

## مقایسه کار آبی مدل هیدرولوژیکی WetSpa، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم عصبی - فازی انطباقی در شبیه‌سازی دبی جریان رودخانه (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بالوخلوچای استان اردبیل)

رسول ایمانی<sup>1</sup>، هدی قاسمیه<sup>2\*</sup>، اباذر اسمعلی عوری<sup>3</sup>

تاریخ پذیرش: 94/07/05

تاریخ دریافت: 93/09/04

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، اصفهان

<sup>2</sup> استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، اصفهان

<sup>3</sup> دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [h.ghasemieh@kashanu.ac.ir](mailto:h.ghasemieh@kashanu.ac.ir)

### چکیده

رواناب تولیدشده اثرات قابل توجهی بر کمیت و کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی، فرسایش خاک و حتی پوشش گیاهی حوضه‌های آبخیز دارد. در سال‌های اخیر، مدل‌های متنوع کامپیوتری و روش‌های هوشمند عصبی جهت تخمین و پیش‌بینی رواناب و تأثیرات متعدد آن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، عملکرد مدل هیدرولوژیکی WetSpa و دو مدل هوشمند ANN و ANFIS در شبیه‌سازی بارش- رواناب و تخمین دبی روزانه حوضه آبخیز بالوخلوچای مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مورد نیاز شامل اطلاعات مربوط به مدل رقومی ارتفاع، نقشه‌های کاربری اراضی و خاک و همچنین داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی مربوط به سری‌های روزانه بارندگی، دما، تبخیر- تعرق مرجع و دبی تهیه شدند. داده‌های سال‌های آبی 1386-1387 تا 1388-1389 برای واسنجی و آموزش و داده‌های سال‌های آبی 1389-1390 و 1390-1391 برای اعتبارسنجی و آزمون مدل‌ها انتخاب شدند. ضرایب ارزیابی عملکرد مختلف مانند ناش- ساتکلیف، ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا (برحسب مترمکعب بر ثانیه) به ترتیب برابر با 0/457، 0/696 و 1/719 برای WetSpa، 0/724، 0/865 و 1/232 برای ANN و 0/289، 0/603 و 1/968 برای ANFIS نشان داد که بالاترین دقت بین مدل‌های بکار رفته به ترتیب به مدل‌های ANN، WetSpa و ANFIS متعلق است. اگرچه دقت مدل ANN نسبت به WetSpa بیشتر است، اما استفاده از آن به دلیل خاصیت جعبه سیاه بودن در برخی موارد از جمله بررسی تأثیر کاربری اراضی یا توپوگرافی بر رواناب نسبت به مدل کاملاً توزیعی WetSpa با محدودیت‌هایی مواجه است.

واژه‌های کلیدی: بارش- رواناب، حوضه آبخیز بالوخلوچای، ANFIS، ANN، WetSpa

## Comparing the Performance of WetSpa Hydrological Model, Artificial Neural Network and Adaptive Neuro-Fuzzy System for Simulating River Flow Discharge (Case Study: Balukhluchay Watershed, Ardabil Province)

R Imani<sup>1</sup>, H Ghasemieh<sup>2\*</sup>, A Esmali Ouri<sup>3</sup>

Received: 25 November 2014

Accepted: 27 September 2015

<sup>1</sup>Ph.D. Student of Watershed Sciences and Engin., Faculty of Natural Resources and Geoscience, Kashan Univ., Isfahan, Iran

<sup>2</sup>Assist. Prof., Watershed and Rangeland Dept., Faculty of Natural Resources and Geoscience, Kashan Univ., Isfahan, Iran

<sup>3</sup>Assoc. Prof., Watershed and Rangeland Management Dept., Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili Univ., Ardabil, Iran

\* Corresponding Author, Email: [h.ghasemieh@kashanu.ac.ir](mailto:h.ghasemieh@kashanu.ac.ir)

### Abstract

Generated runoff has significant effects on quality and quantity of the surface and groundwater resources, soil erosion and even vegetation cover in watersheds. In recent years, different computer models have been applied for estimating and forecasting the runoff and its effects. In this study, the performances of WetSpa hydrological model and ANN and ANFIS intelligent models were evaluated in simulation of the rainfall-runoff and estimation of the daily discharge in Balukhluchay watershed of Ardabil province. The required data including the needed information for the digital elevation model, land use and soil maps and also the climatic and hydrological data of the daily precipitation, temperature, reference evapotranspiration and discharge time series were prepared. The data of 2007 to 2010 were used for calibration and training and the data of 2010 to 2012 were used for validation and test of the models. Different evaluating coefficients such as Nash-Sutcliffe, Correlation Coefficient and Root Mean Square Error (0.457, 0.696 and 1.719 for WetSpa, 0.724, 0.865 and 1.232 for ANN and 0.289, 0.603 and 1.968 for ANFIS, respectively) showed that the highest accuracy among the used models belonged to the ANN, WetSpa and ANFIS, respectively. Despite high accuracy of the ANN, since it is a black box model, its usage for investigating the land use and topography effects on the runoff has some limitations in comparison with the completely distributed Wetspa model.

**Keywords:** ANFIS, ANN, Balukhluchay Watershed, Rainfall- Runoff, WetSpa

فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی موجود در چرخه آب و مؤثر بر منابع آب در حوضه‌های آبخیز امری ضروری است، چرا که مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی بلندمدت جهت استفاده بهینه و پایدار، در سایه شناخت فرآیندها و عوامل مؤثر بر آنها محقق می‌شود (شریفی و صالحی 1384، متکان و همکاران 1390، چورمانسکی

مقدمه

حوضه‌های آبخیز، سیستم‌های هیدرولوژیکی- بیولوژیکی هستند که به‌عنوان اولین و اصلی‌ترین بستر جمع‌آوری آب حاصل از نزولات جوی شناخته‌شده و نقش اساسی در تعیین بیلان آبی دارند (مهدوی 1386، لوکس و همکاران 2005). از این رو شناسایی رفتارها و

و باتلان (2011). فرآیند بارش- رواناب مهم‌ترین و اصلی‌ترین فرآیند هیدرولوژیکی مؤثر بر منابع آب سطحی و زیرزمینی، بیلان آبی، کیفیت آب و فرسایش خاک در سطح حوضه آبخیز است (صفاری و همکاران 1392، زیائو و همکاران 2011). پیشرفت‌های اخیر در زمینه کامپیوتر و همچنین وجود داده‌ها و اطلاعات با دقت بالا، امکان فهم دقیقی از فرآیندهای فیزیکی و پیچیده هیدرولوژیکی را برای هیدرولوژیست‌ها فراهم کرده است، به طوری که معادلات ریاضی مناسبی جهت حل این فرآیندها ارائه شده است (لیو و همکاران 2003 و 2006، چورمانسکی و باتلان 2011، برزوسکی و همکاران 2012). امروزه این معادلات در قالب مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی ارائه می‌شوند که برای شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب و تخمین رواناب به منظور پیش‌بینی وضعیت آینده و اتخاذ تصمیم بهینه در مدیریت آبخیزها به کار گرفته می‌شوند (بهره‌مند و دی-اسمیت 2008، شافی و دی‌اسمیت 2009، صفری و همکاران 2012). یکی از این مدل‌ها، مدل هیدرولوژیکی مبتنی بر فیزیک و کاملاً توزیعی WetSpa<sup>1</sup> است. توانایی بالا در شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی، پیش‌بینی و تحلیل مکانی-زمانی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی، استفاده از بستر GIS جهت پردازش و تهیه لایه‌های رقومی و همچنین نیاز به داده‌های قابل‌اندازه‌گیری، این مدل را از سایر مدل‌های توزیعی پیچیده متمایز ساخته است (متکان و همکاران 1389). همچنین فنون جدید هوش محاسباتی<sup>2</sup> حدود دو دهه است که به دلیل توانایی بالا در محاسبات سیستم‌های پیچیده و غیرخطی (مانند فرآیند بارش- رواناب) و نیاز به پارامترهای کم و قابل‌اندازه‌گیری، کاربرد گسترده‌ای در علوم مختلف به‌ویژه علم هیدرولوژی و مدیریت منابع آب پیدا کرده است (صف‌شکن و همکاران 1390، گومان و همکاران 2011). مطالعات متعددی در خارج و داخل کشور با استفاده از مدل‌های مذکور جهت شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های آبخیز انجام شده است که برخی از آن‌ها به شرح زیر هستند.

وربرین و همکاران (2013) تأثیر تغییرات و گسترش محدوده شهری بر دبی ساعتی حوضه آبخیز رودخانه تولکا در کشور ایرلند را با استفاده از سنجش‌ازدور و مدل WetSpa بررسی کرده و نشان دادند که از سال 1988 تا 2006 افزایش مساحت شهر از 16 کیلومترمربع به 34 کیلومترمربع باعث شده که زمان تا اوج هیدروگراف سیل 3 ساعت کاهش و دبی اوج به-طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یابد. گوس و همکاران (2013) دبی روزانه حوضه آبخیز ماهانادی<sup>3</sup> در کشور هندوستان را با استفاده از داده‌های ارتفاع آب و دبی روزانه مشاهده‌شده در دو سری با تأخیر زمانی و بدون تأخیر زمانی و کاربرد سیستم استنتاج فازی-عصبی انطباقی شبیه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که داده‌های تأخیر داده‌شده تخمین دقیق‌تری از رواناب روزانه را ارائه می‌دهد. دهقانی و همکاران (1392) دبی روزانه حوضه آبخیز معرف کسلیان از زیر حوضه‌های رودخانه تالار در استان مازندران را با استفاده از مدل WetSpa شبیه‌سازی کرده و با مقایسه دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده در خروجی حوضه نشان دادند که این مدل، جریان پایه را با ضریب ناش ساتکلیف 64/35 درصد بهتر از جریان‌های بیشینه شبیه‌سازی می‌کند. جعفری و همکاران (1392) دو تابع محرک سیگموئید<sup>4</sup> و تانژانت هایپربولیک<sup>5</sup> در شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه را به‌منظور پیش-بینی ضریب رواناب حوضه آبخیز باراریه در نیشابور استان خراسان رضوی مورد مقایسه قرار دادند. در نهایت نتایج حاصل نشان‌دهنده برتری تابع محرک سیگموئید نسبت به تانژانت هایپربولیک در شرایط برابری داده‌های ورودی بود.

