۰/۸۴۶	۰/۸۲	۰/۸۴۶	۰/۸۴۲	۰/۵۹۱	۰/۹۲۷
M9	۳	۰/۸۴۱	۰/۹۳۵	۰/۸۴۱	۰/۸۳۳	۰/۵۹۲	۰/۹۲۴
M10	۴	۰/۸۵۶	۰/۸۸۹	۰/۸۵۶	۰/۸۴۵	۰/۵۸۸	۰/۹۲۵
M11	۴	۰/۸۳۸	۰/۹۴۳	۰/۸۳۸	۰/۸۳۲	۰/۵۹۶	۰/۹۲
M12	۵	۰/۸۷۴	۰/۸۳۳	۰/۸۷۴	۰/۸۴۴	۰/۵۹۲	۰/۹۲۱
M13	۵	۰/۸۶۱	۰/۸۷۴	۰/۸۶۱	۰/۸۴۳	۰/۵۸۹	۰/۹۲۲

برای مدل‌سازی فرآیند بارش- رواناب براساس شبکه عصبی مصنوعی از نرم‌افزار 5 NeuroSolutions استفاده شده است. نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در جدول ۴ بیان شده است. با توجه به معیارهای ارزیابی مدل M9 که شامل بارش امروز، دبی دیروز و دبی دو روز قبل می‌باشد با ضریب تعیین ۰/۸۵۳، جذر میانگین مربعات خطای ۰/۵۷۴ و ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۹۲۶ دقیق‌ترین مدل می‌باشد.

جدول ۴- نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌های مختلف

مدل	تعداد ورودی	تعداد لایه‌های پنهان	واسنجی (آموزش)			صحت سنجی (آزمون)		
			R ²	RMSE ((m ³ /sec	N-S	R ²	RMSE ((m ³ /sec	N-S
M1	۱	۳	۰/۰۱۷	۲/۳۲۲	۰/۰۱۷	۰/۰۰۴	۱/۷۴۸	۰/۳۱
M2	۲	۳	۰/۰۳۵	۲/۳۰۱	۰/۰۳۵	۰/۰۱۱	۱/۷۳۵	۰/۳۲۱
M3	۳	۳	۰/۰۶۳	۲/۲۶۷	۰/۰۶۳	۰/۰۱۲	۱/۷۲۹	۰/۳۲۶
M4	۱	۳	۰/۸۵۶	۰/۸۸۹	۰/۸۵۶	۰/۸۵۲	۰/۵۹۵	۰/۹۲۵
M5	۲	۳	۰/۸۷۴	۰/۸۳۴	۰/۸۷۳	۰/۸۴۱	۰/۵۹۷	۰/۹۱۹
M6	۳	۳	۰/۸۵۹	۰/۸۵۶	۰/۸۵۹	۰/۸۴۳	۰/۵۹۱	۰/۹۲۱
M7	۲	۳	۰/۸۱۸	۱/۰۰۷	۰/۸۱۵	۰/۸۰۹	۰/۶۹۱	۰/۸۹۲
M8	۳	۳	۰/۸۵۴	۰/۸۹۵	۰/۸۵۴	۰/۸۲۳	۰/۶۲۸	۰/۹۱۱
M9	۳	۳	۰/۸۷۵	۰/۸۳	۰/۸۷۴	۰/۸۵۳	۰/۵۷۴	۰/۹۲۶
M10	۴	۵	۰/۸۴۷	۰/۹۲۱	۰/۸۴۵	۰/۸۴۹	۰/۵۸۱	۰/۹۲۴
M11	۴	۵	۰/۸۳۱	۰/۹۷۵	۰/۸۲۷	۰/۸۲۹	۰/۶۳۴	۰/۹۰۹
M12	۵	۴	۰/۸۰۶	۱/۰۷۹	۰/۷۸۸	۰/۷۴۸	۱/۰۱۲	۰/۸۱۲
M13	۵	۵	۰/۸۱۸	۱/۰۸۱	۰/۷۸۷	۰/۷۷۱	۰/۸۷۵	۰/۸۲۷

به منظور مدل‌سازی فرآیند بارش- رواناب براساس سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی از نرم‌افزار Matlab 7. 12 استفاده شده است. نتایج حاصل از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در جدول ۵ بیان شده است. با توجه به معیارهای ارزیابی مدل M12 که متشکل از بارش امروز، بارش دیروز، بارش دو روز قبل، دبی دیروز و دبی دو روز

قبل می‌باشد با ضریب تعیین ۰/۸۵۴، جذر میانگین مربعات خطای ۰/۵۷۳ و ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۹۳۵ دقیق‌ترین مدل می‌باشد.

