نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۶ شماره ۴/۲ صفحه‌های ۱۵۹ تا ۱۷۲ / سال ۱۳۹۵

مدل‌سازی هیدرولوژیکی تجمع و ذوب برف در حوضه‌های نیمه‌خشک و کوهستانی (مطالعه موردی: حوضه باراریه)

حسین رحمتی*[۱]، حسین زینی‌وند[۲]، حسین انصاری[۳]، علی نقی ضیائی[٤]، پیوند پاپن[٥]، سعید شکری کوچک[٦]

تاریخ دریافت: ۹٤/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۲۷

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

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

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

٤- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

٥- کارشناس ارشد خاکشناسی، سازمان آب و برق خوزستان

٦- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Hosein.Rahmati86@gmail.com

چکیده

در این تحقیق به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندهای تجمع و ذوب برف حوضه باراریه که حوضه‌ای کوهستانی با متوسط ارتفاع ۲۲۲۵ متر از سطح دریا می‌باشد از مدل WetSpa، استفاده گردید. اطلاعات ورودی مدل شامل بارش، دمای هوا، تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه، در دوره آماری ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۷ و نقشه‌های کاربری اراضی، بافت خاک و رقوم ارتفاعی می‌باشد. با توجه به معیار ارزیابی ناش – ساتکلیف در دو دوره واسنجی و ارزیابی که به‌ترتیب برابر با ۰/٦۷ و ۰/٦۹ می‌باشند مشخص شد که مدل به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی جریان رودخانه باراریه می‌باشد. بر اساس نتایج مشخص شد آستانه شکل‌گیری برف در این حوضه درجه حرارت ۰/۱۱ سِلسیوس می‌باشد. با توجه به مقادیر متوسط ماهانه مؤلفه‌های بیلان مشخص گردید که دو ماه دی و بهمن به‌ترتیب با ۲۹/۲۵ میلی‌متر و ۳۷/۹٤ میلی‌متر بیش‌ترین مقدار آب معادل برف و دو ماه اسفند و فروردین با ۳۸/۸۹ میلی‌متر و ۳۷/۱٤ میلی‌متر بیش‌ترین مقدار ذوب برف را دارا می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: رودخانه باراریه نیشابور، ذوب برف، مدل WetSpa، مدل‌سازی هیدرولوژیکی

Hydrological Modeling of Snow Accumulation and Melting in Semi-Arid and Mountainous Watersheds (Case study: Bar Arye Watershed)

H Rahmati[1*], H Zeinivand[2], H Ansari[3], AN Ziaee[4], P Papan[5], S Shokri Khoochak[6]

Received: 07 February 2016 Accepted: 18 October 2016

1- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage Engin., Faculty of Water Science Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2- Assist. Prof., Dept. of Range and Watershed Management Engin., Faculty of Agric., Lorestan Univ, Iran
3- Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran
4- Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Iran
5- M.Sc. graduate in Soil Science, Khuzestan Water and Power Authority
6- Ph.D. Student of Water Resources Engin., Faculty of Water Sciences Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Ahvaz, Iran
* Corresponding Author, Email: Hosein.Rahmati86@gmail.com

Abstract

In this study, the WetSpa model was utilized to simulate the snow accumulation and melting processes in the Bar Arye mountainous watershed with an average altitude of 2225 meters above the mean sea level. The input data used in this study included daily records of precipitation, air temperature and potential evapotranspiration, covering the period of 2003 to 2008, as well as three types of maps, namely; land use, soil texture and topography maps. According to Nash-Sutcliffe assessment index values (0.67, 0.69) for the calibration and validation periods, the model could simulate the Bar Arye river flow with high accuracy. The results indicated that the temperature threshold for snow formation in this catchment was 0.11°C. According to the water balance components, it was indicated that the maximum amounts of equivalent snow water belonged to the months of December (29.25 mm) and January (37.94 mm), while the maximum snow melt values were observed during March and April , as 38.89 mm and 37.14 mm, respectively.

