

مقایسه مدل هیدرولوژیک توزیعی Wetspa و شبکه عصبی - فازی تطبیقی در شبیه سازی بارش - رواناب در حوزه آبخیز کسلیان

نوید دهقانی^۱، مهدی وفاخواه^{۱*} و عبدالرضا بهره مند^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۹/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۲۴)

چکیده

مدل سازی فرایند بارش - رواناب و پیش بینی دبی رودخانه یک اقدام مهم در مدیریت و مهار سیلاب ها، طراحی سازه های آبی در حوزه های آبخیز و مدیریت خشکسالی است. هدف این تحقیق شبیه سازی جریان روزانه در حوزه آبخیز کسلیان با مدل Wetspa و شبکه عصبی - فازی تطبیقی است. Wetspa یک مدل پیوسته هیدرولوژیک - فیزیکی است که قابلیت پیش بینی سیلاب در مقیاس حوزه آبخیز با گام های زمانی مختلف را داراست و شبکه عصبی - فازی تطبیقی هم جزء مدل های جعبه سیاه می باشند که امروزه مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این تحقیق از آمار باران، تبخیر و دمای ایستگاه هواشناسی سنگده و آمار دبی ایستگاه ولیکن طی سال های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ استفاده شد. نتایج شبیه سازی با مدل Wetspa نشان داد که این مدل به خوبی توانسته جریان پایه رودخانه را با معیار ناش ساتکلیف ۰/۶۴ در مرحله آزمون شبیه سازی نماید ولی در شبیه سازی جریان های سیلابی با خطا همراه است که دلیل آن را می توان به کوچک بودن آبخیز و کوتاه بودن زمان پیمایش اشاره کرد. همچنین این مدل به خوبی توانسته بیان آب حوزه آبخیز کسلیان را شبیه سازی کند. آنالیز حساسیت پارامترهای مدل نشان داد که ضریب افت آب زیرزمینی از بیشترین حساسیت و ضریب روز درجه بارش از کمترین حساسیت برخوردار است. همچنین شبکه عصبی - فازی تطبیقی با ورودی باران با یک روز تأخیر و تبخیر با یک روز تأخیر با معیار ناش ساتکلیف ۰/۸۰ در دوره آزمون پاسخ های قابل قبول تری نسبت به مدل Wetspa با معیار ناش ساتکلیف ۰/۲۴ داشت.

واژه های کلیدی: مدل سازی بارش - رواناب، مدل Wetspa، شبکه عصبی - فازی تطبیقی، جریان پایه، حوزه آبخیز کسلیان

۱. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس نور

۲. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: vafakhah@modares.ac.ir

مقدمه

یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای هیدرولوژیک، فرآیندهای بارش-رواناب است که از پارامترهای مختلف فیزیکی و هیدرولوژیک تأثیر می‌پذیرد. مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب و پیش‌بینی دبی رودخانه یک اقدام مهم در مدیریت و مهار سیلاب‌ها، طراحی سازه‌های آبی در حوزه‌های آبخیز و مدیریت خشکسالی می‌باشد (۱). امروزه روش‌ها و مدل‌های زیادی برای برآورد آن ارائه شده است. با توجه به ناهمگنی و عدم یکنواختی در توپوگرافی، خاک، پوشش، کاربری اراضی و عوامل زمین‌شناسی و تغییر اقلیم در زمان و مکان در آبخیز و برآورد واقعی‌تر از سیستم فیزیکی، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک توزیعی نسبت به مدل‌های یکپارچه ارجحیت دارد (۱۲). Wetspa (Water and Energy Transfer between Soil, Plant and Atmosphere) یک مدل پیوسته هیدرولوژیک-فیزیکی است که قابلیت پیش‌بینی سیلاب و شبیه‌سازی بیلان آبی، فرسایش و انتقال رسوب، کیفیت آب و مدیریت آبخیز در مقیاس حوزه آبخیز، زیرحوزه آبخیز و شبکه سلولی با گام‌های زمانی مختلف را دارا است (۱۷). اولین بار ونگ و همکاران (۱۶) این مدل را در حوزه آبخیز مولنیک در بلژیک اجرا نمودند و نتایج بیانگر این بود که ترکیب مدل‌سازی توزیعی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بسیار سودمند بوده است. تحقیقات مختلفی با استفاده از این مدل در سراسر جهان انجام شده است که در خارج از کشور می‌توان به گبرمسکل و همکاران (۱۰)، لیو و همکاران (۱۱)، نورمحمد و همکاران (۱۲) و بهره‌مند و همکاران (۹) اشاره کرد. در داخل کشور هم مرادی‌پور و همکاران (۵) در حوزه آبخیز طالقان توانایی مدل در شبیه‌سازی توزیعی مکانی سیل را بررسی کردند و نمایه ارزیابی ناش-ساتکلیف برای برآورد رواناب ۸۴/۸۵ درصد برآورد کردند. نتایج، بیانگر قابلیت بالای مدل در برآورد مؤلفه‌های هیدرولوژیک و به تبع آن شبیه‌سازی دقیق‌تر بیلان آبی بود. یعقوبی و همکاران (۶) در حوزه آبخیز چهل‌چای گلستان نقشه ضریب رواناب را با استفاده از مدل

