

ارزیابی مدل WetSpa در شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه‌های نیمه‌خشک و کوهستانی (مطالعه موردی: حوضه بار اریه)

حسین رحمتی^{۱*}، حسین انصاری^۲، علی نقی ضیائی^۳ و حسین زینی‌وند^۴

^{۱*} - نویسنده مسئول، دانشجوی دکترا آبیاری و زهکشی، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز Hosein.Rahmati86@gmail.com

^۲ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

^۴ - استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۱۵

چکیده

مطالعات انجام گرفته در زمینه شبیه‌سازی بارش - رواناب نشان می‌دهد بیشتر تحقیقات در مناطق مرطوب انجام شده است. این در حالی است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطالعات کم‌تری صورت گرفته است. به همین منظور، در این پژوهش از مدل توزیعی مکانی WetSpa با قابلیت اتصال به سیستم اطلاعات جغرافیایی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب حوضه بار اریه واقع در منطقه‌ای نیمه‌خشک و مساحتی معادل ۱۱۲ کیلومتر مربع و متوسط بارش سالانه ۳۰۷ میلی‌متر استفاده شد. از دوره آماری سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۷ به منظور مدل‌سازی استفاده گردید. نتایج نشان داد شبیه‌سازی مدل WetSpa با استناد به مقدار ضریب ناش - ساتکلیف ۰/۶۹+ در دوره ارزیابی از دقت خوبی برخوردار است. ضریب رواناب حاصل از مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بارش - رواناب دوره ارزیابی به ترتیب برابر با ۰/۵۹ و ۰/۵۷ می‌باشد که بیانگر کارایی مدل در تخمین رواناب حاصل از بارش در حوضه مورد مطالعه می‌باشد.

کلید واژه‌ها: حوضه بار اریه، ضریب رواناب پتانسیل، مدل‌سازی بارش - رواناب، مدل WetSpa.

Evaluation of WetSpa Model for Rainfall-Runoff Simulation in Semi-Arid and Mountainous Watersheds (Case Study: Bar Arye Watershed)

H. Rahmati^{1*}, H. Ansari², A.N. Ziaee³ and H. Zeinivand⁴

1* - Corresponding Author, Ph.D Student of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2 - Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3 - Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

4 - Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

Received: 5 May 2015

Accepted: 11 January 2016

Abstract

A review over the rainfall-runoff studies shows that, humid regions have received worth more attention than arid and semi-arid regions. So that, in this study, the rainfall-runoff process of an arid and semi-arid district, namely; Bar Arye Watershed with an area of about 112km² and a mean annual precipitation of 307mm was simulated by using the spatially distributed rainfall-runoff model,

WetSpa which has the ability to be connected to the geographical information systems. The period from 2003 to 2008 was applied for modeling. In the present study, according to Nash-Sutcliffe criteria with the value of 0.69% for the validation phases it was indicated that the model has shown a good performance in modeling the rainfall-runoff. The rainfall-runoff coefficients of the observed and simulated values were equal to 0.59 and 0.57, respectively. This shows that the model has a good performance in estimating the values of runoff.

Keywords: Bar Arye Watershed, Potential runoff coefficient, Rainfall-runoff modeling, WetSpa model.

مواردی که در بالا ذکر شد از جمله عواملی هستند که باعث عدم

توسعه مدل‌هایی متناسب با مناطق خشک و نیمه‌خشک شده است. مدل‌ها را می‌توان به دو گروه مدل‌های یکپارچه و توزیعی طبقه‌بندی کرد (بیون^۶، ۲۰۰۰). در مدل‌های یکپارچه، توزیع مکانی متغیرهای ورودی، پارامترها و فرآیندهای فیزیکی در نظر گرفته نمی‌شود، اما در مدل‌های توزیعی، تنوع مکانی برای هر یک از متغیرهای ورودی برآورد می‌شود (رحمتی، ۱۳۹۲).

با توجه به ناهمگنی و عدم یکنواختی در توپوگرافی، خاک، نوع پوشش، عوامل زمین‌شناسی و تغییر اقلیم در زمان و مکان در حوزه آبخیز و برآورد واقعی‌تر از سیستم فیزیکی، استفاده از مدل‌های هیدرولوژی توزیعی نسبت به مدل‌های یکپارچه ارجحیت دارد (نورمحمد و همکاران^۷، ۲۰۰۶).

مدل WetSpa^۸ مدلی پیوسته، توزیعی - مکانی بوده که قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در گام‌های زمانی روزانه و ساعتی در مقیاس شبکه و زیرحوضه را دارا است (رحمتی، ۱۳۹۲).

گبرمسکل و همکاران^۹ (۲۰۰۲) در مقاله‌ای تحت عنوان برآورد سیلاب با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل WetSpa اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه حوضه آزلت واقع در لوکزامبورگ نمودند و در نهایت ضریب ناش - ساتکلیف ۷۱ درصد و ۸۶ درصد برای جریان‌های کم و زیاد نشانگر توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی بارش - رواناب بود. بهره‌مند و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۵) با استفاده از این مدل و نقشه‌های شبکه‌بندی شده رقوم ارتفاعی، بافت خاک و کاربری اراضی و همچنین مورد استفاده قرار دادن اطلاعات ۴۴ ایستگاه برای بارش، ۴ ایستگاه برای دما و یک ایستگاه برای تبخیر و تعرق اقدام به شبیه‌سازی جریان حوضه هورناد با مساحت ۴۲۶۴ کیلومترمربع و میانگین بارشی برابر با ۶۶۴ میلی‌متر نمودند. نتایج آماری و مخصوصاً ضریب ناش - ساتکلیف ۸۵-۷۵ درصد نشان داد

مقدمه

اقلیم خشک و نیمه‌خشک و توزیع نامناسب بارندگی از نظر مکانی و زمانی سبب افزایش دو چندان اثر منفی کمبود منابع آب در کشور ایران شده است (احمدی، ۱۳۹۰). به همین دلیل، شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب در حوزه آبخیز از نقطه نظر مدیریت منابع آب در مناطق خشک اهمیت ویژه‌ای دارد (شفیعی، ۱۳۸۸). روش‌های مدل‌سازی حدود ۴۰ سال است که به منظور دستیابی به اهداف متفاوت در نقاط مختلفی از دنیا استفاده می‌شود، اما تقریباً همه ابزارهای مدل‌سازی در درجه اول به منظور کاربرد در مناطق مرطوب توسعه داده شده‌اند. مناطق خشک و نیمه‌خشک دارای مشکلات خاصی هستند و به همین دلیل به آن‌ها توجه کم‌تری شده است (ویتنر و همکاران^۱، ۲۰۰۸). از طرفی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فقدان اطلاعات مشاهده‌ای مهم‌ترین علت عدم توسعه هیدرولوژی در این مناطق است (نیمک و رودری^۲، ۱۹۷۹؛ پیلگریم و همکاران^۳، ۱۹۸۸).

بارش پراکنده با تغییرات زمانی و مکانی بالا، بالا بودن نرخ تبخیر، تغییرات گسترده میزان رطوبت خاک و ذخیره آب زیرزمینی از مهم‌ترین مشخصه‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است (آل مولا^۴، ۲۰۰۵).

فقدان پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باعث عدم حفاظت ذرات خاک در مقابل قطرات باران بوده و در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که دارای سدیم زیادی است بارش باران منجر به سله بستن خاک و کاهش پدیده نفوذ در خاک‌های لخت می‌شود (مورین و بنیامینی^۵، ۱۹۷۷). بارش به عنوان اولین ورودی چرخه هیدرولوژیکی می‌باشد، اما این مولفه، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، دارای تغییرات زمانی و مکانی گسترده‌ای است (ویتنر و همکاران، ۲۰۰۸).

