

مقایسه مدل هیدرولوژیک توزیعی Wetspa و شبکه عصبی- فازی تطبیقی در شبیه‌سازی بارش- رواناب در حوزه آبخیز کسیلیان

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

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

چکیده

مدل‌سازی فرایند بارش- رواناب و پیش‌بینی دبی رودخانه یک اقدام مهم در مدیریت و مهار سیلاب‌ها، طراحی سازه‌های آبی در حوزه‌های آبخیز و مدیریت خشکسالی است. هدف این تحقیق شبیه‌سازی جریان روزانه در حوزه آبخیز کسیلیان با مدل WetSpa و شبکه عصبی- فازی تطبیقی است. WetSpa یک مدل پیوسته هیدرولوژیک- فیزیکی است که قابلیت پیش‌بینی سیلاب در مقایس حوزه آبخیز با گام‌های زمانی مختلف را دارد و شبکه عصبی- فازی تطبیقی هم جزء مدل‌های جعبه سیاه می‌باشد که امروزه مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این تحقیق از آمار باران، تبخر و دمای استگاه هواشناسی سنجکده و آمار دبی ایستگاه و لیکن طی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۸۲ استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی با مدل WetSpa نشان داد که این مدل به خوبی توانسته جریان پایه رودخانه را با معیار ناش ساتکلیف ۰/۶۴ در مرحله آزمون شبیه‌سازی نماید ولی در شبیه‌سازی جریان‌های سیلابی با خطأ همراه است که دلیل آن را می‌توان به کوچک بودن آبخیز و کوتاه بودن زمان پیمایش اشاره کرد. همچنین این مدل به خوبی توانسته بیلان آب حوزه آبخیز کسیلیان را شبیه‌سازی کند. آنالیز حساسیت پارامترهای مدل نشان داد که ضربی افت آب زیرزمینی از بیشترین حساسیت و ضربی روز درجه بارش از کمترین حساسیت برخوردار است. همچنین شبکه عصبی- فازی تطبیقی با ورودی باران با یک روز تأخیر و تبخر با یک روز تأخیر با معیار ناش ساتکلیف ۰/۸۰ در دوره آزمون پاسخ‌های قابل قبول تری نسبت به مدل WetSpa با معیار ناش ساتکلیف ۰/۲۴ داشت.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی بارش- رواناب، مدل WetSpa، شبکه عصبی- فازی تطبیقی، جریان پایه، حوزه آبخیز کسیلیان

۱. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریانی، 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

به دست آوردن 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 به کارگیری روش‌های هوشمند در شبیه‌سازی در زمینه‌های مختلف متداول شده و این روش نیز نتایج بسیار مناسبی را به همراه داشته است در زمینه مقایسه مدل‌های هیدرولوژیکی 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 چند لایه، 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^(۸) 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 مریلندر آمریکا مدل‌سازی کرده و نتایج حاصله را با مدل مفهومی (Water balance) مقایسه کردند. نتایج نشان داد شبکه عصبی مصنوعی در همه موارد دارای کارآیی بالاتری است. احمد نور^(۹) 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 و رگرسیون چندمتغیره مقایسه نمود. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی به طور مطلوبی می‌تواند رواناب را شبیه‌سازی نماید و همبستگی بالایی با نتایج خروجی مدل‌های مذکور داشت. نیلسون و همکاران^(۱۰) 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^(۱۱) شبکه عصبی بیزی را برای مدل‌سازی بارش - رواناب استفاده نمودند

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^(۱۲). 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 واقعی تر از سیستم فیزیکی، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک توزیعی نسبت به مدل‌های یکپارچه ارجحیت Water and Energy Transfer between Wetspa^(۱۳) دارد. مدل پیوسته (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 دارد^(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 در ۸۴/۸۵ درصد برآورد کردند. نتایج، بیانگر قابلیت بالای مدل در برآورد مؤلفه‌های هیدرولوژیک و به تبع آن شبیه‌سازی دقیق تر بیلان آبی بود. یعقوبی و همکاران^(۶) در حوزه آبخیز چهل‌چای گلستان نقشه ضریب رواناب را با استفاده از مدل

رواناب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی حوزه آبخیز مورد تحقیق

