



ISSN 2345 - 5012

Available online at: www.waterdevelop.com

IBWRD

International Bulletin of Water Resources & Development

Vol. (III)- No. (04)- S.N. (12)- Spring 2016
13th Article- P. 140-152



TCSN 4098 1734

Application and Calibration of WetSpa Hydrological Model for Daily Runoff Simulation for 2007-2008 to 2011-2012 Water years: A Case Study: Balokhluchay Watershed, Ardabil, Northwestern Iran

Rasool Imani¹, Hoda Ghasemieh^{2*}, Abazar Esmali Ouri³

¹ M.Sc Student of Water Engineering, Department of Watershed and rangeland management, Faculty of Natural Resources and Geoscience, Kashan University, Isfahan, Iran.

² M.Sc Student of Water Engineering, Department of Watershed and rangeland management, Faculty of Natural Resources and Geoscience, Kashan University, Isfahan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Water Engineering, Department of Watershed and rangeland management, Faculty of Natural Resources and Geoscience, Kashan University, Isfahan, Iran.

* Corresponding Author (h.ghasemieh@kashanu.ac.ir)

Article History:

Revised: Oct. 10, 2014

Received: Jun. 09, 2014

Accepted: Dec. 26, 2014

Reviewed: Aug. 12, 2014

Published: Mar. 15, 2016

ABSTRACT

WetSpa model simulates water and energy transfer between soil, plant and atmosphere and calculates water balance in cell scale. In this study, the WetSpa model was applied to simulate daily discharge of Balokhluchay watershed in Ardabil province. Three base layers including digital elevation model from 1:50,000 scale topographic maps, landuse map from ETM+ satellite images and soil texture map from analyses of 38 surface soil samples were prepared in raster format with a cell size of 100 m. Precipitation, temperature, evapotranspiration and discharge data were obtained from Ardabil Regional Water Company in daily time step. The model was run for 2007-2008 to 2009-2010 water years and then was calibrated using both manual and automatic calibration methods. In order to test the model, it was run with 11 calibrated global parameters for 2010-2011 and 2011-2012 water years. Evaluating coefficients for test period including Model Bias, Nash-Sutcliffe, Nash-Sutcliffe for low and high flow, correlation coefficient and mean relative error were calculated -0.0873, 0.4572, 0.3011, 0.6437, 0.6965 and 0.9607 respectively. Results showed acceptable accuracy of model in daily flow simulation and high accuracy of model in high flow simulation in comparison to low flow in study area.

Keywords: WetSpa Model, Calibration, Daily Flow, Balokhluchay.

کاربرد و کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی WetSpa جهت شبیه‌سازی رواناب

روزانه سال‌های آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱-۱۳۹۰،

مطالعه موردی: حوزه آبخیز بالخلوچای

رسول ایمانی^۱، هدی قاسمیه^۲، ابازر اسمعیل عوری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، اصفهان.

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، اصفهان، نگارنده رابط (z.bidokhti@yahoo.com).

^۳ استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، اصفهان.

تاریخ داوری: ۱۳۹۳/۵/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۱۹

تاریخچه انتشار مقاله

تاریخ انتشار: ۱۳۹۴/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۵

تاریخ اصلاحات: ۱۳۹۳/۷/۱۸

چکیده

مدل WetSpa انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و اتمسفر را شبیه‌سازی و بیان آبی را در واحد سلول محاسبه می‌کند. در این تحقیق از مدل WetSpa جهت شبیه‌سازی دبی روزانه حوزه آبخیز بالخلوچای در استان اردبیل استفاده شد. لایه‌های پایه با اندازه سلول ۱۰۰ متری شامل مدل رقومی ارتفاع از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، کاربری اراضی از پردازش تصاویر ماهواره‌ای ETM+ و لایه بافت خاک از آزمایش ۳۸ نمونه خاک سطحی برداشته شده از منطقه، تهیه شدند. داده‌های روزانه بارندگی، دما، تبخیر و تعرق و دبی در خروجی از شرکت آب منطقه‌ای اردبیل تهیه شد. مدل برای سال‌های آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۹ تا ۱۳۸۸-۱۳۸۹ اجرا و سپس به دو روش دستی و اتوماتیک واسنجی شد. با استفاده از ۱۱ پارامتر کلی واسنجی شده، مدل برای سال‌های آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ و ۱۳۹۱-۱۳۹۰ جهت آزمون مدل، اجرا شد. ضرایب ارزیابی شامل انحراف مدل، ناش-ناش-ساتکلیف، ناش-ساتکلیف برای جریان کم و جریان زیاد، ضریب همبستگی و میانگین خطای نسبی برای دوره تست به ترتیب برابر با ۰/۰۸۷۳، -۰/۴۵۷۲، ۰/۳۰۱۱، ۰/۶۴۳۷، ۰/۶۹۶۵ و ۰/۹۶۰۷ شدند. نتایج، دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه و دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جریان‌های سیلابی نسبت به جریان‌های پایه را در منطقه نشان داد.

واژه‌های کلیدی: مدل WetSpa، واسنجی، جریان روزانه، بالخلوچای.

۱. مقدمه

(متکان و همکاران ۱۳۸۹ و میرجعفری و نصیری صالح ۱۳۹۱). یکی از این مدل‌ها، مدل هیدرولوژیکی مبتنی بر فیزیک و کاملاً توزیعی WetSpa^۳ است که توانایی شبیه‌سازی بیلان آبی، پیش‌بینی سیلاب، شبیه‌سازی فرسایش خاک و انتقال رسوب، بررسی تأثیر تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر شرایط هیدرولوژیکی را داشته و تمام پارامترهای هیدرولوژیکی را به صورت توزیع مکانی و در واحد سلول، شبیه‌سازی می‌کند (یعقوبی و بهره‌مند ۱۳۹۰ و Verbeiren et al. 2013). توانایی بالا در شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی و استفاده از بستر GIS جهت پردازش و تهیه لایه‌های رقومی مورد استفاده و همچنین نیاز به داده‌های کم و قابل اندازه‌گیری، این مدل را از سایر مدل‌های توزیعی پیچیده متمایز ساخته است (متکان و همکاران ۱۳۸۹) لذا به طور گسترده‌ای در خارج و داخل کشور مورد استفاده قرار گرفته که به طور نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

لیو و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی سهم هریک از کلاس‌های کاربری اراضی زیر حوزه استینسل از حوزه آبخیز رودخانه آلزیت در کشور لوکزامبورگ، در تولید رواناب و همچنین تأثیر تغییر کاربری اراضی بر تولید رواناب و سیلاب ناشی از آن با استفاده از مدل WetSpa پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مناطق شهری سهم به‌سزایی در تولید رواناب داشته و این مدل به خوبی می‌تواند ویژگی‌های مختلف هیدرولوژیکی مثل حجم سیل، دبی اوج، زمان تا اوج را برای سناریوهای مختلف تغییر کاربری اراضی شبیه‌سازی

امروزه مسئله کمبود آب در پهنه وسیعی از کشور به یک نگرانی جدی و مدیریت منابع آب به یک ضرورت تبدیل شده است. این مسئله شناسایی فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی مؤثر بر منابع آب را لازم می‌سازد، چرا که شناخت این فرآیندها، پیش‌نیاز برنامه‌ریزی بلند مدت جهت استفاده بهینه از آب و در راستای توسعه پایدار است (شریفی و صالحی ۱۳۸۴، متکان و همکاران ۱۳۹۰ و Chormanski & Batelaan 2011). پیشرفت‌های اخیر در زمینه کامپیوتر، استفاده از داده‌های بروز و دقیق زمینی و اقلیمی، این امکان را به هیدرولوژیست‌ها فراهم کرده است که فهم دقیقی از فرآیندهای فیزیکی پیچیده در سیستم‌های هیدرولوژیکی داشته و معادلات ریاضی مناسبی را جهت حل آنها ارائه دهند (Liu et al. 2003, Liu et al. 2006, Chormanski & Batelaan 2011, Berezowski et al. 2012). امروزه این معادلات در قالب مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی ارائه می‌شوند که برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب و یا تعیین تأثیر تغییر اقلیم و کاربری اراضی در تولید رواناب، در راستای پیش‌بینی وضعیت آینده و اتخاذ تصمیم بهینه در مدیریت آبخیزها به کار گرفته شده (Bahremmand & De Smedt 2008, Shafii & De Smedt 2009, Safari et al. 2012) و براساس در نظر گرفتن یا نگرفتن تغییرات مکانی متغیرها به ترتیب به دو نوع مدل‌های توزیعی^۱ و مدل‌های یکپارچه^۲ تقسیم می‌شوند