جدول ۵- نتایج مدل سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی برای مدل‌های مختلف

مدل	تعداد ورودی	واسنجی (آموزش)			صحت سنجی (آزمون)		
		R ²	RMSE ((m ³ /sec	N-S	R ²	RMSE ((m ³ /sec	N-S
M1	۱	۰/۰۱۲	۲/۳۲۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵	۱/۷۴۴	۰/۳۱۴
M2	۲	۰/۰۳۱	۲/۳۰۶	۰/۰۳۱	۰/۰۰۹	۱/۷۳۵	۰/۳۲۱
M3	۳	۰/۰۶۲	۲/۲۶۹	۰/۰۶۲	۰/۰۱۲	۱/۷۲۸	۰/۳۲۷
M4	۱	۰/۸۴۴	۰/۹۲۵	۰/۸۴۴	۰/۸۵۲	۰/۵۸۲	۰/۹۲۶
M5	۲	۰/۸۹۱	۰/۷۷۵	۰/۸۹۱	۰/۸۴۳	۰/۵۹۷	۰/۹۱۹
M6	۳	۰/۹۰۱	۰/۷۳۶	۰/۹۰۱	۰/۸۴۹	۰/۵۸۳	۰/۹۲۳
M7	۲	۰/۸۴۹	۰/۹۱۱	۰/۸۴۹	۰/۸۵۲	۰/۵۷۹	۰/۹۲۴
M8	۳	۰/۸۵۸	۰/۸۸۳	۰/۸۵۸	۰/۸۴۹	۰/۵۸۱	۰/۹۳۴
M9	۳	۰/۸۹۵	۰/۷۵۸	۰/۸۹۵	۰/۸۴۴	۰/۵۹۳	۰/۹۲۱
M10	۴	۰/۹۰۳	۰/۷۲۹	۰/۹۰۳	۰/۸۵۱	۰/۵۷۸	۰/۹۲۴
M11	۴	۰/۹۰۶	۰/۷۱۹	۰/۹۰۶	۰/۸۲۸	۰/۶۲۱	۰/۹۱۳
M12	۵	۰/۹۰۹	۰/۷۰۶	۰/۹۰۹	۰/۸۵۴	۰/۵۷۳	۰/۹۳۵
M13	۵	۰/۹۰۸	۰/۷۰۹	۰/۹۰۸	۰/۸۰۵	۰/۶۶۶	۰/۸۹۹

در این تحقیق برای بارش نقطه‌ای ۶ حالت در نظر گرفته شده است. در تمامی حالات داده‌های دبی روزانه مربوط به ایستگاه هیدرومتری پل‌الماس بر روی رودخانه بالخلوچای بوده و در حالت اول بارش نقطه‌ای بارش ایستگاه باران‌سنجی پل‌الماس و در حالات دوم تا ششم بارش نقطه‌ای، به ترتیب داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی سنین، یامچی، نیر، لای، تک بلاغ اضافه شده است. معیارهای ارزیابی سه مدل شامل ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطای مدل و ضریب نش‌ساتکلیف می‌باشد. بهترین حالت هر یک از ۶ حالت بارش نقطه‌ای در جدول ۶ آورده شده است.

