[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]

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 مقیاس حوزه آبخیز با گام‌های زمانی مختلف را داراست و شبکه عصبی- فازی تطبیقی هم جزء مدل‌های جعبه سیاه می‌باشند که امروزه مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این تحقیق از آمار باران، تبخیر و دمای ایستگاه هواشناسی سنگده و آمار دبی ایستگاه ولیک‌بن طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی با مدل WetSpa نشان داد که این مدل به‌خوبی توانسته جریان پایه رودخانه را با معیار ناش ساتکلیف ۰/۶۴ در مرحله آزمون شبیه‌سازی نماید ولی در شبیه‌سازی جریان‌های سیلابی با خطا همراه است که دلیل آن را می‌توان به کوچک بودن آبخیز و کوتاه بودن زمان پیمایش اشاره کرد. همچنین این مدل به‌خوبی توانسته بیلان آب حوزه آبخیز کسیلیان را شبیه‌سازی 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 پاسخ‌های قابل قبول‌تری 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 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 مولنبیک 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 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 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 مریلند 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 کارآیی 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 وسونگای 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]

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 به‌صورت 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 فرآیند 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) به‌کار 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 برمی‌آید 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، به‌همین 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 رواناب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی حوزه آبخیز مورد تحقیق

حوزه آبخیز کسیلیان با مساحت ۶۶/۷۵ کیلومترمربع در محدوده جغرافیایی ' ۱۸ ° ۵۳ تا ' ۳۰ ° ۵۳ طول شرقی و ' ۵۸ ° ۳۵ تا ' ۷ ° 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 به‌عنوان معرف مناطق کوهستانی و جنگلی در نظر گرفته می‌شود. متوسط بارندگی منطقه ۷۹۱ میلی‌متر بوده و عمدتاً به‌صورت باران ریزش می‌نماید. اقلیم منطقه براساس روش آمبرژه نیمه مرطوب سرد می‌باشد. شکل۱ 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 ۵۰۰۰۰: ۱ 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، جمع‌آوری 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 به‌هدف 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 به‌مدت ۳۶ ماه برای واسنجی(Calibration) و از بهمن‌ماه ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸ به‌مدت 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز کسیلیان 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. فرآیندهای 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 به‌میزان 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 به‌ذکر است مدل دارای ۱۱ پارامتر کلی می‌باشد، که به‌منظور واسنجی، در نظر گرفته شده‌اند (جدول۱). 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 به‌صورت دستی کالیبره شد، و در این مرحله پارامتر حساس و کلیدی‌تر توسط کاربر مشاهده شد. پس از به‌دست 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 به‌کار می‌گیرد. چون فرآیند اتوکالیبراسیون توسط این نرم‌افزار و الگوریتم به‌کارگرفته شده به‌صورت یک فرآیند تکراری (iterative) می‌باشد و در آن مشتقات همه مشاهدات نسبت به تمام پارامترها محاسبه می‌شوند. نتایج هر تکرار

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]

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
Kss	رطوبت اولیه خاک(میلی‌متر)	۰/۹۲	۰/۸۸	۳
Kep	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر)	۱/۳۶	۱/۳۹	۲
G_o	ذخیره آب زیرزمینی اولیه (میلی‌متر)	۱۵۰	۱۶۰	۸
Gmax	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (میلی‌متر)	۲۱۶/۲۶	۵۲۷/۹۹۳	۹
T_o	ضریب درجه حرارت آستانه (درجه سانتی‌گراد)	۰/۹۹	۱/۰۵	۶
Ksnow	ضریب درجه روز درجه حرارت (میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد بر روز)	۰/۷۵	۰/۷۹	۴
Krain	ضریب روز درجه بارش(بر درجه سانتی‌گراد بر روز)	۱/۷۹	۱/۸۸	۱۱
Krun	توان رواناب سطحی برای شدت بارندگی صفر(-)	۵/۹۰	۴/۸۱	۵
Pmax	حداکثر شدت بارش (میلی‌متر بر روز)	۵۹/۵۳	۱۲۸/۶۳	۱۰