6 - Beven

7 - Nurmohamed *et al.*

8- Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere

9 - Gebremeskel *et al.*

10 - Bahremand *et al.*

1 - Wheeler *et al.*

2 - Nemeč and Rodier

3 - Pilgrim *et al.*

4 - Al Mulla

5- Morin and Benyamini

جریان رودخانه بوده، به طوریکه ضریب ناش - ساتکلیف در این پژوهش معادل با ۶۶ درصد گزارش شده است.

با توجه به مطالب مطرح شده در بالا مشخص می‌شود که تا به امروز مدل WetSpa بیشتر در حوزه‌های آبخیز مرطوب مورد استفاده قرار گرفته است. از سوی دیگر اکثر حوزه‌های آبخیز مورد بررسی دارای بیش از یک ایستگاه ثبت اطلاعات هواشناسی بوده‌اند. با توجه به ماهیت خشک و نیمه‌خشک کشور ایران، حوزه‌های آبخیز زیادی وجود دارند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده‌اند که بعضاً دارای مساحت‌های کمی بوده و از نظر تعداد ایستگاه‌های ثبت اطلاعات و دوره آماری در وضعیت مطلوبی به سر نمی‌برند. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی توانایی مدل WetSpa در شبیه‌سازی جریان رودخانه حوزه آبخیز بار اریه که در منطقه‌ای نیمه‌خشک واقع شده است، می‌باشد. به دلیل ماهیت کوهستانی منطقه و مساحت کم آن تنها یک ایستگاه ثبت اطلاعات هواشناسی در حوضه موجود است که در این پژوهش از آن استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

مدل WetSpa

مدل به منظور بیان تعادل آب و انرژی در هر شبکه سلولی از چندین لایه 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 شامل می‌شود. سیستم هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شامل چهار لایه در جهت عمودی می‌باشد: تاج پوشش، سطح خاک، ناحیه ریشه و آب زیرزمینی اشباع. تخمین رواناب مازاد، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، جریان زیرسطحی و نفوذ عمقی به صورت نقطه‌ای انجام می‌گیرد. خصوصیات متفاوت شیب، کاربری و بافت خاک در شبکه‌های مختلف یک حوضه، باعث ایجاد رواناب‌های مختلف با میزان بارش ثابت می‌شود. روندیابی رواناب از سلول‌های مختلف به سمت خروجی حوضه، به سرعت جریان و ضریب موج پخشی بستگی داشته و با استفاده از روش تخمین موج پخشی انجام می‌شود. با وجود اینکه تغییرات کاربری اراضی، خاک و خصوصیات توپوگرافی حوضه در مدل به صورت مکانی در نظر گرفته می‌شوند، اما مدل به منظور راحت‌تر بودن شبیه‌سازی، مدل‌سازی آب زیرزمینی را در مقیاس زیرحوضه‌های کوچک انجام می‌دهد (بهره‌مند^۴، ۲۰۰۶ و زینی‌وند و دی‌اسمدت، ۲۰۱۰).

در مدل WetSpa تعادل آب در منطقه ریشه در مقیاس شبکه با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود (بهره‌مند، ۲۰۰۶):

انطباق خوب بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در زیرحوضه‌های اصلی و خروجی حوضه وجود دارد.

بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۷) اقدام به شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه توریسا واقع در اسلواکی نمودند که ضریب ناش - ساتکلیف ۷۳ درصد بیانگر توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه بود.

صفری و همکاران^۱ (۲۰۰۹) مدل را در کشور آمریکا مورد استفاده قرار دادند. در این پژوهش نقشه‌های شبکه‌بندی شده با مساحت ۳۰ مترمربع و اطلاعات هواشناسی ساعتی مورد استفاده قرار گرفتند. بعد از واسنجی، در تمامی حوضه‌ها بجز حوضه رودخانه بلو، نتایج مدل در بازه خیلی خوب تا عالی متغیر بودند، هم‌چنین، در دوره اعتبارسنجی به نتایجی در محدوده خوب تا خیلی خوب دست یافتند که این مطلب حاکی از توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی است. در این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد مدل از معیار جمعی که نشان‌دهنده میزان اختلاف شکل، اندازه و حجم هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است، استفاده شد.

زینی‌وند^۲ (۲۰۰۹) با ارتقاء مدل در بخش فرسایش و انتقال رسوب به گونه‌ای که مدل با همان اطلاعات مورد نیاز قبلی اجرا شود، با استفاده از اطلاعات روزانه و ساعتی اقدام به شبیه‌سازی در حوضه‌های مارک‌بیک در کشور بلژیک، هورناد در کشور اسلواکی و لتیان در ایران نمود. نتایج حاصل از مقایسه دبی و غلظت رسوب شبیه‌سازی شده در خروجی این حوضه‌ها برای دوره‌های متفاوت نشان داد که مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب دارد.

زینی‌وند و دی‌اسمدت^۳ (۲۰۰۹) با استفاده از مدل و رویکرد تعادل فیزیکی آب و توده برف به پیش‌بینی سیلاب ناشی از ذوب برف در رودخانه هورناد پرداختند. این پژوهش در بالادست حوضه مارگسانی، در کوهستان کارپینین واقع در اسلواکی انجام شد. آن‌ها در این مطالعه به نتایج موفقیت‌آمیزی در زمینه شبیه‌سازی فرآیندهای ذوب برف رسیدند.

یعقوبی و بهره‌مند (۱۳۹۰) با استفاده از مدل WetSpa اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه حوزه آبخیز چهل‌چای که دارای مساحتی معادل با ۲۵۴/۹ کیلومتر مربع است، پرداختند. با توجه به معیار ارزیابی ناش - ساتکلیف که برای جریان روزانه بین ۵۰ درصد تا ۵۷ درصد متغیر بود، مشخص شد که تطبیق خوبی بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و واقعی وجود دارد. آذین‌مهر و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی توانایی مدل WetSpa در حوضه دینور در بالادست سد کرخه پرداختند که نتایج پژوهش بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی

1 - Safari et al.

2 - Zeinivand

3 - Zeinivand and De Smedt

رحمتی و همکاران: ارزیابی مدل WetSpa در شبیه‌سازی بارش - رواناب...

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial X} - d \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

که در آن، Q: دبی $[M^3T^{-1}]$ ، d: ضریب میرایی موج $[L^2T^{-1}]$ ، C: سرعت موج $[LT^{-1}]$ ، X: مسافت طی شده [L] و t: زمان [T] می‌باشد. در اینجا سرعت جریان با استفاده از معادله مانینگ محاسبه می‌شود.

در نهایت رواناب مستقیم در خروجی حوضه و یا در هر نقطه که جریان به هم می‌پیوندد از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (لیو و دی-اسمدت، ۲۰۰۴):

$$Q = \int A \int_0^t V(\tau) U(T - \tau) d\tau dA \quad (4)$$

Q: مقدار دبی خروجی $[L^3T^{-1}]$ ، τ : تاخیر زمانی و V: حجم رواناب خروجی $[L^3]$ می‌باشند.