حوزه آبخیز کسیلیان با مساحت ۶۶/۷۵ کیلومترمربع در محدوده جغرافیایی $18^{\circ} ۵۳' \text{ تا } ۳۰^{\circ} ۵۳'$ طول شرقی و $۵۸^{\circ} ۳۵' \text{ تا } ۷^{\circ} ۳۶'$ عرض شمالی واقع است و از زیرحوزه‌های آبخیز رودخانه تالار در مازندران بهشمار می‌رود. این آبخیز با توجه به شرایط طبیعی و آب و هوایی خود به عنوان معرف مناطق کوهستانی و جنگلی در نظر گرفته می‌شود. متوسط بارندگی منطقه ۷۹۱ میلی‌متر بوده و عمدتاً به صورت باران ریزش می‌نماید. اقلیم منطقه براساس روش آمبرژه نیمه مرطوب سرد می‌باشد. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز کسیلیان در استان مازندران و ایران را نشان می‌دهد.

جمع آوری آمار و اطلاعات

ابتدا با مراجعه به سازمان نقشه‌برداری کشور نقشه رقومی ۱:۵۰۰۰۰ توپوگرافی حوزه آبخیز کسیلیان تهیه شد، سپس با مراجعه به اداره منابع طبیعی استان مازندران نقشه‌های خاک‌شناسی و کاربری اراضی که از تصویر ماهواره‌ای 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 نقشه‌ها صحت نقشه‌ها با بازدیدهای میدانی تایید شد. سپس با بررسی آمار ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در محدوده حوزه آبخیز کسیلیان و با توجه به هدف تحقیق و نیاز مدل WetSpa به ورودی‌های با گام زمانی روزانه، پیوسته و همزمان بودن سری زمانی، نهایتاً دوره زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ انتخاب شد. سپس سال‌های آبی ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵ به مدت ۳۶ ماه برای واسنجی (Calibration) و از بهمن‌ماه ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸ به مدت ۳۰ ماه برای آزمون (Test) مدل WetSpa انتخاب شد. به‌منظور مقایسه نتایج، برای سیستم عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS) نیز از همین تقسیم‌بندی داده‌ها برای دوره آموزش و

و با نتایج شبکه عصبی مصنوعی استاندارد و مدل بارش- رواناب ۹۶-HBV 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 می‌نماید. سلطانی و مرید (۲) با مقایسه عملکرد مدل‌های SAC-SMA و SWAT و شبکه‌های عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب، عنوان کردند که شبکه‌های 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 نرم‌افزار HEC-HMS با استفاده از روش سرویس حفاظت خاک امریکا (SCS) برای پیش‌بینی هیدروگراف سیل در حوزه آبخیز باروت آغاجی، ناورود آسالم و ابوالعباس استفاده نمود. نتایج نشان داد که در این آبخیزها دقت پیش‌بینی شبکه عصبی بهتر از هیدروگراف واحد SCS است. جهانگیر و همکاران (۳) در پژوهشی مقایسه کارآمدی شبکه‌های عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی 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 معنی‌داری میان دو روش وجود ندارد، ولی مقایسه عملکرد شبکه و روش سرویس حفاظت خاک امریکا (SCS) به کار رفته نشان می‌دهد 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 بر می‌آید که مدل WetSpa اغلب در حوزه‌های آبخیز بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است، همچنین تاکنون مقایسه‌ای بین مدل هیدرولوژیک توزیعی WetSpa و روش‌های هوشمند انجام نشده است، به همین منظور هدف از مطالعه حاضر آزمایش توانایی مدل در حوزه‌های آبخیز کوچک برای شبیه‌سازی بارش- رواناب و همچنین استفاده از شبکه عصبی- فازی تطبیقی در حوزه آبخیز کسیلیان و ارزیابی نتایج آن با مدل هیدرولوژیک توزیعی WetSpa و ارزیابی دقت و توانایی‌ها و مزایا و معایب هر یک از این مدل‌ها در پیش‌بینی



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

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. بدین‌منظور ابتدا مدل تا حدود زیادی به صورت دستی کالیبره شد، و در این مرحله پارامتر حساس و کلیدی‌تر 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

آزمون استفاده گردید.

