

توسعه مدل فازی - عصبی تطبیقی به منظور پیش‌بینی دبی بیشینه روزانه سیلاب با استفاده از بارش تراکمی پنج روزه

الهام فیروزنیا^۱

محمد مهدوی^۲

شهاب عراقی نژاد^۳

سعید سلطانی^۴

پذیرش ۹۲/۱/۲۳

(دریافت ۹۱/۸/۸)

چکیده

در فرایند بارش رواناب، عوامل بسیاری دخالت دارند که با عدم قطعیت همراه هستند. یکی از فاکتورهای بسیار مهم در این فرایند، رطوبت اشیاع پیشین خاک است. یکی از روش‌هایی که به این پارامتر توجه دارد، روش ارائه شده توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا به نام شماره منحنی است. در این روش، مجموع بارش‌های پنج روز پیش از رخداد دبی اوج سیل، به عنوان نماینده شرایط رطوبتی پیشین خاک در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که پدیده‌های طبیعی به دلیل دخالت تعداد زیادی از عوامل و پارامترها با عدم قطعیت همراه هستند، یکی از ابزارهای کارآمد در بررسی رفتار این پدیده‌ها، مدل‌های هوشمند فازی - عصبی تطبیقی هستند. از این رو در این پژوهش به بررسی اثر مجموع بارش‌های پنج روزه در پیش‌بینی دبی بیشینه روزانه سیلاب با استفاده از مدل‌های انفیس پرداخته شد. مدل مذکور با دو الگوریتم آموزشی پس انتشار و هیبرید آموزش دیده شد و سپس با استفاده از آزمون‌های آماری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج، کارآمدی مدل انفیس به دست آمده را در بررسی ورودی بارش پنج روزه و خروجی دبی اوج سیل نشان داد. همچنین نتایج حاصل از روش هیبرید، عملکرد بهتری را نشان دادند. بهترین ضریب همبستگی برای مدل ۵ روزه و به میزان ۰/۹۸۵ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۱۶۲ در روش هیبرید بود.

واژه‌های کلیدی: انفیس، پس انتشار، هیبرید، شماره منحنی، رواناب، بیش‌ترین دبی روزانه

Developing an Adaptive Neuro-fuzzy Model to Predict the Maximum Daily Discharge Using 5-day Cumulative Rainfall

E. Firouznia¹

M. Mahdavi²

Sh. Araghinejad³

S. Soltani⁴

(Received Oct. 29, 2012 Accepted Apr. 12, 2013)

Abstract

Rainfall is one of the factors involved in increasing soil moisture. Soil moisture, in turn, is a key parameter in the rise and fall of water in the soil which plays an important role in the rainfall-runoff process. It, therefore, requires to be carefully investigated in order to determine its effect on peak flood discharge. One method commonly used for this purpose is the CN-NRCS (curve-number method). Based on this approach, the sum of rainfalls during the 5 days preceding the flood event is taken to represent the soil moisture conditions prior to the event. Given the fact that natural phenomena are always associated with different degrees of uncertainty due to the involvement a multitude of factors, an efficient method for investigating their behavior is the Adaptive Neuro-Fuzzy Intelligent System (ANFIS). Here, we used ANFIS for determining the effect of rainfalls over the five days prior to the flood event in order to predict the maximum daily flood discharge. The model employed the two training algorithms of Back Propagation and Hybrid, which were then tested using different statistical tests and the results were analyzed for each model. The results indicate that the hybrid method outperformed the back propagation method. The best correlation coefficient of the 5-day model was 0.985 and the RMSE (Root Mean Squared Error) was 0.162 in the hybrid method.

Keywords: ANFIS, Bach Propagation, Hybrid, Curve Number, Runoff, Maximum Daily Discharge.

1. Grad. MSc Student of Watershed Management, College of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Sciences and Research Branch, Tehran, Iran (Corresponding Author) 09359944045 elham.firouznia@gmail.com

2. Prof. of Watershed Management, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Tehran, Iran

3. Assist. Prof. of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Tehran, Iran

4. Assoc. Prof. of Watershed Management, Dept. of Natural Resources, Isfahan University of Tech., Isfahan, Iran

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه آب‌خیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران، ایران (نویسنده مسئول) ۰۹۳۵۹۹۴۴۰۴۵ elham.firouznia@gmail.com

۲- استاد گروه آب‌خیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- دانشیار گروه آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

کنترل سیل برای مخازن پرداختند. این پژوهش در چین و به منظور کاهش خسارت‌ها و خطرهای ناشی از سیل انجام شده است [۶]. کورانی و همکاران در سال ۲۰۰۵ به پیش‌بینی سیل رودخانه با استفاده همزمان از منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌سازی فرایند بارش - رواناب پرداختند. این پژوهش در یکی از حوزه‌های کشور ایتالیا انجام شده است [۷].

براتو و سوزالفیو در سال ۲۰۰۷ با استفاده از منطق فازی، به تخمین رواناب در یک حوزه آبخیز گرمسیری پرداختند. آنها در این مدل که بر پایه قانون‌های فازی پایه‌گذاری شده بود، از روش SCS-CN استفاده نمودند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که رواناب محاسباتی توسط این مدل، نزدیک به روانابهای مشاهده شده در حوزه آبخیز مورد بررسی هستند. به این ترتیب استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی در پدیده‌های طبیعی قابل اعتماد است [۸].

طالعی و همکاران در سال ۲۰۱۲، زمان تأخیر در مدل‌سازی رابطه بارش - رواناب با استفاده از رویکردهای داده ورودی را بررسی کردند. آنها با استفاده از مدل انفیس، به مدل‌سازی بارش - رواناب پرداختند و نتایج حاصل از این مدل‌سازی را با مدل‌های شبکه عصبی و مدل‌های دیگر مقایسه کردند [۹].

در این پژوهش به بررسی مجموع بارش‌های پیش از رخداد دبی بیشینه روزانه، با استفاده از مدل‌های انفیس پرداخته شد. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به مدل‌سازی و بررسی بارشهای تراکمی پنج روزه به‌عنوان نماینده رطوبت پیشین خاک پیش از رخداد دبی بیشینه روزانه، با استفاده از مدل‌های فازی - عصبی تطبیقی اشاره کرد.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوزه آبخیز بالادست سد امیرکبیر (کرج) با مساحت ۸۵/۸۴ کیلومتر مربع و محیط ۱۶/۷ کیلومتر بود. بیشترین ارتفاع حوزه آبخیز حدود ۴۳۰۰ متر و کمترین ارتفاع آن حدود ۱۶۰۰ متر است. این منطقه دارای موقعیت جغرافیایی $51^{\circ} 5' 11''$ تا $51^{\circ} 53' 23''$ شرقی و $35^{\circ} 56' 57''$ تا $36^{\circ} 5' 35''$ شمالی است.

حوزه آبخیز مورد مطالعه، یک حوزه کوهستانی واقع در ارتفاعات البرز است. شکل ۱ موقعیت ایستگاههای باران‌سنجی و هیدرومتری این منطقه را نشان می‌دهد.