(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 به‌وجود آمده‌اند. یکی از متداول‌ترین 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 خطا و کمینه مربعات خطا بهره‌گیری می‌کند. درANFIS 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 آموزشی شبکه عصبی بهره‌گیری می‌شود. نوع توابع عضویت (مثلثی، گوسی و ...) و تعداد توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی‌ها به روش سعی و خطا 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 کنندهٔ محدودهٔ نفوذ یک مرکز خوشه در هر یک از ابعاد داده‌هاست. در این تحقیق از مقادیر اسکالری این شعاع برای به‌کارگیری در تمامی ابعاد داده‌ها بهره گرفته شده است. به‌منظور تصور بهتر این پارامتر می‌توان گفت شعاع تأثیر همانند کره‌ای است که مرکز خوشه در مرکز آن قرار گرفته است و تمامی داده‌های موجود در این فضا را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. به‌طور کلی محققین با تغییر مقادیر شعاع تأثیر سعی در دست‌یابی به شبکه‌های کاراتر را دارند، در این تحقیق به‌منظور جلوگیری از اتلاف وقت با نوشتن زیر برنامهٔ در MATLAB میزان بهینه برای شعاع تأثیر

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

تعیین ساختار شبکه‌ها برای مدل‌سازی شبکه عصبی- فازی تطبیقی

بدین‌منظور با استفاده از نمودار خودهمبستگی جزئی(Partial Autocorelation) تعداد تأخیرهای لازم برای ورود متغیرهای ورودی به شبکه در نرم‌افزار Minitab۱۴ به‌دست آمد. همچنین به‌دلیل همبستگی بالای تبخیر و دما از مدل‌سازی ترکیبی این دو متغیر صرف‌نظر 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

در روابط بالا MB انحراف مدل،MC: قابلیت اعتماد مدل، NSمعیار 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. Qoi,Qsi : جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در گام زمانی i (مترمکعب بر ثانیه)، N: تعداد گام‌های زمانی $\overline{Q_o}$ متوسط دبی جریان مشاهده شده. δ_o و ∂_s: به‌ترتیب 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 این‌صورت فاکتور NSL باعث ایجاد بایاس می‌گردد. مقادیر MBپایین نشان دهنده برازش بهتر و میزان صفر نمایانگر شبیه‌سازی کامل میزان جریان مشاهده‌ای می‌باشد ، مقدار MCبین 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 درتغییر 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]

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

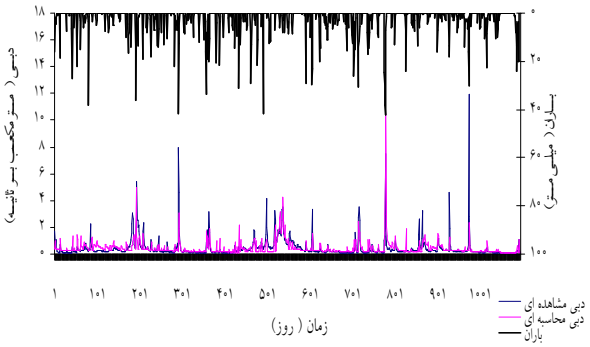
نمایه	واسنجی	آزمون
انحراف مدل	۰	۱/۳۸
قابلیت اعتماد مدل	۰/۶۰	۰/۶۶
نمایه ناش- ساتکلیف	۰/۱۹	۰/۲۴
نمایه ناش- ساتکلیف جریان‌های کم	۰/۵۹	۰/۶۴
نمایه ناش- ساتکلیف جریان‌های زیاد	۰/۲۱	۰/۳۰
ضریب همبستگی اصلاح شده	۰/۴۰	۰/۴۵
میانگین مطلق خطا	۰/۲۴	۰/۲۵
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۵۴	۰/۶۵