WetSpa مدل

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. فرآیندهای هیدرولوژیک مدل شامل بارش، ذوب برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمیقی، 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 استدلای اصلاح شده (روش ضریب رواناب مبتنی بر رطوبت خاک) و بر مبنای خصوصیات هر شبکه شامل

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 (-)	۱/۶۶	۱/۹۱	۷
K_g	ضریب افت آب زیرزمینی (بر روز)	۰/۰۰۲۶۵۸	۰/۰۰۴۷	۱
K_{ss}	رطوبت اولیه خاک(میلی‌متر)	۰/۸۸	۰/۹۲	۳
K_{ep}	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر)	۱/۳۹	۱/۳۶	۲
G_0	ذخیره آب زیرزمینی اولیه (میلی‌متر)	۱۶۰	۱۵۰	۸
G_{max}	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (میلی‌متر)	۵۲۷/۹۹۳	۲۱۶/۲۶	۹
T_0	ضریب درجه حرارت آستانه (درجه سانتی‌گراد)	۱/۰۵	۰/۹۹	۶
K_{snow}	ضریب درجه روز درجه حرارت (میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد بر روز)	۰/۷۹	۰/۷۵	۴
K_{rain}	ضریب روز درجه بارش (بر درجه سانتی‌گراد بر روز)	۱/۸۸	۱/۷۹	۱۱
K_{run}	توان رواناب سطحی برای شدت بارندگی صفر(-)	۴/۸۱	۵/۹۰	۵
P_{max}	حداکثر شدت بارش (میلی‌متر بر روز)	۱۲۸/۶۳	۵۹/۵۳	۱۰

آموزشی شبکه عصبی بهره‌گیری می‌شود. نوع توابع عضویت (مثلثی، گوسی و ...) و تعداد توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی‌ها به روش سعی و خطای تعیین می‌شود. در ANFIS لازم است که در لایه اول نوع توابع عضویت و تعداد آنها را مشخص گردد.

شعاع تأثیر

از مهم‌ترین پارامترهای قابل تنظیم در ANFIS می‌توان به شعاع تأثیر اشاره کرد. شعاع تأثیر مشخص کننده محدوده نفوذ یک مرکز خوش در هر یک از ابعاد داده‌های است. در این تحقیق از مقادیر اسکالاری این شعاع برای به کارگیری در تمامی ابعاد داده‌ها بهره گرفته شده است. به منظور تصور بهتر این پارامتر می‌توان گفت شعاع تأثیر همانند کره‌ای است که مرکز خوش در مرکز آن قرار گرفته است و تمامی داده‌های موجود در این فضا را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. به طور کلی محققین با تغییر مقادیر شعاع تأثیر سعی در دست‌یابی به شبکه‌های کاراتر را دارند، در این تحقیق به منظور جلوگیری از اتلاف وقت با نوشتن زیر برنامه در MATLAB میزان بهینه برای شعاع تأثیر

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

شبکه عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS)

در سال‌های اخیر از ترکیب منطق فازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه عصبی- فازی تطبیقی به وجود آمده‌اند. یکی از متدائل‌ترین سیستم‌های عصبی- فازی، سیستم ANFIS است. این مدل یک سیستم فازی سوگنو (Sugeno) را در یک ساختار عصبی اجرا می‌کند و برای فرآیند آموزش از ترکیبی از روش‌های آموزش پس انتشار خطای و کمینه مربعات خطای بهره‌گیری می‌شود. در ANFIS قوانین ثابت است و آن چه بهینه‌سازی می‌شود پارامترهای توابع عضویت می‌باشد که برای تعیین پارامترهای توابع عضویت (یا همان شکل توابع عضویت) از الگوریتم‌های

$$NSL = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Qs_i + \varepsilon) - \ln(Qo_i + \varepsilon)]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Qo_i + \varepsilon) - \ln(\bar{Qo} + \varepsilon)]^2} \quad [4]$$

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qo_i + \bar{Qo})(Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qo_i + \bar{Qo})(Qo_i - \bar{Qo})^2} \quad [5]$$

$$R_{mod} = \left[\frac{\min\{\delta_o, \delta_s\}}{\max\{\delta_o, \delta_s\}} * r \right] \quad [6]$$

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

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Qo_i - Qs_i| \quad [8]$$

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 خطأ و MAE میانگین قدرمطلق خطأ است. Qo_i, Qs_i : جریان شبیه‌سازی شده و مشاهدهای در گام زمانی i (مترمکعب بر ثانیه)، N: تعداد گام‌های زمانی \bar{Q}_o 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. e: 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 پایین نشان دهنده برآذش 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