Keywords: Bar Arye watershed, Hydrological modeling, Snow melt, WetSpa model

مقدمه

برف یکی از منابع بزرگ آب در بیشتر نقاط دنیا می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد آب شرب مورد نیاز بیش از یک میلیارد نفر از ساکنان دنیا از رواناب ناشی از ذوب برف‌ها تامین می‌شود. رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی و مرتفع عامل مهم و کنترل کننده رژیم جریان محسوب می‌شود. یکی از عوامل مؤثر در فرآیند تغییر اقلیم، تغییرات عمده در مقدار باران، برف و نیز زمان ذوب برف بوده که بهره‌برداری از منابع آب را تحت‌الشعاع خود قرار داده است (بالس و کلین ۲۰۰۳). ایران سرزمین کم آبی است که در منطقه‌خشک و نیمه‌خشک کره زمین قرار گرفته و با استفاده از رشته کوه‌های مرتفعی هم‌چون البرز و زاگرس احاطه گردیده است (رسولی و ادهمی ۱۳۸٦). در این مناطق کوهستانی کشور، بخش قابل توجهی از بارش به‌صورت برف می‌باشد که منبع مهم جریان رودخانه‌ای محسوب می‌گردد. ذخایر برفی حوضه‌های کوهستانی از منابع مهم و قابل اطمینان کشور است که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در میزان ذخایر آب، به‌ویژه در فصل‌های گرم سال، محسوب می‌گردد لذا شناخت

کمیت این منابع به لحاظ ارزش روزافزون آب شیرین و هم به‌واسطه بهره‌برداری بهینه از منابع آب ضروری است (معروفی و همکاران ۱۳۸۹). برآورد میزان آب و یا تخمین رواناب ناشی از ذوب برف یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های هیدرولوژیست‌ها به‌حساب می‌آید (وظیفه دوست و همکاران ۱۳۸۹). تخمین رواناب حوضه در مناطقی با پوشش برف فصلی، نیاز به یک الگوریتم ذوب برف به‌عنوان جزئی از سیستم مدل‌سازی دارد (بالس و کلین ۲۰۰۳). افزایش اطلاعات توزیعی حوضه‌ها مانند پوشش برف، اطلاعات توپوگرافی، افزایش قابلیت‌های رایانه‌ای و توسعه نرم‌افزارهای GIS و روش‌های مربوطه سبب تسریع در این تحول گردیده است. رویکردهای بسیاری برای مدل‌سازی ماهیت توزیعی فرآیندهای برف در سطح حوضه به‌کار رفته است (معتمدی و صدقی ۱۳۹۲). تحقیقات فراوانی در زمینه برف و فرآیندهای مربوط به آن در سطح جهان و کشور انجام شده است که از آن جمله، مرید و همکاران (۲۰۰٤) در تحقیقی به بررسی عملکرد روش‌های مختلف برآورد ذوب برف با استفاده از اطلاعات اقلیمی مصنوعی در شبیه‌سازی جریان پرداختند. برای این منظور آن‌ها از مدل‌های SWAT، درجه- روز، SRM و SNOW17، و از روش‌های ترکیبی مبتنی بر درجه حرارت، درجه حرارت- تابش و بیلان انرژی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش بیلان انرژی از سایر روش‌ها عملکرد مناسب‌تری داشته است. شریفی و شهاب‌فر (۱۳۸۳) در پژوهشی به ارزیابی رواناب حاصل از ذوب برف در یک حوضه با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل SRM پرداختند و در نهایت استفاده از مدل SRM در ترکیب با تصاویر ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی را توصیه نمودند. وظیفه‌دوست و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی به بررسی سهم رواناب ناشی از ذوب برف در جریان رودخانه پلرود واقع در استان گیلان پرداختند. آن‌ها از مدل SRM و مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده نمودند. نتایج حاصل از مدل SRM در شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارندگی و ذوب برف در حوضه حاکی از دقت نسبتا خوب و قابل قبول بوده است. فتاحی و همکاران (۱۳۹۰) به شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه کوهستانی بازفت با استفاده از مدل SRM پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که شبیه‌سازی با استفاده از مدل SRM موفق و قابل قبول می‌باشد به‌طوری‌که شاخص‌های ارزیابی ضریب تعیین و تفاضل حجمی به ترتیب برابر است با ۸۲ درصد و ۱۸/۹- درصد می‌باشد. میریعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی به مدل‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه سد کرج پرداختند. نتایج نشان داد که در دو سال دوره شبیه‌سازی نتایج قابل قبول می‌باشد. دلاور و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی به شبیه‌سازی توزیعی ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی پرداختند. منطقه مورد مطالعه آن‌ها حوضه امامزاده داوود بود. آن‌ها از الگوریتم ذوب برف SRM استفاده نمودند و با به‌کارگیری مدل SWAT به محاسبه رواناب پرداختند. نتایج حاصل از مدل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی حاکی از دقت قابل قبول و کارآیی مناسب آن در حوضه‌های کوهستانی بوده است. شرافتی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی با هدف بررسی جریان ورودی به سد طرق از مدل ذوب برف SWEG استفاده کردند. با استناد به اطلاعات مشاهده‌ای ایستگاه‌های برف‌سنجی در سال‌های ۷۸-۱۳۷۷ تا ۷۹-۱۳۷۸ و ضریب همبستگی آب معادل برف در ایستگاه‌های برف‌سنجی نسبت به واسنجی مدل در حوضه کشف‌رود اقدام کردند که در نتیجه ضریب همبستگی خروجی مدل با اطلاعات مشاهداتی ۰/۵۲ بهبود یافت. زینی‌وند و دی‌اسمدت (۲۰۰۹) با استفاده از مدل WetSpa و آمار سه ساله