نتایج و بحث

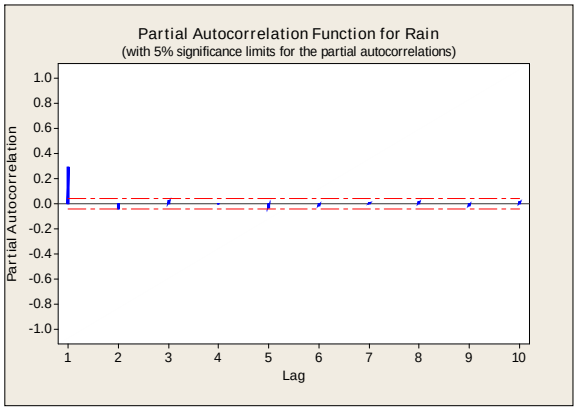
پس از تقسیم‌بندی داده‌ها برای دوره‌های واسنجی و آزمون در مدل WetSpa، در ادامه شبیه‌سازی در هر شبکه سلولی خصوصیات زمین شامل ارتفاع، جهت جریان، شبکه آبراهه، انشعابات رودخانه، رتبه آبراهه و شعاع هیدرولیکی از طریق مدل رقومی ارتفاعی تهیه شدند. سپس با استفاده از بافت خاک و مقادیر جدول های مرجع، هدایت هیدرولیکی خاک، تخلخل و ظرفیت زراعی، رطوبت باقیمانده و شاخص توزیع اندازه ذرات و نقطه پژمردگی گیاه به‌صورت نقشه محاسبه گردید. به‌طور 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 به‌صورت 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 (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 مدلWetSpa 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 مدلWetSpa به‌مقدار 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 به‌منظور برآورد میزان رواناب روزانه حوزه آبخیز کسیلیان مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا به‌منظور انجام تأخیرهای لازم برای مدل‌سازی متغیرهای ورودی به شبکه نمودار خودهمبستگی جزیی و متقاطع برای داده‌ها در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ به‌دست آمد (شکل‌های ۳ تا ۵) که در نهایت ۱۴ ساختار مختلف برای مدل‌سازی تعیین شد (جدول ۳). سپس

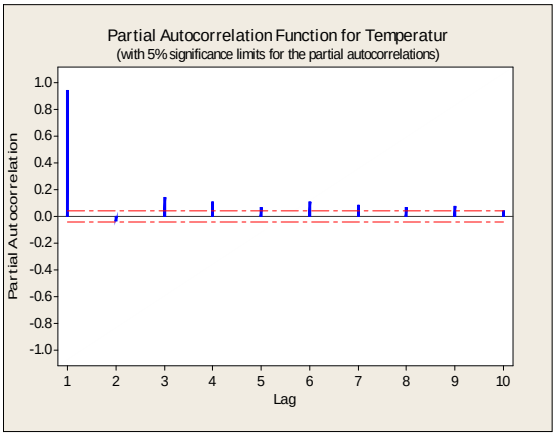
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]



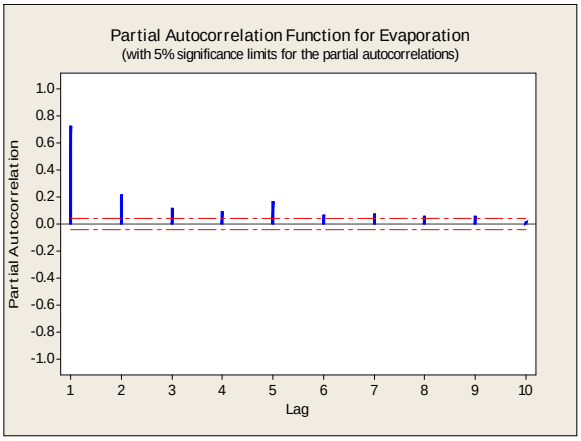
شکل ۲. دبی روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روزانه مدل Wetspa برای دوره آزمون



شکل ۳. تابع خودهمبستگی جزئی باران



شکل ۴. تابع خودهمبستگی جزئی دما



شکل ۵. تابع خودهمبستگی جزئی تبخیر

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 مرحلهٔ 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 به‌عنوان بهترین شبکه عصبی- فازی تطبیقی تعیین شد (جدول۴). پس از آن نتایج حاصل از تعیین مقادیر شاخص‌های کارآیی برای دوره‌های آموزش و آزمون برای مدل انتخاب شده به‌دست آمد (جدول۶). 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 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 ذکرشده هم‌خوانی دارد. مقایسه آماری آب‌نمودهای محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی نیز نشان دهنده

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]