3. Water And Energy Transfer Between Soil, Plants And Atmosphere

1. Distributed
2. Lump

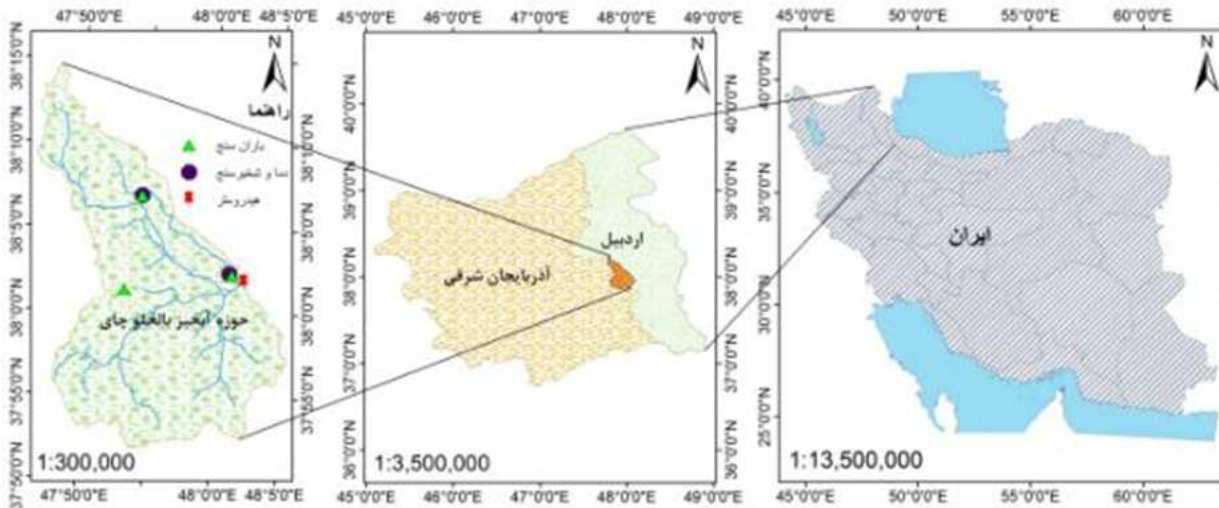
جریان روزانه حوزه آبخیز حاجی‌قوشان از زیرحوزه‌های گرگان رود در استان گلستان را با استفاده از مدل WetSpa شبیه‌سازی کردند و با توجه به ضریب ناش - ساتکلیف ۶۵ درصد به دقت قابل قبول مدل در منطقه اشاره کردند.

لذا با توجه به تأثیر تولید رواناب بر بیلان آبی و مدیریت حوزه‌های آبخیز و همچنین کارایی بالای مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa در مطالعات متعدد انجام شده، هدف اصلی این پژوهش کاربرد و کالیبراسیون این مدل به منظور شبیه‌سازی دبی روزانه حوزه آبخیز بالخلوچای است. نتایج این پژوهش می‌تواند در زمینه‌های پیش‌بینی رواناب، کنترل سیل، بررسی اثر سناریوهای مختلف مدیریتی، تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر تولید رواناب، مدیریت مخزن سد ذخیره‌ای پایین دست و سایر جوانب مدیریت جامع آبخیز مورد استفاده قرار گیرد.

۲. منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز بالخلوچای از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۲۶° ۴۶' تا ۴۷° ۴۷' طول شرقی و ۵۳° ۵۱' تا ۳۷° ۳۳' عرض شمالی و در حد فاصل دو رشته‌کوه بزقوش و سبلان جای گرفته است. رودخانه بالخلوچای که از مهم‌ترین رودخانه‌های دائمی استان اردبیل است این حوزه را زهکشی کرده و در محل ایستگاه درجه یک هیدرومتری یامیجی، بخش بالایی رودخانه بالخلوچای را تشکیل می‌دهد. شکل (۱) موقعیت کشوری و استانی حوزه آبخیز بالخلوچای را نشان می‌دهد. مساحت حوزه آبخیز ۵۶۲۷۰/۸ هکتار است که ۷۱/۵۱ درصد (۴۰۲۳۹/۳۸ هکتار) آن در استان اردبیل و ۲۸/۴۹ درصد (۱۶۰۳۱/۴۲ هکتار) نیز در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. ایستگاه‌های هواشناسی موجود در آن شامل ایستگاه‌های باران سنجی نیر، لای و تکبلاغ و همچنین ایستگاه‌های تبخیر سنجی لای و نیر است (شکل ۱).

کند (Liu Et Al, 2004). بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۷) به شبیه‌سازی جریان ساعتی به منظور ارزیابی تأثیر احیای جنگلی بر تولید رواناب در زیرحوزه مارجکنی از حوزه آبخیز رودخانه هورناد در کشور اسلواکی با استفاده از مدل WetSpa پرداختند و با مقایسه دبی خروجی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به این نتیجه رسیدند که این مدل، کارایی قابل قبولی در شبیه‌سازی رواناب داشته و سناریوی افزایش ۵۰ درصدی در سطح اراضی جنگلی کاهش ۱۲ درصدی در دبی اوج سیلاب را نشان می‌دهد (Bahremand et al, 2007). پورتابرندیک و همکاران (۲۰۱۰) دبی روزانه سه حوزه آبخیز متفاوت از نظر ویژگی‌های فیزیکی و جغرافیایی کامینا، سیدرا و ملوکا در کشور لهستان را با استفاده از مدل WetSpa شبیه‌سازی کردند و با مقایسه دبی‌های مشاهده شده در خروجی حوزه و دبی‌های شبیه‌سازی شده به این نتیجه رسیدند که برای دو حوزه سیدرا و کامینا فقط جریان‌های بالا خوب (ضریب کارایی برای جریان‌های بالا و پایین به ترتیب برابر با ۸۱ و ۳۴ درصد برای سیدرا و ۸۱ و ۳۵ درصد برای کامینا) و برای حوزه ملوکا، هم جریان بالا و هم جریان کم به خوبی (ضریب کارایی برای جریان‌های بالا و پایین به ترتیب برابر با ۸۲ و ۵۵ درصد) شبیه‌سازی شده است (Porretta- Brandyk at al, 2010). بهره‌مند و همکاران (۱۳۸۹) به معرفی مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa پرداختند و با اشاره به تست‌های انجام شده در کشورهای لوکزامبرگ، بلژیک، اسلواکی و تانزانیا، تطابق بالای هیدروگراف مشاهداتی با هیدروگراف محاسباتی در همه تست‌ها و قابلیت بالای آن مدل را اعلام کردند. مرادی‌پور و همکاران (۱۳۹۰) دبی روزانه حوزه آبخیز طالقان از زیرحوزه‌های سفیدرود در استان تهران را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa شبیه‌سازی کردند و با توجه به معیار ناش - ساتکلیف (۰/۸۵) در دوره آزمون مدل، به دقت بالای مدل در آن منطقه اشاره کردند. کبیر و همکاران (۱۳۹۲b)