با توجه به بررسی گزارش‌های موجود، بیشترین وسعت کاربری زمین در این حوزه آبخیز، مراتع خوب، متوسط و فقیر هستند. همچنین بخشی از کاربری زمین به دریاچه سد و بخش بسیار کمی

در فرایند تبدیل بارش به رواناب سطحی، دو دسته عوامل، شامل پارامترهای اقلیمی و عوامل فیزیوگرافیکی حوزه آبخیز نقش دارند. عوامل اقلیمی شامل نوع، شدت و تداوم بارش و نیز توزیع مکانی بارندگی، همچنین جهت حرکت توده باران‌زا و دیگر عوامل اقلیمی نظیر تبخیر و تعرق است. پارامترهای فیزیوگرافیکی شامل نوع کاربری اراضی، جنس خاک، مساحت حوزه آبخیز، شکل حوزه آبخیز، ارتفاع، شیب، جهت و نوع شبکه زهکشی است. همه این عوامل هم در میزان حجم رواناب سطحی و هم در مقدار دبی اوج آن به نحوی مؤثراند. به‌عنوان مثال هر چه تداوم بارندگی بیشتر باشد، ظرفیت نفوذ آب در خاک کاهش یافته و بنابراین حجم رواناب افزایش می‌یابد [۱۰]. به این ترتیب، رطوبت پیشین خاک نقش بسیار مهم و کلیدی در فرایند بارش - رواناب دارد. بر خاک اشباع شده، با رخداد بارش کم هم رواناب تولید می‌شود و خطرات جاری شدن سیل را به همراه خواهد داشت. هر چند که بدون اشباع خاک هم با رخداد بارش، امکان جاری شدن سیل با توجه به خصوصیات خاک، شیب و غیره وجود دارد. بنابراین بررسی رفتار بارش‌های رخداد پیش از وقوع دبی اوج سیل ضرورت دارد. از طرفی با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در این فرایند و ذات اصلی مدل‌های هوشمند فازی-عصبی که با عدم قطعیتها سر و کار دارند، استفاده از این ابزار در بررسی این فرایند، کارآمد به نظر می‌رسد.

پژوهش‌های بسیاری در سراسر دنیا و ایران پیرامون موضوعات مختلف فرایندهای هیدرولوژیکی و مدل‌های هوشمند انجام شده است. رضایی و همکاران در سال ۱۳۸۶ به مدل‌سازی منطقه‌ای دبی‌های اوج در زیرحوزه‌های آبخیز سد سفیدرود با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش در مقایسه با روشهای سنتی، برتری کامل مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی را به اثبات رسانده است [۳].

ابراهیمی و همکاران در سال ۱۳۹۰ به پیش‌بینی میان مدت خشکسالی با استفاده از روش استنتاج فازی پرداختند، آنها از یک دوره آماری ۳۱ ساله برای مدل‌سازی استفاده نمودند. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نیز کارایی مناسب مدل‌های استنتاج فازی را نشان می‌دهد [۴].

سیلوریا و همکاران در سال ۲۰۰۰ به بررسی شرایط رطوبت اشباع پیشین خاک در روش شماره منحنی در یک حوزه آبخیز پرداختند. آنها در این پژوهش به تحلیل AMC^۱ در روش شماره منحنی پرداختند [۵].

چانگ و چاو در سال ۲۰۰۴ به طراحی یک سامانه مدیریت و

^۱ Antecedent Moisture Condition

از مساحت حوزه آبخیز به میزان ۷/۴۵ هکتار به کاربری شهری اختصاص دارد [۱۰].

وجود دارد. با توجه به رعایت دوره مشترک آماری، ایستگاههای هیدرومتری گچسر و سیرا، به عنوان ایستگاههایی برای داده‌های بیشترین دبی روزانه و ایستگاههای باران‌سنجی نسا، شهرستانک و سیرا، به عنوان ایستگاههایی برای داده‌های بارش مورد استفاده قرار گرفتند. طول دوره آماری مورد استفاده در این پژوهش از سالهای آبی ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۷ بود.

با توجه به هدف پژوهش، از داده‌های بارش و دبی روزانه در ایستگاههای نام‌برده در طول دوره آماری استفاده شد. چنانچه پیشتر گفته شد، با توجه به اینکه بیشتر رواناب‌های منطقه ناشی از ذوب برف است، برای جلوگیری از دخالت پارامتر بارش‌های به صورت برف، به دلیل داشتن پیچیدگی‌های مخصوص به خود، از داده‌های دبی و بارش در ماه‌های خرداد و تیر استفاده شد. دلیل دیگر استفاده از داده‌های ماههای تیر و خرداد این است که روش شماره-منحنی، بارشهای برفی را در بر نمی‌گیرد و به این ترتیب فرایند مدل‌سازی برای ماه‌هایی از سال است که بارشهای جوی فقط به صورت باران باشد. صرف نظر از محدودیت روش شماره منحنی برای در نظر نگرفتن بارش‌های ناشی از ذوب برف، عامل ایجاد پیچیدگی برف در رطوبت پیشین خاک هم عامل دیگری برای انتخاب ماههای خرداد و تیر است. در ماههای اردیبهشت و فروردین با توجه به موقعیت کوهستانی حوزه مورد مطالعه، بخشی از بارشها در برخی سالها و در طول دوره آماری به صورت برف است و از طرفی ذوب برف موجود در این ماهها نیز، عامل دیگر ایجاد پیچیدگی در مدل است؛ با توجه به هدف پژوهش و به منظور پرهیز از تأثیرگذاری عوامل جانبی، از این ماهها صرف نظر شد.

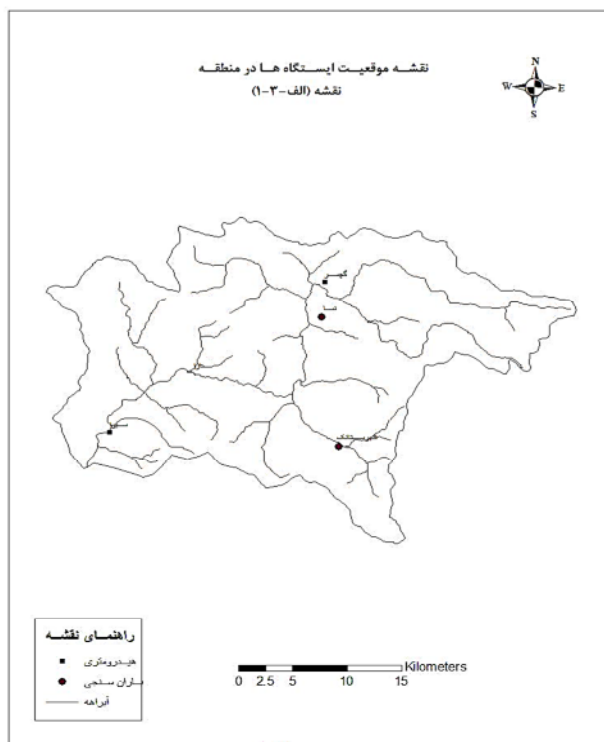
دبی‌های بیشینه روزانه در هر یک از ماههای خرداد و تیر در دوره آماری نام‌برده، در ایستگاههای سیرا و گچسر گردآوری شد و سپس مجموع بارشهای متناظر با دبی‌های گردآوری شده در پنج روز پیش از رخداد دبی در محل ایستگاههای نسا، شهرستانک و سیرا جمع‌آوری شد. جدول‌های ۱ و ۲ وضعیت داده‌ها را از نظر آماری مورد بررسی قرار می‌دهد.