به‌دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که با اصلاح و بهبود کاربری اراضی در این مناطق می‌توان تولید رواناب را کاهش داد. از طرفی در دهه اخیر به‌کارگیری روش‌های هوشمند در شبیه‌سازی در زمینه‌های مختلف متداول شده و این روش نیز نتایج بسیار مناسبی را به‌همراه داشته است در زمینه مقایسه مدل‌های هیدرولوژیک با روش‌های هوشمند تحقیقات مختلفی انجام شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. انکتیل و همکاران (۷) برای برآورد جریان سیل یک روز آینده با بهره‌گیری از شبکه پرسپترون چند لایه و مقایسه نتایج آن با یک مدل مفهومی، چنین تشخیص دادند که شبکه پرسپترون چندلایه، در مرحله آموزش، متأثر از طول دوره داده‌ها بوده و برای داده‌های طولانی‌تر از یک روز بهتر از مدل مفهومی عمل می‌کند. توکر و مارکوس (۱۵) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی رابطه بارندگی-رواناب را برای پیش‌بینی جریان ماهانه در سه حوزه آبخیز با شرایط آب و هوایی و فیزیوگرافی متفاوت در مرلند آمریکا مدل‌سازی کرده و نتایج حاصله را با مدل مفهومی (Watbal (Water balance) مقایسه کردند. نتایج نشان داد شبکه عصبی مصنوعی در همه موارد دارای کارایی بالاتری است. احمت نور (۸) مدل‌سازی بارش-رواناب را با استفاده از ساختارهای مختلف شبکه عصبی مصنوعی در حوزه‌های آبخیز سونگای بکوک، سونگای کتیل، سونگای کلانک و سونگای اسلیم در مالزی انجام داده و با نتایج مدل‌های HEC-HMS، XP-SWMM و رگرسیون چندمتغیره مقایسه نمود. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی به‌طور مطلوبی می‌تواند رواناب را شبیه‌سازی نماید و همبستگی بالایی با نتایج خروجی مدل‌های مذکور داشت. نیلسون و همکاران (۱۳) با استفاده از مدل‌های مفهومی و شبکه‌های عصبی مصنوعی و ترکیب آنها، مقادیر ماهانه رواناب خروجی از دو حوزه آبخیز در نروژ را شبیه‌سازی نمودند و به این نتیجه رسیدند که شبکه عصبی مصنوعی و ترکیب آن با مدل‌های مفهومی برآورد بهتری در هر دو حوزه آبخیز داشته است. سجادخان و کولی‌بالی (۱۴) شبکه عصبی بیزی را برای مدل‌سازی بارش-رواناب استفاده نمودند

رواناب می باشد.

مواد و روش ها

معرفی حوزه آبخیز مورد تحقیق

حوزه آبخیز کسلیان با مساحت ۶۶/۷۵ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی $53^{\circ}18'$ تا $53^{\circ}30'$ طول شرقی و $35^{\circ}58'$ تا 37° عرض شمالی واقع است و از زیرحوزه های آبخیز رودخانه تالار در مازندران به شمار می رود. این آبخیز با توجه به شرایط طبیعی و آب و هوایی خود به عنوان معرف مناطق کوهستانی و جنگلی در نظر گرفته می شود. متوسط بارندگی منطقه ۷۹۱ میلی متر بوده و عمدتاً به صورت باران ریزش می نماید. اقلیم منطقه براساس روش آمبرژه نیمه مرطوب سرد می باشد. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز کسلیان در استان مازندران و ایران را نشان می دهد.

جمع آوری آمار و اطلاعات

ابتدا با مراجعه به سازمان نقشه برداری کشور نقشه رقومی ۵۰۰۰۰: ۱ توپوگرافی حوزه آبخیز کسلیان تهیه شد، سپس با مراجعه به اداره منابع طبیعی استان مازندران نقشه های خاک شناسی و کاربری اراضی که از تصویر ماهواره ای ASTER تهیه شده بود، جمع آوری گردید. برای اجرای مدل WetSpa هر سه نقشه با اندازه شبکه ۵۰ متر در ۵۰ متر به مدل معرفی شدند. پس از تهیه نقشه ها صحت نقشه ها با بازدیدهای میدانی تایید شد. سپس با بررسی آمار ایستگاه های هواشناسی و هیدرومتری در محدوده حوزه آبخیز کسلیان و با توجه به هدف تحقیق و نیاز مدل WetSpa به ورودی های با گام زمانی روزانه، پیوسته و هم زمان بودن سری زمانی، نهایتاً دوره زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ انتخاب شد. سپس سال های آبی ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵ به مدت ۳۶ ماه برای واسنجی (Calibration) و از بهمن ماه ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸ به مدت ۳۰ ماه برای آزمون (Test) مدل WetSpa انتخاب شد. به منظور مقایسه نتایج، برای سیستم عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS) نیز از همین تقسیم بندی داده ها برای دوره آموزش و

و با نتایج شبکه عصبی مصنوعی استاندارد و مدل بارش - رواناب HBV-96 مقایسه کردند. نتایج تحقیق نشان داد که شبکه عصبی بیزی جریان رودخانه و ورودی به مخزن را به صورت واقعی در مقایسه با شبکه عصبی استاندارد و مدل مفهومی HBV برآورد می نماید. سلطانی و مرید (۲) با مقایسه عملکرد مدل های SAC-SMA و SWAT و شبکه های عصبی مصنوعی در شبیه سازی فرایند بارش - رواناب، عنوان کردند که شبکه های عصبی مصنوعی در مقایسه با دو مدل دیگر به حجم اطلاعات کمتری نیاز دارد. در داخل کشور هم حسینی (۴) از شبکه عصبی مصنوعی و نرم افزار HEC-HMS با استفاده از روش سرویس حفاظت خاک امریکا (SCS) برای پیش بینی هیدروگراف سیل در حوزه آبخیز باروت آغاجی، ناورود آسالم و ابوالعباس استفاده نمود. نتایج نشان داد که در این آبخیزها دقت پیش بینی شبکه عصبی بهتر از هیدروگراف واحد SCS است. جهانگیر و همکاران (۳) در پژوهشی مقایسه کارآمدی شبکه های عصبی مصنوعی در شبیه سازی فرایند بارش - رواناب را با نتایج HEC-HMS با استفاده از روش سرویس حفاظت خاک امریکا (SCS) انجام دادند و نتیجه گرفتند که گرچه تفاوت معنی داری میان دو روش وجود ندارد، ولی مقایسه عملکرد شبکه و روش سرویس حفاظت خاک امریکا (SCS) به کار رفته نشان می دهد که در تمام پارامترها، دقت ANN بیشتر از روش سرویس حفاظت خاک امریکا (SCS) است. با توجه به مطالعات صورت گرفته در داخل و خارج از کشور برمی آید که مدل WetSpa اغلب در حوزه های آبخیز بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است، همچنین تاکنون مقایسه ای بین مدل هیدرولوژیک توزیعی WetSpa و روش های هوشمند انجام نشده است، به همین منظور هدف از مطالعه حاضر آزمایش توانایی مدل در حوزه های آبخیز کوچک برای شبیه سازی بارش - رواناب و همچنین استفاده از شبکه عصبی - فازی تطبیقی در حوزه آبخیز کسلیان و ارزیابی نتایج آن با مدل هیدرولوژیک توزیعی WetSpa و ارزیابی دقت و توانایی ها و مزایا و معایب هر یک از این مدل ها در پیش بینی