با توجه به اهمیت رواناب تولیدشده در حوضه-های آبخیز در برنامه‌های مدیریتی منابع آب و همچنین کاربرد گسترده مدل‌های مختلف در این زمینه، هدف

پیش‌بینی وضعیت آینده و اتخاذ تصمیم بهینه در مدیریت آبخیزها به کار گرفته می‌شوند (بهره‌مند و دی-اسمیت 2008، شافی و دی‌اسمیت 2009، صفری و همکاران 2012). یکی از این مدل‌ها، مدل هیدرولوژیکی مبتنی بر فیزیک و کاملاً توزیعی WetSpa<sup>1</sup> است. توانایی بالا در شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی، پیش‌بینی و تحلیل مکانی-زمانی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی، استفاده از بستر GIS جهت پردازش و تهیه لایه‌های رقومی و همچنین نیاز به داده‌های قابل‌اندازه‌گیری، این مدل را از سایر مدل‌های توزیعی پیچیده متمایز ساخته است (متکان و همکاران 1389). همچنین فنون جدید هوش محاسباتی<sup>2</sup> حدود دو دهه است که به دلیل توانایی بالا در محاسبات سیستم‌های پیچیده و غیرخطی (مانند فرآیند بارش- رواناب) و نیاز به پارامترهای کم و قابل‌اندازه‌گیری، کاربرد گسترده‌ای در علوم مختلف به‌ویژه علم هیدرولوژی و مدیریت منابع آب پیدا کرده است (صف‌شکن و همکاران 1390، گومان و همکاران 2011). مطالعات متعددی در خارج و داخل کشور با استفاده از مدل‌های مذکور جهت شبیه-

<sup>3</sup> Mahanadi<sup>4</sup> Sigmoid<sup>5</sup> Hyperbolic tangent<sup>1</sup> Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere<sup>2</sup> Computational intelligence

بالوخلوچای 390 میلی‌متر، دمای متوسط روزانه 9/5 درجه سلسیوس و متوسط تبخیر- تعرق سالانه 1129 میلی‌متر است. عمده بارش‌های جوی در فصل‌های بهار، زمستان و اواخر پاییز رخ می‌دهد و به دلیل ارتفاع بالا و دمای پایین هوای منطقه، به‌ویژه در زمستان و اوایل بهار، بارش‌ها عمدتاً به‌صورت برف نازل می‌شوند که موجب تجمع و ذوب برف در منطقه می‌شود، به‌طوری‌که گاهی اوقات تا اوایل تابستان تجمع برف در ارتفاعات شمالی (ارتفاعات جنوبی قله سبلان) وجود دارد و جریان رودخانه بالوخلوچای را در فصول بدون بارندگی تأمین می‌کند. منطقه مورد مطالعه بر اساس روش آمبرژه، دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است. موقعیت استانی و کشوری حوضه مورد مطالعه در شکل 1 نشان داده شده است.

#### داده‌های مورد استفاده

داده‌های استفاده شده در این پژوهش به دو دسته داده‌های اقلیمی و داده‌های رقومی تقسیم می‌شوند که به شرح زیر تهیه شدند.

#### الف - داده‌های رقومی

سه نقشه اصلی رقومی مورد نیاز شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)<sup>6</sup>، نقشه کاربری اراضی و نقشه بافت خاک است. نقشه مدل رقومی ارتفاع با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی 1:50000 منطقه در محیط ArcGIS تهیه شد. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور، پردازش و طبقه‌بندی تصویر ETM<sup>+</sup> ماهواره لندست 7 مربوط به ماه ژوئن سال 2012 میلادی با روش نظارت‌شده<sup>7</sup> و بیشترین شباهت<sup>8</sup>، در محیط نرم‌افزار ENVI تهیه شد. درصد رس، سیلت و شن مربوط به 38 نمونه خاک سطحی (0 تا 15 سانتی-متری) برداشت شده از حوضه آبخیز به‌روش هیدرومتری در آزمایشگاه خاک تعیین و بافت خاک نمونه‌ها بر اساس مثلث بافت خاک USDA مشخص

اساسی این پژوهش، شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب و تخمین دبی روزانه حوضه آبخیز بالوخلوچای در استان اردبیل با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa و مدل‌های هوشمند است. نتایج این تحقیق می‌تواند در زمینه‌های مختلف مدیریت منابع آب مانند پیش‌بینی رواناب و دبی‌های آینده، کنترل سیل، مدیریت خشک-سالی، ذخیره سیلاب، مدیریت مخزن و برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سد پایین‌دست، بررسی تأثیر سناریوهای مختلف مدیریتی، تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر تولید رواناب و سایر جوانب مدیریت جامع حوضه آبخیز و در نهایت به‌منظور مطالعه و مدیریت حوضه‌های آبخیز مجاور و مشابه اقلیمی و فیزیوگرافی فاقد آمار و ایستگاه هیدرومتری، مورد استفاده قرار گیرد.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخش بالادست رودخانه بالوخلوچای در محل ایستگاه هیدرومتری یامچی و بالادست سد ذخیره‌ای یامچی موسوم به حوضه آبخیز بالوخلوچای است. حوضه آبخیز مذکور در غرب و شمال‌غرب شهرستان نیر، جنوب‌غربی استان اردبیل و شمال‌غرب کشور قرار دارد و از نظر مختصات جغرافیایی بین 46° 47' تا 5° 48' طول شرقی و 37° تا 14° 38' عرض شمالی واقع شده است. مساحت حوضه آبخیز بالوخلوچای، 56270/8 هکتار است که 71/51% (40239/38 هکتار) آن در استان اردبیل و 28/49% (16031/42 هکتار) نیز در استان آذربایجان-شرقی قرار گرفته است. بیشینه ارتفاع در نزدیکی قله سبلان، کمینه ارتفاع در خروجی حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری و ارتفاع متوسط حوضه به‌ترتیب برابر با 4380، 1560 و 2100 متر بالاتر از سطح دریا هست. در میان کلاس‌های کاربری اراضی، مراتع با 51 درصد و اراضی زراعی با 46 درصد از مساحت کل حوضه آبخیز مورد مطالعه، دو کلاس عمده کاربری را تشکیل می‌دهند. میانگین بارندگی سالانه حوضه آبخیز

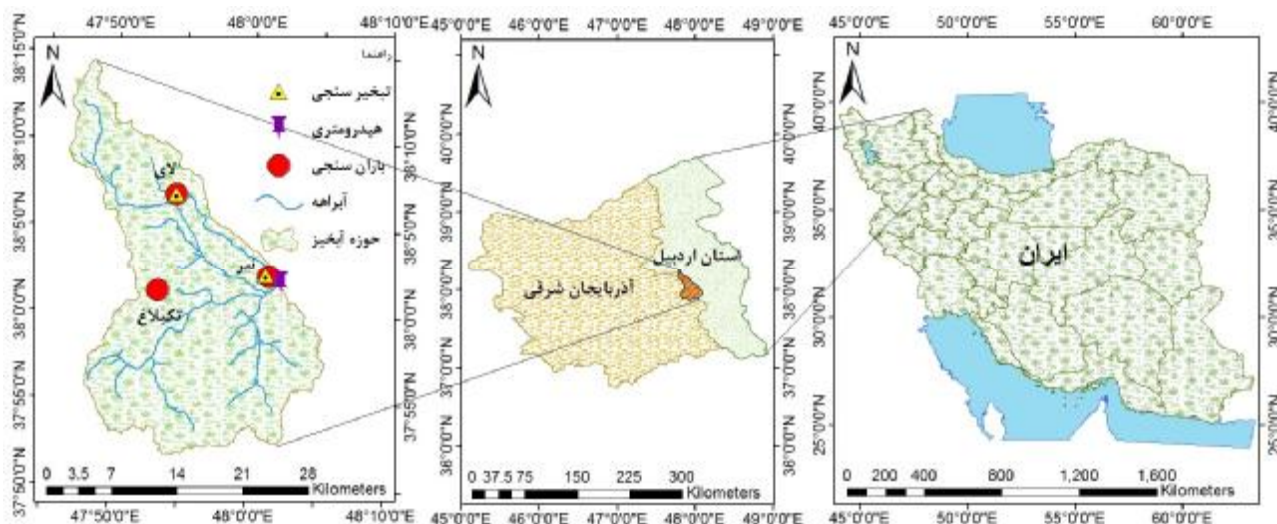
<sup>6</sup> Digital Elevation Model

<sup>7</sup> Supervised

<sup>8</sup> Maximum Likelihood

مورد مطالعه با اندازه سلولی  $100 \times 100$  متر تهیه شدند. علاوه بر لایه‌های رقمی مذکور، لایه‌های نقطه‌ای موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی داخل و مجاور حوضه و لایه پلیگونی مرز حوضه آبخیز به منظور پلیگون‌بندی سطح اثر هر کدام از ایستگاه‌ها تهیه شدند.

گردید. در نهایت نقشه بافت خاک حوضه با استفاده از روش درون‌یابی پلیگون تیسن (قهرودی‌تالی و بابایی فینی 1389) برای کل حوضه آبخیز در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. نقشه مدل رقمی ارتفاع، نقشه کاربری اراضی و نقشه بافت خاک برای حوضه آبخیز



شکل 1- موقعیت کشوری و استانی حوضه آبخیز بالوخلوچای و ایستگاه‌های موجود.

موجود، سال‌های آبی 1386-1387 تا 1390-1391 (5 سال)، به‌عنوان دوره مشترک آماری انتخاب و داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی آن‌ها جهت استفاده در مدل‌ها، آماده شدند.