۳-۲- روش شماره منحنی

روابط تجربی و مدل‌های مختلفی به بررسی و تعیین ارتفاع رواناب و دبی آن می‌پردازد. از جمله می‌توان به رابطه ارائه شده توسط سازمان حفاظت از منابع ملی آمریکا^۱ که شماره-منحنی (CN) نامیده می‌شود، اشاره نمود. این رابطه به صورت زیر است

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad P > 0.2S \quad (1)$$

¹ Natural Resources Conservation Service (NRCS)



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌ها در حوزه آبخیز کرج

از نظر وضعیت اقلیمی منطقه با روش دومارتن در ایستگاه نسا در دسته بسیار مرطوب و در ایستگاه سد کرج در دسته نیمه خشک و کل حوزه آبخیز در اقلیم بسیار مرطوب قرار می‌گیرد. همچنین در روش طبقه‌بندی اقلیمی آمبروزه نیز، اقلیم منطقه در ایستگاه نسا خیلی مرطوب، در ایستگاه سد کرج نیمه خشک و در کل، اقلیم منطقه خیلی مرطوب به حساب می‌آید. میانگین میزان بارش طی دوره آماری ۳۷ ساله (سال ۱۳۴۷-۱۳۸۶) در ایستگاه شهرستانک حدود ۶۳۰ میلی‌متر تا حدود ۴۲۰ میلی‌متر در ایستگاه سد کرج متفاوت است. همچنین برف، سهم بزرگی در بارشهای جوی دارد و منشا اکثر روانابهای بهاری ناشی از ذوب شدن برف است که بیشینه آن تا اردیبهشت ماه است. میزان بارش در فصل تابستان کاهش می‌یابد و سهم کمتری از بارشهای سالانه در این فصل جای می‌گیرد [۱۱].

۳- روش تحقیق

۳-۱- گردآوری داده

حوزه آبخیز سد کرج دارای آمار بارش نسبتاً طولانی است. در این منطقه، ایستگاههای مختلف باران‌سنجی، هیدرومتری و سینوپتیک

جدول ۱- بررسی آماری بارش تراکمی ایستگاه‌های باران‌سنجی برای دبی اوج روزانه متناظر در ایستگاه هیدرومتری سیرا

ماه	ایستگاه/آماره	میانگین	انحراف معیار	بیشینه	کمینه
تیر	نسا	۴/۲۶	۹/۰۱	۳۴	۰
	شهرستانک	۴/۲۶	۸/۴۸	۲۶/۵	۰
	سیرا	۲/۴۶	۵/۰۸	۱۷	۰
خرداد	نسا	۶/۶۴	۸/۸۹	۳۲	۰
	شهرستانک	۷/۸۳	۹/۶۵	۳۰	۰
	سیرا	۴/۹۹	۷/۹۶	۳۳	۰

که در آن

Q ارتفاع رواناب، P ارتفاع بارندگی ۲۴ ساعته و S حداکثر توان نگهداری مربوط به نفوذپذیری^۱ و ذخیره سطحی است [۲].

جدول ۲- بررسی آماری بارش تراکمی ایستگاه‌های باران‌سنجی برای دبی اوج روزانه متناظر در ایستگاه هیدرومتری گچسر

ماه	ایستگاه/آماره	میانگین	انحراف معیار	بیشینه	کمینه
خرداد	نسا	۴/۷۱	۸/۵۸	۳۵	۰
	شهرستانک	۵/۴۷	۹/۷	۳۷/۵	۰
	سیرا	۴/۰۹	۷/۷۸	۳۳	۰
تیر	نسا	۴/۰۱	۹/۵۶	۳۶	۰
	شهرستانک	۳/۳۴	۷/۶۷	۳۰	۰
	سیرا	۲/۰۸	۴/۹	۲۰/۵	۰

مقدار S با نوع پوشش، نحوه بهره‌برداری از زمین و وضعیت سطح خاک از نظر نفوذپذیری و داخل خاک از نظر انتقال ارتباط دارد. بارندگی‌های متوالی، مقدار S را کاهش داده و برای هوا خوردن، زهکشی و تبخیر و تعرق به خاک فرصتی نمی‌دهد و در نتیجه برای S یک مقدار حداقل و یک مقدار حداکثر وجود دارد که بستگی به رطوبت پیشین خاک دارد و از رابطه ۲ به دست می‌آید

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

شماره منحنی (CN) به نوبه خود از روی مشخصات خاک، نوع بهره‌برداری از زمین و شرایط رطوبت پیشین خاک به دست می‌آید [۲ و ۱].

لازم به ذکر است با توجه به این که مشخصات خاک و نوع بهره‌برداری از زمین در طول دوره آماری مورد بررسی این پژوهش ثابت است، یک فاکتور استاتیک برای فرایند مدل‌سازی به حساب می‌آید و بنابراین در طی روند مدل‌سازی، تأثیری بر خروجی مدل ندارد، بنابراین به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته نشده است. تنها ورودی دینامیک در فرایند مدل‌سازی، شرایط رطوبتی پیشین خاک

¹ Interseption

است، که توسط NRCS ارائه شده است (جدول ۳). بر اساس پیشنهاد این سازمان، مجموع بارش‌های پنج روزه به عنوان نماینده شرایط رطوبتی خاک در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- وضعیت رطوبت پیشین خاک [۲]

گروه رطوبتی خاک	فصل رشد	فصل خواب
I	کمتر از ۳۶ میلی‌متر	کمتر از ۱۳ میلی‌متر
II	۳۶-۵۳ میلی‌متر	۱۳-۲۸ میلی‌متر
III	بیش از ۵۳ میلی‌متر	بیش از ۲۸ میلی‌متر

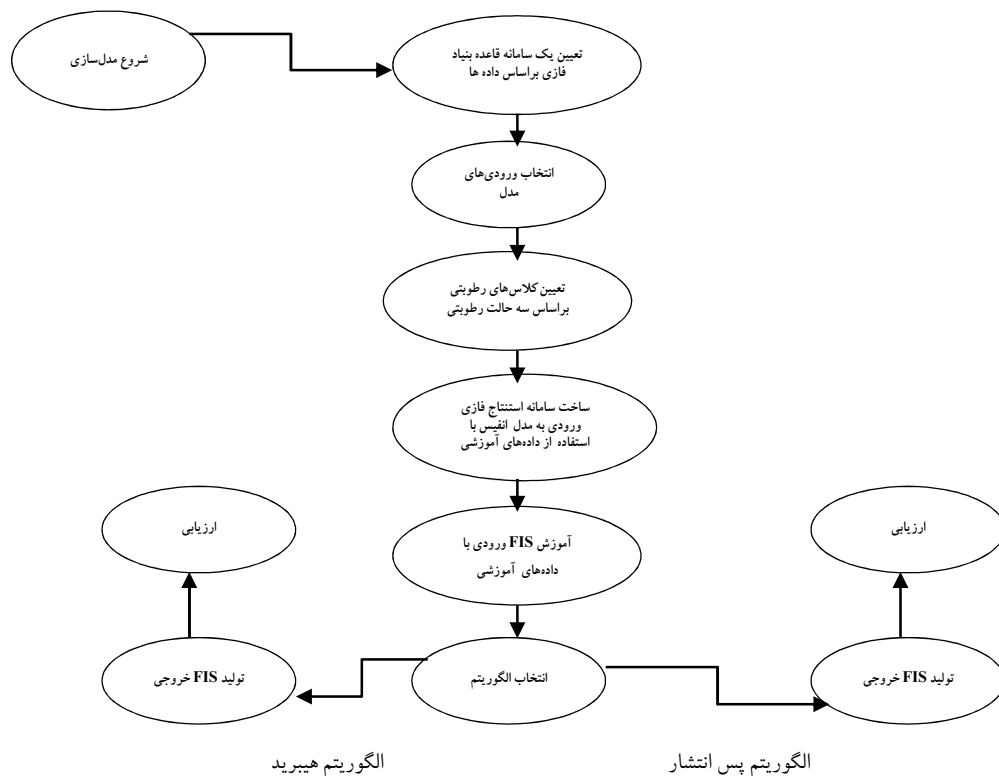
به این ترتیب، مجموع بارش‌های پنج روزه ایستگاه‌های باران‌سنجی به عنوان ورودی مدل و دبی‌های اوج روزانه در طول دوره آماری به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۲، الگوریتم کلی فرایند مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