شکل ۱. موقعیت کشوری و استانی حوزه آبخیز بالخلوچای

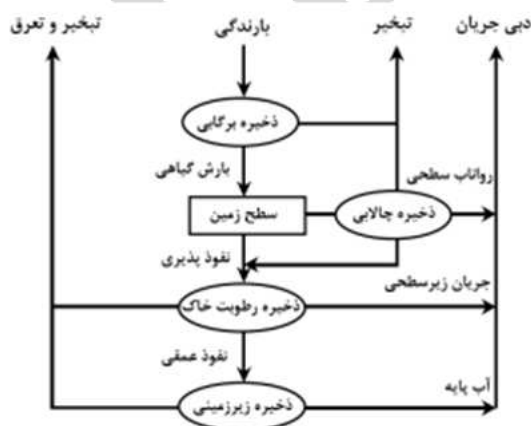
سلول از شبکه سلولی از سطح زمین به پایین به ترتیب چهار لایه عمودی منطقه تاج پوشش، منطقه ریشه، منطقه انتقال و منطقه اشباع در نظر گرفته و با استفاده از اطلاعات زمینی و اقلیمی، فرآیندهای هیدرولوژیکی شامل بارش، ذوب برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی کرده و تعادل آب و انرژی و در نهایت بیلان آبی را در هر سلول محاسبه می‌کند (Liu & De Smedt 2004). بیلان آبی حوزه آبخیز از جمع بیلان آبی سلول‌ها بدست می‌آید (کبیر و همکاران ۱۳۹۲a). شکل (۲) نمودار ساختار مدل را در واحد سلول نشان می‌دهد (Liu et al. 2006).

بارش متوسط سالانه آن ۳۰۳ میلیمتر، متوسط دمای سالانه ۱۳ درجه سانتی‌گراد، اقلیم آن نیمه‌خشک و حداکثر ارتفاع در نزدیکی قله سبلان و حداقل ارتفاع در خروجی حوزه در محل ایستگاه هیدرومتری به ترتیب ۴۳۸۰ و ۱۵۶۰ متر از سطح دریا بوده و آب آن پس از عبور از ایستگاه هیدرومتری یامچی وارد مخزن سد ذخیره‌ای یامچی شهرستان اردبیل می‌شود. عمده کاربری ارضی حوزه شامل مراتع با ۵۱ درصد و اراضی زراعی با ۴۶ درصد از مساحت کل حوزه است. حوزه آبخیز بالخلوچای جزو زیر حوزه‌های حوزه آبخیز قره‌سو بوده که آب آن به رودخانه ارس وارد شده و در نهایت به دریای خزر تخلیه می‌شود (Imani et al. 2014).

۳. مواد و روش‌ها

۳.۱. مدل WetSpa

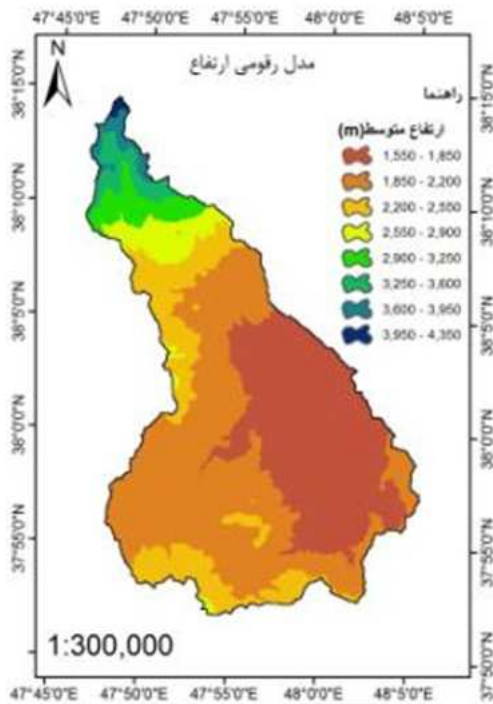
مدل انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و اتمسفر (WetSpa) برای اولین بار توسط ونگ^۱ و همکاران (۱۹۹۶) در دانشگاه وریج بروکسل بلژیک ابداع شد و سپس توسط دی‌اسمیت^۲ و همکاران (۲۰۰۰)، لیو^۳ و همکاران (۲۰۰۳) و زینی‌وند^۴ (۲۰۰۹) توسعه یافت. این مدل برای هر



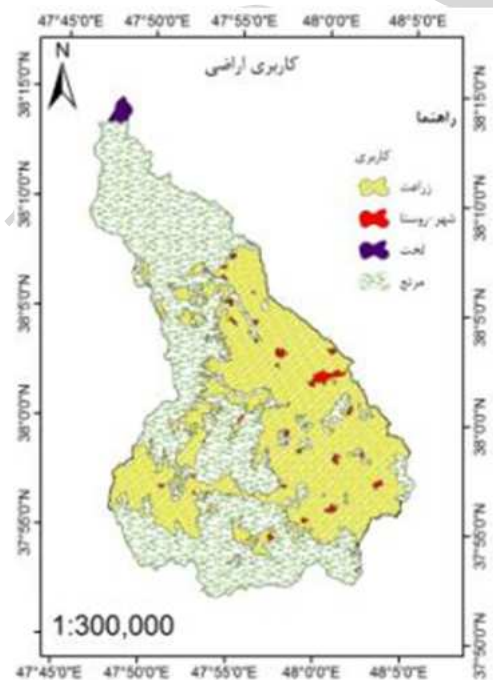
شکل ۲. ساختار عملکرد مدل WetSpa در واحد سلول

1. Wang Et Al.
2. De Smedt Et Al.
- 3: Liu
- 4: Zeinivand

نقشه‌های پایه در محیط Arc GIS به فرمت رستری، با اندازه سلولی ۱۰۰ متر و کدهای تعریف شده در جداول استاندارد مدل تبدیل شده و با فرمت اسکی فایل^۱ در دایرکتوری مربوطه از مدل ذخیره شدند.



شکل ۳. مدل رقمی ارتفاع حوزه آبخیز



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز

در شکل (۲) رواناب سطحی با استفاده از یک روش استدلالی اصلاح شده مبتنی بر رطوبت با یک ضریب 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 زیرحوزه به زیرحوزه 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 (Liu & De Smedt 2004). روابط مورد استفاده و شرح آنها به تفصیل در راهنمای مدل WetSpa ارائه شده است.

۲.۳. جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات

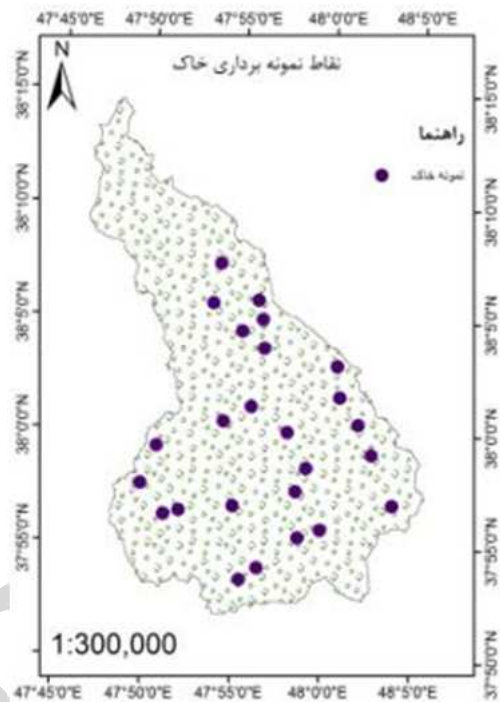
سه نقشه مدل رقمی ارتفاع، کاربری اراضی و بافت خاک به عنوان لایه‌های پایه در اجرای مدل WetSpa عمل می‌کنند (Liu & De Smedt 2004) که هر کدام از آنها برای منطقه مورد مطالعه به شرح زیر تهیه شدند.