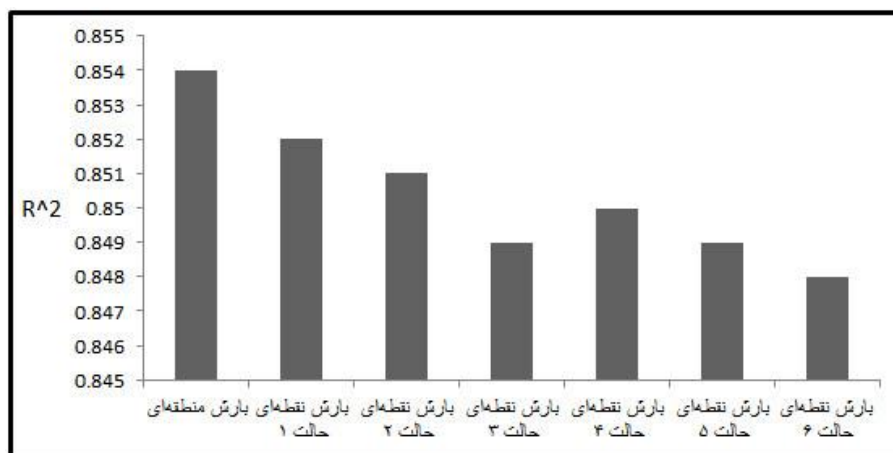
جدول ۶- نتایج دقیق‌ترین حالات بارش نقطه‌ای

	نوع مدل	تعداد ورودی	مدل	واسنجی (آموزش)			صحت سنجی (آزمون)		
				R ²	RMSE ((m ³ /sec	N-S	R ²	RMSE ((m ³ /sec	N-S
حالت اول بارش نقطه‌ای	GP	۳	M5	۰/۸۸۶	۰/۷۹۳	۰/۸۸۵	۰/۸۴۶	۰/۵۸۳	۰/۹۲۶
	ANN	۳	M9	۰/۸۷۳	۰/۸۳۵	۰/۸۷۳	۰/۸۴۳	۰/۶۱۴	۰/۹۲۹
	ANFIS	۴	M12	۰/۸۹۸	۰/۷۴۹	۰/۸۹۸	۰/۸۵۲	۰/۵۷۸	۰/۹۳۲
حالت دوم بارش نقطه‌ای	GP	۴	M5	۰/۸۸۶	۰/۷۹۳	۰/۸۸۵	۰/۸۴۶	۰/۵۸۳	۰/۹۲۶
	ANN	۳	M9	۰/۸۶۷	۰/۸۵۶	۰/۸۶۶	۰/۸۵۱	۰/۵۸۲	۰/۹۳۱
	ANFIS	۴	M12	۰/۹۰۸	۰/۷۱۲	۰/۹۰۸	۰/۸۴۹	۰/۵۸۸	۰/۹۲۲
حالت سوم بارش نقطه‌ای	GP	۵	M5	۰/۸۸۶	۰/۷۹۳	۰/۸۸۵	۰/۸۴۶	۰/۵۸۵	۰/۹۲۶
	ANN	۳	M9	۰/۸۷۳	۰/۸۳۵	۰/۸۷۳	۰/۸۴۲	۰/۶۱۵	۰/۹۳۲
	ANFIS	۴	M12	۰/۹۰۶	۰/۷۱۸	۰/۹۰۶	۰/۸۴۹	۰/۵۸۴	۰/۹۲۸
حالت چهارم بارش نقطه‌ای	GP	۵	M5	۰/۸۸۶	۰/۷۹۳	۰/۸۸۵	۰/۸۴۶	۰/۵۸۳	۰/۹۲۶
	ANN	۳	M9	۰/۸۳۶	۰/۹۴۹	۰/۸۳۶	۰/۸۵	۰/۵۸۱	۰/۹۲۸
	ANFIS	۴	M12	۰/۹۰۶	۰/۷۱۸	۰/۹۰۶	۰/۸۴۸	۰/۵۸۶	۰/۹۲۲
حالت پنجم بارش نقطه‌ای	GP	۴	M5	۰/۸۸۶	۰/۷۹۳	۰/۸۸۵	۰/۸۴۶	۰/۵۸۸	۰/۹۲۶
	ANN	۳	M9	۰/۸۸۵	۰/۸۱۲	۰/۸۷۹	۰/۸۴۹	۰/۵۸۳	۰/۹۲۳
	ANFIS	۴	M12	۰/۹۰۶	۰/۷۱۸	۰/۹۰۶	۰/۸۴۵	۰/۵۹۱	۰/۹۲۱
حالت ششم بارش نقطه‌ای	GP	۳	M5	۰/۸۸۶	۰/۷۹۳	۰/۸۸۵	۰/۸۴۶	۰/۵۸۹	۰/۹۲۱
	ANN	۳	M9	۰/۸۶۹	۰/۸۵۸	۰/۸۶۶	۰/۸۴۸	۰/۵۸۶	۰/۹۲۲
	ANFIS	۴	M12	۰/۹۰۶	۰/۷۱۹	۰/۹۰۶	۰/۸۳۲	۰/۶۱۵	۰/۹۱۵