خروجی‌های اصلی مدل شامل هیدروگراف جریان‌های سطحی، زیرسطحی و جریان زیرزمینی برای خروجی حوضه و یا زیر حوضه‌ها، بیلان آبی و توزیع مکانی فرآیندهای هیدرولوژیکی است (لیو و دی-اسمدت، ۲۰۰۴ و زینی‌وند و دی‌اسمدت، ۲۰۱۰). به منظور کسب اطلاعات بیشتر در مورد ساختار مدل WetSpa می‌توان به منابع (لیو و دی‌اسمدت، ۲۰۰۴؛ بهره‌مند، ۲۰۰۶؛ زینی‌وند، ۲۰۰۹ و زینی‌وند و دی‌اسمدت، ۲۰۱۰) که به طور کامل مدل را توضیح داده‌اند، رجوع کرد.

پارامترهای ورودی مدل

به منظور آسان‌سازی واسنجی پارامترها، ۱۱ پارامتر قراردادی در مدل مورد استفاده قرار گرفته است. k_{ep} : فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه‌های مرطوب که دارای پوشش کامل و میزان رطوبت کافی بوده برابر با ۱ است. k_i : فاکتور تصحیح جریان زیرسطحی که به منظور در نظرگیری تأثیر هدایت هیدرولیکی بر جریان زیر سطحی استفاده می‌شود و مقدار یک را به صورت پیش فرض برای این ضریب در نظر می‌گیرند. K_g : ضریب افت آب زیرزمینی که این ضریب منعکس کننده وضعیت ذخیره زیرحوضه است. میزان ضریب افت آب زیرزمینی را می‌توان با توجه به داده‌های جریان اندازه‌گیری شده و بر مبنای مطالعات انجام شده استخراج نمود و مقدار پیش فرضی برای این ضریب وجود ندارد. K_{ss} : رطوبت اولیه خاک که این فاکتور در شبیه‌سازی طولانی مدت حوضه اهمیت کم‌تری خواهد داشت و تنها مرحله اول شبیه‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. G_0 : ذخیره اولیه آب زیرزمینی است. یک مقدار عددی بر

$$D \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = P - I - V - E - R - F \quad (1)$$

که در آن، D: عمق ناحیه ریشه [L]، $\Delta \theta$: تغییرات رطوبت خاک $[L^3L^{-3}]$ ، Δt : گام زمانی [T]، P: بارش [T]، I: تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی و ذخیره چالابی، S: رواناب سطحی $[LT^{-1}]$ ، E: تبخیر و تعرق واقعی $[LT^{-1}]$ ، F: جریان زیرسطحی [L] و R: نرخ نفوذ عمقی از منطقه ریشه [L] می‌باشد.

میزان رواناب سطحی با استفاده از رابطه استدلالی اصلاح شده و با توجه به میزان ضریب رواناب هر سلول که به توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک وابسته است محاسبه می‌گردد (بهره‌مند، ۲۰۰۶ و زینی‌وند، ۲۰۰۹):

$$S = C(P - I) \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\alpha \quad (2)$$

θ_s : میزان رطوبت در حالت اشباع $[L^3L^{-3}]$ ، C: ضریب رواناب پتانسیل (-) و α : بیانگر تأثیر میزان شدت بارش بر باران مازاد می‌باشد (-). در مدل فرض بر این است که آب با نفوذ عمقی به خارج از ناحیه ریشه مستقیماً وارد مخزن آب زیرزمینی می‌شود که مقدار آن را می‌توان با استفاده از قانون دارسی تعیین نمود که در آن نفوذ عمقی، تابعی از هدایت هیدرولیکی و هدایت پتانسیل است. هدایت هیدرولیکی پتانسیل توسط رابطه بروکس و کوری (۱۹۹۶) محاسبه می‌شود (لیو و دی‌اسمدت، ۲۰۰۴).

به منظور تشکیل جریان زیرسطحی فرض بر این است که میزان رطوبت خاک بیشتر از ظرفیت زراعی خاک است. برای محاسبه مقدار جریان زیرسطحی به خارج از سلول از قانون دارسی و معادله‌های موج سینماتیکی استفاده شده، در هر سلول میزان گرادیان هیدرولیکی برابر با شیب زمین در نظر گرفته شده است (لیو و دی‌اسمدت، ۲۰۰۴).

به علت این که جریان آب زیرزمینی بسیار آهسته‌تر از حرکت آب در سطح زمین و نزدیک به سطح است، جریان آب زیرزمینی به صورت یک مخزن خطی یکپارچه در مقیاس زیرحوضه تعریف می‌شود. جریان آب سطحی و زیرسطحی ابتدا در هر شبکه سلولی به سوی کانال اصلی روندیابی می‌شود و در خروجی هر زیر حوضه آب زیرزمینی هم به آن‌ها اضافه شده و سپس کل جریان به سمت خروجی حوضه روندیابی می‌شود. روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادله‌های تقریب موج پخشی سنت و نانت انجام می‌گیرد (یعقوبی و بهره‌مند، ۱۳۹۰):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{S_i} - Q_{O_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2} \quad (۶)$$

$$r_{mod} = \left[\frac{\min \{ \sigma_O, \sigma_S \}}{\max \{ \sigma_O, \sigma_S \}} \times r \right] \quad (۷)$$

$$AM = \frac{r_{mod} + NS + (1 - |MB|)}{3} \quad (۸)$$

انحراف مدل (MB) نشان دهنده قابلیت تعیین تعادل آب باشد. ضریب ناش - ساتکلیف (NS) به منظور ارزیابی توانایی شبیه‌سازی بارش - رواناب به کار می‌رود. مقدار NS از یک مقدار منفی تا یک متغیر است و زمانی که میزان آن یک باشد، نمایانگر انطباق کامل بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است. ضریب همبستگی اصلاح شده (r_{mod}) نشان‌دهنده تفاوت اندازه هیدروگراف و شکل آن است و مقدار یک به معنای یکسان بودن مقدار دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است. Q_{si} : جریان شبیه‌سازی شده در گام زمانی i [L^3T^{-1}]; Q_{oi} : جریان مشاهده‌ای در گام زمانی i [L^3T^{-1}]; N : تعداد گام، \bar{Q}_O : متوسط دبی جریان مشاهده شده طی دوره شبیه‌سازی [L^3T^{-1}]; σ_O و σ_S : به ترتیب انحراف استاندارد دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و r : ضریب همبستگی بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی است. به منظور قضاوت در مورد کارایی مدل از معادله ۸ که در برگزیده جنبه‌های متفاوت هیدروگراف شبیه‌سازی شده از جمله اندازه، شکل و حجم می‌باشد استفاده می‌شود، بهترین حالت زمانی است که این معیار برابر با یک شود. به منظور طبقه‌بندی کارایی مدل از جدول (۱) که توسط اندرسون و همکاران^۱ (۲۰۰۲) تهیه شده، استفاده می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

حوضه رودخانه بار اریه با مساحت و محیطی معادل با ۱۱۲ کیلومتر مربع و ۷۶ کیلومتر به عنوان یکی از زیرحوضه‌های، حوضه نیشابور است که در شمال شرق این شهرستان قرار دارد. رودخانه اصلی این حوضه از دامنه جنوب غربی کوه‌های بینالود سرچشمه گرفته و در نهایت با عبور از نیشابور به رودخانه کال سبزوار می‌پیوندد. این حوضه در محدوده‌ای بین طول جغرافیایی "۵۸° ۲۱' ۵" تا "۵۸° ۲۱' ۶" شرقی و عرض جغرافیایی "۳۶° ۲۰' ۱۸" تا "۳۶° ۱۸' ۱۸" شمالی قرار دارد (شکل ۱).