#### معرفی مدل‌ها

#### الف - مدل هیدرولوژیکی WetSpa

مدل هیدرولوژیکی WetSpa، یک مدل ریاضی، مبتنی بر فیزیک، کاملاً توزیعی و زمان‌پیوسته برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر در مقیاس حوضه آبخیز و مبتنی بر گام زمانی است که با استفاده از داده‌های اقلیمی بارندگی، دما و تبخیر-تعرق مرجع در پایه‌های زمانی ساعتی یا روزانه و داده‌های مربوط به زمین شامل مدل رقمی ارتفاع، بافت خاک و کاربری اراضی، تمام پارامترهای هیدرولوژیکی مؤثر بر رواناب و بیلان آبی را به‌صورت توزیع زمانی و مکانی و در واحد سلول، شبیه‌سازی می‌کند (کبیر و

#### ب - داده‌های اقلیمی - هیدرولوژیکی

داده‌های اقلیمی موردنیاز شامل بارش، تبخیر-تعرق مرجع، دما و همچنین داده‌های جریان رودخانه خروجی حوضه هست که به‌منظور واسنجی و ارزیابی عملکرد مدل‌ها به‌کار گرفته می‌شود. داده‌های بارندگی روزانه سه ایستگاه باران‌سنجی لای، تکبلاغ و نیر، داده‌های دمای روزانه و تبخیر-تعرق مرجع روزانه اصلاح‌شده از تشتک‌های تبخیر دو ایستگاه تبخیرسنجی لای و نیر که سطح اثر تیسن آن‌ها پوشش‌دهنده کل مساحت حوضه بود و همچنین داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری یامچی (خروجی حوضه) از سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل تهیه شدند. اطلاعات و موقعیت ایستگاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب در جدول 1 و شکل 1 نشان داده‌شده است. با توجه به بررسی منابع مختلف (یعقوبی و بهره‌مند 1390، دهقانی و همکاران 1392، نورمحمد و همکاران 2006، ریوتابولا و همکاران 2007) و نقایص آماری

پتانسیل رواناب، رواناب ناشی از ذوب برف به روش ضریب روز-درجه، جریان زیرسطحی بر اساس قانون دارسی و موج سینماتیک، جریان آب زیرزمینی از یک زیرحوضه به زیرحوضه پایینی به روش مخزن خطی یکپارچه و روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادلات موج پخش سنت و نانت انجام می‌شود (لیو و دی‌اسمیت 2004). در مدل مذکور، رواناب کل از هر سلول شامل مجموع رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی بوده و پاسخ جریان حوضه با در نظر گرفتن قابلیت تجزیه مکانی در یک سیستم روندیابی خطی، از طریق جمع‌کردن پاسخ‌های تمام سلول‌های شرکت‌کننده تعیین می‌شود. روابط مورد استفاده و شرح آن‌ها به تفصیل در راهنمای مدل WetSpa ارائه شده است که از آدرس <http://www.vub.ac.be/WetSpa/downloads.html> برای مطالعه بیشتر قابل دریافت است.

همکاران 1392، یعقوبی و بهره‌مند 1390، وربرین و همکاران (2013). این مدل برای اولین بار توسط ونگ و همکاران (1996) در دانشگاه وریج بروکسل بلژیک ابداع شد و سپس توسط دی‌اسمیت و همکاران (2000) و نیز لیو و همکاران (2003) برای پیش‌بینی سیل و محاسبه بیلان آبی توسعه یافت و پس از آن زینی‌وند (2009)، توانایی محاسبه ذوب برف و شبیه‌سازی فرسایش خاک و حمل رسوب را به آن مدل افزود. مدل WetSpa برای بیان تعادل آب و انرژی در هر شبکه سلولی از چهار لایه تاج پوشش، سطح خاک، منطقه ریشه و منطقه اشباع استفاده می‌کند و هر یک از فرآیندهای بارش، ذخیره برگابی، ذوب برف، ذخیره چالابی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل رواناب سطحی با استفاده از یک روش استدلالی اصلاح شده مبتنی بر رطوبت با یک ضریب

جدول 1- اطلاعات ایستگاه‌های موجود در حوضه آبخیز مورد مطالعه.

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	متوسط پارامتر	واحد پارامتر
یامچی	هیدرومتری	48° 02' 11"	38° 02' 05"	1560	2/14	دبی روزانه (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
لای	باران‌سنجی	47° 54' 25"	38° 06' 55"	2038	368	بارندگی سالانه (mm)
تک‌بلاغ	باران‌سنجی	47° 53' 15"	38° 01' 15"	2076	334	بارندگی سالانه (mm)
نیر	باران‌سنجی	48° 01' 07"	38° 02' 22"	1623	342	بارندگی سالانه (mm)
لای	تبخیرسنجی	47° 54' 25"	38° 06' 55"	2038	1254	تبخیر- تعرق مرجع سالانه (mm)
نیر	تبخیرسنجی	48° 01' 07"	38° 02' 22"	1623	1010	تبخیر- تعرق مرجع سالانه (mm)

#### ب- مدل‌های هوشمند عصبی

به‌عنوان یک روش محاسباتی و به‌صورت شبکه‌های پرسپترون ارائه گردید. این روش، بر اساس نظریه درونی پیچیده و فرآیندهای موازی سیستم‌های عصبی بیولوژیک استوار است و توانایی آن در برقراری ارتباط میان ورودی‌ها و خروجی‌های یک فرآیند، بدون آگاهی کامل از فیزیک آن است. معمولاً شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌های خروجی واقعی به‌سمت خروجی هدف تعیین‌شده، سوق می‌یابند که این

از جمله مدل‌های هوش محاسباتی، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی است که جزء مدل‌های جعبه‌سیاه و یکپارچه است و با الگوبرداری از شبکه عصبی مغز انسان، توانایی مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و با الگوی غیرخطی را دارند (اسکندری‌نیا و همکاران 1390، جهانگیر و همکاران 2005). شبکه‌های عصبی مصنوعی اولین بار توسط روزن‌بلات<sup>9</sup> (1958)

<sup>9</sup> Rosenblatt

عصبی مصنوعی، انجام مراحل انتخاب و پیش‌پردازش داده‌ها، معماری شبکه، آموزش و در نهایت آزمون مدل ضروری است (بی‌شاپ 1995).

### روش کار

#### مدل هیدروژیکی WetSpa

داده‌های وکتوری شامل مرز حوضه آبخیز و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی داخل و مجاور حوضه (کمینه 3 ایستگاه به‌منظور پلیگون‌بندی تیسن) با فرمت شیپ فایل و همچنین داده‌های رقومی کاربری اراضی و بافت خاک با کدهای مربوط به هر یک از کلاس‌های کاربری اراضی و بافت خاک تعریف‌شده در راهنمای مدل WetSpa و مدل رقومی ارتفاع با فرمت اسکی<sup>18</sup> در دایرکتوری مربوطه از مدل ذخیره شدند. با استفاده از داده‌های وکتوری و رقومی و همچنین اطلاعات هیدرولوژیکی پیش‌فرض ذخیره‌شده در جدول‌های استاندارد مدل برای هر یک از کلاس‌های شیپ، کاربری اراضی و بافت خاک، تعداد 30 نقشه رستری از جمله نقشه‌های شبکه آبراه‌ای، شیپ، شعاع هیدرولیکی، نسبت پوشش گیاهی، ضریب زبری مانینگ، بیشینه شاخص سطح برگ، هدایت هیدرولیکی، تخلخل، ظرفیت زراعی، محتوای رطوبت اولیه خاک، ضریب رواناب پتانسیل، سرعت جریان، پلیگون تیسن ایستگاه‌های هواشناسی و ... در محیط نرم‌افزار ArcView با بهره‌گیری از الحاقیه‌های Spatial Analyst، 3D Analyst و Create Thissen Polygon ساخته شد. این نقشه‌ها به‌همراه سری‌های زمانی اقلیمی ذخیره‌شده به فرمت نوشتاری<sup>19</sup> و پارامترهای واسنجی مدل، بخش فرمول‌بندی مدل را تکمیل کردند. مدل مذکور برای دوره آماری 1378-1386 تا 1389-1388 اجرا شد و پس از ارزیابی کارایی مدل، پارامترهای مدل به‌صورت دستی و خودکار با استفاده از مدل PEST مورد واسنجی قرار گرفت. به‌منظور بررسی دقت عملکرد و

موضوع، همان آموزش<sup>10</sup> شبکه است. نظریه فازی برای اولین بار در سال 1965 توسط لطفی زاده معرفی شد. این نظریه در سال‌های اخیر توانایی بالایی در کاهش خطای تخمینی و انسانی نسبت به نظریه‌های دیگر مانند روش‌های احتمالاتی نشان داده است. هر سیستم فازی شامل سه بخش اصلی است که عبارت‌اند از الف- فازی کردن داده‌ها با استفاده از یک تابع عضویت، ب- ایجاد ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها با استفاده از قواعد اگر- آنگاه<sup>11</sup> و ج- تخمین نتایج سیستم و غیرفازی ساختن آن‌ها به‌وسیله عملگرهای و، یا، نه<sup>12</sup> (ژانگ 1993). امروزه ترکیب منطق فازی با شبکه عصبی مصنوعی، سیستم عصبی- فازی را ایجاد نموده است و سیستم مذکور مشکل اساسی سیستم فازی در تعیین قواعد اگر- آنگاه جهت تنظیم پارامترها و کاهش خطای شبیه‌سازی را با استفاده از قابلیت آموزش شبکه عصبی مصنوعی و تولید خودکار این قواعد، برطرف می‌کند. بنابراین سیستم استنتاجی عصبی- فازی انطباقی، نوعی از شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر سیستم استنتاجی تاکاگی- سوگنو<sup>13</sup> فازی است که از مزایای منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی به‌طور هم‌زمان استفاده می‌کند (آبراهام 2005). شبکه عصبی مصنوعی (ANN)<sup>14</sup> و سیستم عصبی- فازی انطباقی (ANFIS)<sup>15</sup> از جمله روش‌های هوشمند هستند که کاربرد عمده‌ای در مطالعات مرتبط با آب دارند و جهت شبیه‌سازی فرآیند غیرخطی بارش- رواناب، بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند (کارآموز و عراقی نژاد 1384). هر دو مدل ANN و ANFIS از نوع شبکه‌های پیش‌خور با ناظر<sup>16</sup> است که با الگوریتم انتشار به عقب<sup>17</sup> آموزش داده می‌شوند (ساجی‌کومار و تانداوسوارا 1999، کولی- بالی و همکاران 2000). برای ایجاد یک مدل شبکه

<sup>10</sup> Train

<sup>11</sup> If-Then

<sup>12</sup> And, Or, Not

<sup>13</sup> Takagi-Sugeno

<sup>14</sup> Artificial neural network

<sup>15</sup> Adaptive neuro-fuzzy inference system

<sup>16</sup> Feed forward network

<sup>17</sup> Back propagation

<sup>18</sup> Ascii

<sup>19</sup> Text

تعیین شد و طبق نتایج آن در شکل 2، سری‌های بارندگی و جریان رودخانه با یک روز و دو روز تأخیر که بیشترین خودهمبستگی جزئی را داشتند نیز به‌عنوان ورودی انتخاب شدند. در مرحله سوم، به‌منظور تعدیل واریانس شدید بین داده‌ها ناشی از وجود روزهای با بارندگی و تبخیر- تعرق صفر، داده‌ها با استفاده از رابطه 1 (راجورکار و همکاران 2004) بین 0/1 و 0/9 نرمال شدند.

$$X_{\text{norm}} = 0.8 * \left( \frac{X_i - X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \right) + 0.1 \quad [1]$$

که در آن،  $X_{\text{norm}}$  داده نرمال شده،  $X_i$  داده غیرنرمال،  $X_{\text{max}}$  مقدار بیشینه داده‌های غیرنرمال و  $X_{\text{min}}$  مقدار کمینه داده‌های غیرنرمال است.