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز کسلیان در استان مازندران و ایران

آزمون استفاده گردید.

مدل WetSpa

مدل WetSpa اولین بار توسط ونگ و همکاران (۱۷) برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر در حوزه آبخیز تهیه شد. در این مدل برای هر شبکه سلولی، چهار لایه در جهت عمودی شامل لایه تاج پوشش، زون ریشه، زون انتقال و زون اشباع در نظر گرفته می‌شود. فرایندهای هیدرولوژیک مدل شامل بارش، ذوب برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیر سطحی، جریان آب زیرزمینی و بیلان آب است. در مدل WetSpa برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی از نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی، نقشه خاک و سری زمانی روزانه هواشناسی استفاده می‌شود. مدل در هر شبکه سلولی با توجه به میزان بارش، دما و تبخیر و تعرق، مقدار ذخیره برگابی گیاهان، ذخیره چالابی، نفوذ و رواناب تولیدی را شبیه‌سازی می‌نماید. در این مدل بارش مازاد با استفاده از روش استدلالی اصلاح شده (روش ضریب رواناب مبتنی بر رطوبت خاک) و بر مبنای خصوصیات هر شبکه شامل

شیب، کاربری، نوع خاک، میزان بارش و رطوبت پیشین خاک محاسبه می‌گردد. ضریب پتانسیل رواناب براساس جداول مرجع تعیین می‌شود که این جداول براساس نقشه‌های شیب، کاربری و تیپ خاک تهیه می‌شوند. لازم به ذکر است مدل دارای ۱۱ پارامتر کلی می‌باشد، که به منظور واسنجی، در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۱). در واسنجی خودکار توسط نرم‌افزار PEST، انتخاب مقادیر اولیه مناسب برای جلوگیری از افتادن در مینیمم‌های محلی، خیلی مهم است. بدین منظور ابتدا مدل تا حدود زیادی به صورت دستی کالیبره شد، و در این مرحله پارامتر حساس و کلیدی تر توسط کاربر مشاهده شد. پس از به دست آوردن مقادیر نسبتاً مناسب برای مجموعه پارامترهای مورد نظر جهت واسنجی، این مقادیر به PEST داده شد تا براساس روش جستجوی محلی مقادیر مناسبی برای پارامترها تعیین گردد. PEST برای تخمین پارامترها یک الگوریتم جستجوی محلی پیچیده و معروف بنام گوس-مارکوارت-لونبرگ را به کار می‌گیرد. چون فرآیند اتوکالیبراسیون توسط این نرم‌افزار و الگوریتم به کار گرفته شده به صورت یک فرآیند تکراری (iterative) می‌باشد و در آن مشتقات همه مشاهدات نسبت به تمام پارامترها محاسبه می‌شوند. نتایج هر تکرار

جدول ۱. پارامترها، مقادیر اولیه، واسنجی شده و رتبه حساسیت توسط PEST

علامت	پارامتر	مقدار اولیه	مقدار واسنجی شده	رتبه حساسیت
K_i	فاکتور بی بعد جریان زیر سطحی (-)	۱/۹۱	۱/۶۶	۷
K_g	ضریب افت آب زیرزمینی (بر روز)	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۲۶۵۸	۱
K_{ss}	رطوبت اولیه خاک (میلی متر)	۰/۹۲	۰/۸۸	۳
K_{ep}	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر)	۱/۳۶	۱/۳۹	۲
G_o	ذخیره آب زیرزمینی اولیه (میلی متر)	۱۵۰	۱۶۰	۸
G_{max}	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (میلی متر)	۲۱۶/۲۶	۵۲۷/۹۹۳	۹
T_o	ضریب درجه حرارت آستانه (درجه سانتی گراد)	۰/۹۹	۱/۰۵	۶
K_{snow}	ضریب درجه روز درجه حرارت (میلی متر بر درجه سانتی گراد بر روز)	۰/۷۵	۰/۷۹	۴
K_{rain}	ضریب روز درجه بارش (بر درجه سانتی گراد بر روز)	۱/۷۹	۱/۸۸	۱۱
K_{run}	توان رواناب سطحی برای شدت بارندگی صفر (-)	۵/۹۰	۴/۸۱	۵
P_{max}	حداکثر شدت بارش (میلی متر بر روز)	۵۹/۵۳	۱۲۸/۶۳	۱۰

(iteration) در قالب ماتریکس ژاکوب ثبت می گردد لذا PEST در انتهای اتوکالیبراسیون با استفاده از همین مشتقات جزئی حساسیت مطلق هر پارامتر را محاسبه می کند و سپس حساسیت نسبی محاسبه و پارامترها را بر این اساس رتبه بندی می کند. برای اطلاعات بیشتر در مورد روابط و معادلات حاکم بر مدل Wetspa و نرم افزار PEST به وبسایت مدل به آدرس (<http://www.vub.ac.be/WetSpa>) مراجعه کنند.