با توجه به جدول ۶، مدل ۱۲ سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در حالت اول بارش نقطه‌ای که شامل دبی دیروز و دبی دو روز قبل ایستگاه هیدرومتری پل الماس و بارش امروز، بارش دیروز و بارش دو روز قبل ایستگاه باران‌سنجی پل الماس می‌باشد نسبت به سایر حالات بارش نقطه‌ای با توجه به معیارهای ارزیابی نتایج بهتری دارد. مقدار ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب نش‌ساتکلیف برای داده‌های آزمون مربوط به دقیق‌ترین حالت اول بارش نقطه‌ای به ترتیب برابر ۰/۸۵۲، ۰/۵۷۸، ۰/۹۳۲ می‌باشد.

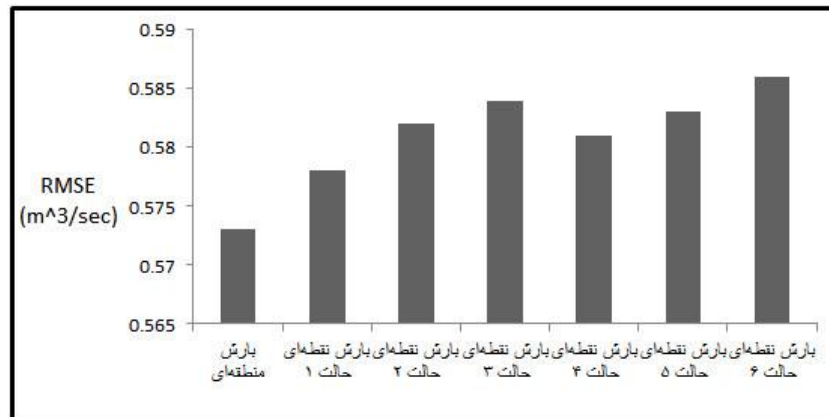
با مقایسه معیارهای ارزیابی ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب نش-ساتکلیف میان مدل‌های بارش نقطه‌ای و منطقه‌ای نتیجه گرفته می‌شود که بارش منطقه‌ای در مقایسه با بارش نقطه‌ای دارای نتایج بهتری می‌باشد. در هر دو حالت بارش نقطه‌ای و منطقه‌ای، سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی دارای دقیق‌ترین معیارهای ارزیابی می‌باشد. مقدار ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب نش-ساتکلیف مربوط به دقیق‌ترین مدل بارش منطقه‌ای که مدل دوازدهم سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی می‌باشد. برای داده‌های آزمون به ترتیب ۰/۸۵۴، ۰/۵۷۳، ۰/۹۳۵ و دقیق‌ترین مدل بارش نقطه‌ای که مربوط به مدل دوازدهم سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی حالت اول بارش نقطه‌ای است، برای داده‌های آزمون به ترتیب ۰/۸۵۲، ۰/۵۷۸، ۰/۹۳۲ می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که بارش منطقه‌ای نتایج بهتری نسبت به بارش نقطه‌ای داشته است.

شکل ۲ مقادیر ضریب تعیین بهترین مدل‌های بارش منطقه‌ای و ۶ حالت بارش نقطه‌ای را نشان می‌دهد، بارش منطقه‌ای دارای بیش‌ترین دقت بوده و هر چه بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی دورتر از خروجی حوضه لحاظ شود مقدار دقت کم‌تر می‌شود.



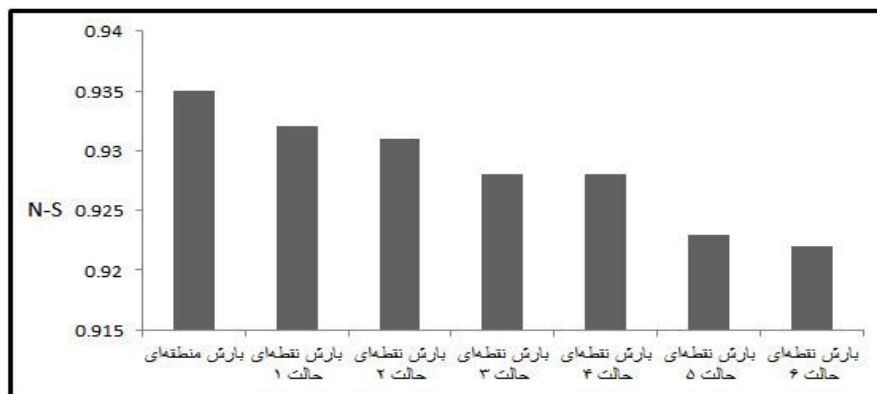
شکل ۲: نمودار تغییرات R^2 برای حالت‌های مختلف بارش نقطه‌ای و منطقه‌ای