حسب میلی‌متر به‌عنوان عمق اولیه آب زیرزمینی برای همه زیرحوضه‌ها قرار داده می‌شود که این مقدار با مقایسه مراحل ابتدایی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، قابل و استسجی است. G_{max} : حداکثر ذخیره آب زیرزمینی که میزان تبخیر و تعرق را از آب زیرزمینی کنترل می‌کند. T_0 : درجه حرارت پایه برای ذوب برف بوده و معمولاً مقادیر نزدیک به صفر انتخاب می‌شوند. K_{snow} : ضریب روز-درجه حرارت است و در شرایطی که بارندگی وجود ندارد، ضریب روز-درجه بیشتر از صفر تا ۳/۷ است. با مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در فصل بهار می‌توان این ضریب را و استسجی کرد. K_{rain} : ضریب روز-درجه بارش، تعیین کننده نرخ ذوب برف ناشی از تراکم هوای مرطوب بر سطح برف و گرمای انتقال یافته به پشته برف به وسیله بارندگی است و در حقیقت برای محاسبه ذوب برف ناشی از بارندگی کاربرد دارد. به طور کلی مقدار این ضریب بسیار کم و نزدیک به ۰/۰۱ می‌باشد. اگر مقدار صفر برای این ضریب در نظر گرفته شود در واقع بارندگی هیچ گونه تأثیری بر ذوب برف نخواهد داشت. K_{run} : توان رواناب سطحی و P_{max} : شدت بارش مربوط $a=1$ است و این پارامتر به یک شدت بارش آستانه با واحد میلی‌متر در روز یا میلی‌متر در ساعت، مربوط می‌شود و بستگی به تفکیک موقعیت شبیه‌سازی دارد، همچنین در آن توان رواناب سطحی برابر با یک بوده و ضریب رواناب واقعی به صورت تابع خطی با محتوای رطوبت نسبی خاک در می‌آید (لیو و دی‌اسمدت، ۲۰۰۴؛ بهره‌مند، ۲۰۰۶ و زینی‌وند، ۲۰۰۹).

واستسجی مدل

به منظور و استسجی و اعتبارسنجی مدل، اطلاعات مشاهده‌ای به دو گروه تقسیم شد. از ۳۶ ماه اول اطلاعات به منظور و استسجی مدل و از ۲۱ ماه آخر اطلاعات برای ارزیابی مدل استفاده شد. در این پژوهش فرآیند و استسجی به دو صورت دستی (سعی و خطا) و خودکار انجام پذیرفت. در فرآیند و استسجی خودکار به وسیله PEST تابع هدف خطی، مجموع مربعات می‌باشد و سعی می‌کند این خطا را به صفر برساند. در صورت قابل قبول بودن نتایج دوره ارزیابی، می‌توان نسبت به انتخاب صحیح پارامترهای ورودی اطمینان حاصل کرد.

به منظور ارزیابی عملکرد و کارایی مدل از پارامترهایی نظیر انحراف مدل، ضریب ناش - ساتکلیف، ضریب همبستگی اصلاح شده و معیار جمعی استفاده شد (زینی‌وند، ۲۰۰۹):

$$MB = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{S_i} - Q_{O_i})}{\sum_{i=1}^N Q_{O_i}} \quad (۵)$$

رحمتی و همکاران: ارزیابی مدل WetSpa در شبیه‌سازی بارش - رواناب...

دوره آماری ۱۵ ساله استفاده شده است. شروع این دوره آماری سال آبی ۱۳۷۵-۱۳۷۴ بوده و پایان آن سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ است. متوسط بارش سالانه منطقه بر اساس ایستگاه بار اریه در دوره شاخص، ۳۰۶/۷۲ میلی‌متر محاسبه شده است. بیشترین بارش در مرتبه اول مربوط به فصل زمستان و در مرتبه دوم مربوط به فصل بهار است. دما به عنوان نمایه‌ای از شدت گرما یکی از عناصر اساسی شناخت هوا است. در ایران دمای هوا به شدت تابع ارتفاع، عرض جغرافیایی و محتوای رطوبتی جو است. اثر ارتفاع بر دمای هوا چشم‌گیرتر و چندین برابر عرض جغرافیایی است. در منطقه مورد مطالعه عواملی چون عرض جغرافیایی بالا، دوری از منابع آب و ارتفاع موجب می‌شود تا منطقه دارای اقلیمی نیمه‌سرد باشد در این رژیم گرمایی ماه دی با ۱/۶ سانتی‌گراد و ماه تیر با ۲۴/۶ سانتی‌گراد سردترین و گرم‌ترین ماه‌های سال محسوب می‌شوند (رحمتی، ۱۳۹۲). از آنجایی که به منظور اجرای مدل نیاز به اطلاعاتی با گام‌های زمانی روزانه و پیوسته می‌باشد بازه‌ی زمانی ۵۷ ماهه انتخاب شد. این دوره زمانی از سال ۱۳۸۳-۱۳۸۲ شروع و در ۱۳۸۷-۱۳۸۶ خاتمه یافت. به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل مورد نظر بازه‌ی زمانی ۵۷ ماهه به دو قسمت ۳۶ و ۲۱ ماهه تقسیم شد که از دوره اول برای واسنجی مدل و از قسمت دوم برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

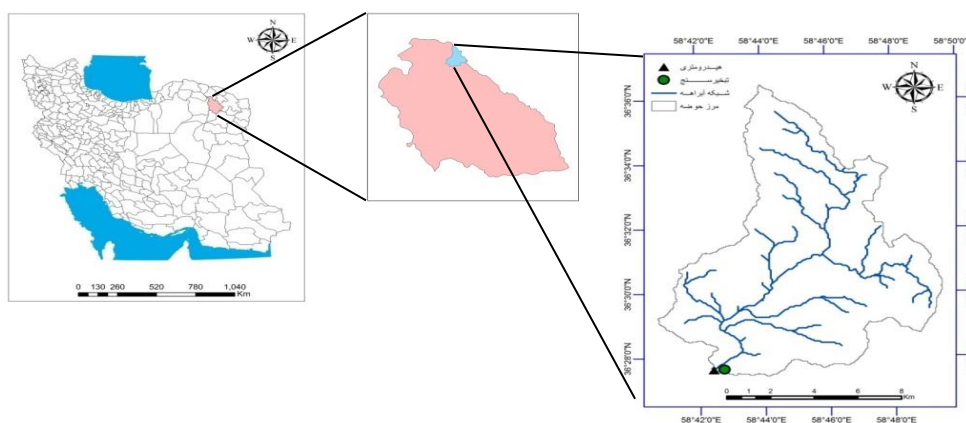
بر اساس نقشه‌ی رقوم ارتفاعی بیشترین و کم‌ترین ارتفاع در حوضه برابر با ۲۸۷۰/۷۵ و ۱۰۶۱/۳۰ متر می‌باشند. هم‌چنین حوضه آبخیز بار اریه به طور متوسط دارای شیب ۱۹ درصد است. در شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب نقشه‌های بافت خاک و کاربری اراضی حوضه آبخیز بار اریه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ نمایش داده شده‌اند.