شبکه عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS)

در سال های اخیر از ترکیب منطق فازی با شبکه های عصبی مصنوعی، شبکه عصبی - فازی تطبیقی به وجود آمده اند. یکی از متداول ترین سیستم های عصبی - فازی، سیستم ANFIS است. این مدل یک سیستم فازی سوگنو (Sugeno) را در یک ساختار عصبی اجرا می کند و برای فرآیند آموزش از ترکیبی از روش های آموزش پس انتشار خطا و کمینه مربعات خطا بهره گیری می کند. در ANFIS قوانین ثابت است و آن چه بهینه سازی می شود پارامترهای توابع عضویت می باشد که برای تعیین پارامترهای توابع عضویت (یا همان شکل توابع عضویت) از الگوریتم های

آموزشی شبکه عصبی بهره گیری می شود. نوع توابع عضویت (مثلی، گوسی و ...) و تعداد توابع عضویت برای ورودی ها و خروجی ها به روش سعی و خطا تعیین می شود. در ANFIS لازم است که در لایه اول نوع توابع عضویت و تعداد آنها را مشخص گردد.

شعاع تأثیر

از مهم ترین پارامترهای قابل تنظیم در ANFIS می توان به شعاع تأثیر اشاره کرد. شعاع تأثیر مشخص کننده محدوده نفوذ یک مرکز خوشه در هر یک از ابعاد داده هاست. در این تحقیق از مقادیر اسکالری این شعاع برای به کارگیری در تمامی ابعاد داده ها بهره گرفته شده است. به منظور تصور بهتر این پارامتر می توان گفت شعاع تأثیر همانند کره ای است که مرکز خوشه در مرکز آن قرار گرفته است و تمامی داده های موجود در این فضا را تحت تأثیر خود قرار می دهد. به طور کلی محققین با تغییر مقادیر شعاع تأثیر سعی در دست یابی به شبکه های کارا تر را دارند، در این تحقیق به منظور جلوگیری از اتلاف وقت با نوشتن زیر برنامه در MATLAB میزان بهینه برای شعاع تأثیر

$$NSL = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{Si} + \varepsilon) - \ln(Q_{Oi} + \varepsilon)]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{Oi} + \varepsilon) - \ln(\overline{Q_0} + \varepsilon)]^2} \quad [4]$$

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Oi} + \overline{Q_0})(Q_{Si} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{Oi} + \overline{Q_0})(Q_{Oi} - \overline{Q_0})^2} \quad [5]$$

$$R_{mod} = \left[\frac{\min\{\delta_o, \delta_s\}}{\max\{\delta_o, \delta_s\}} * r \right] \quad [5]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - Q_{Si})^2} \quad [7]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{Oi} - Q_{Si}| \quad [8]$$

در روابط بالا MB انحراف مدل، MC: قابلیت اعتماد مدل، NS معیار ناش- ساتکلیف، NSL معیار ناش- ساتکلیف برای جریان‌های پایین، NSH معیار ناش- ساتکلیف برای جریان‌های بالا، R_{mod} : ضریب همبستگی اصلاح شده RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا و MAE میانگین قدرمطلق خطا است. Q_{oi}, Q_{si} : جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در گام زمانی i (متر مکعب بر ثانیه)، N : تعداد گام‌های زمانی $\overline{Q_0}$ متوسط دبی جریان مشاهده شده. δ_o و δ_s : به ترتیب انحراف نمایه دبی‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای و r : ضریب همبستگی دبی‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای. ε : مقدار بسیار کوچک اختیاری برای اجتناب از مشکلات ناشی از دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مساوی با صفر. در غیر این صورت فاکتور NSL باعث ایجاد بایاس می‌گردد. مقادیر MB پایین نشان دهنده برازش بهتر و میزان صفر نمایانگر شبیه‌سازی کامل میزان جریان مشاهده‌ای می‌باشد، مقدار MC بین صفر و ۱ متغیر است و مقدار مساوی با ۱، نمایانگر قابلیت اعتماد بالای مدل می‌باشد. مقدار NS، NSL و NSH از یک مقدار منفی تا ۱ در تغییر است و زمانی که میزان آن ۱ باشد، نمایانگر انطباق کامل بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده می‌باشد. RMSE هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد مدل از دقت بیشتری برخوردار است.

محاسبه شد و سپس شبکه با در نظر گرفتن مقدار بهینه شعاع تأثیر، مجدداً مدل وارد مرحله آموزش و آزمون گردید.

تعیین ساختار شبکه‌ها برای مدل‌سازی شبکه عصبی- فازی

تطبیقی

بدین منظور با استفاده از نمودار خودهمبستگی جزئی (Partial Autocorrelation) تعداد تأخیرهای لازم برای ورود متغیرهای ورودی به شبکه در نرم‌افزار Minitab ۱۴ به دست آمد. همچنین به دلیل همبستگی بالای تبخیر و دما از مدل‌سازی ترکیبی این دو متغیر صرف نظر گردید. در این تحقیق تعداد تأخیرها لازم برای بارندگی تا یک تأخیر، برای دما و تبخیر تا سه تأخیر مناسب تشخیص داده شد.