هر چند مدل شماره منحنی در سال‌های قبل توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا پیشنهاد شده است، ولی امروزه به دلیل کارآمدی آن، در برخی از نرم‌افزارهای مهندسی همچون HEC نقشه پایه‌ای دارد. از طرفی این روش در بسیاری از مقالات و پژوهش‌های روز دنیا استفاده شده است [۱۶-۱۲]. این مدل با در نظر گرفتن پتانسیل ویژگی‌های هر حوزه آبخیز، به بررسی و محاسبه دبی اوج سیل در همان حوزه می‌پردازد و به این ترتیب بر خلاف بسیاری از مدل‌های دیگر، نیاز به کالیبراسیون و تغییرات متفاوت ضرایب عددی نیست و لذا به دلیل سازگاری، در بسیاری از مناطق دنیا و از جمله ایران به ویژه برای حوزه‌های فاقد آمار و یا حوزه‌های با دوره آماری کم، قابل استفاده است. در ایران نیز در بسیاری از مطالعات تفصیلی آبخیزداری و حفاظت آب و خاک، برای محاسبه دبی به ویژه در حوزه‌های فاقد آمار از این روش استفاده شده است [۱۰ و ۱۱].

این مدل نیز مانند بسیاری از مدل‌های تجربی دارای محدودیت‌ها و فرضیاتی است. جدول ۴ محدودیت‌ها و فرضیات مدل SCS-CN را نشان می‌دهد.

جدول ۴- محدودیت‌ها و فرضیات مدل SCS-CN

محدودیت‌ها و فرضیات مدل
بارش‌های ناشی از برف را در بر نمی‌گیرد.
بارش‌های بر روی زمین‌های یخ زده را نمی‌تواند محاسبه نماید.
آب پایه را در بر نمی‌گیرد.
ضریب ۰/۲ برای رگبارهای متوسط و کوچک زیاد است.
چنانچه ارتفاع رواناب کمتر از ۱۲ میلی‌متر باشد از دقت کمی برخوردار است.
چنانچه شماره منحنی کمتر از ۴۰ باشد، باید از روش‌های دیگر استفاده نمود.
در مناطقی که سطح آب زیر زمینی بالاست باید گروه هیدرولوژیکی خاک را گروه D در نظر گرفت.
در زمین‌های شهری چون هدر رفت اولیه کم است ضریب S ۰/۲ را باید ۰/۱ در نظر گرفت.



شکل ۲- الگوریتم کلی فرایند مدل سازی بارش های تراکمی و دبی اوج

ویژگی متمایز کننده انفیس، فراهم کردن الگوریتم یادگیری پیوندی، روش شیب گرادیان و روش حداقل مربعات، به منظور اصلاح پارامترها است [۱۷].
به منظور انجام فرایند مدل سازی، از نرم افزار متلب^۲، ورژن 7.8.0(R2009a) در کلیه مراحل مدل سازی در این پژوهش استفاده شد.

مدل انفیس ساخته شده، دارای سه ورودی بارش تراکمی ایستگاه های باران سنجی و یک خروجی دبی بیشینه روزانه در ایستگاه هیدرومتری بود. از توابع عضویت زنگی شکل به دلیل گستردگی کاربرد در مطالعات مختلف به منظور فازی سازی داده ها استفاده شد. همچنین با توجه به جدول ۳، سه حالت رطوبتی خشک، نرمال و تر برای کلاس بندی داده های هر ورودی به مدل در نظر گرفته شد. معیار تقسیم بندی و تغییر از یک کلاس رطوبتی به معیار ۵۳ میلی متر برای تغییر از کلاس II به III است. این معیار توسط NRCS پیشنهاد شده است. ولی با توجه به اقلیم منطقه مورد مطالعه و بیشترین میزان بارش تراکمی ۵ روزه در حوزه آبخیز کرج که ۳۷/۵ میلی متر است، انتخاب این معیار برای مدل سازی چندان

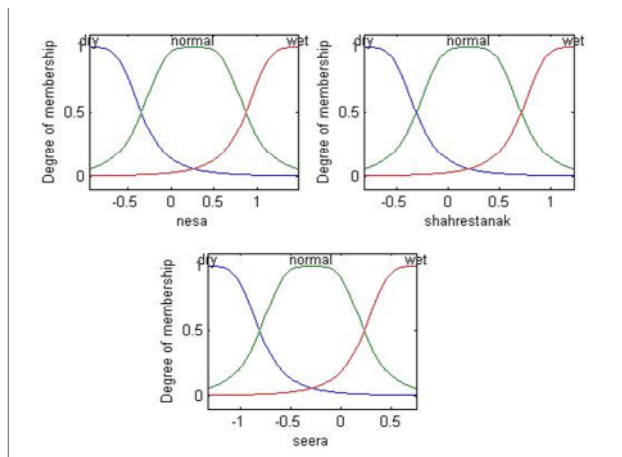
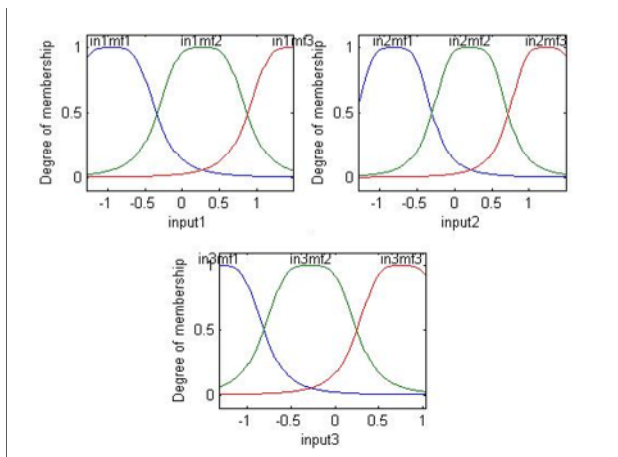
۳-۳- مدل سازی فازی- عصبی تطبیقی انفیس^۱

انفیس یک شبکه پیش خور چند لایه است، که از الگوریتم های یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور ترسیم یک فضای ورودی به یک فضای خروجی استفاده می کند. این شبکه با توانایی ترکیب قدرت زبانی یک سامانه فازی با قدرت عددی یک شبکه تطبیقی عصبی، توانایی خود را در مدل کردن مسائل عددی در زمینه های مختلف علمی مثل سری های زمانی هیدرولوژیکی و غیره نشان داده است [۱۷ و ۱۸].