نقشه کاربری اراضی به عنوان یکی از ورودی‌های اصلی مدل بوده که از نظر اندازه سلول و محیط مشابه نقشه توپوگرافی است. منطقه مورد مطالعه از چهار نوع پوشش مرتع، باغات آبی، اراضی دیم و منطقه مسکونی و شهری تشکیل شده است که با توجه به نقشه شکل (۳) مشخص می‌شود که پوشش مرتع ۹۳/۵۹ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده و سهم هر یک از پوشش‌های باغات آبی، اراضی دیم و منطقه مسکونی و شهری به ترتیب برابر با ۰/۰۶ درصد، ۰/۲۲ درصد و ۰/۱۵ درصد است.

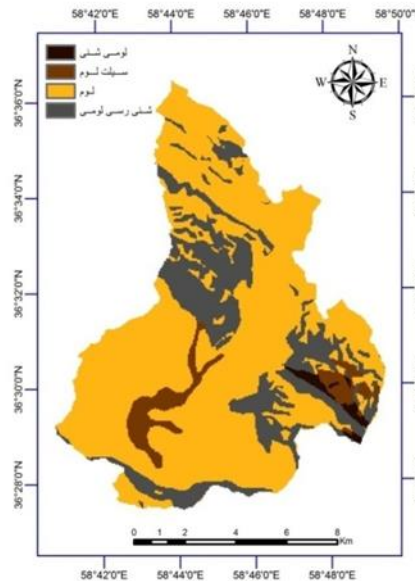
مدل به منظور طبقه‌بندی بافت خاک سطحی از مثلث بافت خاک آمریکا استفاده می‌کند. این مثلث بر مبنای تغییرات درصد رس، سیلت و ماسه به ۱۲ طبقه تقسیم می‌شود. بافت خاک لوم با اختصاص ۷۰/۶۹ درصد از مساحت حوضه عمده‌ترین بافت موجود در حوضه است. بافت‌های شنی رسی لوم، سیلت لوم و لوم شنی به ترتیب ۲۲/۷۱ درصد، ۵/۴۶ و ۱/۱۴ درصد از سطح حوضه را در بر می‌گیرند. به منظور بررسی وضعیت بارندگی در حوضه بار اریه از یک

جدول ۱- طبقه‌بندی کارایی مدل

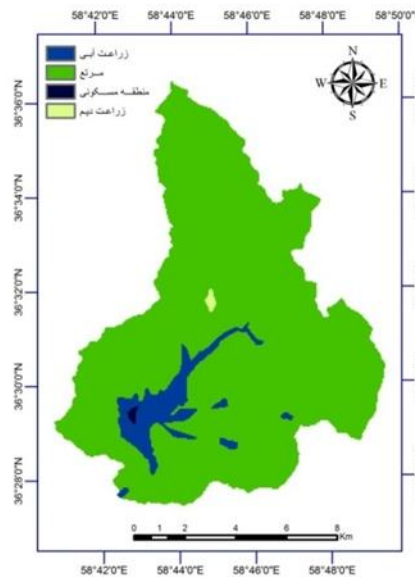
طبقه‌بندی	عالی	خیلی خوب	خوب	ضعیف	خیلی ضعیف
معیار جمعی	>۰/۸۵	۰/۷۰-۰/۸۵	۰/۵۵-۰/۷۰	۰/۴۰-۰/۵۵	<۰/۴۰



شکل ۱- موقعیت مکانی حوضه آبخیز بار اریه در حوضه نیشابور و در ایران



شکل ۲- نقشه بافت خاک سطحی حوزه آبخیز بار اریه



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز بار اریه

آبراهه، شعاع هیدرولیکی و زیرحوضه‌ها از این نقشه به دست می‌آیند. به منظور ترسیم آبراهه‌ها باید عددی را به عنوان آستانه ترسیم آبراهه باز، به مدل معرفی نمود، آستانه باز به این معنا است که به مدل دستور داده می‌شود آن آبراهه اصلی را که از این مساحت تغذیه می‌شود در نظر بگیرد و سایر آبراهه‌ها را حذف نماید. در این پژوهش، عدد ۲۰۰ به عنوان آستانه آبراهه باز برای این حوضه معرفی شد.

نتایج و بحث

اطلاعات ورودی مدل در دو دسته نقشه‌های رستری و اطلاعات هیدرولوژی تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین، به منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل به دبی واقعی ایستگاه آب‌سنجی واقع در خروجی حوضه نیز نیاز می‌باشد. با استفاده از سه نقشه رقوم ارتفاعی، بافت خاک و کاربری اراضی پارامترهای توزیعی مورد نیاز مدل محاسبه می‌شود. در این پژوهش، از توپوگرافی با ابعاد شبکه ۵۰ متر استفاده شد. نقشه‌های میزان شیب، طول جریان، جریان تجمعی، شبکه

رحمتی و همکاران: ارزیابی مدل WetSpa در شبیه‌سازی بارش - رواناب...

هیدرولیکی در فرآیند محاسبه مقدار نفوذ و جریان زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد از نقشه تخلخل به‌منظور محاسبه فرآیندهای هیدرولوژیکی از قبیل بارش مازاد، نفوذ و جریان زیرسطحی استفاده می‌شود. به‌منظور تعیین مقدار تبخیر و تعرق در سطح حوضه به رطوبت در حد ظرفیت زراعی نیاز است. نقشه رطوبتی که مدل در شرایط رطوبت باقی‌مانده استخراج می‌کند در تعیین مقدار نفوذ عمقی و جریان زیرسطحی استفاده می‌شود. تنها کاربرد شاخص توزیع اندازه منافذ خاک در رابطه با تعیین نفوذ عمقی و جریان زیرسطحی است. نقشه رطوبتی بر پایه نقطه پژمردگی دائم ایجاد و به منظور محاسبه مقدار تبخیر و تعرق در سطح حوضه استفاده می‌شود.

محتوای رطوبت اولیه خاک که کاربرد آن در تعیین مقدار بارش مازاد، نفوذ، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی و جریان سطحی است با توجه به اطلاعات جریان و شیب و بر اساس شاخص توپوگرافی به صورت نقشه توزیعی استخراج می‌شود. در محیط ArcView با استفاده از سه نقشه رستری اولیه و پارامترهای توزیعی ایجاد شده و جداول مرجع مربوط به ضرایب رواناب پتانسیل و چالاب، دو نقشه توزیعی ضریب رواناب پتانسیل و چالاب ایجاد می‌شود. در گام بعد با استفاده از نقشه‌های تولید شده در مراحل قبل اقدام به ایجاد نقشه‌های سرعت جریان، متوسط زمان تمرکز جریان تا خروجی حوضه و تا آبراهه اصلی و انحراف معیار زمان تمرکز جریان می‌شود. این لایه‌ها به‌منظور محاسبه تابع پاسخ جریان از هر سلول تا خروجی حوضه و آبراهه اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرعت جریان با توجه به اطلاعات ضریب زبری مانینگ، شعاع هیدرولیکی و شیب به‌صورت نقشه توزیعی برآورد می‌شود که حداقل سرعت برابر با $0/38$ متر بر ثانیه و حداکثر سرعت برابر با 2 متر بر ثانیه محاسبه شد. زمان پیمایش حوزه آبخیز بار اریه حداکثر 10 ساعت می‌باشد. نقشه‌های شبکه‌بندی شده بارش، دما و تبخیر از نظر ابعاد شبکه مانند دیگر نقشه‌ها تهیه می‌شوند. موقعیت ایستگاه موجود در حوضه در شکل (۱) نشان داده شده است. در حالت استفاده از یک تک ایستگاه از نقشه ماسک حوضه به‌جای پلی‌گون‌های تیسن بارندگی، دما و تبخیر استفاده گردید. پس از وارد کردن داده‌های مورد نیاز مدل WetSpa مانند باران، تبخیر و تعرق پتانسیل، دما و دبی، مدل اجرا گردید. در شروع عملیات بهینه‌سازی لازم است برای تمام پارامترهای به‌کار رفته در مدل مقادیر اولیه‌ای اختیار شود، عملیات واسنجی با حصول بهترین تطبیق بین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به اتمام می‌رسد (رحمتی، ۱۳۹۲).