معرفی نمایه‌های کارایی و ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی بهترین برازش بین هیدروگراف‌های محاسبه‌شده و مشاهده‌ای، نمایه‌های ارزیابی انحراف مدل^۱ (Bias) (رابطه ۱)، قابلیت اعتماد مدل^۲ (Model Confidence) (رابطه ۲)، کارایی ناش- ساتکلیف^۳ (Nash-Sutcliffe) (رابطه ۳)، کارایی ناش- ساتکلیف برای ارزیابی جریان‌های پایین^۴ (Nash-Sutcliffe Low) (رابطه ۴)، کارایی ناش- ساتکلیف برای ارزیابی دبی‌های بالا^۵ (Nash-Sutcliffe High) (رابطه ۵)، ضریب همبستگی اصلاح شده^۶ (Modified Correlation Coefficient) (رابطه ۶)، ریشه میانگین مربعات خطا^۷ (Root Mean Squared Error) (رابطه ۷) و میانگین قدرمطلق خطا^۸ (Mean Absolute Error) (رابطه ۸) را نام برد.

$$MB = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Si} - Q_{Oi})}{\sum_{i=1}^N Q_{Oi}} \quad [1]$$

$$MC = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Si} - \overline{Q_0})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{Oi} - \overline{Q_0})^2} \quad [2]$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Si} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{Oi} - \overline{Q_0})^2} \quad [3]$$

جدول ۲. مقادیر نمایه های کارایی مدل WetSpa در دوره واسنجی و آزمون

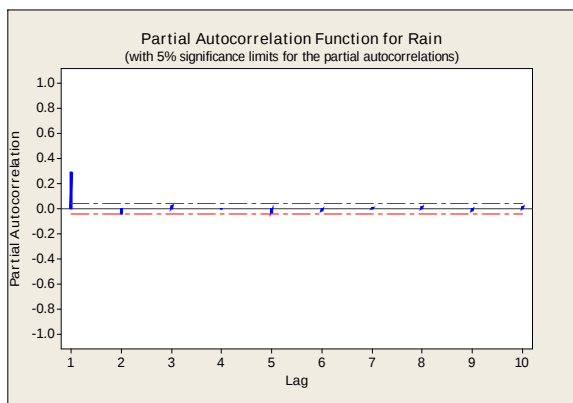
نمایه	واسنجی	آزمون
انحراف مدل	۰	۱/۳۸
قابلیت اعتماد مدل	۰/۶۰	۰/۶۶
نمایه ناش - ساتکلیف	۰/۱۹	۰/۲۴
نمایه ناش - ساتکلیف جریان های کم	۰/۵۹	۰/۶۴
نمایه ناش - ساتکلیف جریان های زیاد	۰/۲۱	۰/۳۰
ضریب همبستگی اصلاح شده	۰/۴۰	۰/۴۵
میانگین مطلق خطا	۰/۲۴	۰/۲۵
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۵۴	۰/۶۵

نتایج و بحث

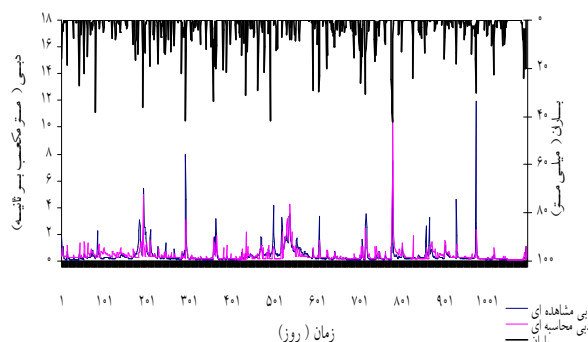
پس از تقسیم بندی داده ها برای دوره های واسنجی و آزمون در مدل WetSpa، در ادامه شبیه سازی در هر شبکه سلولی خصوصیات زمین شامل ارتفاع، جهت جریان، شبکه آبراهه، انشعابات رودخانه، رتبه آبراهه و شعاع هیدرولیکی از طریق مدل رقومی ارتفاعی تهیه شدند. سپس با استفاده از بافت خاک و مقادیر جدول های مرجع، هدایت هیدرولیکی خاک، تخلخل و ظرفیت زراعی، رطوبت باقیمانده و شاخص توزیع اندازه ذرات و نقطه پژمردگی گیاه به صورت نقشه محاسبه گردید. به طور مشابه نقشه های شبکه عمق جریان، ظرفیت ذخیره برگابی و ضریب زبری مانینگ براساس نقشه کاربری طبقه بندی شدند. نقشه های ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی نیز به صورت ترکیبی از کاربری، خاک و ارتفاع هستند. پس از تهیه نقشه ها مدل اجراء، و واسنجی پارامترها انجام شد. پارامترها، مقادیر اولیه و واسنجی شده توسط نرم افزار PEST در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج محاسبه حساسیت نسبی پارامترها نشان داد که از بین فاکتورهای موجود، فاکتور ضریب افت آب زیرزمینی (Kg) و پس از آن فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق (Kep) از

بیشترین حساسیت و ضریب روز درجه بارش (Krain) از کمترین حساسیت برخوردار است. نتایج بررسی معیارهای ارزیابی در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به معیارهای آماری مدل WetSpa جریان های پایه را با معیار تش - ساتکلیف ۰/۶۴ شبیه سازی نموده ولی در پیش بینی جریان های حداکثر موفق عمل نکرده است. همچنین انحراف مدل براساس جدول ۲ در مرحله واسنجی صفر و در مرحله آزمون ۱/۳۸ بوده است که نشان می دهد مدل WetSpa به مقدار بسیار کمی حجم جریان را بیشتر تخمین می زند. در شکل ۲ آب نمود مشاهده ای و شبیه سازی شده مدل WetSpa برای دوره آزمون در حوزه آبخیز کسلیان پس از واسنجی متغیرها ارائه شده است.