مدل رقمی ارتفاع با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه در محیط Arc GIS تهیه شد. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور، پردازش و طبقه‌بندی تصویر ETM⁺ ماهواره لندست ۷ مربوط به ماه ژوئن سال ۲۰۱۲ میلادی در محیط نرم افزار ENVI تهیه شد. جهت تهیه نقشه بافت خاک، تعداد ۳۸ نمونه خاک سطحی (۰ تا ۱۵ سانتی‌متری) به صورت تصادفی و با پراکنش مناسب در سطح حوزه آبخیز تهیه شد. درصد رس، سیلت و شن نمونه‌ها به روش هیدرومتری در آزمایشگاه خاک تعیین شد و بافت خاک نمونه‌ها براساس مثلث بافت خاک USDA و با استفاده از نرم‌افزار TAL تعیین شد. در نهایت نقشه بافت خاک حوزه با استفاده از روش درونیابی پلیگون تیسن (قهرودی و بابایی، ۱۳۸۹) برای کل حوزه آبخیز در نرم افزار Arc GIS تهیه شد. نقشه مدل رقمی ارتفاع، نقشه کاربری اراضی، نقشه نقاط نمونه برداری خاک و نقشه بافت خاک برای حوزه آبخیز مورد مطالعه به ترتیب در شکل‌های (۳)، (۴)، (۵) و (۶) آمده است.

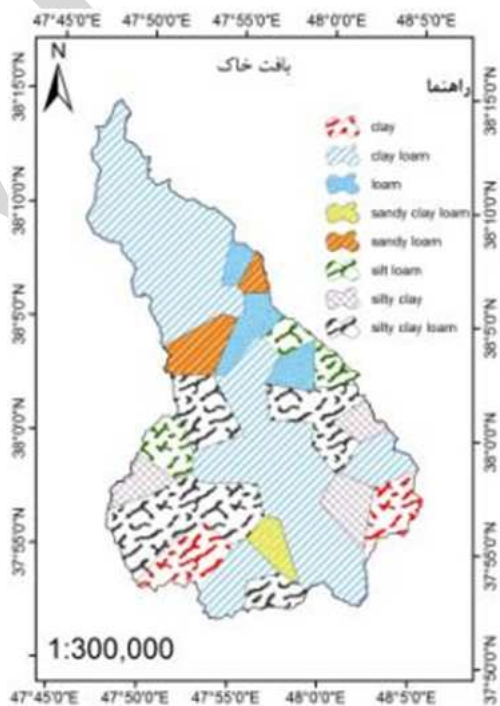
(شکل‌های ۱ و ۱۱) و داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل و همچنین دمای متوسط روزانه از ایستگاه‌های تبخیرسنجی لای و نیر (شکل‌های ۱ و ۱۲) که توسط اداره آب منطقه‌ای اردبیل وابسته به وزارت نیرو احداث و آماربرداری می‌شوند، تهیه شدند. همچنین داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری درجه یک یامچی واقع در خروجی حوزه جهت واسنجی و ارزیابی عملکرد مدل از همان سازمان تهیه شد. با توجه به بررسی منابع مختلف (یعقوبی و بهره‌مند ۱۳۹۰، دهقانی و همکاران ۱۳۹۲، Nurmohamed et al. 2006، Rwetabula et al. 2007)، نقایص آماری موجود و همچنین شرایط اقلیمی سال‌های مختلف، داده‌های مربوط به سال‌های آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱-۱۳۹۰ (۵ سال) که شرایط اقلیمی تقریباً مشابهی داشتند، آماده شدند. از آمار سه سال اول جهت واسنجی و از آمار دو سال آخر جهت آزمون مدل استفاده شد.

۳.۳. روش کار

در مدل WetSpa شش جدول مرجع و استاندارد وجود دارد که مقادیر هدایت هیدرولیکی، تخلخل، ظرفیت زراعی، رطوبت اولیه خاک، رطوبت باقیمانده و تراکم خاک برای هر کلاس بافت خاک، مقادیر عمق ریشه، ظرفیت برگابی، ضریب زبری مانینگ و شاخص سطح برگ مربوط به هر کلاس کاربری اراضی و همچنین اطلاعات مربوط به ذخیره چالابی، دور بازگشت و ضریب رواناب در آنها ذخیره شده است. طبق گزارش Liu & De Smedt (2004) اطلاعات این جداول استاندارد براساس مطالعات متعدد مرتبط صورت گرفته در دنیا انتخاب شده‌اند. نقشه‌های پایه تهیه شده دارای کدهای مربوطه به صورت اسکی فایل در محیط نرم افزار Arc View وارد می‌شود. با استفاده از کدهای نقشه‌های پایه و اطلاعات مربوطه به آن کدها در جداول مرجع، حدود ۳۰ نقشه دیگر و به فرمت اسکی تهیه می‌شود. برای مثال نقشه‌های ماسک، جهت جریان، جریان تجمعی، طول جریان، شبکه آبراهه، رتبه‌بندی آبراهه‌ها، شیب و زیرحوزه‌ها از نقشه مدل رقومی ارتفاع ساخته می‌شوند.



شکل ۵. نقاط نمونه برداری از خاک سطحی



شکل ۶. نقشه بافت خاک حوزه آبخیز

داده‌های اقلیمی مورد نیاز شامل بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل و دما (به علت کوهستانی بودن منطقه و تجمع و ذوب برف در حوزه) است. داده‌های بارندگی با گام زمانی روزانه از سه ایستگاه باران سنجی تک‌بلاغ، لای و نیر

که در آن Q_{S_i} و Q_{O_i} به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و N تعداد داده‌ها است.

ضریب ناش - ساتکلیف^۳

این معیار، استاندارد واریانس باقیمانده‌ها بوده و با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{S_i} - Q_{O_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2} \quad (3)$$

که در آن Q_{S_i} و Q_{O_i} به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، \bar{Q}_O متوسط دبی‌های مشاهده شده و N تعداد داده‌ها است.

ضریب ناش - ساتکلیف برای جریان‌های کم^۴

این معیار، لگاریتم نپین ناش - ساتکلیف (رابطه ۳) برای دبی‌های کم بوده و با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$NSL = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{S_i} + \varepsilon) - \ln(Q_{O_i} + \varepsilon)]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{O_i} + \varepsilon) - \ln(\bar{Q}_O + \varepsilon)]^2} \quad (4)$$

که در آن Q_{S_i} و Q_{O_i} به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، \bar{Q}_O متوسط دبی‌های مشاهده شده، N تعداد داده‌ها و ε مقدار بسیار کوچک اختیاری برای رفع مشکل مربوط به دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برابر با صفر است.

ضریب ناش - ساتکلیف برای جریان‌های بالا^۵

این معیار، سازگار شده ناش - ساتکلیف (رابطه ۳) برای دبی‌های زیاد بوده، با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{O_i} + \bar{Q}_O)(Q_{S_i} - Q_{O_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{O_i} + \bar{Q}_O)(Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2} \quad (5)$$

که در آن Q_{S_i} و Q_{O_i} به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهده شده، \bar{Q}_O متوسط دبی‌های مشاهده شده و N تعداد داده‌ها است.