بدین‌منظور 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 برآذش بین هیدروگراف‌های محاسبه شده 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 خطأ^۷ (Root Mean Squared Error) (رابطه ۷) و میانگین قدرمطلق خطأ^۸ (Mean Absolute Error) (رابطه ۸) را نام برد.

$$MB = \frac{\sum_{i=1}^N (Qs_i - Qo_i)}{\sum_{i=1}^N Qo_i} \quad [1]$$

$$MC = \frac{\sum_{i=1}^N (Qs_i - \bar{Qo})^2}{\sum_{i=1}^N (Qo_i - \bar{Qo})^2} \quad [2]$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qo_i - \bar{Qo})^2} \quad [3]$$

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

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

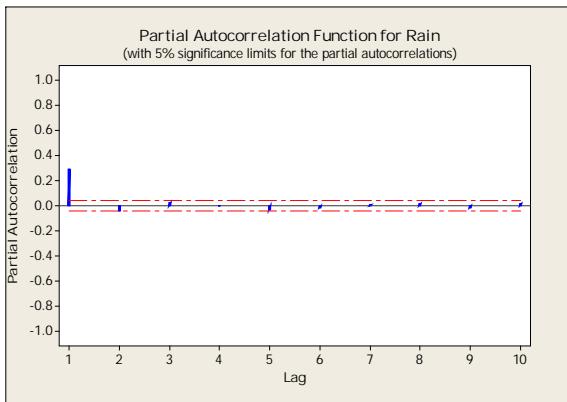
بیشترین حساسیت و ضریب روز درجه بارش (Krain) از

کمترین حساسیت برخوردار است. نتایج بررسی معیارهای ارزیابی در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به معیارهای آماری مدل WetSpa جریان‌های پایه را با معیار تش- ساتکلیف ۰/۶۴ ° شبیه‌سازی نموده ولی در پیش‌بینی جریان‌های 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 می‌دهد مدل WetSpa به مقدار بسیار کمی حجم جریان را بیشتر تخمین می‌زند. در شکل ۲ آب‌نمود مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل WetSpa برای دوره آزمون در حوزه آبخیز کسیلیان پس از واسنجی متغیرها ارائه شده است.

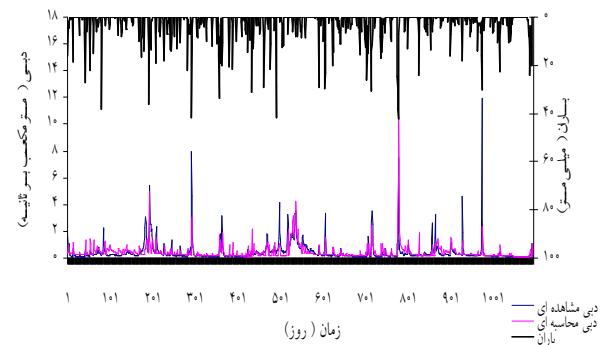
در بخش دوم این تحقیق کارایی مدل شبکه عصبی- فازی تطبیقی به منظور برآورد میزان رواناب روزانه حوزه آبخیز کسیلیان مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا به منظور انجام تأثیرهای لازم برای مدل‌سازی متغیرهای ورودی به شبکه نمودار خودهمبستگی جزئی و متقاطع برای داده‌ها در سطح معنی داری ۰/۰۵ به دست آمد (شکل‌های ۳ تا ۵) که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

نتایج و بحث

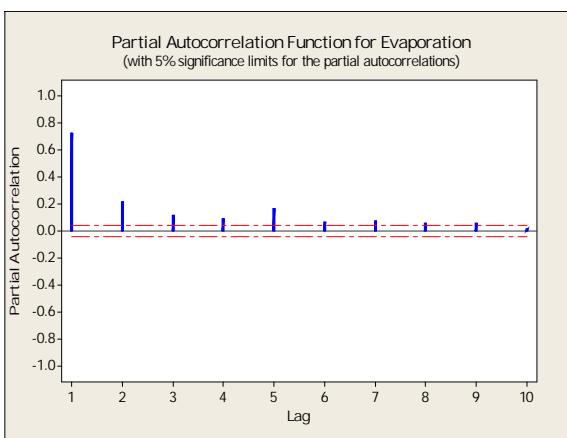
پس از تقسیم‌بندی داده‌ها برای دوره‌های واسنجی و آزمون در مدل WetSpa، در ادامه شبیه‌سازی در هر شبکه سلولی خصوصیات زمین شامل ارتفاع، جهت جریان، شبکه آبراهه، انشعابات رودخانه، رتبه آبراهه و شعاع هیدرولیکی از طریق مدل رقومی ارتفاعی تهیه شدند. سپس با استفاده از بافت خاک و مقادیر جدول‌های مرجع، هدایت هیدرولیکی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