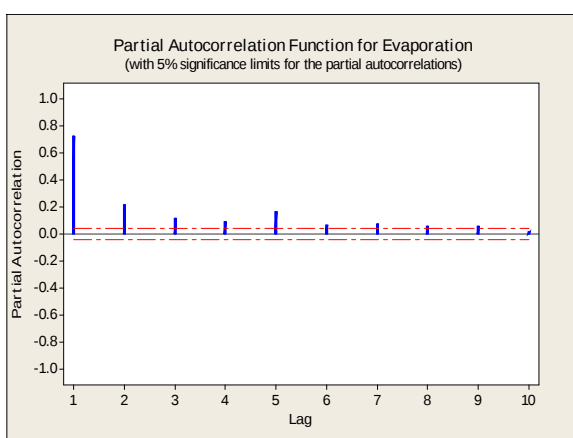
در بخش دوم این تحقیق کارایی مدل شبکه عصبی - فازی تطبیقی به منظور برآورد میزان رواناب روزانه حوزه آبخیز کسلیان مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا به منظور انجام تأخیرهای لازم برای مدل سازی متغیرهای ورودی به شبکه نمودار خودهمبستگی جزئی و متقاطع برای داده ها در سطح معنی داری ۰/۰۵ به دست آمد (شکل های ۳ تا ۵) که در نهایت ۱۴ ساختار مختلف برای مدل سازی تعیین شد (جدول ۳). سپس



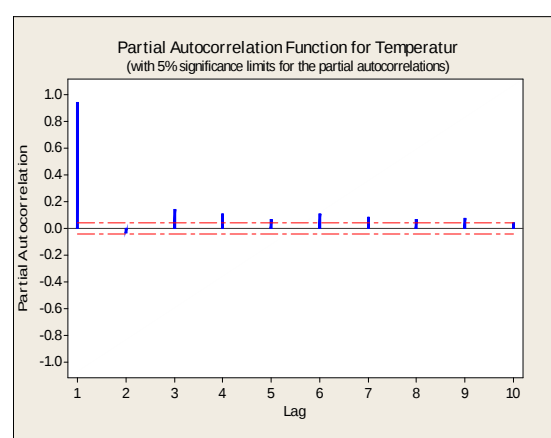
شکل ۳. تابع خودهمبستگی جزئی باران



شکل ۲. دبی روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روزانه مدل Wetspa برای دوره آزمون



شکل ۵. تابع خودهمبستگی جزئی تبخیر



شکل ۴. تابع خودهمبستگی جزئی دما

شاخص‌های کارآیی برای دوره‌های آموزش و آزمون برای مدل انتخاب شده به دست آمد (جدول ۶). شکل ۶ آب‌نمود مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل شبکه عصبی- فازی تطبیقی برای دوره آزمون ارائه شده است.

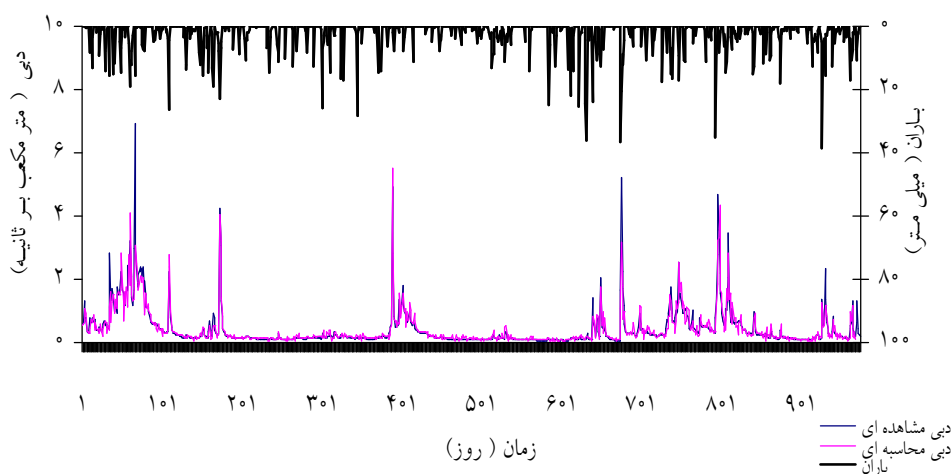
نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا مدل WetSpa در حوزه آبخیز کسلیان طی سال‌های آبی ۸۸-۱۳۸۲ اجرا شد. پس از واسنجی مدل، آنالیز حساسیت پارامترها با استفاده از نرم‌افزار PEST انجام شد که نتایج آن با تحقیقات بهره‌مند و دی‌اسمیت (۹) و نورمحمد و همکاران (۱۲) مبنی بر حساس بودن پارامترهای ذکر شده هم‌خوانی دارد. مقایسه آماری آب‌نمودهای محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی نیز نشان دهنده

ساختارهای ورودی پس از تقسیم‌بندی به مراحل آموزش و آزمون در کد نوشته شده در برنامه Matlab 2009 اجرا شد. سپس شبکه با در نظر گرفتن مقدار بهینه شعاع تأثیر، مجدد وارد مرحله آموزش و آزمون شد که نمایه نش- ساتکلیف ۰/۷۴ در مرحله آزمون به ازای مقدار بهینه شعاع برابر با ۰/۸۰ گردید. به عبارت دیگر شعاع تأثیر افزایشی ۶٪ را در میزان نمایه نش- ساتکلیف برای داده‌های آزمون به همراه داشت (جدول ۵). سپس نمایه‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا و ناش ساتکلیف برای تمام مدل‌ها تعیین گردید که در نهایت ساختار باران با یک روز تأخیر و تبخیر با یک روز تأخیر با تعداد قوانین فازی ۱۶ و تابع ناقوسی شکل تعمیم یافته به عنوان بهترین شبکه عصبی- فازی تطبیقی تعیین شد (جدول ۴). پس از آن نتایج حاصل از تعیین مقادیر

جدول ۳. ساختار ریاضی متغیرهای (باران R_t ، دما T_t و تبخیر E_t)