به این ترتیب انفیس قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه بندی دارد و همچنین این مزیت را داراست که اجازه استخراج قوانین فازی را از اطلاعات عددی یا دانش متخصص می دهد و به طور تطبیقی یک قاعده- بنیاد می سازد. علاوه بر این، می تواند تبدیل پیچیده هوش بشری به سامانه های فازی را تنظیم کند. مشکل اصلی مدل پیش بینی انفیس، نیاز نسبتاً زیاد به زمان برای آموزش ساختار و تعیین پارامترها است.

^۱ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

^۲ MATLAB



شکل ۳- توابع عضویت ورودی (الف) و خروجی مدل انفیس (ب)

۴- نتایج و بحث

همانگونه که گفته شد هدف از این پژوهش، بررسی اثر بارشهای رخ داده در روزهای قبل در پیش بینی دبی بیشینه روزانه بود. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در پدیده‌های طبیعی، از روش هوشمند فازی-عصبی تطبیقی برای بررسی پارامترهای ورودی و خروجی استفاده شد؛ ابزاری توانمند که در بسیاری از مطالعات روز دنیا به ویژه در حوزه مطالعات آب و خاک کاربردهای فراوانی دارد. این مطالعه بر اساس روش ارائه شده توسط سازمان حفاظت منابع ملی آمریکا بود که مجموع بارش‌های پنج روز پیش از رخداد دبی را به عنوان نماینده شرایط رطوبتی پیشین خاک در نظر می‌گیرد و با استفاده از خصوصیات اقلیمی، ادافیکی حوزه به محاسبه ارتفاع رواناب و دبی اوج سیل می‌پردازد.

در این پژوهش، پارامترهای ثابت حوزه در طول دوره آماری مورد بررسی، از ورودی مدل حذف شد و تنها مجموع بارش‌های پنج روزه به عنوان ورودی دینامیک مدل و دبی‌های بیشینه روزانه به عنوان خروجی مدل انتخاب شدند. همچنین با توجه به اهمیت دبی در دوره بازگشت‌های مختلف در مسائل گوناگون طراحی و مطالعات، به بررسی توزیع‌های آماری و سپس انتخاب مناسب‌ترین توزیع که توزیع لوگ پیرسون است و برازش دبی‌های بیشینه روزانه در طول دوره آماری با دوره بازگشت‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله پرداخته شد و سپس فرایند مدل‌سازی با ورودی مجموع بارش‌های پنج روزه در سه کلاس رطوبتی خشک، نرمال، تر و دبی با دوره بازگشت‌های مختلف با دو الگوریتم آموزشی هیبرید و پس انتشار مورد آموزش قرار گرفت. همه مدل‌ها با تعداد ۲۰ اپیک مورد آموزش و خطاهای آموزشی و واری در همه مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از دو دسته داده‌های آموزشی و واری مدل‌های مورد آموزش و واری و سپس با استفاده از داده‌های

مناسب به نظر نمی‌رسد. بنابراین با توجه به داده‌های آموزشی، از سیستم خودکار مدل‌سازی برای تعیین تغییر از یک کلاس رطوبتی به بعدی استفاده شد. به منظور فرایند مدل‌سازی، داده‌ها به سه دسته داده‌های آموزشی، واری و آزمایشی تقسیم‌بندی شدند. شکل ۳ توابع عضویت ورودی و خروجی به مدل را نشان می‌دهد.

مدل تولید شده با هر دو الگوریتم آموزشی هیبرید و پس انتشار با تعداد ۲۰ اپیک آموزش دید. پس از ساخت مدل انفیس پنج روزه، مدل با داده‌های آزمایشی مورد ارزیابی قرار گرفت.

به منظور کاربردی‌تر نمودن خروجی مدل، علاوه بر مدل مجموع بارش و دبی مشاهداتی، دبی‌های بیشینه روزانه در طول دوره آماری با استفاده از آنالیز آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و بهترین توزیع مناسب برای برازش دبی‌های مورد مطالعه در دوره بازگشت‌های مختلف توزیع لوگ پیرسون به دست آمد. با استفاده از این توزیع، بیشترین دبی‌های روزانه برای دوره بازگشت ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برازش یافت. سپس مدل انفیس با استفاده از ورودی مجموع بارش‌های پنج روزه و دبی با دوره بازگشت‌های مختلف با دو الگوریتم آموزشی هیبرید و پس انتشار مورد آموزش قرار گرفت. به این ترتیب علاوه بر مدل بارش پنج روزه، دبی بیشینه روزانه، مدل‌های بارش پنج روزه و دبی با دوره بازگشت‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله نیز همچون روال مدلی که در بالا توضیح داده شد، تولید و نتایج حاصل از خروجی هر مدل مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار گرفت. مدل اول با استفاده از داده‌های طبیعی برای هر دو ورودی و خروجی مورد آموزش قرار گرفت. ولی مدل‌های بعدی با دبی‌های محاسباتی و برازش یافته با توزیع آماری لوگ پیرسون به عنوان خروجی و مجموع بارش‌های پنج روزه به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده‌اند.

۶ نشان داده شده است. همانگونه که از این جدولها بر می آید، در مرحله آزمون مدل، هر دو روش ضریب همبستگی بالایی دارند، ولی روش هیبرید نسبت به روش پس انتشار، ضریب همبستگی بالاتر و ریشه دوم مربعات خطا و پارامتر خطای کمتری دارد. همچنین با توجه به بیشینه ضریب نسبت، روش هیبرید داده‌های محاسباتی را بیشتر از مقدار واقعی و روش پس انتشار کمتر از مقدار واقعی محاسبه می‌نماید.

تست، مدل آموزش دیده مورد آزمایش قرار گرفت. بیشترین میزان داده‌ها به داده‌های آموزشی اختصاص داده شد. این داده‌ها شامل بیشترین تغییرات در داده‌های موجود نیز بود. سپس به منظور بررسی و ارزیابی نتایج به دست آمده، داده‌های خروجی از مدل مورد آزمون‌های آماری قرار گرفتند. برای این منظور از آماره‌های ضریب همبستگی، ریشه دوم میانگین مربعات خطا، ضریب نسبت و پارامتر خطا استفاده شد. نتایج به دست آمده برای روش پس انتشار در جدول ۵ و نتایج به دست آمده از روش هیبرید در جدول