از آنجایی‌که در بعضی نقاط حوضه ممکن است شیب برابر با صفر باشد و این امر باعث ایجاد خطا در بحث روندیابی جریان می‌شود به همین دلیل در بخش تهیه نقشه شیب، عددی به عنوان حداقل شیب به مدل تعریف می‌شود که در صورت صفر بودن شیب واقعی منطقه، شیبی معادل با این عدد در نظر گرفته شود و در این بخش پیش فرض مدل که معادل با $0/01$ درصد بود، لحاظ شد. نقشه شعاع هیدرولیکی با در نظرگیری دوره بازگشت دو ساله ایجاد شد.

در مدل WetSpa محدودیتی برای تعداد زیرحوضه‌ها وجود ندارد و زیرحوضه‌ها با توجه به مقدار عددی آستانه ترسیم آبراهه باز در نظر گرفته شده، ایجاد می‌شوند که در این حوضه با توجه به عدد 200 معرفی شده به عنوان آستانه، حوضه به 105 زیرحوضه تقسیم شد. در فرآیند آماده‌سازی نقشه‌ها هر چه تعداد زیرحوضه‌های بیشتری در نظر گرفته شود حالت نیمه‌توزیعی به حالت توزیعی نزدیک‌تر خواهد بود. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز بار اریه دارای مقیاس $1:100000$ است. نقشه کاربری اراضی به عنوان یکی از ورودی‌های اصلی بوده که از نظر اندازه سلول و محیط باید مشابه به نقشه توپوگرافی باشد. با توجه به تأثیر نوع پوشش بر فرآیندهای هیدرولوژیکی، عمل تقسیم‌بندی پوشش‌ها در 17 کلاس صورت گرفته است.

طبق الگوریتم بکار رفته در مدل، تقسیم‌بندی تغییر می‌کند به‌عنوان نمونه به‌منظور تعیین ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی تنها پنج کلاس محصولات زراعی، مرتع، جنگل، خاک لخت و مناطق شهری مورد توجه قرار می‌گیرند. در محیط ArcView با استفاده از نقشه کاربری اراضی و جداول مرجع موجود اقدام به ایجاد نقشه‌هایی هم چون عمق ریشه، درصد پوشش، ظرفیت ذخیره برگایی حداقل و حداکثر، ضریب زبری مانینگ برای جریان سطحی و کانال و شاخص سطح برگ می‌شود. نقشه ضریب زبری مانینگ برای جریان سطحی و جریان کانال با توجه به نقشه آبراهه تعیین می‌شود. ضریب زبری کانال با استفاده از درون‌یابی بین رتبه‌های مختلف کانال ایجاد می‌شود که $0/15$ برای حداقل رتبه و $0/05$ برای حداکثر رتبه در نظر گرفته می‌شود.

نقشه واحدهای اراضی خاک اخذ شده با دقت $1:100000$ است. کدبندی بافت خاک در مدل بر اساس مثلث طبقه‌بندی بافت خاک است. این مثلث بر مبنای تغییرات درصد رس، سیلت و ماسه به 12 طبقه تقسیم می‌شود. با استفاده از نقشه بافت خاک و محیط ArcView نقشه‌های مورد نیاز به‌منظور اجرای مدل تهیه می‌گردند. نقشه‌هایی که در این مرحله تولید می‌شوند شامل هدایت هیدرولیکی، تخلخل، ظرفیت زراعی، رطوبت باقیمانده، شاخص توزیع اندازه ذرات، نقطه پژمردگی و حداکثر میزان اشباع می‌باشند. نقشه هدایت

جدول ۲- پارامترهای مورد نیاز مدل WetSpa و مقدار واسنجی شده

علامت	پارامتر	مقدار واسنجی شده	حداقل	حداکثر
K_i	فاکتور بی بعد جریان زیرسطحی (-)	۰/۷۵۰۱۱۱	۰/۶۸۲۹۳	۰/۸۳۱۰۷
K_g	ضریب افت آب زیرزمینی (T^{-1})	۰/۰۰۰۵۱	۴/۱۵۱۰۱*۱۰ ^{-۴}	۶/۳۲۸۹۸*۱۰ ^{-۴}
K_{ss}	رطوبت اولیه خاک (L)	۰/۹۶۸۱۲	۰/۸۹۱۷۸	۱/۰۴۹۶۸
K_{ep}	فاکتور تصحیح تبخیر و ترقق پتانسیل (L)	۰/۱۴۵۶۱	۰/۱۳۲۵۳	۰/۱۵۹۲۱
G_0	ذخیره اولیه آب زیرزمینی (L)	۳۰/۶۹۸۰۰	۲۱/۲۰۰۹۰	۴۰/۸۸۷۵۰
G_{max}	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (L)	۲۸۵/۸۶۹	۴۹/۷۱۷۳۰	۵۲۰/۷۹۹۰
T_0	ضریب درجه حرارت آستانه (C^0)	۰/۱۱۱۳۹	۰/۰۶۳۴۷	۰/۱۵۶۸۸
K_{snow}	ضریب درجه روز درجه حرارت ($L \cdot C^0 \cdot T^{-1}$)	۰/۸۰۱۱۷	۰/۷۱۷۳۹	۰/۸۹۳۱۵
K_{rain}	ضریب درجه - روز بارش ($C^0 \cdot T^{-1}$)	۵/۶۲۲۹۰*۱۰ ^{-۷}	۱/۷۸۴۳۰*۱۰ ^{-۷}	۵/۶۲۲۹۰*۱۰ ^{-۷}
K_{run}	توان رواناب سطحی برای شدت بارندگی صفر (-)	۷/۸۲۹۴۶	۵/۲۹۲۵۲	۱۰/۴۹۱۴۰
P_{max}	حداکثر شدت بارش ($L \cdot T^{-1}$)	۶۷/۰۹۲۰	۴۵/۰۸۷۲۰	۸۵/۴۱۸۴۰

جدول ۳- مقادیر معیارهای کارایی مدل در دوره واسنجی (۸۵-۱۳۸۴ تا ۸۳-۱۳۸۲) و اعتبارسنجی (۸۷-۱۳۸۶ تا ۸۶-۱۳۸۵)

نمایه	دوره واسنجی (درصد)	دوره اعتبارسنجی (درصد)
انحراف مدل	۰/۹۹-	۵/۳۷-
نمایه ناش - ساتکلیف	۶۶/۷۸	۶۹/۲۱
نمایه ناش - ساتکلیف جریانهای کم	۶۱/۶۷	۵۶/۹۹
نمایه ناش - ساتکلیف جریانهای زیاد	۷۶/۶۳	۶۶/۷۹
ضریب همبستگی اصلاح شده	۷۷/۲۸	۶۳/۸۰
معیار جمعی	۸۱/۰۲	۷۵/۸۸