شماره مدل	ساختار ریاضی و متغیرها
۱	R_t
۲	R_t, R_{t-1}
۳	R_t, T_t
۴	R_t, T_t, T_{t-1}
۵	$R_t, R_{t-1}, T_t, T_{t-1}$
۶	$R_t, T_t, T_{t-1}, T_{t-2}$
۷	$R_t, R_{t-1}, T_t, T_{t-1}, T_{t-2}$
۸	$R_t, R_{t-1}, T_t, T_{t-1}, T_{t-2}, T_{t-3}$
۹	R_t, E_t
۱۰	R_t, R_{t-1}, E_t
۱۱	R_t, E_t, E_{t-1}
۱۲	$R_t, R_{t-1}, E_t, E_{t-1}$
۱۳	$R_t, R_{t-1}, E_t, E_{t-1}, E_{t-2}$
۱۴	$R_t, R_{t-1}, E_t, E_{t-1}, E_{t-2}, E_{t-3}$



شکل ۶. دبی روزانه مشاهده ای و شبیه سازی شده شبکه عصبی- فازی تطبیقی برای دوره آزمون

جریان های کم برآورد کرده اند. علت پایین بودن نمایه نش- ساتکیف برای جریان های بالا در این تحقیق را می توان به کوچک بودن حوزه آبخیز و استفاده از داده های روزانه به جای داده های ساعتی مرتبط دانست. چرا که زمان پیمایش جریان حوزه آبخیز کمتر از ۲۴ ساعت (حداکثر ۱۰/۴ ساعت) است.

تطابق نسبتاً خوبی بین دو آب نمود در جریان های کم می باشند. نتایج این تحقیق با نتایج لیو و دی اسمیت (۱۱) و بهره مند و همکاران (۹) مبنی بر پایین تر بودن نمایه نش- ساتکیف برای جریان های کم هم خوانی ندارد. این محققین در تحقیقات خود نمایه نش- ساتکیف را برای جریان های حداکثر را بیش از

جدول ۴. نمایه‌های ریشه میانگین مربعات خطا و نش - ساتکلیف برای آرایش‌های مختلف ANFIS

شماره مدل	تعداد قوانین	دوره آموزش		دوره آزمون	
		NSH	RMSE	NSH	RMSE
۱	۲	۰/۳۶	۰/۰۵۵	۰/۳۰	۰/۰۵۰
۲	۴	۰/۴۸	۰/۰۵۰	۰/۴۰	۰/۰۴۹
۳	۴	۰/۵۰	۰/۰۴۹	۰/۲۷	۰/۰۵۲
۴	۸	۰/۶۱	۰/۰۴۳	۰/۳۶	۰/۰۵۹
۵	۱۶	۰/۷۰	۰/۰۳۸	۰/۵۱	۰/۰۵۴
۶	۱۶	۰/۶۸	۰/۰۳۹	۰/۵	۰/۰۶۲
۷	۳۲	۰/۶۹	۰/۰۳۱	۰/۵۳	۰/۰۶۵
۸	۶۴	۰/۶۰	۰/۰۲۳	۰/۴۵	۰/۱۱۲
۹	۴	۰/۵۵	۰/۰۴۷	۰/۳۲	۰/۰۵۰
۱۰	۴	۰/۶۴	۰/۰۵۰	۰/۵۴	۰/۰۴۹
۱۱	۴	۰/۶۲	۰/۰۴۵	۰/۴۷	۰/۰۵۰
۱۲	۱۶	۰/۸۲	۰/۰۳۸	۰/۸۰	۰/۰۵۶
۱۳	۳۲	۰/۷۶	۰/۰۳۴	۰/۷۱	۰/۰۷۶
۱۴	۶۴	۰/۷۴	۰/۰۳۰	۰/۶۹	۰/۰۸۰

جدول ۵. مقایسه نتایج حاصل از عملکرد شبکه به ازای مقادیر اولیه و بهینه شعاع

مرحله دست‌یابی به شعاع بهینه	آموزش		آزمون	
	NSH	RMSE	NSH	RMSE
سعی اول	۰/۰۴۳	۰/۰۷۷	۰/۰۶۴	۰/۰۷۴
مقدار بهینه	۰/۰۳۸	۰/۰۸۲	۰/۰۵۶	۰/۰۸۰

این نتیجه‌گیری متفاوت با نتایج به‌دست آمده توسط این محققین ناشی از حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه باشد. حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در پژوهش‌های این محققین شامل حوزه‌های آبخیز بزرگ با توپوگرافی تقریباً یکنواخت است، ولی حوزه آبخیز مورد مطالعه در این تحقیق دارای توپوگرافی پیچیده می‌باشد. عامل دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد این است که مدل WetSpa برای شرایط اقلیمی و جغرافیایی کشور بلژیک توسعه داده شده است و برای کشور ایران که شرایط خاص آب و هوایی دارد نمی‌تواند مبنا قرار گیرد. به‌طور کلی در این تحقیق مدل WetSpa دارای معایب و

مزایایی بوده که از مزایای اصلی آن می‌توان به ارتباط با سامانه اطلاعات جغرافیایی برای تولید نقشه‌های توزیعی مورد نیاز برای مدل‌سازی، نیاز به ورودی‌های کم برای اجراء (کاربری اراضی، مدل رقومی ارتفاع و نوع خاک)، وجود یک الگوریتم کمکی به‌نام PEST برای واسنجی و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل اشاره کرد و همچنین از معایب آن می‌توان به استفاده از روش تیسن برای مناطق کوهستانی باتوجه به این‌که آبخیز مورد نظر یک آبخیز کوهستانی می‌باشد و ادغام تعدادی از کاربری‌ها در طبقات یکسان در آبخیز مورد نظر باتوجه به این‌که آبخیز دارای کاربری‌های مختلفی می‌باشد، و

جدول ۶. مقادیر نمایه‌های کارایی مدل انتخاب شده شبکه عصبی - فازی تطبیقی در دوره‌های مختلف

نمایه	آموزش	آزمون
انحراف مدل	۰/۰۱	۰/۰۱
قابلیت اعتماد مدل	۰/۷۷	۰/۸۱
معیار نش - ساتکلیف	۰/۸۲	۰/۸۰
معیار نش - ساتکلیف جریان‌های کم	۰/۹۰	۰/۸۶
معیار نش - ساتکلیف جریان‌های زیاد	۰/۸۵	۰/۷۸
ضریب همبستگی اصلاح شده	۰/۷۹	۰/۸۱
میانگین مطلق خطا	۰/۱۳	۰/۱۱
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۰۳۸	۰/۰۵۶

همچنین محاسبه رواناب سطحی در مدل با استفاده از روش استدلالی که یک روش تجربی می‌باشد و ثابت فرض کردن سرعت جریان در آبخیز مورد نظر اشاره نمود.