در نهایت داده‌های ورودی نهایی به شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌صورت زیر انتخاب شدند:

- 1- نرمال بارندگی روزانه ایستگاه باران‌سنجی لای
  - 2- نرمال بارندگی روزانه ایستگاه باران‌سنجی لای با یک روز تأخیر
  - 3- نرمال بارندگی روزانه ایستگاه باران‌سنجی لای با دو روز تأخیر
  - 4- نرمال تبخیر- تعرق مرجع روزانه ایستگاه تبخیرسنجی لای
  - 5- نرمال دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری یامچی با یک روز تأخیر
  - 6- نرمال دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری یامچی با دو روز تأخیر
- همچنین داده‌های نرمال دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری یامچی به‌عنوان خروجی شبکه‌ها انتخاب شد.

صحت مدل با پارامترهای تنظیم‌شده برای شرایطی متفاوت یا شبیه به شرایط داده‌های واسنجی، مدل برای دوره آماری 1389-1390 و 1391-1390 (دوره صحت‌سنجی) اجرا شد و ضرایب ارزیابی کارایی مدل برای این دوره مورد محاسبه قرار گرفت.

### مدل‌های هوشمند عصبی

#### الف- انتخاب و پیش‌پردازش داده‌ها

عناصر اقلیمی شامل بارندگی و تبخیر- تعرق مرجع روزانه (مهم‌ترین عوامل اقلیمی تعیین‌کننده بیلان آبی) به‌عنوان پارامترهای ورودی و داده‌های دبی روزانه به‌عنوان پارامتر خروجی شبکه در نظر گرفته شدند. بنابراین، داده‌های ورودی اولیه در این پژوهش شامل داده‌های کلیه ایستگاه‌های هواشناسی موجود در داخل حوضه شامل بارندگی روزانه ایستگاه‌های باران-سنجی لای، نیر و تکبلاغ و داده‌های روزانه تبخیر- تعرق مرجع تشک ایستگاه‌های تبخیرسنجی لای و نیر بودند. از آنجایی که ساده بودن ساختار مدل شبکه عصبی دارای اهمیت ویژه‌ای است (نصیری و ایمانی 1388)، بالا بودن تعداد داده‌های ورودی باعث پیچیده‌تر شدن شبکه‌های عصبی و همچنین افزایش زمان محاسبات می‌شود. لذا در مرحله اول میزان همبستگی بین هر یک از داده‌های اقلیمی ورودی و دبی خروجی مطابق جدول 1 محاسبه شد و یک ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه تبخیرسنجی با بیشترین ضریب همبستگی صرف‌نظر از نوع علامت انتخاب شدند (ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی لای). در مرحله دوم، میزان خودهمبستگی جزئی داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی به‌منظور در نظر گرفتن تأثیر شرایط روزهای قبلی در داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS.16

جدول 2- همبستگی بین پارامترهای اقلیمی موجود و جریان خروجی از حوضه آبخیز.

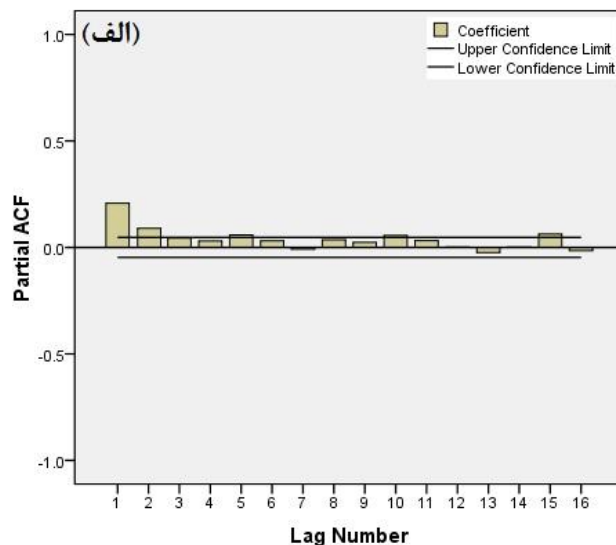
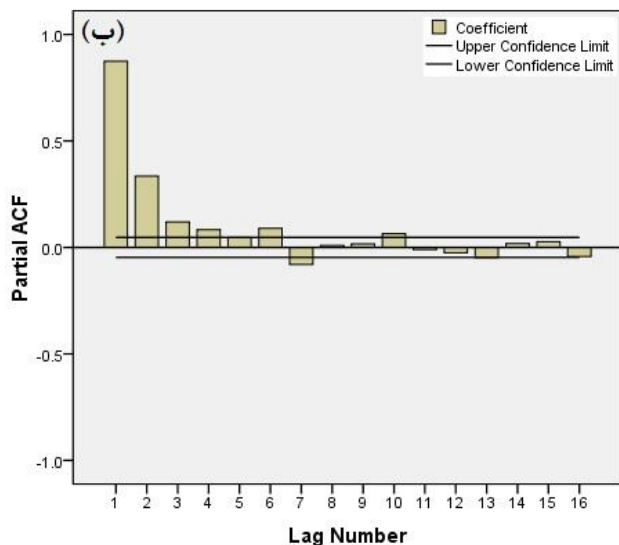
ایستگاه	باران‌سنجی		تبخیرسنجی	
	لای	تکبلاغ	لای	نیر
همبستگی	0/18	0/12	-0/32	-0/28



## ب- معماری شبکه

شدند. اما نکته حائز اهمیت این است که ساختار لایه-های پنهان در ANN متفاوت با ANFIS است. نحوه معماری لایه میانی در شبکه‌های ANN در نرم‌افزار Neurosolotions.5 مطابق جدول 3 و همچنین نحوه معماری لایه پنهان سیستم ANFIS در محیط نرم‌افزار MATLAB مطابق جدول 4 است.

معماری شبکه عصبی عبارت است از تعیین ساختار لایه ورودی، لایه پنهان (لایه میانی) و لایه خروجی. با توجه به مطالب مطرح شده در بخش قبل، لایه ورودی شبکه‌ها دارای 6 نرون (6 متغیر ورودی) و لایه خروجی نیز شامل یک نرون (یک متغیر خروجی)



شکل 2- خودهمبستگی جزئی بین داده‌های بارندگی ایستگاه لای (الف) و جریان خروجی حوضه (ب).

جدول 3- طرح کلی معماری شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار Neurosolotions.5.

شماره مدل	الگوریتم	تابع محرک	تعداد لایه مخفی	تعداد نرون	تکرار
1	Momentum	Tanh Axon	آزمون و خطا (2 تا 6)	آزمون و خطا (2 تا 20)	1000
2		Sigmoid Axon	آزمون و خطا (2 تا 6)	آزمون و خطا (2 تا 20)	1000
3	Levenberg- Marquardt	Tanh Axon	آزمون و خطا (2 تا 6)	آزمون و خطا (2 تا 20)	1000
4		Sigmoid Axon	آزمون و خطا (2 تا 6)	آزمون و خطا (2 تا 20)	1000
5	Quickprop	Tanh Axon	آزمون و خطا (2 تا 6)	آزمون و خطا (2 تا 20)	1000
6		Sigmoid Axon	آزمون و خطا (2 تا 6)	آزمون و خطا (2 تا 20)	1000

جدول 4- طرح کلی معماری سیستم عصبی - فازی انطباقی در نرم‌افزار MATLAB.

شماره مدل	تابع عضویت ورودی	تعداد تابع عضویت	تابع عضویت خروجی	الگوریتم	تکرار
1	trimf	3	Linear	backpropa	آزمون و خطا
2	trapmf	3	Linear	backpropa	آزمون و خطا
3	gbellmf	3	Linear	backpropa	آزمون و خطا
4	gaussmf	3	Linear	backpropa	آزمون و خطا
5	gaussmf2	3	Linear	backpropa	آزمون و خطا

## آموزش و آزمون شبکه‌های عصبی

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

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

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Qo_i - \bar{Qo})(Qs_i - \bar{Qs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Qo_i - \bar{Qo})^2 (Qs_i - \bar{Qs})^2}} \quad [6]$$

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

در روابط فوق،  $Qo_i$  و  $Qs_i$  به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهده شده در زمان  $i$  و  $\bar{Qo}$  به ترتیب متوسط دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده،  $N$  تعداد داده‌ها،  $\epsilon$  مقدار بسیار کوچک اختیاری برای رفع مشکل مربوط به دبی‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برابر با صفر و  $Vsim$  واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده هست (لیو و دی-اسمیت 2004، راجورکار و همکاران 2004).

## نتایج

## نتایج پارامترهای رقومی ورودی مدل WetSpa

نتایج مربوط به تهیه مدل رقومی ارتفاع، نقشه کاربری اراضی و نقشه بافت خاک به ترتیب در شکل‌های 3، 4 و 5 آورده شده است.

به منظور هماهنگی با داده‌های مربوط به مدل هیدرولوژیکی WetSpa و امکان مقایسه نتایج مدل‌های استفاده شده، داده‌های سال‌های آبی 1386-1387 تا 1388-1389 برای آموزش و داده‌های سال‌های 1390-1389 و 1391-1390 برای آزمون شبکه‌های عصبی انتخاب شدند.