نقشه‌های عمق ریشه، ظرفیت برگابی، ضریب زبری مانینگ و شاخص سطح برگ از نقشه کاربری اراضی ساخته می‌شوند. نقشه‌های هدایت هیدرولیکی، تخلخل، ظرفیت زراعی، رطوبت اولیه خاک، رطوبت باقیمانده و تراکم خاک از نقشه بافت خاک تهیه می‌شوند. نقشه‌هایی از قبیل ضریب رواناب پتانسیل، ظرفیت چالابی، سرعت جریان و زمان تأخیر از ترکیب نقشه‌های خاک و کاربری اراضی و نقشه‌های پلیگون تیسن بارندگی، دما و تبخیر و تفرق با استفاده از نقشه‌های موقعیت ایستگاه‌ها، مرز و ماسک حوزه تهیه می‌شوند. این نقشه‌ها در دایرکتوری مربوطه ذخیره شده و موقع اجرای مدل فراخوانی می‌شوند. مدل با استفاده از سری‌های زمانی و نقشه‌های ذخیره شده، اجرا و خروجی‌هایی مانند تعادل آب در هر یک از زیر حوزه‌ها، مقدار میانگین پارامترهای هیدرولوژیکی مانند هدایت هیدرولیکی برای هر زیرحوزه، تبخیر، دما و بارندگی روزانه برای هر زیرحوزه، دبی رواناب سطحی، زیرقشری، زیرزمینی و جریان کل خروجی از حوزه به صورت فایل نوشتاری^۱ و همچنین توزیع مکانی و زمانی پارامترهایی مانند رواناب سطحی، جریان زیر قشری و جریان زیرزمینی را با فرمت اسکی ارائه می‌دهد.

۴.۳. ارزیابی مدل

نرم افزار محاسبه معیارهای ارزیابی در مدل تعیین شده و بعد از اجرای مدل می‌توان آن را جهت محاسبه معیارها اجرا کرد. بعضی از معیارهای پرکاربرد جهت ارزیابی عملکرد مدل WetSpa به شرح زیر است:

۱- انحراف مدل^۲

این معیار تفاوت میانگین نسبی بین دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده بوده و با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{S_i} - Q_{O_i})}{\sum_{i=1}^N Q_{O_i}} \quad (2)$$

1. Nash-Sutcliffe
2. Nash-Sutcliffe Low
3. Nash-Sutcliffe High

1. TEXT
2. Model Bias

- ضریب همبستگی

این معیار درجه نزدیکی دو متغیر را به هم نشان داده و با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

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

که در آن Qo_i و Qs_i به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهده شده، \bar{Qo} و \bar{Qs} به ترتیب متوسط دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و N تعداد داده‌ها است.

- ریشه میانگین مربعات خطا

این معیار نشان دهنده تفاوت میان دبی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بوده و با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود. (۷)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Qo_i - Qs_i)^2}$$

که در آن Qo_i و Qs_i به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و N تعداد داده‌ها است.

- میانگین خطای نسبی

این معیار نشان دهنده تفاوت میان دبی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بوده و با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Qo_i - Qs_i|}{Qo_i} \quad (8)$$

که در آن Qo_i و Qs_i به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و N تعداد داده‌ها است.

۳.۵. واسنجی مدل

در این پژوهش از داده‌های مربوط به سال‌های آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹-۱۳۸۸ برای واسنجی و از داده‌های سال‌های آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ و ۱۳۹۱-۱۳۹۰ جهت آزمون مدل استفاده شد. در جدول (۱) پارامترهای کلی کالیبراسیون، واحد پارامترها، مقادیر اولیه انتخاب شده و محدوده تغییرات آنها را که در نرم‌افزار PEST برای دوره واسنجی تعریف شدند، آمده است.

جدول ۱. پارامترهای کلی واسنجی، مقادیر اولیه و محدوده تغییرات وارد شده به نرم‌افزار PEST

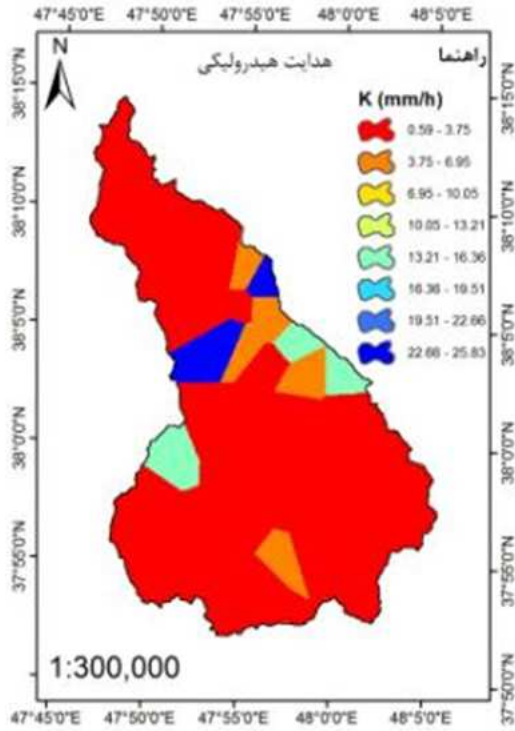
پارامتر	علامت	واحد	مقدار اولیه	حداقل	حد اکثر
فاکتور جریان زیرسطحی	K_i	-	۱۴/۲	۰/۰۱	۱۰۰
ضریب افت آب زیرزمین	K_g	d^{-1}	۰/۰۰۰۹۶	1^{-10}	۰/۱
رطوبت اولیه خاک	K_{ss}	-	۰/۷۳	-۱	۲
فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق	K_{ep}	-	۰/۱۴	۰/۱	۲
ذخیره آب زیرزمینی اولیه	G_0	mm	۳۹۰	۰	۳۰۰۰
حداکثر ذخیره آب زیرزمینی	G_{max}	mm	۲۸۰۰	۱	۳۰۰۰
ضریب درجه حرارت آستانه	T_0	$^{\circ}C$	۰/۹۸	-۱	۱
ضریب درجه روز حرارت	K_{snow}	$mm^{\circ}C^{-1} d^{-1}$	۰/۸۸	-۱	۵۰
ضریب روز درجه بارش	K_{rain}	$mm mm^{\circ}C^{-1} d^{-1}$	۰/۰۱	1^{-10}	۰/۱
توان رواناب سطحی	K_{run}	-	۵/۵	۱	۱۰۰
حداکثر شدت بارش	P_{max}	mm	۲۰۰	۱	۵۰۰

۴. یافته‌ها و بحث

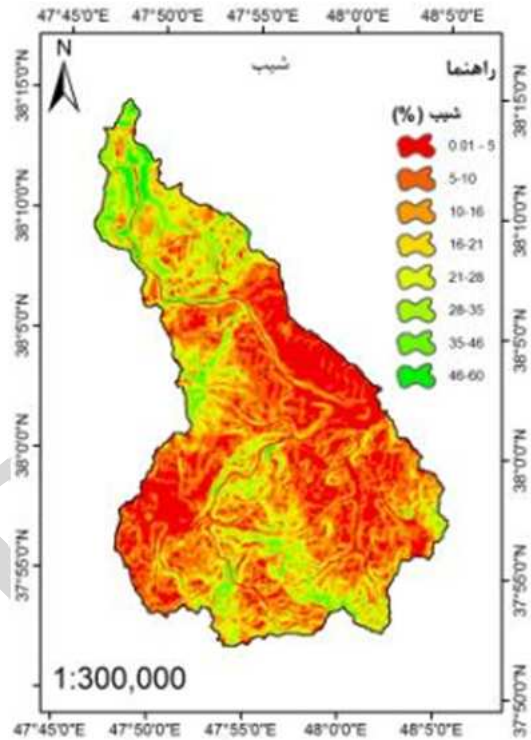
نمونه‌ای از نقشه‌های پارامترهای مکانی مهم شامل نقشه شیب، تهیه شده از نقشه مدل رقومی ارتفاع، نقشه ضریب

زبری مایننگ، تهیه شده از نقشه کاربری اراضی، نقشه هدایت هیدرولیکی، تهیه شده از نقشه خاک و نقشه سرعت جریان رواناب تهیه شده از ترکیب سه لایه پایه در محیط

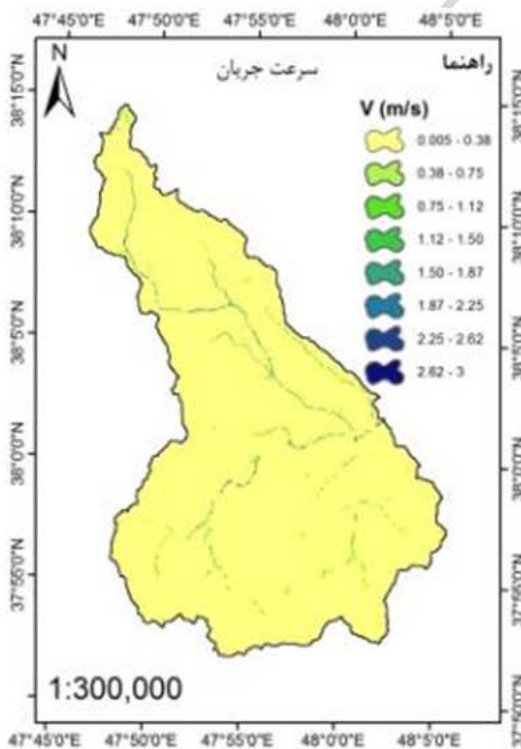
نرم‌افزار Arc View به ترتیب در شکل‌های (۷) تا (۱۰) آمده است.