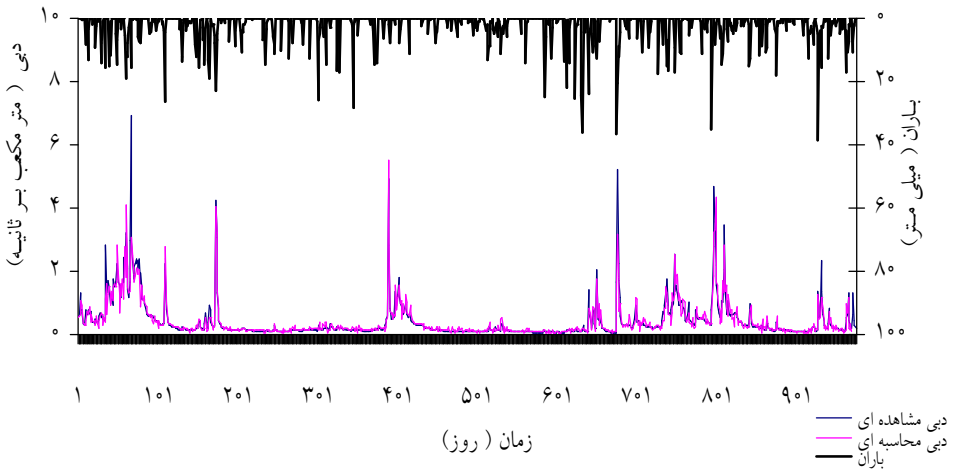
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]

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

شماره مدل	ساختارریاضی 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

تطابق نسبتاً خوبی بین دو آب‌نمود در جریان‌های کم می‌باشند. نتایج این تحقیق با نتایج لیو و دی‌اسمیت (۱۱) و بهره‌مند و همکاران (۹) مبنی بر پایین‌تر بودن نمایه نش- ساتکلیف برای جریان‌های کم هم‌خوانی ندارد. این محققین در تحقیقات خود نمایه نش- ساتکلیف را برای جریان‌های حداکثر را بیش از جریان‌های کم برآورد کرده‌اند. علت پایین بودن نمایه نش- ساتکلیف برای جریان‌های بالا در این تحقیق را می‌توان به کوچک بودن حوزه آبخیز و استفاده از داده‌های روزانه به‌جای داده‌های ساعتی مرتبط دانست. چرا که زمان پیمایش جریان حوزه آبخیز کمتر از ۲۴ ساعت (حداکثر ۱۰/۴ ساعت) است.

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

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

جدول۵. مقایسه نتایج حاصل از عملکرد شبکه به ازای مقادیر اولیه و بهینه شعاع

مرحلهٔ دست‌یابی به شعاع بهینه	آموزش		آزمون	
	RMSE	NSH	RMSE	NSH
سعی اول	۰/۰۴۳	۰/۷۷	۰/۰۶۴	۰/۷۴
مقدار بهینه	۰/۰۳۸	۰/۸۲	۰/۰۵۶	۰/۸۰

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]

جدول۶ . 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 به‌منظور برآورد 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 احمت نور(۸) همخوانی دارد. به‌طور کلی روش‌های هوشمند به‌دلیل ساختار غیرخطی خود نسبت به‌مدل 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 ٦٢ (١): ٦٥ -٧٠.

۲. سلطانی، س. و س. مرید.۱۳۸۱. مقایسه مدل‌های تفهیمی با شبکه‌های عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی بارش- رواناب. ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۸ تا ۱۰ بهمن‌ماه ۱۳۸۱.

۳. جهانگیر، ع.، م. رائینی سرجاز و م. ضیاءتباراحمدی.۱۳۸۷. شبیه سازی فرآیند بارش ـ روانآب 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]

۴. حسینی، ه. ۱۳۷۸.مدل شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین هیدروگراف سیلاب،پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه علم وصنعت ایران، ۱۰۳ص.

۵. مرادی‌پور، ش.، ع. ر. بهره‌مند، ح. زینی‌وند و ع. نجفی‌نژاد. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی توزیعی ـ مکانی سیل با مدل هیدرولوژیکیWetSpa در حوزه آبخیز طالقان. هفتمین همایش ملّی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه صنعتی اصفهان ۷ تا ۸ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۰.

٦. یعقوبی، ف.، ع. ر. بهره‌مند و ن. نورا. ۱۳۸۹. تهیه نقشه ضریب پتانسیل رواناب حوضه چهل‌چای با استفاده از مدلWetSpa. ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری وچهارمین 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 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.13.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.151]