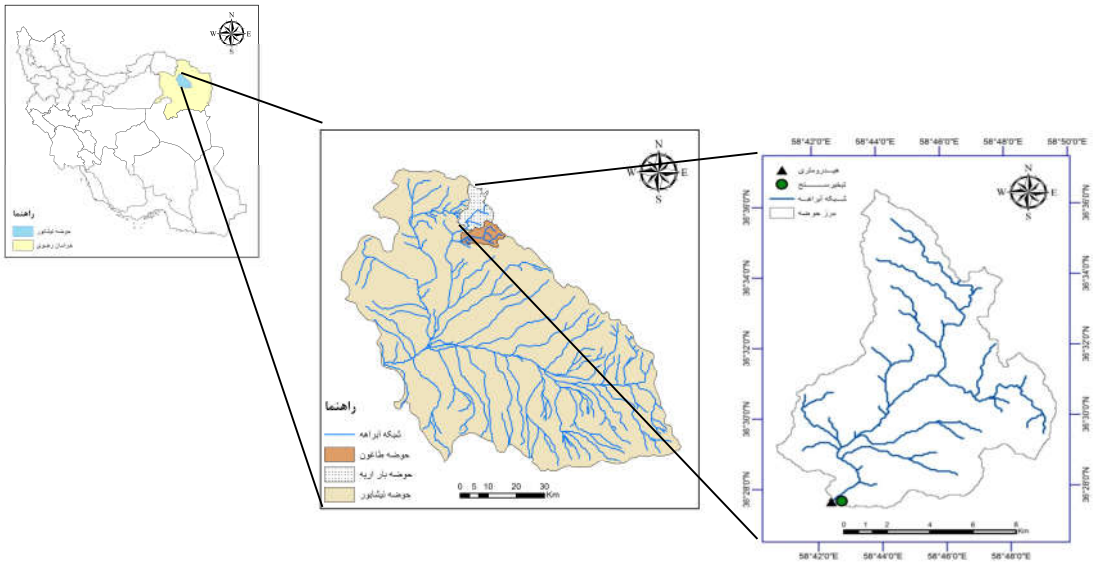
بین مقادیر محلسباتی و مشاهداتی مشخص گردید که ضرایب روابط مورد استفاده و مقادیر عددی پارامترهای به‌کاررفته در مدل اولیه مورد استفاده با واقعیت حوضه تطبیق چندانی ندارد. از این رو با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مقادیر مشاهده‌ای ارتفاع