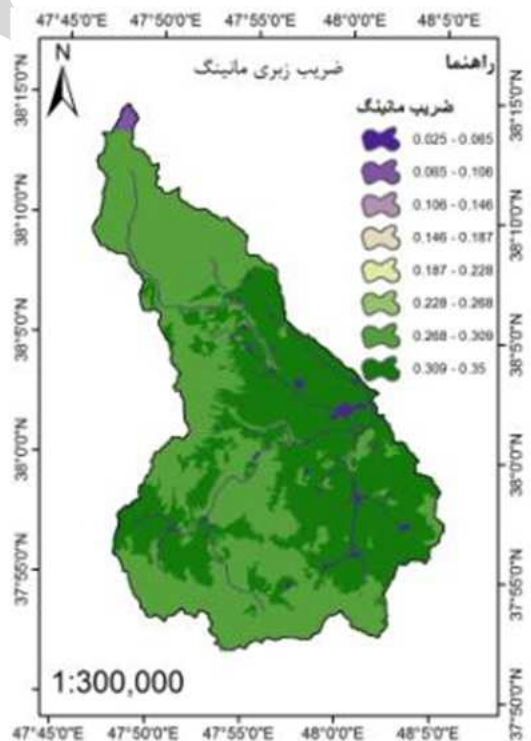
شکل ۹. نقشه هدایت هیدرولیکی خاک حوزه آبخیز



شکل ۷. نقشه شیب حوزه آبخیز



شکل ۱۰. نقشه سرعت جریان رواناب در حوزه آبخیز

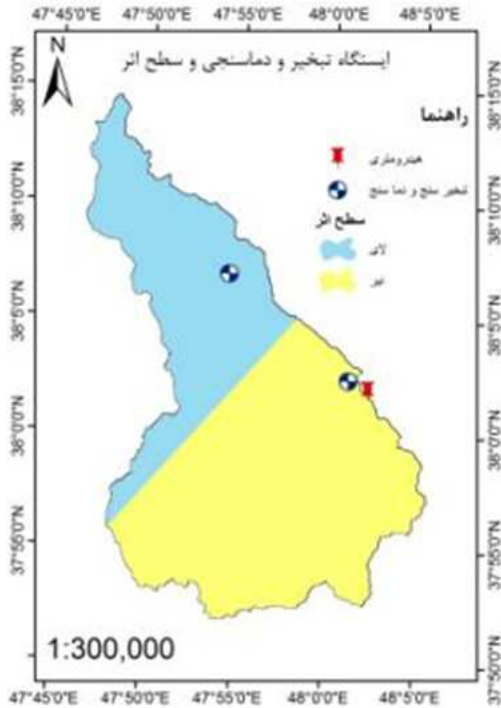


شکل ۸. نقشه ضریب زبری مانینگ

نتایج مربوط به پارامترهای کلی نهایی و بهینه تعیین شده در واسنجی اتوماتیک با نرم‌افزار PEST و آنالیز حساسیت آنها مطابق جدول (۲) است.

جدول ۲. پارامترهای بهینه واسنجی شده و آنالیز حساسیت آنها

پارامتر	مقدار بهینه	حساسیت	رتبه حساسیت
K_i	۱۳/۶۴۲۸	$1/57 \times 10^{-2}$	۸
K_g	$1/41 \times 10^{-4}$	۲۳۵/۲۶	۱
K_{ss}	۰/۷۲۹۶۷۵	۰/۱۳۱	۶
K_{ep}	۰/۱۴۷۰۸۱	۱/۱۷۹	۲
G_0	۱۷۸۴/۸۳	$2/913 \times 10^{-5}$	۱۰
G_{max}	۲۹۱/۵۰۱	$1/117 \times 10^{-5}$	۱۱
T_0	۰/۹۹۰۴۶۷	۰/۳۷۸	۵
K_{snow}	۰/۸۷۸۳۲۲۵	۰/۳۷۹	۴
K_{rain}	۰/۰۹۹۷۹۷۲	۱/۱۰۸	۳
K_{run}	۵/۵۹۸۱۸۳	$2/179 \times 10^{-2}$	۷
P_{max}	۴۰/۵۹۱۹۲۶	$1/436 \times 10^{-3}$	۹



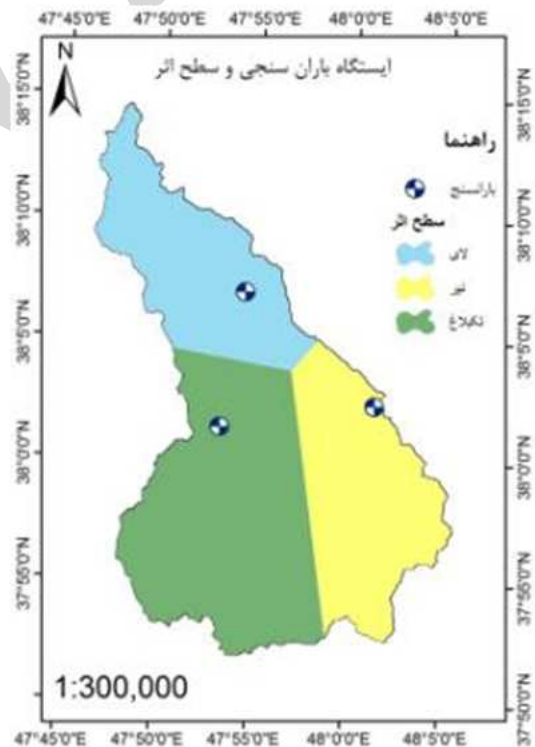
شکل ۱۲. موقعیت ایستگاه هیدرومتری، تبخیر و دماسنجی و سطح اثر

موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری و نتایج مربوط به پلیگون‌بندی سطح اثر هریک از ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی به ترتیب مطابق شکل‌های (۱۱) و (۱۲) است.

معیارهای ارزیابی کارایی مدل در سه مرحله محاسبه شدند. مرحله واسنجی دستی و اولیه مدل برای دوره واسنجی، مرحله واسنجی اتوماتیک با نرم‌افزار PEST برای دوره واسنجی و مرحله آزمون برای دوره آزمون که نتایج مربوط به آماره‌های ارزیابی برای هر مرحله در جدول (۳) ارائه شده است.