شکل ۳ مقادیر جذر میانگین مربعات خطا بهترین مدل‌های بارش منطقه‌ای و ۶ حالت بارش نقطه‌ای را نشان می‌دهد، با توجه به شکل ۳ بارش منطقه‌ای دارای کم‌ترین خطا بوده و هر چه بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی دورتر از خروجی حوضه لحاظ شود مقدار خطا بیش‌تر می‌شود.



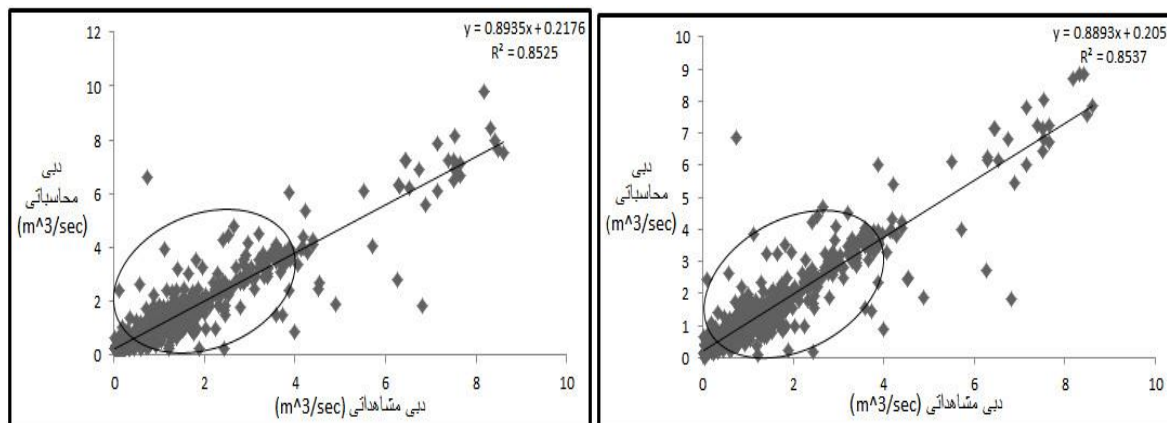
شکل ۳: نمودار تغییرات RMSE برای حالت‌های مختلف بارش نقطه‌ای و منطقه‌ای

شکل ۴ مربوط به ضریب نش‌سات‌کلیف بهترین مدل‌های بارش منطقه‌ای و حالت بارش نقطه‌ای است. شکل ۴ نشان می‌دهد که بارش منطقه‌ای دارای بیش‌ترین بازده بوده و هر چه بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی دورتر از خروجی حوضه لحاظ شود مقدار بازده کم‌تر می‌شود.