حوضه سد لتیان اقدام به شبیه‌سازی تجمع و ذوب برف در این حوضه نمودند. در واقع هدف اصلی آن تحقیق بررسی میزان کارآیی دو روش روز-درجه حرارت و بیلان انرژی در شبیه‌سازی تجمع و ذوب بوده است که بر اساس نتایج مشخص گردید هر دو روش از دقت خوبی برخوردار می‌باشند. آرورا و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل SNOWMOD و اطلاعات سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ اقدام به شبیه‌سازی جریان حاصل از یخچالی در هیمالیا نمودند. بر اساس اطلاعات روزانه مشخص گردید که میزان کارآیی مدل در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ به‌ترتیب برابر با ۸۶٪ و ۹۰٪ بوده است. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی مدل WetSpa در شبیه‌سازی جریان رودخانه، فرآیندهای تجمع و ذوب برف و تعیین برخی مؤلفه‌های بیلان حوضه کوهستانی و نیمه‌خشک باراریه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در محدوده‌ای بین طول جغرافیایی "۵ ′۲۱ °۵۸ تا "۶ ′۲۱ °۵۸ شرقی و عرض جغرافیایی "۱۸ ′۲۰ °۳۶ تا "۱۸ ′۲۹ °۳۶ شمالی قرار دارد. حوضه رودخانه باراریه به‌عنوان یکی از زیرحوضه‌های، حوضه نیشابور می‌باشد که در شمال شرق این شهرستان قرارگرفته است. رودخانه اصلی این حوضه از دامنه جنوب غربی سلسله جبال بینالود سرچشمه گرفته و پس از عبور از نیشابور به رودخانه کال سبزوار می‌پیوندد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی و محدوده حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است. بیشترین ارتفاع در این حوضه برابر با ۲۸۷۰/۷۵ متر و کم‌ترین ارتفاع ۱۰۶۱/۳۰ متر می‌باشند.



شکل ۱- موقعیت مکانی حوضه باراریه در حوضه نیشابور و ایران.

مدل WetSpa

این مدل از جمله مدل‌های پیوسته و توزیعی بوده که با هدف پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر توسط در دانشگاه بروکسل VUB در بلژیک کدنویسی شده است (وانگ و همکاران ۱۹۹۶) و سپس در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ توسعه پیدا کرده است (دی‌اسمدت و همکاران ۲۰۰۰، لیو ۲۰۰۴، زینی‌وند ۲۰۰۹). توسعه پیدا کرده است. این مدل با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه به‌صورت (روزانه –

ساعتی) می‌باشد (وانگ و همکاران ۱۹۹۶). با استفاده از این مدل می‌توان هیدروگراف جریان را در خروجی حوضه و یا هر نقطه‌ای از حوضه که در آن جریان به‌هم می‌پیوندد، با گام‌های زمانی متفاوت تخمین زد (دی‌اسمدت و همکاران ۲۰۰۰). اطلاعات ورودی مدل شامل دو دسته اطلاعات نقشه‌های رستری (رقوم ارتفاعی، بافت خاک و کاربری اراضی) و اطلاعات هیدرولوژی می‌باشند. هم‌چنین به‌منظور واسنجی پارامترهای ورودی مدل به اطلاعات دبی مشاهده‌ای خروجی حوضه نیاز می‌باشد. به‌منظور اجرای مدل، دو دسته پارامتر باید به‌عنوان ورودی مدل معرفی گردند. دسته اول شامل پارامترهایی می‌باشند که به‌صورت توزیعی بوده و بر اساس سه نقشه رقوم ارتفاعی، بافت خاک و کاربری اراضی و جدول‌های مرجع موجود در محیط ArcView تعیین می‌شود و دسته دوم پارامترهایی می‌باشند که به‌صورت مستقیم نمی‌توان آن‌ها را تعیین کرد و بر اساس مشخصات حوضه مورد نظر باید توسط کاربر تعیین شود که پارامترهای دسته دوم عبارتند از فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل، فاکتور تصحیح جریان زیرسطحی، ضریب افت آب زیرزمینی، رطوبت اولیه خاک، ذخیره اولیه آب زیرزمینی، بیشینه ذخیره آب زیرزمینی، درجه حرارت پایه برای ذوب برف، ضریب روز- درجه حرارت، ضریب روز- درجه بارش، توان رواناب سطحی و شدت بارش مربوط a=۱ می‌باشد و این پارامتر به یک شدت بارش آستانه با واحد میلی‌متر در روز یا میلی‌متر در ساعت، مربوط می‌گردد و بستگی به تفکیک موقعیت شبیه‌سازی دارد. هم‌چنین در آن توان رواناب سطحی برابر با یک بوده و ضریب رواناب واقعی به‌صورت تابع خطی با محتوای رطوبت نسبی خاک در می‌آید. در مدل WetSpa بارش مازاد با استفاده از روش استدلالی اصلاح‌شده و با توجه به میزان ضریب رواناب هر سلول که به توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک وابسته است محاسبه می گردد (رحمتی ۱۳۹۲).