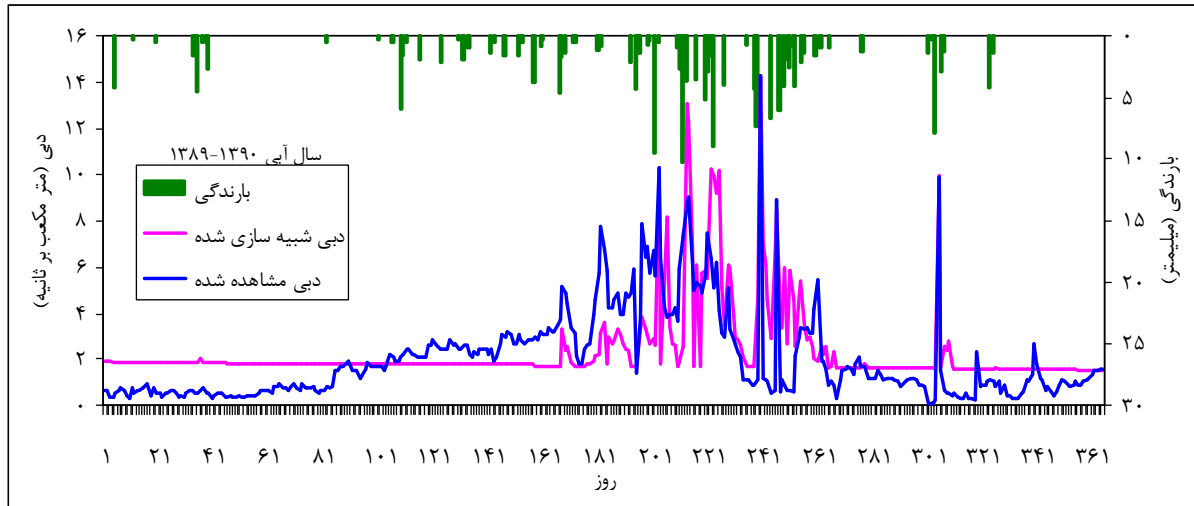
جدول ۳. معیارهای ارزیابی مدل در دوره واسنجی و آزمون

دوره آزمون	واسنجی اتوماتیک	واسنجی دستی	معیار ارزیابی
-۰/۰۸۷۳	-۰/۰۰۲۹	۰/۰۱	Bias
۰/۴۵۷۲	۰/۵۲۶۲	۰/۴۸۵۴	NS
۰/۳۰۱۱	۰/۳۶۵۲	۰/۳۷۱۸	NSL
۰/۶۴۳۷	۰/۶۸۸۵	۰/۶۷۲۶	NSH
۰/۶۹۶۵	۰/۷۳۰۱	۰/۷۰۸۷	R
۰/۶۹۷۸	۰/۵۷۰۲	۰/۵۹۴۲	RMSE
۰/۹۶۰۷	۰/۸۱۶۱	۰/۷۷۷۵	MRE

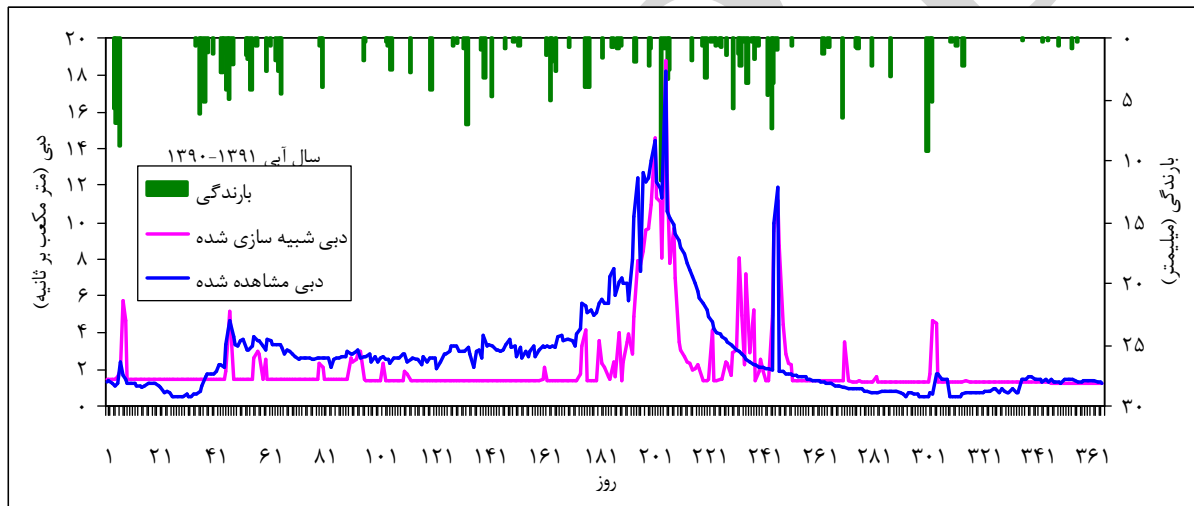


شکل ۱۱. موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و سطح اثر

نتایج مربوط به دبی‌های شبیه‌سازی شده، مشاهده شده و بارندگی مربوط به آن برای دوره آزمون مطابق شکل‌های (۱۳) و (۱۴) است.



شکل ۱۳. دبی و بارندگی مشاهده شده و دبی شبیه‌سازی شده برای سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰



شکل ۱۴. دبی و بارندگی مشاهده شده و دبی شبیه‌سازی شده برای سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۹۱

مدل WetSpa دبی‌های بالا و سیلابی را در منطقه مورد مطالعه بهتر از دبی‌های پایین شبیه‌سازی می‌کند و با نتایج تحقیقات جورمانسکی و باتلان (۲۰۱۱)، پورتابرندیک و همکاران (۲۰۱۰)، کبیر و همکاران (۱۳۹۲b) و یعقوبی و بهره‌مند (۱۳۹۰) تطابق دارد، لذا این مدل با دقت خوبی می‌تواند در پیش‌بینی دبی‌های سیلابی این منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل هیدرولوژیکی WetSpa جهت شبیه‌سازی دبی روزانه حوزه آبخیز بالخلوچای مورد استفاده

نتایج جداول و اشکال فوق نشان می‌دهد که از میان ۱۱ پارامتر کلی واسنجی، ضریب افت آب زیر زمینی (K_g) بیشترین و حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (G_{max}) کمترین حساسیت را در واسنجی مدل دارند. کالیبراسیون اتوماتیک دقت مدل را تا حدودی افزایش داده است.

دقت مدل در مرحله واسنجی بهتر از دوره آزمون بوده و این امر به دلیل تطبیق پارامترهای مدل با شرایط دوره واسنجی است. با توجه به معیارهای ارزیابی هم در دوره واسنجی و هم در دوره آزمون، نتایج شبیه‌سازی دبی روزانه و عملکرد مدل در حد قابل قبول است. همچنین نتایج نشان می‌دهد

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از زحمات بخش مطالعات آب‌های سطحی شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل و خانم مهندس آذرخش و همچنین کادر مدیریت دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

بهره‌مند، ع.، یعقوبی، ف.، کبیر، آ. (۱۳۸۹). معرفی مدل WetSpa (مدل توزیعی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و اتمسفر)، ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۸ و ۹ اردیبهشت ۱۳۸۹، دانشگاه تربیت مدرس نور.

دهقانی، ن.، وفاخواه، م.، بهره‌مند، ع. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa حوزه آبخیز کسلیان. نشریه پژوهش‌های حفاظت خاک و آب، ۲۰(۶)، ۲۵۳-۲۶۱.

شریفی، م.ب.، صالحی، م. (۱۳۸۴). کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی جریان رودخانه در حوزه معرف کارده. خلاصه گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شرکت آب منطقه‌ای خراسان.

قهرودی‌تالی، م.، بابایی فینی، ا.ا. (۱۳۸۹). درآمدی بر سیستم‌های اطلاعاتی جغرافیایی. انتشارات دانشگاه پیام نور.

۵: کبیر، آ.، بهره‌مند، ع.، آذین‌مهر، م. (۱۳۹۲a). مدل WetSpa (دستورالعمل و کاربردها). انتشارات ارسطو، مشهد.

کبیر، آ.، بهره‌مند، ع.، آذین‌مهر، م. (۱۳۹۲b). شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی-مکانی WetSpa در حوزه آبخیز حاجی قوشان استان گلستان. پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، ۲۹ و ۳۰ بهمن ۱۳۹۲، پردیس فنی و مهندسی شهیدعباسپور، دانشگاه شهید بهشتی.