## انتخاب ساختار بهینه

ساختار بهینه از میان هر کدام از ساختارهای (مدل‌های) طراحی شده (جدول‌های 3 و 4) بر اساس ضریب همبستگی بین مقادیر دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مرحله آزمون ANN (که توسط نرم-افزار Neurosolutions محاسبه می‌شود) و بر اساس ریشه میانگین مربعات خطا در مرحله آزمون شبکه ANFIS (که توسط نرم‌افزار MATLAB محاسبه می‌شود) انتخاب شدند. در نهایت بهترین ساختار برای هر کدام از دو نوع شبکه عصبی از میان ساختارهای بهینه انتخاب شده برای هر کدام از مدل‌های ANN و ANFIS بر اساس همان ضرایب انتخاب گردید.

## ارزیابی کارایی مدل

به منظور ارزیابی کارایی مدل‌های استفاده شده، از ضرایب انحراف مدل<sup>20</sup>، ناش-ساتکلیف<sup>21</sup>، ناش-ساتکلیف برای جریان‌های کم<sup>22</sup> (NSL)، ناش-ساتکلیف برای جریان‌های بالا<sup>23</sup> (NSH)، ضریب همبستگی<sup>24</sup> و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>25</sup> که به ترتیب با استفاده از روابط 2 تا 7 محاسبه می‌شوند، استفاده شد.

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

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

<sup>20</sup> Model Bias

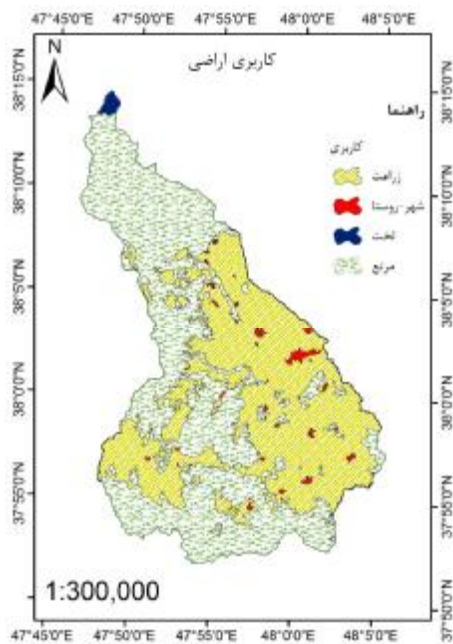
<sup>21</sup> Nash-Sutcliffe

<sup>22</sup> Nash-Sutcliffe for Low Flow

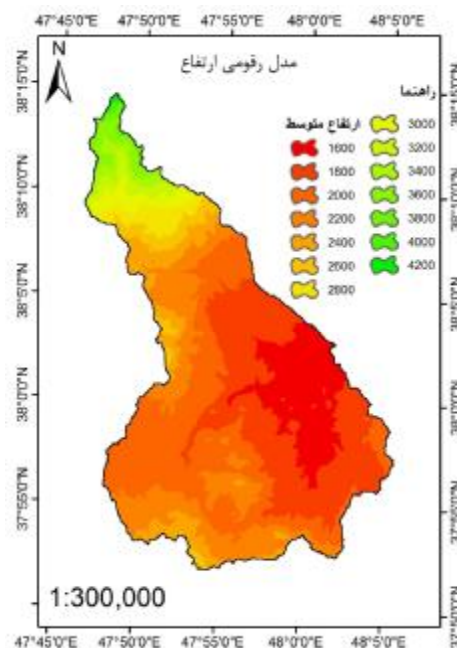
<sup>23</sup> Nash-Sutcliffe for High Flow

<sup>24</sup> Correlation Coefficient

<sup>25</sup> Root Mean Square Error



شکل 4- نقشه کاربری اراضی.

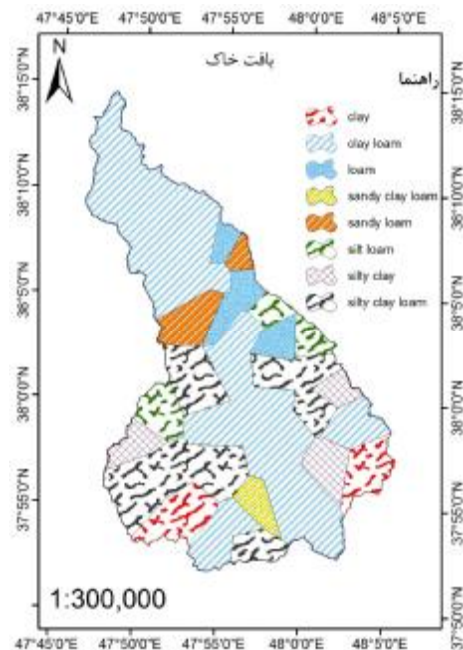


شکل 3- نقشه مدل رقومی ارتفاع.

شکل 6 و در دوره اعتبارسنجی (1388-1389) مطابق شکل 6 و در دوره اعتبارسنجی (سال‌های آبی 1389-1390 و 1390-1391) مطابق شکل 7 است. همچنین نمودار پراکنش دبی‌های شبیه‌سازی شده در مقابل دبی‌های مشاهده شده در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب مطابق شکل‌های 8 (الف) و 8 (ب) است.

#### نتایج مدل‌های هوشمند عصبی

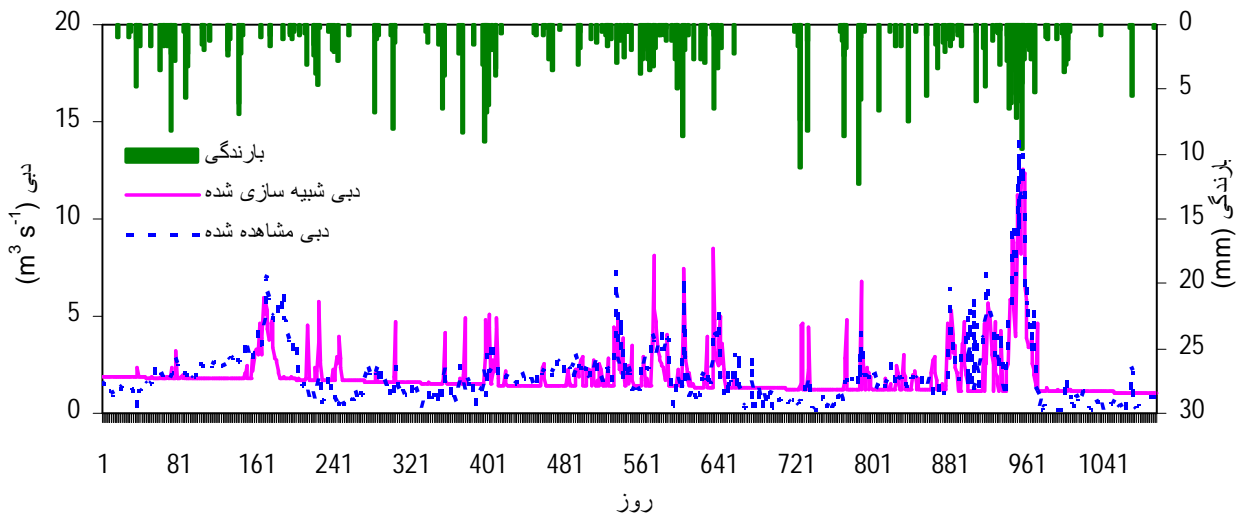
نتایج مربوط به انتخاب ساختارهای بهینه برای هر کدام از مدل‌های ANN و ANFIS به ترتیب مطابق جدول‌های 5 و 6 است. با توجه به نتایج جداول 5 و 6، مدل شماره 3 از ANN با ساختار 1-10-2-6 (از چپ به راست شامل تعداد نرون‌های لایه ورودی، تعداد لایه پنهان، تعداد نرون‌های لایه پنهان و تعداد نرون‌های لایه خروجی) و همچنین مدل شماره 3 از شبکه ANFIS با تابع عضویت زنگوله‌ای و با تعداد تکرار 50، به عنوان بهترین ساختار انتخاب شدند.



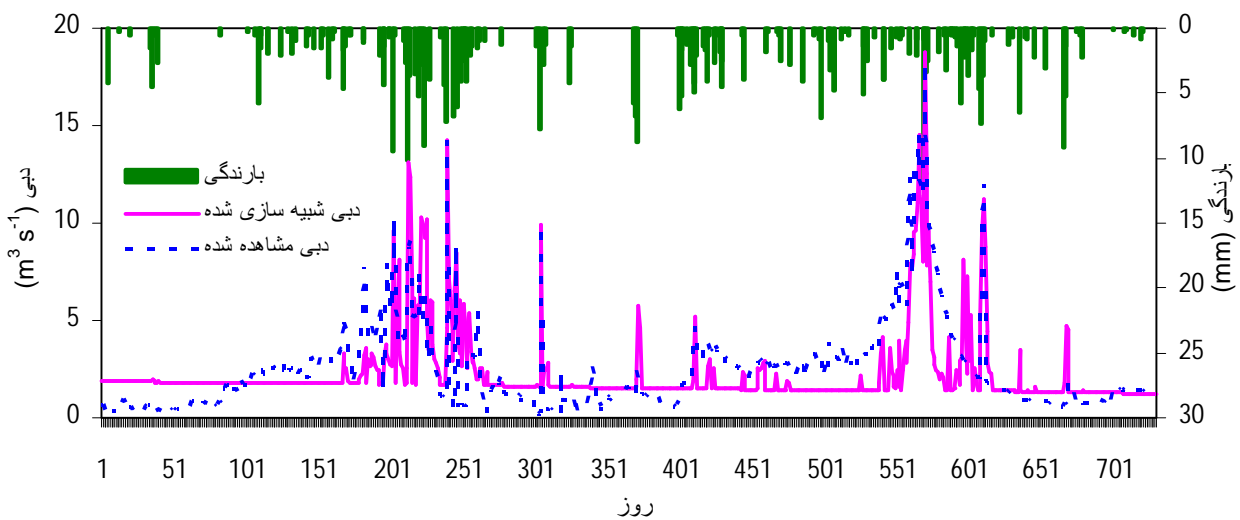
شکل 5- نقشه بافت خاک.