$$S = C(P - I)\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{\alpha} \qquad [۱]$$

C: ضریب رواناب پتانسیل (-)، α: بیان‌گر تأثیرمیزان شدت بارندگی بر بارش مازاد می‌باشد (-) و θs: میزان رطوبت خاک در حالت اشباع [m^3m^{-3}]. جریان آب سطحی و زیرسطحی ابتدا در هر شبکه سلولی به‌سوی کانال اصلی روندیابی می‌شود و در خروجی هر زیر حوضه آب زیرزمینی هم به آن‌ها اضافه شده و سپس کل جریان به‌سمت خروجی حوضه روندیابی می‌گردد. روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادلات تقریب موج پخشی سنت ونانت انجام می‌گیرد (یعقوبی و بهره‌مند ۱۳۹۰).

مدل تجمع و ذوب برف

در مدل WetSpa، فرآیند ذوب برف اختیاری است، در صورت وجود برف در منطقه، باید آمار درجه حرارت نیز به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شود. در مواقعی که اطلاعات مورد نیاز از جمله طول موج تابش در دسترس نباشد شاخص مفهومی درجه حرارت یا روش روز - درجه که در آن تعادل انرژی به‌صورت معادله‌ای در رابطه با درجه حرارت هوا بیان می‌گردد به‌صورت گسترده‌ای در مدل‌سازی ذوب برف به‌عنوان یک روش دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض بر این است که در صورت پایین‌تر بودن دمای هوا از آستانه ذوب برف، بارندگی به‌صورت برف رخ داده و بر روی تاج پوشش گیاهان و سطح زمین ذخیره شود و هنگامی که دمای هوا از آستانه ذوب فراتر رود پشته برف شروع به ذوب شدن کند. این روش با تکیه بر آمار درجه حرارت روزانه و بارش به‌عنوان روشی مفید برای مدل‌سازی ذوب برف در مناطقی که

اندازه‌گیری برف در آن‌ها به‌طور منظم صورت نگرفته و یا این‌که داده‌های تاریخی در آن‌ها محدود است، می‌باشد. آن میزان از برف که ذوب شده و به حجم بارش اضافه می‌گردد در نظر گرفته می‌شود (بهره‌مند ۲۰۰۶). میزان برف ذوب شده به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد (زینی‌وند و دی اسمدت ۲۰۰۹):

$$M = MAX\left[0,\left(K_{Snow} + K_{Rain}P\right)\left(T_a - T_0\right)\right] \qquad [۲]$$

M: میزان ذوب برف روزانه ($mm \quad d^{-1}$)، T_a: متوسط درجه حرارت روزانه سلول($°C$)، T_o: درجه حرارت آستانه ($°C$)، K_{snow}: فاکتور ذوب یا درجه-روز ($mm°C^{-1}day^{-1}$)، K_{rain}: ضریب روز- درجه مربوط به ذوب برف ناشی از بارش ($mm \quad mm^{-}$ $^{1}°C^{-1}day$).