شکل ۴: نمودار تغییرات N-S برای حالت‌های مختلف بارش نقطه‌ای و منطقه‌ای

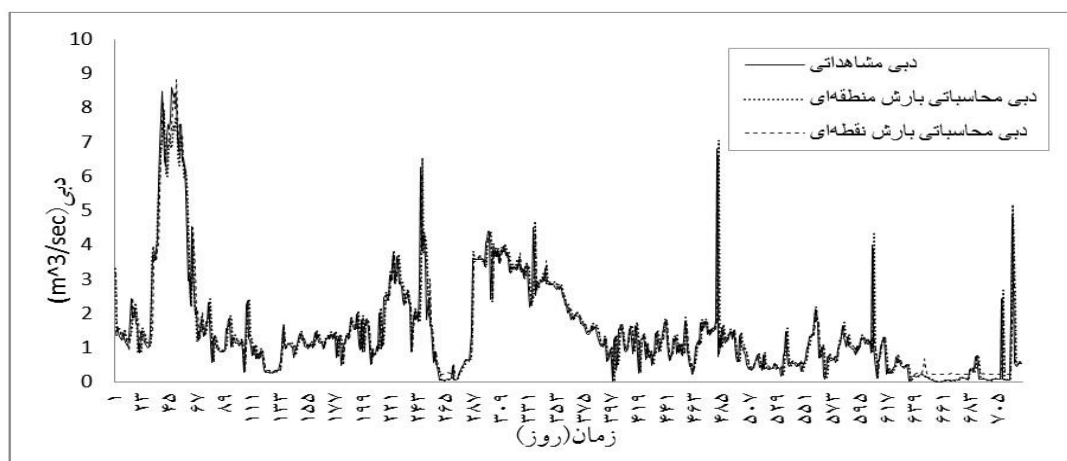
نمودار پراکنش بارش منطقه‌ای و حالت اول بارش نقطه‌ای برای داده‌های آزمون دبی محاسباتی و مشاهداتی در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. دقت مدل‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ در نواحی داخل بیضی نسبت به سایر نقاط بیش‌تر می‌باشد و در قسمت‌های خارج از بیضی که مربوط به داده‌های سیلاب می‌باشد مدل دارای دقت کم‌تری است.



شکل ۶: نمودار پراکنش حالت اول بارش نقطه‌ای

شکل ۵: نمودار پراکنش حالت منطقه‌ای

شکل ۷ مربوط به سری زمانی دبی خروجی ایستگاه پل الماس برای داده‌های آزمون محاسباتی و مشاهداتی بارش منطقه‌ای و حالت اول بارش نقطه‌ای می‌باشد با توجه به شکل ۷ داده‌های بارش منطقه‌ای، نقطه‌ای و مشاهداتی تطابق مناسبی با یکدیگر داشته و هم‌چنین دقت کم‌تری در قله‌های نمودار که مربوط به سیلاب است مشاهده می‌شود.



شکل ۷: نمودار سری زمانی دبی خروجی ایستگاه پل الماس برای داده‌های آزمون محاسباتی و مشاهداتی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور پیش‌بینی رواناب خروجی حوضه بالخلوچای با استفاده از مقادیر دبی و بارش پیشین با بهره‌گیری از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، برنامه‌ریزی ژنتیک و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در دو حالت کلی بارش منطقه‌ای و بارش نقطه‌ای بهره گرفته شده است. با مقایسه معیارهای ارزیابی ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش‌ساتکلیف (N-S) حاصل از این تحقیق نتایج زیر به دست آمد.

- مقدار دبی متوسط روزانه، عامل اصلی در تخمین مقدار دبی خروجی این حوضه می‌باشد. پارامتر هواشناسی میانگین بارش روزانه باعث افزایش کارایی و دقت تخمین مقدار دبی خروجی می‌شود.
- دو پارامتر بارش نقطه‌ای و منطقه‌ای می‌تواند به عنوان روش مناسب برای پیش‌بینی جریان در نظر گرفته شود.
- روش سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در هر دو حالت بارش نقطه‌ای و منطقه‌ای دقیق‌ترین نتایج را در ارزیابی مدل‌ها نشان می‌دهد.
- استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی می‌تواند در زمینه پیش‌بینی جریان و نیز مدل‌سازی بارش-رواناب استفاده شود.
- نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از مطالعات دوروم و همکاران (۲۰۱۰) که به مدل کردن بارش-رواناب در حوضه سوسورلوک واقع در ترکیه پرداخته‌اند و در پایان به این نتیجه رسیدند که مدل استنتاج عصبی-فازی تطبیقی نتایج بهتری را نشان می‌دهد تطابق داشته، همچنین با مطالعات ال‌شافی و همکاران (۲۰۱۱) که به پیش‌بینی جریان رودخانه کلانگ در مالزی پرداخته بودند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که مدل استنتاج عصبی-فازی تطبیقی دارای دقت بالا و خطای کم‌تر نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد هم‌خوانی زیادی دارد.