#### نتایج مدل هیدرولوژیکی WetSpa

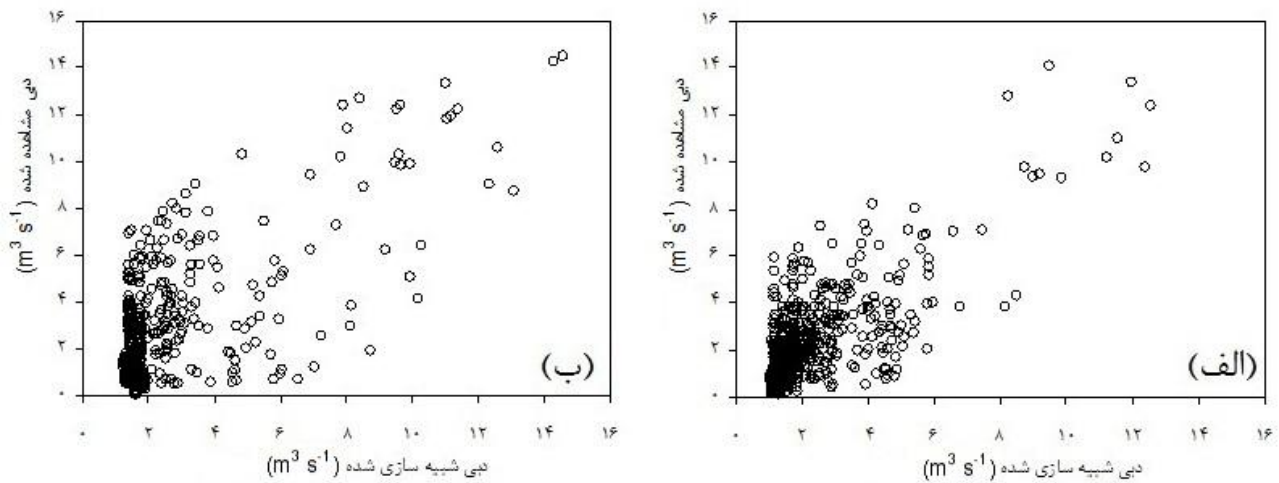
نتایج مربوط به دبی‌های شبیه‌سازی شده، دبی مشاهده شده و همچنین هیستوگرام بارندگی روزانه مربوطه، در دوره واسنجی (سال آبی 1386-1387 تا



شکل 6- دبی شبیه‌سازی‌شده مدل WetSpa، دبی مشاهده‌شده و هیستوگرام بارندگی دوره واسنجی.



شکل 7- دبی شبیه‌سازی‌شده مدل WetSpa، دبی مشاهده‌شده و هیستوگرام بارندگی دوره اعتبارسنجی.



شکل 8- پراکنش دبی شبیه‌سازی‌شده مدل WetSpa، در مقابل دبی مشاهده‌شده در دوره (الف) واسنجی و (ب) اعتبارسنجی.

جدول 5- ساختارهای بهینه انتخاب شده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN).

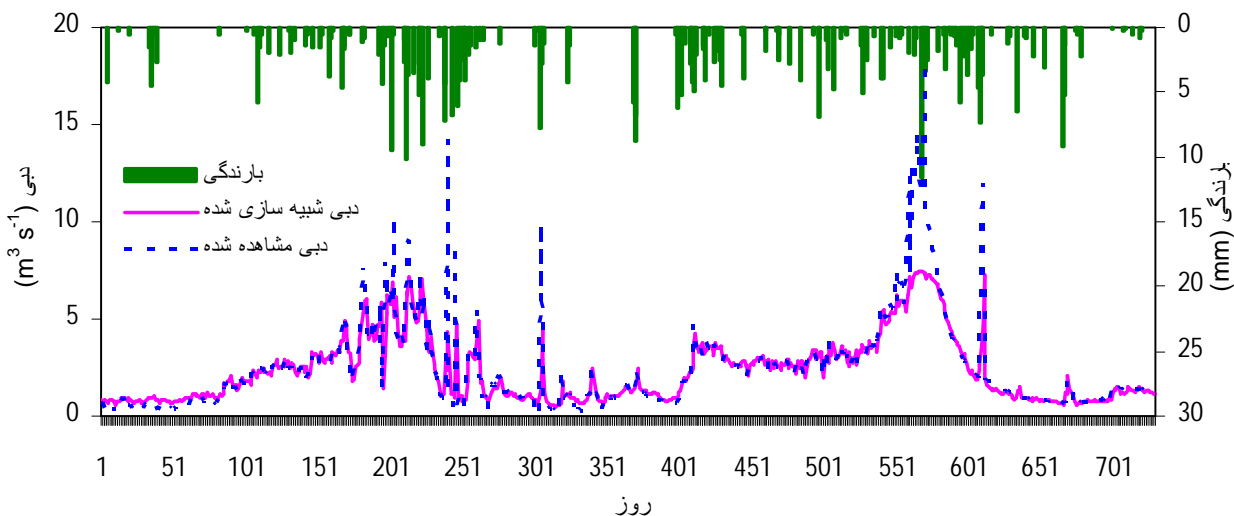
شماره مدل	الگوریتم	تابع محرک	تعداد لایه مخفی	تعداد نرون	همبستگی آموزش	همبستگی آزمون
1	Momentum	Tanh Axon	2	15	0/904	0/862
2		Sigmoid Axon	2	5	0/725	0/807
3	Levenberg-Marquardt	Tanh Axon	2	10	0/964	0/865
4		Sigmoid Axon	2	9	0/945	0/857
5	Quickprop	Tanh Axon	4	20	0/917	0/852
6		Sigmoid Axon	2	6	0/674	0/635

جدول 6- ساختارهای بهینه انتخاب شده از سیستم عصبی - فازی انطباقی (ANFIS).

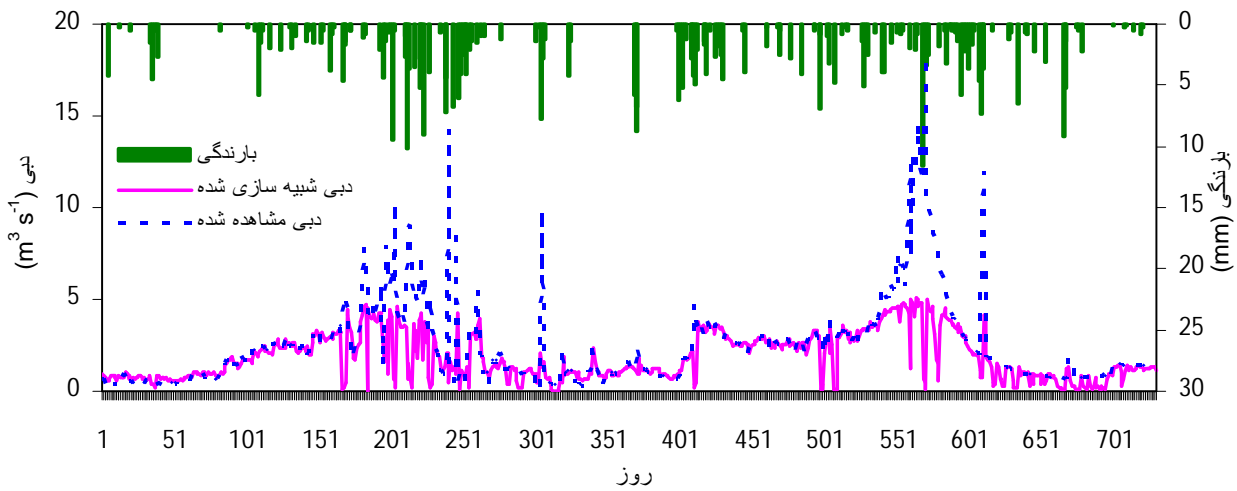
شماره مدل	تابع عضویت ورودی	الگوریتم	تکرار	خطای آموزش	خطای آزمون
1	trimf	backpropa	50	0/0358	0/1235
2	trapmf	backpropa	50	0/0408	0/1276
3	gbellmf	backpropa	50	0/0337	0/0977
4	gaussmf	backpropa	50	0/0331	0/0989
5	gaussmf2	backpropa	50	0/0471	0/1253

از مدل ANFIS مطابق شکل 10 است. همچنین نمودار پراکنش دبی‌های شبیه‌سازی شده در مقابل دبی‌های مشاهده شده در دوره آزمون ANN و ANFIS به ترتیب مطابق شکل‌های 11 (الف) و 11 (ب) است.

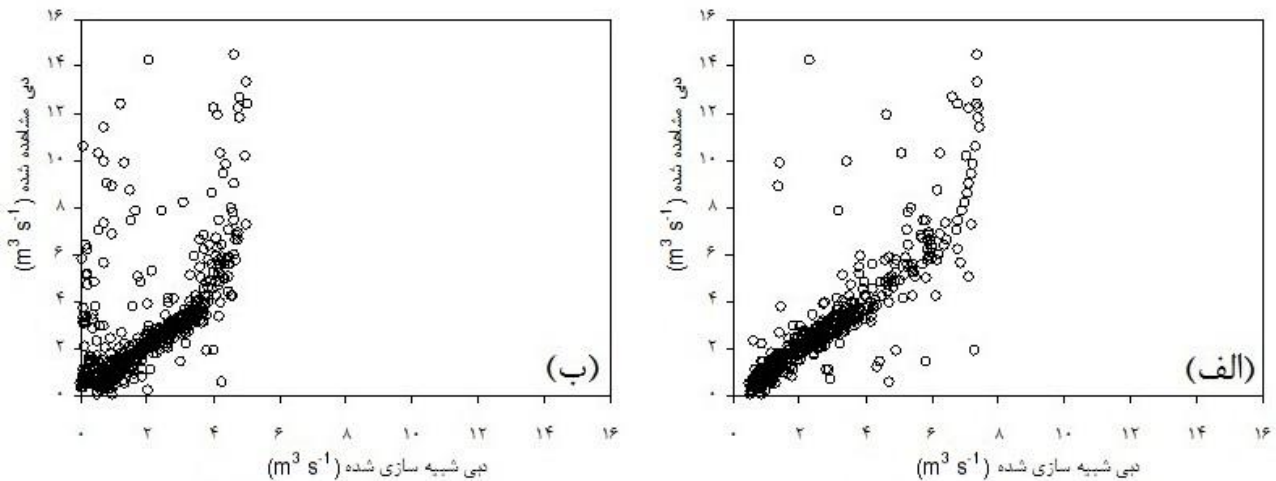
نتایج مربوط به دبی‌های شبیه‌سازی شده، دبی مشاهده شده و همچنین هیستوگرام بارندگی روزانه مربوطه، در دوره آزمون (سال‌های آبی 1389-1390 و 1390-1391) برای بهترین ساختار انتخاب شده از مدل ANN مطابق شکل 9 و برای بهترین ساختار انتخاب شده



شکل 9- دبی شبیه‌سازی شده مدل ANN، دبی مشاهده شده و هیستوگرام بارندگی دوره آزمون.