جدول ۵- آزمون آماری نتایج به دست آمده از مدل انفیس با الگوریتم آموزشی پس انتشار

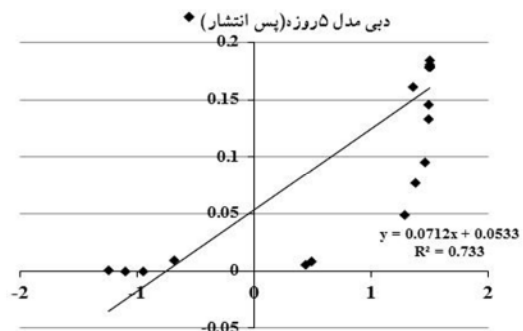
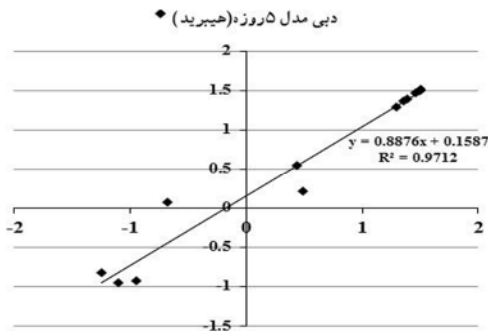
بیشترین دبی روزانه با روش پس انتشار				آماره	
مرحله آزمون	مرحله واریسی	مرحله آموزشی			
۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۷۶			R ²
۱/۲۵	۱/۲۴	۱/۲۷			RMSE
۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۱			Err
-۰/۰۱۱۷	۰/۱۲۲	-۰/۳۸۰	۰/۱۲۹	۰/۰۰۲	۰/۱۳۸
دبی بیشینه با دوره بازگشت ۱۰ ساله					
۰/۹۷	۰/۸۹	۰/۸۲			r
۱/۲۹	۱/۲۹	۱/۲۶			RMSE
۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۱			Err
-۰/۰۴۲	۰/۱۷۹	-۰/۰۱۳	۰/۱۱	۰/۰۰۱	۰/۱۱۹
دبی بیشینه با دوره بازگشت ۵۰ ساله					
۰/۸۶	۰/۹۰	۰/۸۵			r
۱/۲۹	۱/۳۰	۱/۳۱			RMSE
۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۷			Err
-۰/۰۰۰۳	۰/۱۲۹	-۰/۱۰۶	۰/۱۲۶	۰/۰۱۶	۰/۱۲۱
دبی بیشینه با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله					
۰/۸۴	۰/۸۸	۰/۷۱			r
۱/۳۰	۱/۲۹	۱/۲۸			RMSE
۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۴			Err
۰/۰۰۳	۰/۱۱۷	-۰/۰۰۶	۰/۱۸۸	-۰/۰۱۳	۰/۱۲۶

جدول ۶- آزمون آماری نتایج به دست آمده از مدل انفیس با الگوریتم آموزشی هیبرید

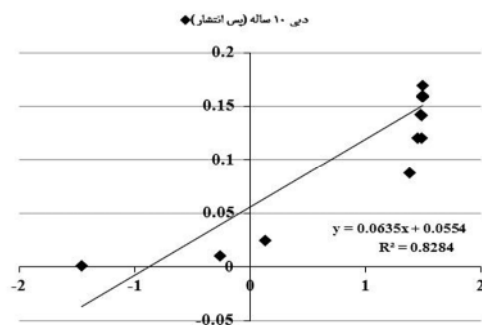
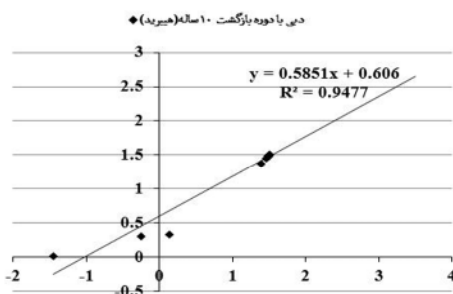
دبی بیشینه روزانه با روش هیبرید				مدل/آماره	
مرحله آزمون	مرحله واریسی	مرحله آموزشی			
۰/۹۸	۰/۹۸	۱			R ²
۰/۱۶۲	۰/۳۱۶	۸/۵۰E-۰۵			RMSE
۰/۰۷۵	۰/۶	۲/۸۸E-۰۵			Err
-۰/۰۹۹	۱/۲۳۱	-۰/۴۵۳	۱/۵۵	۰/۱	۱/۰۰۰۲
دبی بیشینه با دوره بازگشت ۱۰ ساله					
۰/۹۷	۰/۹۷	۱			r
۰/۳۱۷	۰/۱۶۴	۵/۲۸۶E-۰۵			RMSE
۰/۱۸۴	۰/۰۵۶	۱/۷۷E-۰۵			Err
-۱/۱۶	۲/۴۱۱	-۰/۱۳۸	۱/۰۲	۰/۱	۱/۰۰۰۱
دبی بیشینه با دوره بازگشت ۵۰ ساله					
۰/۹۹	۰/۹۹	۱			r
۰/۳۵۲	۰/۴۰۵	۳/۱۵۶E-۰۵			RMSE
۰/۴۷۸	۰/۵۰۳	۰/۴۴۸			Err
-۰/۰۲۱	۵/۱۷۷	-۶/۴۰۷	۱/۰۰۱	۰/۱	۱/۰۰۰۱
دبی بیشینه با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله					
۰/۹۹	۰/۹۹	۱			r
۰/۱۴۳	۰/۳۹۸	۲/۹۷۲E-۰۵			RMSE
۰/۵۳۱	۰/۵۰۷	۰/۴۶۲			Err
۰/۵۶	۱/۵۰۲	-۰/۱۶۳	۹/۶۹	۰/۱	۱/۰۰۰۱

از این نمودار نیز بر می آید، روش هیبرید دارای R^2 بالاتری نسبت به روش پس انتشار است.

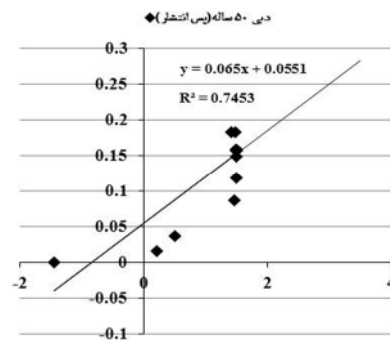
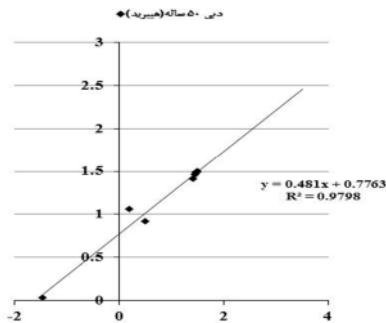
شکل های ۴ تا ۷ نمودار همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی را برای هر دو روش آموزشی نشان می دهد. همانگونه که



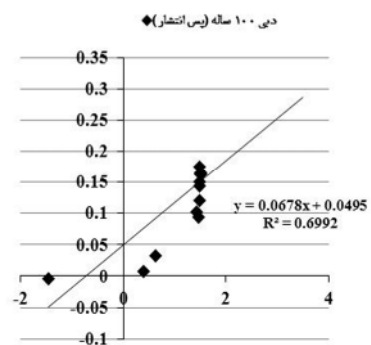
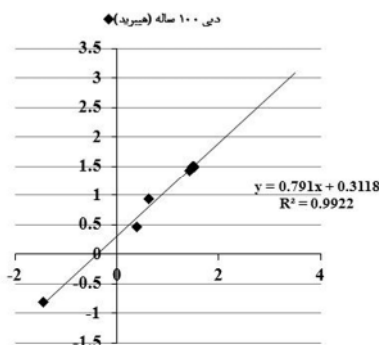
شکل ۴- نمودار همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی مدل پنج روزه به روش پس انتشار و هیبرید



شکل ۵- نمودار همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی مدل دبی بیشینه ۱۰ ساله به روش پس انتشار و هیبرید



شکل ۶- نمودار همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی مدل ۵۰ ساله به روش پس انتشار و هیبرید