منابع

- اسکندری‌نیا، ع. ر؛ ضیاتبار احمدی، م. خ؛ نظربور، ه؛ تیموری، م؛ ذاکر مشفق، م (۱۳۹۰)، «بررسی تأثیر عامل پیشین در برآورد جریان رودخانه توسط مدل‌سازی هوشمند بارش-رواناب (مطالعه موردی: رودخانه بختیاری)»، *پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز*، شماره ۳، صص ۶۲-۵۱.
- داندۀمهر، ع؛ مجدزاده طباطبایی، م. ر (۱۳۸۹)، «بررسی تأثیر توالی دبی روزانه در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (مطالعه موردی: رودخانه آبرده)»، *نشریه آب و خاک*، شماره ۲، صص ۳۳۳-۳۲۵.
- دستورانی، م. ت؛ دارائی، ح. ش؛ طالبی، ع؛ مقدم‌نیا، ع (۱۳۹۰)، «کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در مدل‌سازی بارش- رواناب در حوضه آبخیز سد زاینده‌رود»، *مجله آب و فاضلاب*، شماره ۴، صص ۱۲۵-۱۱۴.
- سلطانی، ع؛ علیائی، ا؛ قربانی، م. ع (۱۳۸۹)، «مدل‌سازی رابطه دبی- اشل در رودخانه‌ها با استفاده از سیستم‌های هوشمند (مطالعه موردی رودخانه قیزیلیرماک در کشور ترکیه)»، *مجله دانش آب و خاک*، شماره ۴، صص ۳۲-۱۵.
- سلطانی، ع؛ قربانی، م. ع؛ فاخری‌فرد، ا؛ صابره، د؛ فرسادی‌زاده، د (۱۳۹۰)، «برنامه‌ریزی ژنتیک و کاربرد آن در مدل‌سازی فرآیند بارش- رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبریز ليقوان)»، *مجله دانش آب و خاک*، شماره ۴، صص ۷۲-۶۱.
- فربودفام، ن؛ قربانی، م. ع؛ اعلمی، م. ت (۱۳۸۸)، «پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه ليقوان)»، *مجله دانش و کشاورزی*، شماره ۴، صص ۱۲۳-۱۰۷.
- نصری، م؛ مدرس، ر؛ دستورانی، م. ت (۱۳۸۸)، «کاربرد مدل شبکه عصبی در برآورد رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبریز پلاسجان)»، *فصلنامه آمایش محیط*، شماره ۵، صص ۳۷-۲۳.
- Abreu, G. L. , Ribeiro, J., (2003), "On-line control of a flexible beam using adaptive fuzzy controller and piezoelectric actuators", *Revista Controle & Automação*, 14:377-383.
- Aytek, A., Asce, M., Alp, M., (2008), "An application of artificial intelligence for rainfall-runoff modeling" *Journal of Earth System Science*, 117: 145-155.
- Dorum, A., Yarar, A., Sevimli, F., Onüçyildiz, M., (2010), "Modelling the rainfall-runoff data of susurluk basin", *Expert Systems with Applications*, 37: 6587-6593.

- El-Shafie, A., Jaafer, O., Akrami, S. A., (2011), "Adaptive neuro-fuzzy inference system based model for rainfall forecasting in Klang River, Malaysia", *International Journal of the Physical Sciences*, 6 :2875–2888.
- Guven, A., (2009), "Linear genetic programming for time-series modelling of daily flow rate", *Journal of Earth System Science*, 118: 157-173.
- Kisi, O., (2005), "Daily river flow forecasting using artificial neural networks and auto regressive models", *Turkish Journal of Engineering Environmental science*, 1 29: 9-20.
- Kumar, P., Kumar, D., (2012), " Rainfall-runoff modelling of a watershed", *Civil and Environmental Research*, 2: 2222-2238.
- Lohani, A. K., Goel, N. K., Bhatia, K. S., (2011), "Comparative study of neural network, fuzzy logic and linear transfer function techniques in daily rainfall-runoff modelling under different input domains", *Hydrological Processes*, 25: 175-193.
- Sette, S., Boullart, L., (2001), "Genetic programming: principles and applications", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14:727–736.
- Wang, W. C., Chau, K. W., Cheng, C. T., Qiu, L., (2009), "A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series", *Journal of Hydrology*, 374 : 294–306.
- Whigham, P. A., Crapper, P. F., (2001), "Modelling rainfall runoff using Genetic programming", *Mathematical and Computer Modelling*, 33: 707-721.