شکل 10- دبی شبیه‌سازی شده مدل ANFIS، دبی مشاهده شده و هیستوگرام بارندگی دوره آزمون.



شکل 11- پراکنش دبی‌های شبیه‌سازی شده در مقابل دبی‌های مشاهده شده مدل‌های (الف) ANN و (ب) ANFIS (دوره آزمون).

ارزیابی کارایی مدل‌های ANN و ANFIS در مرحله آزمون، مطابق جدول 7 است.

نتایج مربوط به ضرایب ارزیابی کارایی مدل WetSpa در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی و ضرایب

جدول 7- ضرایب ارزیابی کارایی ANN، WetSpa و ANFIS.

RMSE ( $m^3 s^{-1}$ )	R	NSH	NSL	NS	Bias	مدل/ ضریب
1/093	0/730	0/698	0/395	0/546	-0/003	WetSpa (واسنجی)
1/719	0/696	0/644	0/301	0/457	-0/087	WetSpa (اعتبارسنجی)
1/232	0/865	0/662	0/847	0/724	-0/054	ANN (آزمون)
1/968	0/603	0/148	0/112	0/289	-0/253	ANFIS (آزمون)

کاهش دقت عملکرد و دقت شبیه‌سازی دبی روزانه، عبارت‌اند از: ANN، WetSpa و ANFIS.

مقایسه نتایج ضرایب ارزیابی کارایی هر کدام از مدل‌های مورد استفاده نشان می‌دهد که مدل‌ها بر اساس

## نتایج و بحث

پایه آن ناشی از ذوب برف است. به همین دلیل مدل مذکور نتوانسته است دبی‌های پایه حوضه آبخیز مورد مطالعه که ناشی از ذوب برف‌های زمستانه است را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. این نتیجه با هدف اصلی مدل جهت پیش‌بینی سیل و نیز نتایج تحقیقات یعقوبی و بهره‌مند (1390)، متکان و همکاران (1390)، میرجعفری و نصیری‌صالح (1391) و کبیر و همکاران (1392)، گبرمسکل و همکاران (2002)، لیو و دی‌اسمیت (2005)، نورمحماد و همکاران (2006)، ریوتابولا و همکاران (2007)، پورتابرندیک و همکاران (2010)، چورمانسکی و باتلان (2011) تطابق دارد. بررسی دبی‌های شبیه‌سازی‌شده توسط دو ساختار عصبی انتخاب‌شده و همچنین ضرایب ارزیابی کارایی مربوط به آن‌ها در مرحله آزمون نشان داد که عملکرد مدل ANN در شبیه‌سازی دبی روزانه بهتر از مدل ANFIS است، به طوری که ضرایب ارزیابی انحراف مدل، ناش-ساتکلیف، ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با  $0/054$ ،  $0/724$  و  $0/865$  و  $1/232$  برای ANN و  $0/253$ ،  $0/289$ ،  $0/603$  و  $1/968$  برای ANFIS در مرحله آزمون شبکه به دست آمدند. بنابراین ترکیب منطق فازی با شبکه عصبی مصنوعی نتوانست دقت آن را در شبیه‌سازی فرآیند هیدرولوژیکی بارش-رواناب و تخمین دبی روزانه حوضه آبخیز بالوخلوچای افزایش دهد. علت این امر دسته‌بندی فازی داده‌ها در ANFIS و در نظر گرفتن اثر چندین کرانه بالا و پایین در دسته‌های فازی است، در حالی که در ANN یک کرانه بالا و پایین در نظر گرفته شده و تمامی داده‌ها به صورت یکجا تا ایجاد بهترین ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی و حصول نتیجه مطلوب در نظر گرفته می‌شوند. این نتیجه با نتایج تحقیقات زارع‌ابیانه و بیات-ورکشی (1390) و بازارتسرن و همکاران (2003) تطابق دارد. همچنین بررسی ضرایب ناش-ساتکلیف برای جریان‌های کم و ناش-ساتکلیف برای جریان‌های زیاد، نشان داد که مدل ANN، برخلاف مدل WetSpa دبی‌های پایین و آب پایه را بهتر و دقیق‌تر از دبی‌های بالا و سیلابی شبیه‌سازی کرده است، به طوری که ضرایب

به دلیل اهمیت بالای فرآیند هیدرولوژیکی بارش-رواناب و دبی رواناب تولیدشده، در مدیریت حوضه‌های آبخیز و نقش ابزاری مدل‌های متنوع هیدرولوژیکی و آماری در این راستا، در این پژوهش مدل هیدرولوژیکی WetSpa و مدل‌های هوشمند ANN و ANFIS به منظور شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب و تخمین دبی روزانه حوضه آبخیز بالوخلوچای در استان اردبیل مورد استفاده و مقایسه قرار گرفتند. نتایج بررسی ضرایب ارزیابی در مورد مدل WetSpa نشان داد که دقت عملکرد مدل مذکور در شبیه‌سازی دبی روزانه در مرحله واسنجی بهتر از مرحله اعتبارسنجی است، به طوری که ضرایب انحراف مدل، ناش-ساتکلیف، ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با  $0/0029$ ،  $0/546$ ،  $0/730$  و  $1/093$  در مرحله واسنجی و  $0/087$ ،  $0/457$ ،  $0/696$  و  $1/719$  در مرحله اعتبارسنجی مدل به دست آمدند، که دلیل آن تطابق دستی و سپس خودکار پارامترهای مدل در مرحله واسنجی با داده‌ها و شرایط حاکم بر دوره واسنجی و همچنین تفاوت زیاد شرایط اقلیمی دوره اعتبارسنجی با دوره واسنجی است. بررسی دو ضریب ناش-ساتکلیف برای جریان‌های کم و ناش-ساتکلیف برای جریان‌های زیاد نشان می‌دهد که مدل WetSpa دبی‌های بالا و سیلابی منطقه مورد مطالعه را بهتر و با دقت بیشتری نسبت به دبی‌های پایین و آب پایه شبیه‌سازی کرده است، به طوری که ضرایب ناش-ساتکلیف برای جریان‌های کم و زیاد به ترتیب با  $0/395$  و  $0/698$  در مرحله واسنجی و  $0/301$  و  $0/643$  در مرحله اعتبارسنجی به دست آمدند. یکی از محدودیت‌های اصلی مدل WetSpa استفاده از یک روش ساده به نام ضریب روز-درجه حرارت به منظور شبیه‌سازی تجمع و ذوب برف است که در آن توزیع برف پشته، شیب محل، تأثیر جهت جغرافیایی، کاربری اراضی و ... در ذوب برف در نظر گرفته نمی‌شود، در حالی که منطقه و حوضه آبخیز مورد مطالعه یک حوضه کوهستانی در دامنه جنوبی قله سبلان است که بخش اصلی رواناب و به‌ویژه دبی‌های

رواناب را در نظر نمی‌گیرد. اما استفاده از مدل Wetspa که پراکنش مکانی پارامترهای اقلیمی و زمینی را در نظر گرفته، تمامی زیر فرآیندهای هیدرولوژیکی مؤثر در تولید رواناب را به‌طور جداگانه و توزیعی شبیه‌سازی و پارامترهای هیدرولوژیکی را محاسبه می‌کند، زمانی توجیه پیدا می‌کند که هدف تعیین بیلان آبی، پیش‌بینی تبخیر-تعرق، شناخت مکانی پارامترهای هیدرولوژیکی، بررسی تأثیر تغییر در هر یک از پارامترهای هیدرولوژیکی بر تولید رواناب یا بررسی تأثیر سناریو-های مختلف تغییر کاربری اراضی یا عملیات مدیریتی بر میزان رواناب و به‌ویژه دبی‌های اوج و سیلابی باشد. البته جهت افزایش دقت عملکرد مدل Wetspa مواردی توصیه می‌شود که عبارت‌اند از: مقاطع زمانی انتخاب‌شده برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل Wetspa بیشترین شباهت و نزدیکی اقلیمی را داشته باشند؛ برخی از پارامترهای هیدرولوژیکی پیش‌فرض مدل مانند ضریب رواناب، نفوذپذیری، هدایت هیدرولیکی و ... حتی‌الامکان در منطقه اندازه‌گیری شده یا در جداول پیش‌فرض مدل واسنجی شوند؛ در صورت وجود، از داده‌های با گام زمانی ساعتی استفاده شود؛ با توجه به اینکه هدف اصلی این مدل پیش‌بینی سیل است، دبی‌های سیلابی شبیه‌سازی‌شده مورد استفاده قرار گیرد و سعی شود تا شبیه‌سازی به‌صورت تک واقعه و برای وقایع سیل انجام شود. همچنین پیشنهاد می‌شود تأثیر سناریوهای کاهش و افزایش بارندگی بر تولید رواناب، به‌منظور پیش‌بینی وضعیت منابع آبی در شرایط خشکی یا پرآبی در راستای ارائه راهکارهای مدیریت خشک-سالی، ذخیره سیلاب و مدیریت مخزن سد ذخیره‌ای یامچی در پایین‌دست حوضه، مورد بررسی قرار گیرد.

ناش - ساتکلیف برای جریان‌های کم‌وزیاد به‌ترتیب برابر با 0/847 و 0/662 به‌دست آمدند. در نهایت نتایج نشان داد که عملکرد مدل ANN به‌مراتب بهتر از Wetspa و دقت Wetspa بالاتر از ANFIS است و این امر به‌دلیل توانایی بالای مدل ANN در شناخت و نگاشت رابطه غیرخطی و پیچیده بین بارش و رواناب است. علی‌رغم واسنجی دستی دقیق و خودکار مدل Wetspa، این مدل شبیه‌سازی مناسبی از رواناب و به‌ویژه جریان پایه منطقه ارائه نکرد که دلیل اصلی آن تفاوت بارز شرایط اقلیمی در سال‌های مختلف واسنجی و عدم توانایی پارامترهای واسنجی شده در نشان دادن این تفاوت‌های اقلیمی بود. مدل ANFIS نیز به‌دلیل فازی کردن سری-های زمانی و در نظر گرفتن اثر چندین کرانه بالا و پایین، نگاشت مناسبی از رابطه بارش- رواناب ارائه نکرد.