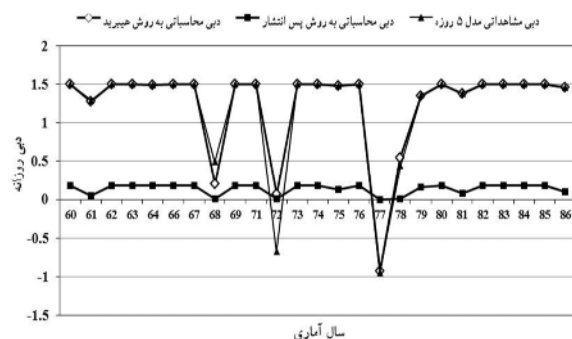


شکل ۷- نمودار همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی مدل دبی بیشینه ۱۰۰ ساله به روش پس انتشار و هیبرید

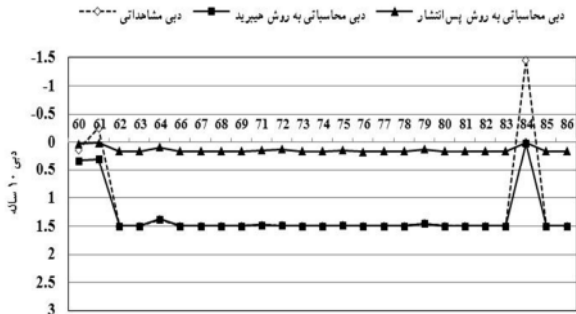
شکل‌های ۸ تا ۱۱ داده‌های دبی بیشینه مشاهداتی و محاسباتی را نشان می‌دهد. همانگونه که از نتایج به‌دست آمده قابل مشاهده است، با استفاده از داده‌های بارش تراکمی پنج روزه، امکان پیش‌بینی دبی بیشینه اوج روزانه با دقت بالاتری وجود دارد. همچنین در مقایسه دو الگوریتم آموزشی پس انتشار و هیبرید، روش هیبرید (پیوندی) عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. داده‌های محاسباتی دبی پس انتشار تطابق چندان خوبی با داده‌های مشاهداتی نشان نمی‌دهند.

در زمینه بررسی و تأکید بر نقش کلیدی پارامتر رطوبت پیشین خاک، تحقیقات گسترده‌ای در سرتاسر جهان و ایران انجام شده است که هر یک از این مدل‌ها، از تجربی تا کاربرد مدل‌های هوشمند، به بررسی این موضوع پرداخته‌اند [۲۱-۱۸]. از جمله کورانی و همکاران در سال ۲۰۰۵ با استفاده از داده‌های آماری ایستگاههای باران‌سنجی به مدل‌سازی رابطه بارش-رواناب با استفاده از شبکه‌های عصبی پس‌خور با یک لایه پنهانی و با استفاده از تراز آب به‌عنوان متغیر وابسته پرداختند. آنها با استفاده از روشهای میان‌یابی همچون تیسن به محاسبه بارش تراکمی در کل سطح حوزه آبخیز پرداختند، سپس با استفاده از خوشه‌بندی فازی به دسته‌بندی داده‌ها و تعیین و استخراج قواعد فازی پرداختند. ایشان همچنین مدل‌های فازی و شبکه عصبی را با هم مقایسه نمودند. طبق نتایج به‌دست آمده از آنالیزهای آماری داده‌ها توسط این پژوهشگران، مدل فازی نتایج بهتری را نشان می‌دهد [۷ و ۲۲]. در مقایسه با نتایج این پژوهش، آنها از مدل‌های زمان واقعی پیش‌بینی سیل و رواناب استفاده نمودند ولی در پژوهش حاضر از گردآوری داده‌های پیشین دبی بیشینه و بارش، برای مدل‌سازی و پیش‌بینی استفاده شد.

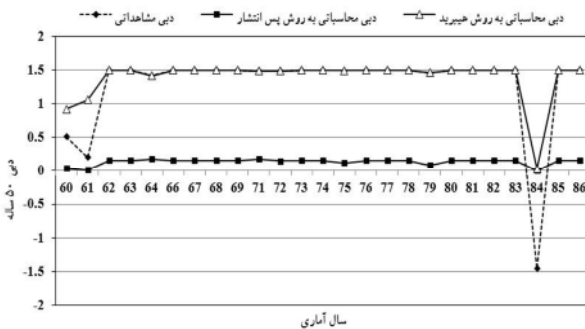
نورانی و صالحی در سال ۱۳۸۷ با استفاده از انفیس به مدل‌سازی رابطه بارش-رواناب پرداختند. سپس نتایج به‌دست آمده را با سامانه استنتاج فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی مقایسه



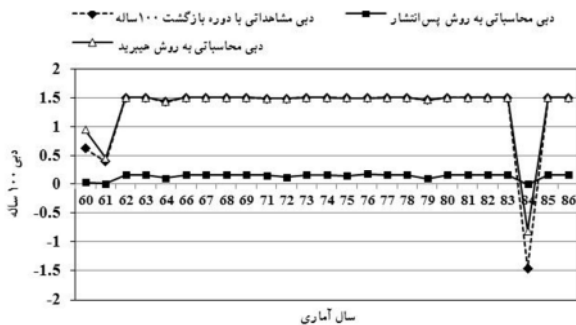
شکل ۸- نمودار دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی در مدل دبی بیشینه روزانه مشاهداتی



شکل ۹- نمودار دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی در مدل دبی با دوره بازگشت ۱۰ ساله



شکل ۱۰- نمودار دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی در مدل دبی با دوره بازگشت ۵۰ ساله



شکل ۱۱- نمودار دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی در مدل دبی بیشینه با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله

نمودند. نتایج به‌دست آمده از پژوهش آنها نیز عملکرد مناسب روش فازی-عصبی تطبیقی، با ضریب تبیین ۰/۹۳ در مرحله آزمون مدل را نشان می‌دهد [۲۳]. پژوهش انجام شده نیز به بررسی نقش مجموع بارش‌های پنج روز پیش از رخداد دبی بیشینه اوج روزانه پرداخته است. در مقایسه، مدل‌های مفهومی هر چند نتایج دقیق و درک بالایی از فرایندهای هیدرولوژیکی را ارائه می‌دهند، اما این مدل‌ها نیازمند حجم عظیمی از اطلاعات گردآوری شده از حوزه آبخیز مورد مطالعه هستند، در حالی که مدل‌های هوشمند، نیازمند حجم عظیم اطلاعات و داده‌ها نیستند و نتایج به‌دست آمده را با دقت بالایی ارائه می‌دهند. این پژوهش علاوه بر داشتن دقت

قابل قبول و بالای نتایج، از سادگی نیز برخوردار است. همچنین در برخورد با مدل جعبه سیاه بارش تراکمی، دبی بیشینه روزانه، عملکرد مناسب و پتانسیل بالای خود را نشان داد. نقش کلیدی و اثرگذار این بارش‌ها نیز در وقوع دبی بیشینه روزانه به اثبات رسید. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیزهای آماری، تخمین نسبتاً دقیق دبی امکان پذیر است. محاسبه دقیق از اهمیت بسیاری برخوردار است زیرا محاسبه و برآورد بیشتر دبی بیشینه، از نظر هزینه و توجیحات اقتصادی و مقرون به صرفه نبودن، طرح را دچار مشکل می‌کند و کمتر محاسبه نمودن دبی نیز خطرات مالی و جانی را به دنبال دارد. اهمیت مدل انفیس پنج روزه که با دقت حدود ۹۸ درصد قادر به پیش‌بینی دبی بیشینه است، از این جا مشخص می‌شود. همچنین این مدل قابل کاربرد در مناطق مشابه است و با استفاده از این مدل خاص فازی-عصبی تطبیقی می‌توان بارش‌های اتفاق افتاده را به رواناب تبدیل نمود و رواناب حاصله را با دقت زیاد تخمین زد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر است:
 ۱- افزایش رطوبت خاک، کاهش نفوذ آب و افزایش تولید رواناب را به دنبال خواهد داشت. یکی از عوامل افزایش رطوبت خاک، بارش‌های به وقوع پیوسته است. به این ترتیب یک عامل مهم و کلیدی در تولید رواناب و افزایش دبی بیشینه سیلاب است.
 ۲- اثر بارش تراکمی ۵ روزه به عنوان ورودی مناسب مدل قابل مشاهده است.