دقت مدل در دبی‌های بالا نسبت به دبی‌های پایین بیشتر است. این نتیجه مشابه به نتایج به دست آمده از پژوهش‌های گبرمسکل و همکاران (۲۰۰۲)، صفری و همکاران (۲۰۰۹) و زینی‌وند و دسمت (۲۰۱۰) است. تطبیق بالای دو هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در ماه‌های نخست مدل‌سازی ارتباط مستقیم با مقادیر پارامترهای، فاکتور بی بعد جریان زیرسطحی، ضریب افت آب زیرزمینی، رطوبت اولیه خاک و ذخیره اولیه آب زیرزمینی دارد. این پارامترها نقش موثری در تعیین میزان دبی پایه رودخانه دارند. با توجه به شکل‌های (۴ و ۵) مشاهده می‌شود دبی شبیه‌سازی شده در

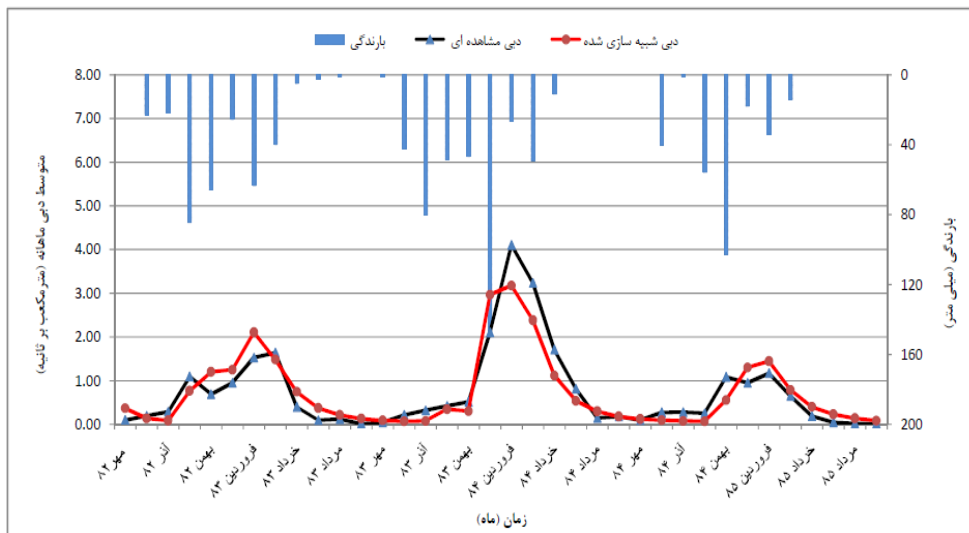
جدول (۲) پارامترهای واسنجی شده و همچنین مقادیر حداقل و حداکثر پارامترها که با استفاده از مدل PEST تعیین شده برای حوزه آبخیز بار اریه نشان می‌دهد.

معیارهای آماری محاسبه شده در دو مرحله واسنجی و ارزیابی در جدول (۳) آمده است. همان طوری که نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد ضریب ناش - ساتکلیف برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۶۶/۷۸ درصد و ۶۹/۲۱ درصد است که بر اساس طبقه‌بندی جدول (۱) دقت مدل در بازه خوب قرار می‌گیرد. مقایسه دقت مدل در دبی‌های بالا نسبت به دبی‌های پایین نشان می‌دهد که

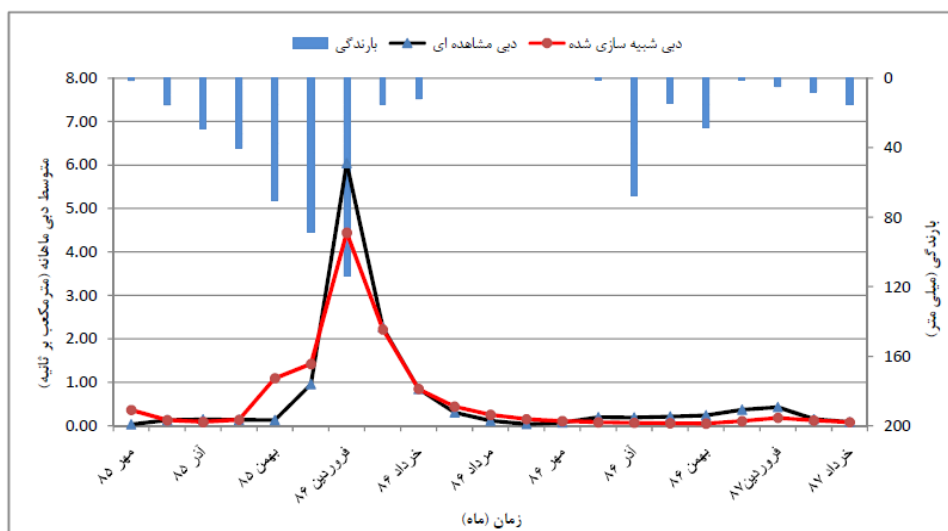
رحمتی و همکاران: ارزیابی مدل WetSpa در شبیه‌سازی بارش - رواناب...

نسبت به سایر ماه‌ها است. نکته قابل بررسی دیگر عدم واکنش مدل نسبت به اغلب بارندگی‌های اتفاق افتاده در فصل‌های تابستان و پاییز می‌باشد که می‌توان به این نکته اشاره کرد که مدل مقدار بارش صورت پذیرفته در سطح حوزه آبخیز را شبیه‌سازی نموده ولی به دلیل تلفات مقدار رواناب را صفر برآورد کرده است.

ماه فروردین ۱۳۸۴ و ماه فروردین ۱۳۸۶ که مصادف با گرم شدن هوا و فرآیند ذوب برف می‌باشد از حالت واقعی کم‌تر محاسبه شده است. همان‌طور که بیان شد مدل به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند تجمع و ذوب برف از روش درجه - روز حرارت استفاده می‌کند و در این روش بعضی از پارامترهای موثر بر فرآیند تجمع و ذوب برف در نظر گرفته نشده است و به‌همین دلیل شبیه‌سازی رواناب توام با خطای بیشتری



شکل ۴- مقایسه سری‌های زمانی دبی ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای ایستگاه آب‌سنجی بار اریه در دوره واسنجی (۱۳۸۴-۸۵ تا ۱۳۸۲-۸۳)



شکل ۵- مقایسه سری‌های زمانی دبی ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای ایستگاه آب‌سنجی بار اریه در دوره اعتبارسنجی (۱۳۸۶-۸۷ تا ۱۳۸۵-۸۶)

جدول ۴- مقدار بارندگی، ضریب رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حوضه بار اریه در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی

دوره اعتبارسنجی					دوره واسنجی				
مشاهده‌ای شده		مشاهده‌ای		بارندگی (میلی‌متر)	شبیه‌سازی شده		مشاهده‌ای		بارندگی (میلی‌متر)
ضریب رواناب (درصد)	دبی (میلی‌متر)	ضریب رواناب (درصد)	دبی (میلی‌متر)		ضریب رواناب (درصد)	دبی (میلی‌متر)	ضریب رواناب (درصد)	دبی (میلی‌متر)	
۵۶/۶۶	۲۹۸/۶۰	۵۹/۳۲	۳۱۲/۶۰	۵۲۷/۰۰	۵۸/۰۰	۶۱۲/۲۰	۵۸/۱۰	۶۱۳/۵۰	۱۰۵۶/۰۰