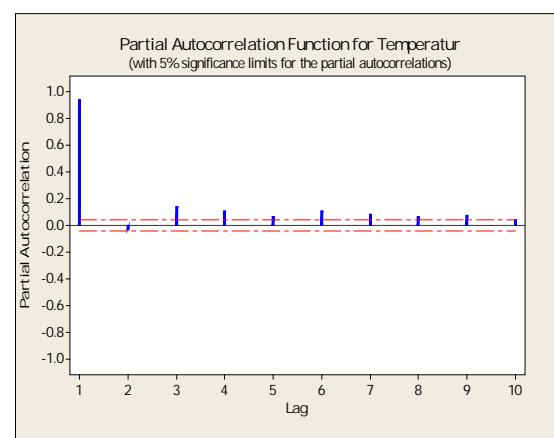
شکل ۳. تابع خودهمبستگی جزئی باران



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



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.

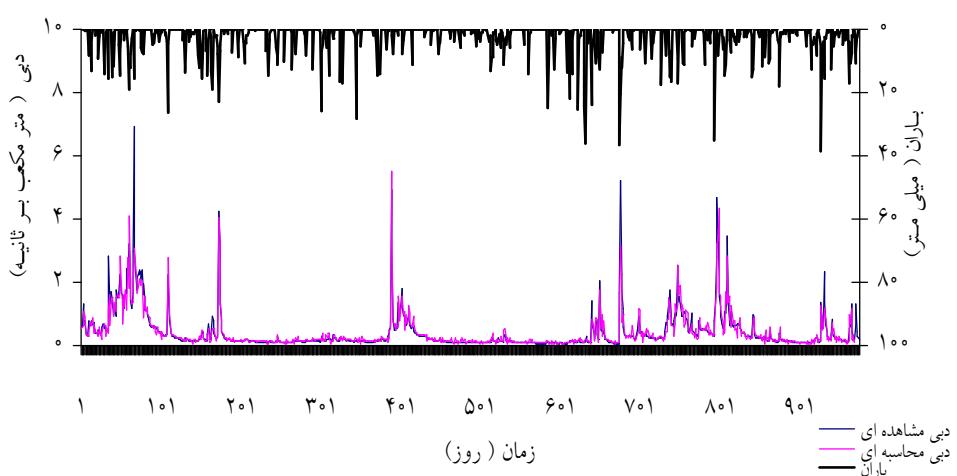
نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا مدل WetSpa در حوزه آبخیز کسیلیان طی سال‌های آبی ۱۳۸۲-۸۸ 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

ساخترهای 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 ۷۴ در مرحله آزمون به ازای مقدار بهینه شعاع برابر با 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 خطأ 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 تعیین 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 نبخار 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 مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده شبکه عصبی- فازی تطبیقی برای دوره آزمون

جريان‌های کم برآورد کرده‌اند. علت پایین بودن نمایه نش- ساتکلیف برای جريان‌های بالا در این تحقیق را می‌توان به کوچک بودن حوزه آبخیز و استفاده از داده‌های روزانه به جای داده‌های ساعتی مرتبط دانست. چرا که زمان پیمایش جريان حوزه آبخیز کمتر از ۲۴ ساعت (حداکثر $10/4$ ساعت) است.