در بخش دوم این تحقیق کارایی مدل شبکه عصبی - فازی تطبیقی به منظور برآورد میزان رواناب روزانه حوزه آبخیز کسلیان مورد بررسی قرار گرفت به طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش نیز، همانند برخی از تحقیقات انجام شده در داخل و خارج از کشور، نشان دهنده قدرت و توانایی روش‌های هوشمند در مدل کردن پدیده بارش - رواناب دارد که نتایج آن با توکر و مارکوس (۱۵)، نیلسون و همکاران (۱۳) و احم‌ت نور (۸) همخوانی دارد. به طور کلی روش‌های هوشمند به دلیل ساختار غیرخطی خود نسبت به مدل فیزیکی WetSpa از پیچیدگی کمتری برخوردار بوده ولی عیب عمده این روش‌ها

جعبه سیاه بودن آنهاست که کاربر از درون سیستم اطلاع چندانی ندارد. در انتها با توجه به این که برای اولین بار در این تحقیق در داخل کشور در یک حوزه آبخیز کوچک انجام گرفت، پیشنهاد می‌شود در حوزه‌های آبخیز کوچک دیگری مدل WetSpa مورد ارزیابی قرار گیرد تا دقت و صحت این مدل در این آبخیزها بررسی شود. همچنین در این تحقیق از شبکه عصبی - فازی تطبیقی استفاده شد، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از سایر روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی - فازی، الگوریتم ژنتیک و موجک در این حوزه آبخیز استفاده شود و نتایج آن با این تحقیق مقایسه گردد.

منابع مورد استفاده

۱. سلاجقه، ع.، ا. ح. فتح‌آبادی و م. مهدوی. ۱۳۸۸. بررسی کارایی روش‌های عصبی - فازی و مدل‌های آماری در شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب. مجله‌ی منابع طبیعی ایران، نشریه مرتع و آبخیزداری ۶۲ (۱): ۶۵ - ۷۰.
۲. سلطانی، س. و س. مرید. ۱۳۸۱. مقایسه مدل‌های تفهیمی با شبکه‌های عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی بارش - رواناب. ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۸۱.
۳. جهانگیر، ع.، م. رائینی سرجاز و م. ضیاءتباراحمدی. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب با شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مقایسه با مدل HEC-HMS در حوزه معرف کارده، آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۲ (۲): ۷۲-۸۴.

۴. حسینی، ه. ۱۳۷۸. مدل شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین هیدروگراف سیلاب، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۰۳ص.
۵. مرادی پور، ش.، ع. ر. بهره‌مند، ح. زینی‌وند و ع. نجفی‌نژاد. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی توزیعی - مکانی سیل با مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوزه آبخیز طالقان. هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه صنعتی اصفهان ۷ تا ۸ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۰.
۶. یعقوبی، ف.، ع. ر. بهره‌مند و ن. نورا. ۱۳۸۹. تهیه نقشه ضریب پتانسیل رواناب حوضه چهل‌چای با استفاده از مدل WetSpa. ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، ۸ تا ۹ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۹.
7. Anctil, F., C. H. Perrin and V. Andreassian. 2003. Impact of the length of observed records on the performance of ANN and of conceptual parsimonious rainfall-runoff forecasting models. *Environ. Model. Softw.* 19: 357-368.
8. Ahmat Nor, N. I. B. 2005. Rainfall-runoff modelling using artificial neural network method, Doctor of Philosophy Dissertation, Faculty of Civil Engineering, Malaysia Technology University.
9. Bahremand, A. F. De Smedt. J. Corluy. Y. B. Liu. J. Poorova. L. Velcicka and E. Kunikova. 2007. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in in Margecany-Hornad watershed, Slovakia, *Water Resour. Manag.* 21: 373-1391.
10. Gebremeskel, S., Y. B. Liu and De F. Smedt. 2002. GIS based distributed modeling for flood estimation, *Proceeding of the Twenty_Second Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, 1-4 April, Colorado State University, USA.
11. Liu, Y. B., F. Gebremeskel. S. De Smedt. L. Hoffmann and S. Fister. 2004. Assessing land use impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach. *Environ. Model. Assess.* 18(9): 227-235.
12. Nurmohamed, R., S. Naipal and F. De Smedt. 2006. Hydrologic Modeling of the Upper Suriname, *J. Spat. Hydrol.*, 1(6):1-17.
13. Nilsson, P., C. B. Uvo and R. Bentsen. 2005. Monthly runoff simulation: comparing and combining conceptual and neural network models, *J. Hydrol.* 321(1-4):344-363.
14. Sajjad Khan, M. and P. Coulibaly. 2006. Bayesian Neural Network for Rainfall-Runoff Modeling, *Water Resour. Res.* 42(W07409).
15. Toker, A. S. and M. Markus. 2000. Precipitation-Runoff Modeling using Artificial Neural Network and Conceptual Models, *J. Hydrol. Eng.*, 5(2):156-161.
16. Wang, Z. O. Batelaan and F. De Smedt. 1997. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa), *Phys. Chem. Earth*, 21:189-193.
17. Zeinivand, H. and F. De Smedt. 2009. Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment transport at watershed scale. *World Environmental & Water Resources Congress (EWRI)*, 17-21 May, Kansas City, USA.