شبیه‌سازی در دو مرحله انجام پذیرفت. مرحله اول شامل تولید نقشه‌های ثانویه در محیط ArcView با استفاده از سه نقشه توپوگرافی، بافت خاک و رقوم ارتفاعی و بانک اطلاعاتی موجود در مدل بود و در مرحله دوم با استفاده از نقشه‌های ثانویه، آمار هواشناسی مرتب شده مطابق با فرمت مخصوص مدل و پارامترهای ورودی، فرآیند شبیه‌سازی انجام شد و در نهایت با استفاده از معیارهای عملکرد نتایج مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر اساس معیارهای ارزیابی ارائه شده در جدول (۳) و شکل‌های (۴ و ۵) مشخص شد که مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان رودخانه حوضه بار اریه را دارد. با توجه به اطلاعات بارش و رواناب مشاهده‌ای دوره پنج ساله شبیه‌سازی مشخص شد که تقریباً نیمی از بارش رخ داده در دو دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی به صورت رواناب از حوزه آبخیز خارج می‌شوند و نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل در دوره‌ی واسنجی ۱/۳ میلی‌متر و در دوره اعتبارسنجی ۱۴ میلی‌متر میزان رواناب را کم‌تر از مقدار مشاهده‌ای شبیه‌سازی کرده است. تنها نقطه ضعف مدل در این پژوهش عدم توانایی در شبیه‌سازی جریان رودخانه در فصل‌های بهار است. در نهایت با توجه به ماهیت خشک و نیمه‌خشک حوضه بار اریه و مساحت کم آن و استفاده از اطلاعات یک تک ایستگاه می‌توان مطرح کرد که مدل WetSpa می‌تواند ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی حوزه‌های آبخیز کوچک واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک که فاقد شبکه ثبت اطلاعات هواشناسی مناسب هستند، باشد.

همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است در دوره واسنجی از ۱۰۵۶/۰ میلی‌متر بارش رخ داده در سطح حوضه مقدار ۶۱۳/۵ میلی‌متر که معادل با ۵۸/۱ درصد از بارندگی می‌باشد به صورت رواناب جاری شده و در ایستگاه هیدرومتری بار اریه ثبت شده است و مدل در این دوره میزان رواناب را معادل با ۶۱۲/۲ میلی‌متر یا ۵۸/۰ درصد از بارندگی را به صورت رواناب شبیه‌سازی کرده است. همچنین در دوره اعتبارسنجی، میزان رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده معادل با ۵۹/۳۲ درصد و ۵۶/۶۶ درصد از بارندگی رخ داده در این دوره است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر تلاشی است در راستای شناخت و درک فرآیندهای حاکم بر حوضه نیمه‌خشک بار اریه، که برای آن راهی جز مدل‌سازی و استفاده از مدل‌های مفهومی نیست. در این پژوهش از مدل WetSpa که یک مدل پیوسته و توزیعی است و تا به امروز به صورت کلی در حوضه‌های مرطوب مورد بررسی قرار گرفته بود، استفاده شد. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد مدل در مناطق مرطوب از دقت خوبی در شبیه‌سازی بارش رواناب برخوردار است به طوری که در اکثر حوضه‌های مرطوب معیار ارزیابی ناش - ساتکلیف بالای ۷۵ درصد بوده است و تاکنون نتایج کاربرد مدل در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه به صورت ماهانه، مورد بررسی کامل قرار نگرفته است. اطلاعات ورودی مورد استفاده در این پژوهش به دو بخش، اطلاعات هیدرولوژی که شامل بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل در مقیاس روزانه و نقشه‌های تغییرات مکانی که شامل رقوم ارتفاعی، بافت خاک و کاربری اراضی می‌باشند، تقسیم شدند. فرآیند

رحمتی و همکاران: ارزیابی مدل WetSpa در شبیه‌سازی بارش - رواناب...

منابع

- ۱- آذین‌مهر، م. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی اثر سناریوهای تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف جریان حوزه آبخیز دینور با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی - مکانی WetSpa. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مرتع و آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۵۰ صفحه.
- ۲- احمدی، م. ۱۳۹۰. مدیریت و بهره‌برداری بهینه آب کشاورزی در شبکه آبیاری و زهکشی سد دز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، ۲۰۷ صفحه.
- ۳- رحمتی، ح. ۱۳۹۲. مدل‌سازی بیلان سطحی توسط مدل WetSpa (مطالعه موردی حوزه بار اریه). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۱۲ صفحه.
- ۴- شفیع، م. ۱۳۸۸. مدل‌سازی هیدرولوژیک بیلان آب‌های سطحی توسط مدل SWAT و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی حوزه آبخیز نیشابور). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۰۸ صفحه.
- ۵- یعقوبی، ف و ع. بهره‌مند. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی - مکانی WetSpa در حوزه آبخیز چهل‌چای در استان گلستان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۸ (۳): ۲۰۵-۱۸۵.
- 6- Al Mulla, M.M. 2005. Application of a hydrological model in a data-poor arid region catchment: a case study of Wadi Ham, United Arab Emirates. PhD Thesis, Cranfield University, England.
- 7- Andersen, J., Dybkjaer, G., Jensen, K.H., Refsgaard, J.C. and K. Rasmussen. 2002. Use of remotely sensed precipitation and leaf area index in a distributed hydrological model. Journal of Hydrology, 264: 34-50.
- 8- Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poorova, J., Velcicka, L. and E. Kunikova. 2007. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany-Hornad watershed, Slovakia. Water Resources Management Journal, 21: 1373-1391.
- 9- Bahremand, A. 2006. Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
- 10- Bahremand, A., Corluy, J., Y.B., Liu, Y.B. and F. De Smedt. 2005. Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad river basin, Slovakia. in: J. van Alphen, E. van Beek, M. Taal (eds.), Floods, from defence to management, Taylor & Francis Group, London.
- 11- Beven, K. J. 2000. Rainfall-runoff modeling. John Willey and Sons Ltd, England.
- 12- Gebremeskel, S., Liu, Y. B. and F. De Smedt. 2002. GIS based distributed modeling for flood estimation, Jorge A. Ramirez (ed.), Proceedings of the Twenty-Second Annual American Geophysical Union Hydrology Days, April 1-4, Colorado State University, USA.
- 13- Liu, Y.B. And F. De Smedt. 2004. WetSpa extension. A GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering Vrije Universiteit Brussel.
- 14- Morin, J. and Y. Benyamini, 1977. Rainfall infiltration into bare soils. Water Resource Research, 13(5): 813-817.
- 15- Nemeč, J. and J.A. Rodier. 1979. Streamflow characteristics in areas of low precipitation. Proceedings of the Canberra Symposium: IAHS Publ. 128:125-40.

- 16-Nurmohamed. R., Naipal. S. and F. De Smedt. 2006. Hydrologic Modeling of the upper suriname. *Journal of Spatial Hydrology*, 1(6): 1-17.
- 17-Pilgrim, D. H., Chapman, T. G. and D.G. Doran.1988. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semi-arid regions. *Hydrological Sciences Journal*, 33(4):379– 400.
- 18-Safari, A., De Smedt, F. and F. Moreda. 2009. WetSpa model application in the Distributed Model Inter comparison Project (DMIP2). *Journal of Hydrology*, 418: 78-89.
- 19-Wheater, H., Sorooshian, S. and K.D. Sharma. 2008. *Hydrological modelling in arid and semi-arid areas*. Cambridge University Press.
- 20-Zeinivand, H. and F. De Smedt. 2010. Prediction of snowmelt floods with a distributed hydrological model using a physical snow mass and energy balance approach. *Natural Hazards Journal*, 54(2): 451-468.
- 21-Zeinivand, H. and F. De Smedt. 2009. Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment transport at watershed scale. *World Environmental and Water Resources Congress (EWRI)*, 17-21 May, Kansas City, USA.
- 22-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.