تطابق نسبتاً خوبی بین دو آب نمود در جريان‌های کم می‌باشدند. نتایج اين تحقیق با نتایج ليو و دي اسميت (11) و بهره‌مند و همکاران (9) مبنی بر پایین تر بودن نمایه نش- ساتکلیف برای جريان‌های کم هم خوانی ندارد. اين محققین در تحقیقات خود نمایه نش- ساتکلیف را برای جريان‌های حداکثر را بيش از

جدول ۴. نمایه‌های ریشه میانگین مریعات خطأ و نش - ساتکلیف برای آرایش‌های مختلف ANFIS

شماره مدل	تعداد قوانین	دوره آموزش	دوره آزمون	دوره آزمون	NSH	RMSE
۱	۲	۰/۰۵۵	۰/۳۶	۰/۰۵۰	۰/۳۰	۰/۰۵۰
۲	۴	۰/۰۵۰	۰/۴۸	۰/۰۴۹	۰/۴۰	۰/۰۴۹
۳	۴	۰/۰۴۹	۰/۵۰	۰/۰۵۲	۰/۲۷	۰/۰۵۲
۴	۸	۰/۰۴۳	۰/۶۱	۰/۰۵۹	۰/۳۶	۰/۰۵۹
۵	۱۶	۰/۰۳۸	۰/۷۰	۰/۰۵۴	۰/۵۱	۰/۰۵۴
۶	۱۶	۰/۰۳۹	۰/۶۸	۰/۰۶۲	۰/۵	۰/۰۶۲
۷	۳۲	۰/۰۳۱	۰/۶۹	۰/۰۶۵	۰/۵۳	۰/۰۶۵
۸	۶۴	۰/۰۲۳	۰/۶۰	۰/۱۱۲	۰/۴۵	۰/۰۱۲
۹	۴	۰/۰۴۷	۰/۵۵	۰/۰۵۰	۰/۳۲	۰/۰۵۰
۱۰	۴	۰/۰۵۰	۰/۶۴	۰/۰۴۹	۰/۵۴	۰/۰۴۹
۱۱	۴	۰/۰۴۵	۰/۶۲	۰/۰۵۰	۰/۴۷	۰/۰۵۰
۱۲	۱۶	۰/۰۳۸	۰/۸۲	۰/۰۵۶	۰/۸۰	۰/۰۵۶
۱۳	۳۲	۰/۰۳۴	۰/۷۶	۰/۰۷۶	۰/۷۱	۰/۰۷۶
۱۴	۶۴	۰/۰۳۰	۰/۷۴	۰/۰۸۰	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	۰/۷۷	۰/۷۴	۰/۰۶۴	۰/۷۴	۰/۰۶۴
مقدار بهینه	۰/۰۳۸	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۰۵۶	۰/۸۰	۰/۰۵۶

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 به نام PEST برای واسنجی و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل اشاره کرد و همچنین از معایب آن می‌توان به استفاده از روش تیسن برای مناطق کوهستانی با توجه به این‌که آبخیز مورد نظر یک آبخیز کوهستانی می‌باشد و ادغام تعدادی از کاربری‌ها در طبقات یکسان در آبخیز مورد نظر با توجه به این‌که آبخیز دارد نمی‌تواند مبنای قرار گیرد.

این نتیجه‌گیری متفاوت با نتایج به دست آمده توسط این محققین ناشی از حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه باشد. حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در پژوهش‌های این محققین شامل حوزه‌های آبخیز بزرگ با تپوگرافی تقریباً یکنواخت است، ولی حوزه آبخیز مورد مطالعه در این تحقیق دارای تپوگرافی 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 مبنای قرار گیرد. به طور کلی در این تحقیق مدل WetSpa دارای معایب و

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

نمایه	آموزش	آزمون
انحراف مدل	۰/۱۰	-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

جعبه سیاه بودن آنهاست که کاربر از درون سیستم اطلاع چندانی ندارد. در انتهای 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 شبکه عصبی- فازی، الگوریتم زننیک و موجک در این حوزه آبخیز استفاده شود و نتایج آن با این تحقیق مقایسه گردد.

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 به‌منظور برآورده میزان رواناب روزانه حوزه آبخیز کسیلیان مورد بررسی قرار گرفت به‌طور 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 احمات نور(۸) همخوانی دارد. به‌طور کلی روش‌های هوشمند به‌دلیل ساختار غیرخطی خود نسبت به مدل فیزیکی WetSpa از پیچیدگی کمتری برخوردار بوده ولی عیب عملده این روش‌ها

منابع مورد استفاده

۱. سلاجمق، 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 هیدرولوگراف سیلاب، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۰۳ ص.
۵. مرادی پور، ش.، ع. ر. بهره‌مند، ح. زینی وند و ع. نجفی نژاد. 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 اردیبهشت ماه 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 اردیبهشت ماه 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 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.