درجه حرارت و پوشش برف در حوضه‌های کوهستانی دارای تغییرات قابل توجهی می‌باشند. در بیشتر مواقع آمار و اطلاعات هیدرولوژیکی-هواشناسی در مناطق کوهستانی بسیار نادر است، لذا برای در نظر گرفتن تغییرات شدید درجه حرارت نسبت به ارتفاع، در هرسلول از ضریب تصحیح میزان خطا استفاده می‌شود (بهره‌مند ۲۰۰۶):

$$T_a = T_{ref} + T_{ref}\left(H_i - H_{ref}\right)\times\beta \qquad [۳]$$

T_{ref}: درجه حرارت در ایستگاه مبنا (^{o}C)، H_i و H_{ref}: ارتفاع در سلول‌های i و مبنا (m)، β: نرخ اختلاف درجه حرارت.

به‌منظور ارزیابی مدل از ٤ معیار MB، NS، NSL و NSH استفاده شد. معیار انحراف مدل (MB) به منظور بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی بیلان آبی یا حجم آب شبیه‌سازی شده در مقایسه با حجم آب مشاهده شده استفاده می‌شود. معیار ناش – ساتکلیف (NS) برای بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی میزان جریان رودخانه به کار می‌رود و به منظور بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان‌هایی با مقادیر کم و زیاد از دو معیار ناش- ساتکلیف جریان‌های کم (NSL) و ناش - ساتکلیف جریان‌های زیاد (NSH) استفاده می‌شود (زینی‌وند و دی‌اسمدت ۲۰۰۹).

$$MB = \frac{\sum_{1}^{i=N} Qs_i}{\sum_{1}^{i=N} Qo_i} - 1 \qquad [٤]$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{1}^{i=N}\left(Qs_i - Qo_i\right)^2}{\sum_{1}^{i=N}\left(Qo_i - \overline{Qo}\right)^2} \qquad [٥]$$

$$NSL = 1 - \frac{\sum_{1}^{i=N}\left[\ln\left(Qs_i\right) - \ln\left(Qo_i\right)\right]^2}{\sum_{1}^{i=N}\left[\ln\left(Qo_i\right) - \overline{\ln\left(Qo_i\right)}\right]^2} \qquad [٦]$$

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{1}^{i=N}\left(Qo_i + \overline{Qo}\right)\left(Qs_i - Qo_i\right)^2}{\sum_{1}^{i=N}\left(Qo_i + \overline{Qo}\right)\left(Qo_i - \overline{Qo}\right)^2} \qquad [٧]$$

Qsi: جریان شبیه‌سازی شده در گام زمانی i (L^3T^{-1})، Qoi: جریان مشاهده‌ای در گام زمانی i (L^3T^{-1})، N: تعداد گام، $\overline{Q_o}$: متوسط دبی جریان مشاهده‌ای طی دوره شبیه‌سازی (L^3T^{-1})، است.

اطلاعات مورد نیاز در منطقه

اطلاعات هیدرولوژی مورد نیاز این تحقیق شامل بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل در مقیاس روزانه و اطلاعات ایستگاه آب‌سنجی خروجی حوضه به‌منظور واسنجی پارامترهای مدل بوده است. در منطقه مورد مطالعه عواملی چون عرض جغرافیایی بالا، دوری از منابع آب و ارتفاع زیاد موجب می‌گردد تا منطقه دارای اقلیمی نیمه‌سرد باشد بر اساس اطلاعات ایستگاه تبخیرسنجی باراریه در این رژیم گرمایی ماه دی با °C ۱/٦ و ماه تیر با °C ۲٤/٦ سردترین و گرم‌ترین ماه‌های سال می‌باشند. بررسی آمار ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی موجود در محدوده حوضه باراریه و با توجه به هدف تحقیق و نیاز مدل به ورودی‌هایی با گام زمانی روزانه، پیوسته و هم زمان بودن سری زمانی، درنهایت

دوره زمانی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ تا ۱۳۸۷-۱۳۸۶ انتخاب گردید و سپس ۳ سال اول جهت واسنجی و ۲ سال باقی‌مانده به‌منظور دوره ارزیابی مدل انتخاب گردیدند. میانگین بارش حوضه در دوره آماری ۵ ساله برابر با ۳۱۶/۶۰ میلی‌متر می‌باشد که سال آبی ۸۴-۱۳۸۳ با ۴۵۶/۵۰ میلی‌متر و سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ با ۱۴۰/۵۰ میلی‌متر به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار بارش را به‌خود اختصاص داده‌اند.