میرجعفری، ف.، نصیری‌صالح، ف. (۱۳۹۱). شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز رودخانه قره‌سو در استان اردبیل با استفاده از مدل توزیعی WetSpa. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۹ تا ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲، دانشگاه صنعتی اصفهان.

مرادی‌پور، ش.، بهره‌مند، ع.، زینی‌وند، ح.، نجفی‌نژاد، ع. (۱۳۹۰). شبیه‌سازی توزیعی-مکانی سیل با مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوزه آبخیز طالقان. هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، ۷ و ۸ اردیبهشت ۱۳۹۰، دانشگاه صنعتی اصفهان.

و واسنجی قرار گرفت. پس از آماده‌سازی سه لایه پایه و تهیه سری‌های زمانی مورد نیاز، مدل برای سال‌های آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹-۱۳۸۸ جهت واسنجی و برای سال‌های آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ و ۱۳۹۱-۱۳۹۰ جهت آزمون اجرا شد. جهت تطبیق بیشتر نتایج شبیه‌سازی با واقعیت، واسنجی مدل به دو صورت دستی و اتوماتیک انجام شد. ضرایب انحراف مدل، ناش-ساتکلیف، ناش-ساتکلیف برای جریان کم، ناش-ساتکلیف برای جریان زیاد، ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با ۰/۰۱، ۰/۴۸، ۰/۳۷، ۰/۶۷، ۰/۷ و ۰/۵۹ در واسنجی دستی و ۰/۰۲، ۰/۵۲، ۰/۳۶، ۰/۶۸، ۰/۷۳ و ۰/۵۷ در واسنجی اتوماتیک شدند. نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای واسنجی، ضریب افت آب زیر زمینی (K_p) را به عنوان حساس‌ترین پارامتر مدل در این منطقه تعیین کرد. با استفاده از پارامترهای واسنجی شده، مدل برای دوره آزمون که شرایط متفاوت اقلیمی با دوره واسنجی داشت، اجرا شد و ضرایب مذکور به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۰/۴۵، ۰/۳۰، ۰/۶۴، ۰/۶۹ و ۰/۶۹ شدند. بررسی جمعی ضرایب کارایی مدل مورد استفاده، دقت قابل قبول مدل را در شبیه‌سازی دبی روزانه نشان داد ولی مدل هم در دوره واسنجی و هم در دوره آزمون جریان‌های بالا و سیلابی را بادقت بسیار بیشتری نسبت به جریان‌های کم و دبی پایه شبیه‌سازی کرد ($NSH=0/68$ برای واسنجی و $NSH=0/64$ برای آزمون) که این موضوع با هدف اصلی مدل که پیش‌بینی سیل است، تطابق دارد. لذا نتایج نشان داد که مدل WetSpa می‌تواند در پیش‌بینی سیل و اقدامات کنترل سیل منطقه و همچنین مدیریت مخزن سد ذخیره‌ای پایین دست مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از آنجا که این مدل قابلیت تعیین تغییرات مکانی پارامترها را دارد، از آن می‌توان در تهیه نقشه تغییرات مکانی پتانسیل تولید رواناب و تعیین محل‌های مناسب جهت عملیات کنترل سیل استفاده کرد. همچنین با استفاده از این مدل می‌توان تأثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و کاربری اراضی را بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و بیلان آبی منطقه بررسی کرد.

- متکان، ع.، زینی‌وند، ح.، غفوری روزبهانی، ع.، بیات، ب.، احمدی، ا. (۱۳۹۰) مدل‌سازی تغییرات مکانی-زمانی رواناب با مدل توزیع یافته مکانی WetSpa در بستر GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز مرک، استان کرمانشاه). هیجدهمین همایش و نمایشگاه ملی ژئوماتیک ۹۰ و گردهمایی انجمن بین‌المللی فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، ۲۵ تا ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۰، سازمان نقشه‌برداری کشور.
- متکان، ع.، زینی‌وند، ح.، بیات، ب.، میرباقری، ب.، غفوری، ع. (۱۳۸۹) بررسی قابلیت‌ها، مزایا و محدودیت‌های مدل هیدرولوژیکی توزیع یافته مکانی WetSpa در ایران. اولین کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا، ۲۳ و ۲۴ آبان ۱۳۸۹ دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- یعقوبی، ف.، بهره‌مند، ع. (۱۳۹۰) شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa در حوزه آبخیز چهلچای در استان گلستان، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳(۱۸)، ۱۸۵-۲۰۵.
- Berezowski, T., Chormanski, J., Batelaan, O., Canters, F. & 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(2012), 54-65.
- Bahreman, A. & De Smedt, F. (2008) Distributed Hydrological Modeling and Sensitivity Analysis in Torysa Watershed, Slovakia. *Water Resource Management*, 22 (2008), 393-408.
- Bahreman, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poorova, J., Velcicka, L. & Kunikova, E. (2007) WetSpa Model Application for Assessing Reforestation Impacts on Floods in Margecany Hornad Watershed, Slovakia. *Water Resource Management*, 21(2007), 1373-1391.
- Chormanski, J. & Batelaan, O. (2011) Application of the WetSpa Distributed Hydrological Model for Catchment with Significant Contribution of Organic Soil, Upper Biebrza Case Study. *Journal of Land Reclamation*, 43(1), 25-35.
- De Smedt, F., Liu, Y.B. & 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.
- Imani, R., Ghasemieh, H. & Mirzavand, M. (2014) Determining and Mapping Soil Erodibility Factor (Case Study: Yamchi Watershed in Northwest of Iran). *Open Journal of Soil Science*, 4(2014), 168-173.
- Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L. & Pfister, L. (2006) Predicting Storm Runoff from Different Land-use Classes Using a Geographical Information System-Based Distributed Model. *Journal of Hydrological Processes*, 20(2006), 533-548.
- Liu, Y.B., De Smedt, F., Hoffmann, L. & Pfister, L. (2004) Assessing Landuse Impacts on Flood Processes in Complex Terrain by Using GIS and Modeling Approach. *Journal of Environmental Modeling and Assessment*, 9(2004), 227-235.
- Liu, Y.B. & De Smedt, F. (2004) *WetSpa Extension, Documentation and User Manual*. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije University Brussel, Belgium.
- Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L. & Pfister, L. (2003) A Diffusive Transport Approach for Flow Routing in GIS-based Flood Modeling. *Journal of Hydrology*, 283(2003), 91-106.
- Nurmohamed, R., Naipal, S. & De Smedt, F. (2006) Hydrologic Modeling of the Upper Suriname River Basin Using WetSpa and ArcView GIS. *Journal of Spatial Hydrology*, 6(1), 1-17.
- Porretta-Brandyk, L., Chormanski, J., Ignar, S., Okruszko, T., Brandyk, A., Szymczak, T. & Krezalek, K. (2010) Evaluation and Verification of the WetSpa Model Based on Selected Rural Catchments in Poland. *Journal of Water and Land Development*, 14(2010), 115-133.
- Rwetabula, J., De Smedt, F. & 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 Discussions*, 4(2007), 881-908.
- Shafii, M. & De Smedt, F. (2009) Multi-Objective Calibration of a Distributed Hydrological Model (WetSpa) Using a Genetic Algorithm. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2009), 2137-2149.
- Safari, A., De Smedt, F. & Moreda, F. (2012) WetSpa Model Application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). *Journal of Hydrology*, 418-419(2012), 78-89.
- Verbeiren, B., Van De Voorde, T., Canters, F., Binard, M., Cornet, Y. & 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(2013), 92-102.
- Wang, Z.M., Batelaan, O. & De Smedt, F. (1996) A Distributed Model for Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa). *Journal of Physics and Chemistry of the earth*, 21(1996), 189-193.
- 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.