### نتیجه‌گیری کلی

با توجه به اینکه یکی از اهداف مهم در هیدرولوژی، استفاده از ابزارهای ساده با کارایی بالا برای پدیده‌های پیچیده هست، بنابراین شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به‌عنوان یکی از بهترین و دقیق‌ترین ابزارها در شبیه‌سازی فرآیند پیچیده بارش- رواناب منطقه مورد مطالعه معرفی می‌شود. لذا در حالتی که هدف اصلی صرفاً پیش‌بینی جریان رودخانه یا بررسی اثرات سناریوهای اقلیمی بر رواناب تولیدشده و مدیریت منابع آب سطحی باشد، استفاده از مدل ANN پیشنهاد می‌شود، چراکه به‌دلیل دقت بالا، زمان و هزینه‌های کم در تهیه داده‌ها و اجرای مدل، ارجحیت دارد، اما یک مدل جعبه سیاه بوده و ناهمگنی‌های مختلف مکانی موجود و زیر فرآیندهای متعدد هیدرولوژیکی مؤثر در تولید

### منابع مورد استفاده

اسکندری نیاع، نظریور ه، ضیاءتبار احمدی مخ، تیموری م و ذاکرمشفق م، 1390. بررسی تأثیر عامل بارش پیشین در برآورد جریان رودخانه توسط شبکه عصبی (مطالعه موردی: رودخانه بختیاری). پژوهش‌نامه مدیریت حوضه آبخیز، سال 2، شماره 3، صفحه‌های 51 تا 62.



- جعفری م، وفاخواه م و عبقری ه، 1392. مقایسه عملکرد دو تابع سیگموئید و تانژانت هایپربولیک شبکه عصبی مصنوعی در پیش-بینی ضریب رواناب رگبار (مطالعه موردی: حوضه آبخیز باراریه نیشابور). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 20، شماره 2، صفحه‌های 85 تا 104.
- دهقانی ن، وفاخواه م و بهره‌مند ع، 1392. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa حوضه آبخیز کسلیان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 20، شماره 6، صفحه‌های 253 تا 261.
- زارع ابیانه ح و بیات ورکشی م، 1390. ارزیابی مدل‌های هوشمند عصبی و تجربی در تخمین رواناب سالانه. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 25، شماره 2، صفحه‌های 365 تا 379.
- شریفی م ب و صالحی م، 1384. کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه معرف کرده. خلاصه گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شرکت آب منطقه‌ای خراسان.
- صفاری ا، قنوتی ع، بهشتی‌جاوید ا و حسینی ه، 1392. برآورد و پهنه‌بندی رواناب ناشی از بارش‌های حداکثر 24 ساعته با استفاده از روش SCS-CN (حوضه سد یامچی). مجله جغرافیا (فصل‌نامه بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران)، سال 11، شماره 38، صفحه‌های 201 تا 217.
- صف‌شکن ف، پیرمادیان ن و افشین‌شریفان ر، 1390. شبیه‌سازی آبنمود بارش-رواناب با توجه به الگوی زمانی بارش و استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در حوضه آبخیز معرف کسلیان. مجله علمی-پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال 5، شماره 15، صفحه‌های 1 تا 10.
- قهرودی‌تالی م و بابایی فینی ا، 1389. درآمدی بر سیستم‌های اطلاعاتی جغرافیایی. انتشارات دانشگاه پیام نور، 180 صفحه.
- کارآموز م و عراقی‌نژاد ش، 1384. هیدرولوژی پیشرفته. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، 484 صفحه.
- کبیر آ، بهره‌مند ع و آذین‌مهر م، 1392. شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی-مکانی WetSpa در حوضه آبخیز حاجی قوشان استان گلستان. پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. 29-30 بهمن ماه، پردیس فنی و مهندسی شهیدعباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- متکان ع، زینی‌وند ح، بیات ب، غفوری ع و میرباقری ب، 1390. مدل‌سازی تغییرات مکانی-زمانی جریان زیرسطحی و نفوذ با استفاده از مدل WetSpa و GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز مرک، استان کرمانشاه). دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران. 28 تا 29 اردیبهشت ماه، شرکت آب منطقه‌ای زنجان، زنجان.
- متکان ع، زینی‌وند ح، بیات ب، میرباقری ب و غفوری ع، 1389. بررسی قابلیت‌ها، مزایا و محدودیت‌های مدل هیدرولوژیکی توزیع یافته مکانی WetSpa در ایران. اولین کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا. 23 تا 24 آبان ماه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
- مهدوی م، 1386. هیدرولوژی کاربردی. جلد دوم. انتشارات دانشگاه تهران، 440 صفحه.
- میرجعفری ف و نصیری‌صالح ف، 1391. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز رودخانه قره‌سو در استان اردبیل با استفاده از مدل توزیعی WetSpa. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. 19 تا 21 اردیبهشت ماه، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- نصیری ع و یمانی م، 1388. تجزیه و تحلیل شبکه‌های عصبی مصنوعی ژئومورفولوژیکی در برآورد رواناب مستقیم (حوضه جاجرود، زیرحوضه امامه). مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره 68، صفحه‌های 33 تا 41.
- یعقوبی ف و بهره‌مند ع، 1390. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa در حوضه آبخیز چهلچای در استان گلستان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 18، شماره 3، صفحه‌های 185 تا 205.
- Abraham A, 2006. Adaptation of Fuzzy Inference System Using Neural Learning, Computer Science Department, Oklahoma State University, US.
- Bahreman A and De Smedt F, 2008. Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in Torysa Watershed, Slovakia. Water Resources Management 22: 393-408.
- Bazartseren B, Hildebrandt G and Holz K, 2003. Short-term water level prediction using Neural Networks and Neuro-fuzzy approach. Journal of Neurocomputing 55: 439-450.
- Berezowski T, Chormanski J, Batelaan O, Canters F and Van De Voorde T, 2012. Impact of remotely sensed land-cover proportions on urban runoff prediction. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 16: 54-65.

- Bishop CM, 1995. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press, New York.
- Chormanski J and Batelaan O, 2011. Application of the WetSpa distributed hydrological model for catchments with significant contribution of organic soil, upper Biebrza case study. *Land Reclamation* 43: 25-35.
- Coulibaly P, Anctil F and Bobee B, 2000. Multivariate reservoir inflow forecasting using temporal Neural Networks. *Journal of Hydrologic Engineering* 5: 115-123.
- De Smedt F, Liu YB and Gebremeskel S, 2000. Hydrological modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed landuse information. In: Brebbia. CA (ed) WTI, Boston, pp. 295-304.
- Gebremeskel S, Liu YB and De Smedt F, 2002. GIS based distributed modeling for flood estimation. Pp. 98-109. In: Orge A. Ramirez (eds). *Proceedings of the twenty-second annual American geophysical union hydrology days*. April 1-4, 2000. Colorado State University, Fort Collins, USA.
- Ghose DK, Panda SS and Swain PC, 2013. Prediction and optimization of runoff via ANFIS and GA. *Alexandria Engineering Journal* 52: 209-220.
- Ghumman AR, Ghazaw YM, Sohail AR and Watanabe K, 2011. Runoff forecasting by artificial Neural Network and conventional model. *Alexandria Engineering Journal* 50: 345-350.
- Jahangir A, Raeni M, Ziatabar Ahmadi M and Akbarpoor A, 2005. Simulating of rainfall-runoff process using the Artificial Neural Network in Kardeh Watershed. 5th conference the hydraulic of Iran. 8-9 Nov, Bahonar Shahid university of engineering, Kerman, Iran.
- Jang JSR, 1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 23(3): 665-685.
- Liu YB, Gebremeskel S, De Smedt F, Hoffmann L and Pfister L, 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *Journal of Hydrology* 283: 91-106.
- Liu YB and De Smedt F, 2004. *WetSpa Extension, Documentation and User Manual*. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije University Brussel, Belgium.
- Liu YB and De Smedt F, 2005. Flood modeling for complex terrain using GIS and remote sensed information. *Water Resources Management* 19: 605-624.
- Liu YB, Gebremeskel S, De Smedt F, Hoffmann L and Pfister L, 2006. Predicting storm runoff from different land-use classes using a geographical information system-based distributed model. *Hydrological Processes* 20: 533-548.
- Loucks DP, van Beek E, Stedinger JR, Dijkam JPM and Villars MT, 2005. *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Studies and Reports in Hydrology, UNESCO Publishing.
- Nurmohamed R, Naipal S and De Smedt F, 2006. Hydrologic modeling of the upper Suriname River basin using WetSpa. *Journal of Spatial Hydrology* 6: 1-17.
- Porretta-Brandyk L, Chormanski J, Ignar S, Okruszko T, Brandyk A, Szymczak T and Krezalek K, 2010. Evaluation and verification of the WetSpa model based on selected rural catchments in Poland. *Journal of Water and Land Development* 14: 115-133.
- Rajurkar MP, Kothyari UC and Chaube CC, 2004. Modeling of the daily rainfall runoff relationship with Artificial Neural Network. *Journal of Hydrology* 285: 96-113.
- Rosenblatt F, 1958. The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review* 65: 386-408.
- Rwetabula J, De Smedt F and Rebhun M, 2007. Prediction of runoff and discharge in the Simiyu River (tributary of lake Victoria, Tanzania) using the WetSpa model. *Hydrology and Earth System Sciences* 4: 881-908.
- Safari A, De Smedt F and Moreda F, 2012. WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). *Journal of Hydrology* 418-419: 78-89.
- Sajikumar N and Thandaveswara BS, 1999. A non-linear rainfall- runoff model using Artificial Neural Networks. *Journal of Hydrology* 216: 32-55.
- Shafii M and De Smedt F, 2009. Multi-objective calibration of a distributed hydrological model (WetSpa) using a Genetic Algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 2137-2149.
- Verbeiren B, Van De Voorde T, Canters F, Binard M, Cornet Y and Batelaan O, 2013. Assessing urbanization effects on rainfall-runoff using a remote sensing supported modeling strategy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21: 92-102.
- Wang ZM, Batelaan O and De Smedt F, 1996. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Physics and Chemistry of the earth* 21: 189-193.
- Xiao B, Wang QH, Fan J, Han FP and Dai QH, 2011. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity. *Pedosphere* 21: 738-749.
- Zeinivand H, 2009. Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, soil erosion, and sediment transport. PhD Thesis, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel (VUB), Brussels, Belgium. 208 pp.