در مرحله اول نقشه‌های میزان شیب، جهت جریان، طول جریان، جریان تجمعی، شبکه آبراهه، شعاع هیدرولیکی و زیرحوضه‌ها با استفاده از نقشه توپوگرافی ایجاد شدند. ازآنجاکه اگر شیب منطقه‌ای برابر با صفر باشد باعث ایجاد خطا در بحث روندیابی جریان می‌گردد به‌همین دلیل در بخش نقشه شیب عددی به‌عنوان کمینه شیب به مدل تعریف گردید 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 ۰/۰۱٪ بود، لحاظ گردید. با در نظرگیری دوره بازگشت ۲ ساله نقشه شعاع هیدرولیکی ایجاد گردید. نقشه کاربری اراضی به‌عنوان یکی از ورودی‌های اصلی بوده و نقشه کاربری اراضی حوضه بارایه دارای مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰ می‌باشد. با توجه به تأثیر نوع پوشش بر فرآیندهای هیدرولوژیکی، عمل تقسیم‌بندی پوشش‌ها در ۱۷ کلاس صورت گرفته است. طبق الگوریتم به‌کار رفته در مدل، تقسیم‌بندی تغییر می‌کند به‌عنوان نمونه به‌منظور تعیین ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی تنها ۵ کلاس محصولات زراعی، مرتع، جنگل، خاک لخت و مناطق شهری مورد توجه قرار می‌گیرند. نقشه‌هایی هم‌چون عمق ریشه، درصد پوشش، ظرفیت ذخیره برگابی کمینه و بیشینه، ضریب زبری مانینگ برای جریان سطحی و کانال و شاخص سطح برگ در محیط ArcView، با استفاده از نقشه کاربری اراضی و جدول‌های مرجع موجود ایجاد گردید. نقشه ضریب زبری مانینگ برای جریان سطحی و جریان کانال با توجه به نقشه آبراهه تعیین شد. ضریب زبری کانال با استفاده از درون‌یابی بین رتبه‌های مختلف کانال ایجاد گردید که ۰/۰۱۵ برای کمینه رتبه و ۰/۰۵۵ برای بیشینه رتبه در نظر گرفته شد. نقشه واحدهای اراضی خاک اخذ شده با دقت ۱:۱۰۰،۰۰۰ می‌باشد. کدبندی بافت خاک در مدل بر اساس مثلث طبقه‌بندی بافت خاک می‌باشد. با استفاده از نقشه بافت خاک و محیط ArcView، نقشه‌های مورد نیاز به‌منظور اجرای مدل تهیه گردیدند. نقشه‌هایی که در این مرحله تولید شدند عبارتند از: هدایت هیدرولیکی، تخلخل، ظرفیت زراعی، رطوبت باقیمانده، شاخص توزیع اندازه ذرات، نقطه پژمردگی و بیشینه میزان اشباع. در محیط ArcView با استفاده از سه نقشه رستری اولیه و پارامترهای توزیعی ایجاد گشت و جداول مرجع مربوط به ضرایب رواناب پتانسیل و چالاب، دو نقشه توزیعی ضریب رواناب پتانسیل و چالاب ایجاد گردیدند. در گام بعد با استفاده از نقشه‌های تولید شده در مراحل قبل اقدام به ایجاد نقشه‌های سرعت جریان، زمان پیمایش، انحراف معیار زمان پیمایش، زمان پیمایش تا آبراهه اصلی شد. این لایه‌ها به‌منظور محاسبه تابع پاسخ جریان از هر سلول تا خروجی حوضه و آبراهه اصلی مورد استفاده قرار گرفتند. سرعت جریان با توجه به اطلاعات ضریب زبری مانینگ، شعاع هیدرولیکی و شیب به‌صورت نقشه توزیعی برآورد گردید که کمینه سرعت برابر با ۰/۳۸ متر بر ثانیه و بیشینه سرعت برابر با ۲ متر بر ثانیه محاسبه گردید. زمان پیمایش[1] حوضه بارایه ۱۰ ساعت می‌باشد. نقشه‌های شبکه‌بندی شده بارش، دما و تبخیر از نظر ابعاد شبکه مانند دیگر نقشه‌ها تهیه شدند. موقعیت ایستگاه‌های موجود در داخل حوضه در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. با توجه به فاصله بین ایستگاه‌ها و هم‌چنین موقعیت قرارگیری آن‌ها بعد از انجام تیسن‌بندی کل حوضه در پلی‌گونی که معرف