۷- مراجع

- 1- Mahdavi, M. (2006). *Appleid hydrology*, 4th Ed., Vol., Tehran University, Tehran. (In Persian)
- 2- Mahdavi, M. (2006). *Appleid hydrology*, 4th Ed., Vol 1., Tehran University, Tehran. (In Persian)
- 3-Rezaei, A., Mahdavi, M., Louks, K., and Mahdavian, M.H. (2008). "Modeling regional peak discharge of Sefidrud sub watersheds using artificial neural networks." *J. Sciences and Techniques of Agriculture and Natural Resources*, 11(1-A),1-15.
- 4- Ebrahimi, R., Zahraei, B., and Naseri, M. (2012). "Mid-term prediction of meteorological drought using fuzzy inference systems." *J. of Water and Wastewater*, 78,112-125. (In Persian)
5. Silveria, L., Charbonnier, F., and Genta, J.L. (2000). "The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure." *J. Hydrological Sciences*, 45(1),1-10.
6. Cheng, Ch., and Chau, K. W. (2004). "Flood control management system for reservoirs." *J. Environmental Modelling and Software*, 19(12),1141-1150.
7. Corani, G., and Guariso, G. (2005). "Coupling fuzzy modelling and neural networks for river flood prediction." <<http://www.elet.polimi.it/upload/corani/neuro-fuzz,1-24>> (May 2012)

۳- توانمندی مدل‌های فازی-عصبی تطبیقی در برخورد با عدم قطعیت‌های رابطه CN-Number با وجود فاکتورهای طبیعی مختلف، به خوبی قابل مشاهده است.
 ۴- مقایسه دو الگوریتم آموزشی پس انتشار و هیبرید نشان می‌دهد که روش هیبرید، روش برتر است.
 ۵- همچنین معیار تعیین کلاس‌های رطوبتی برای هر منطقه، باید با توجه به شرایط اقلیمی و اداپتیکی آن منطقه کالیبره شود.
 ۶- تخمین نسبتاً دقیق دبی بیشینه روزانه با توجه به اهمیت آن در مطالعات حفاظت آب، خاک و طراحی حائز اهمیت است.
 ۷- در مناطقی که نیاز به بررسی سریع و تخمین نسبتاً دقیق دبی بیشینه است، می‌توان از این روش استفاده نمود.

۶- پیشنهادها

- ۱- استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و استنتاج فازی، برای مقایسه با مدل‌های فازی-عصبی تطبیقی پیشنهاد می‌شود.
- ۲- بررسی بارش‌های ساعتی، کوتاه‌مدت تر و یا بارش‌های روزهای پیش از پنج روزه، برای بررسی رخداد دبی اوج پیشنهاد می‌شود.
- ۳- بررسی این فرایند در مناطق با اقلیم‌های متفاوت نیز پیشنهاد می‌شود.
- ۴- پیشنهاد می‌شود امکان استفاده از این مدل برای پایه مطالعات آنلاین و تحت وب سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی بررسی شود.
- ۵- پیشنهاد می‌شود این روش مدل‌سازی برای بررسی ماههای سرد سال با در نظر گرفتن پارامتر دما مورد بررسی قرار گیرد.

8. Barreto, N., Aurélio, A., Souza, F., and Carlos, R. (2007). "Application of fuzzy logic to the evaluation of runoff in a tropical watershed." *J. Environmental Modeling and Software*, 23(2), 244-253.
9. Talei, A., and Chua, L. H.C. (2012). "Influence of lag time on event-based rainfall-runoff modeling using the data driven approach." *J. Hydrology*, 438-439, 223-233.
10. Office of Research and Technical Services .(2003). *Amirkabir dam watershed management plan*, Ministry of Agriculture, 1-80.
11. Green Watershed Company.(2003). *Combining the Sierra watershed report*, Ministry of Agriculture,7-10.
12. Sahu, R.K., Mishra, S.K., and Eldho, T.I.(2013). "Mproved storm duration and antecedent moisture condition coupled SCS-CN concept-based model." *J. Hydrol. Eng.*, 17(11),1173-1179.
13. Geetha, K., Mishra, S., Eldho, T., Rastogi, A., and Pandey, R. (2007). "Modifications to SCS-CN method for long-term hydrologic simulation." *J. Irrig. Drain Eng.*, 133(5), 475-486.
14. El-Hames, A.S.(2012). "An empirical method for peak discharge prediction in ungauged arid and semi-arid region catchments based on morphological parameters and SCS curve number." *J. of Hydrology*, 456-457, 94-100.
15. Caviedes-Voullième, D., García-Navarro, P., and Javier, M. (2012). "Influence of mesh structure on 2D full shallow water equations and SCS Curve Number simulation of rainfall/runoff events." *J. of Hydrology*, 448-449, 39-59.
16. Sabahattin, I., Kalin, L. J., Schoonover, J.E., Srivastava, P., and Lockaby,G. (2012). "Modeling effects of changing land use/cover on daily streamflow: An artificial neural network and curve number based hybrid approach." *J. of Hydrology*, (In Press).
17. Khuzestan Water and Power Agency.(2007). "Prediction of reservoir water level entrance dose rate using fuzzy systems and neural networks." *Khuzestan Water and Power Agency*, 86, 64-65, (In Persian)
18. Kia, M. (2010). *Fuzzy logic in matlab*, Green Kian Computer , 202, 1-181.
19. Akbarzadeh, A., Nouri, R., Farrokhnia, A., Khakpour, A., and Sabahi, M.S. (2011). "Accuracy and uncertainty analysis of intelligent techniques for predicting the longitudinal dispersion coefficient in rivers." *J. of Water and Wastewater*, 75, 99-107. (In Persian)
20. Bezdek, J. (1981). *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*, Plenum Press, New York.
21. Karamouz, M., and Zahraie, B. (2004) "Seasonal streamflow forecasting using snow budget and ENSO climate signals: Application to salt river basin in Arizona." *J. of Hydrologic Engineering*, 9(6), 1312-1325.
22. Natural Resources Conservation Service. (2007). *Hydrologic soil groups*, National Engineering Handbook, NRCS,1-14.
23. Nourani,V., and Salehi, K. (2008). "Modeling of rainfall - runoff using adaptive fuzzy neural network and comparison with neural network and fuzzy logic." *4th Proceeding, Civil Eng. Conference*, Tehran University, Tehran, 1-8. (In Persian)