[1] - Travel time

ایستگاه بارانیه بود قرار گرفت و به‌همین‌دلیل در این تحقیق از اطلاعات تک ایستگاه بارانیه استفاده گردید. لازم به ذکر است که در این پژوهش از نقشه ماسک حوضه بجای پلی‌گون‌های تیسن بارندگی، دما و تبخیر استفاده گردید. پس از معرفی داده‌های مورد نیاز مدل WetSpa، مانند باران، تبخیر و تعرق پتانسیل، دما و دبی، مدل اجرا گردید. در شروع عملیات بهینه‌سازی برای تمام پارامترهای به‌کار رفته در مدل مقادیر اولیه‌ای اختیار گردید و عملیات واسنجی مدل با حصول بهترین تطبیق بین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به اتمام رسید (رحمتی ۱۳۹۲).

نتایج و بحث

اجرای مدل WetSpa

در جدول ۱ مقدار پارامترهای واسنجی شده مدل نشان داده شده است. k_i، فاکتور تصحیح جریان زیرسطحی که به‌منظور درنظرگیری تأثیر هدایت هیدرولیکی بر جریان زیرسطحی استفاده می‌شود و مقدار ۱ را به‌صورت پیش‌فرض برای این ضریب در نظر می‌گیرند. K_g، ضریب افت آب زیرزمینی که این ضریب منعکس‌کننده وضعیت ذخیره زیرحوضه است. میزان ضریب افت آب زیرزمینی را می‌توان با توجه به اطلاعات جریان اندازه‌گیری شده و بر مبنای مطالعات انجام شده استخراج نمود و مقدار پیش‌فرضی 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 تأثیرقرار می‌دهد. k_{ep}، فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل است که در حوضه‌های مرطوب و دارای پوشش کامل و میزان رطوبت کافی می‌باشند برابر با ۱ می‌باشد (رحمتی ۱۳۹۲). G_0، ذخیره اولیه آب زیرزمینی می‌باشد. یک مقدار عددی بر 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 واسنجی است. G_{max}، بیشینه ذخیره آب زیرزمینی که میزان تبخیر و تعرق را از آب زیرزمینی کنترل می‌کند. k_{run}، توان رواناب سطحی و p_{max}، شدت بارش مربوط $a=1$ می‌باشد و این پارامتر به یک شدت بارش آستانه با واحد میلی‌متر در روز یا میلی‌متر در ساعت، مربوط می‌گردد و بستگی به تفکیک موقعیت شبیه‌سازی دارد هم‌چنین در آن توان رواناب سطحی برابر با یک بوده و ضریب رواناب واقعی با محتوای رطوبت نسبی خاک به‌صورت تابع خطی در می‌آید. سه پارامتری که در ادامه معرفی می‌گردند نقش اصلی در فرآیند تجمع و ذوب برف دارند. T_0، درجه حرارت پایه برای ذوب برف بوده و معمولا مقادیر نزدیک به صفر انتخاب می‌شوند. K_{snow}، ضریب روز- درجه حرارت است و در شرایطی که بارندگی وجود ندارد، ضریب روز- درجه بین ۱/۸ تا ۳/۷ می‌باشد. با مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در فصل بهار می‌توان این ضریب را واسنجی کرد. k_{rain}، ضریب روز-درجه بارش، تعیین‌کننده نرخ ذوب برف ناشی از تراکم هوای مرطوب بر سطح برف و گرمای انتقال یافته به پشته برف توسط بارندگی است و در حقیقت برای محاسبه ذوب برف ناشی از بارندگی کاربرد دارد. به‌طورکلی مقدار این ضریب بسیار کم و نزدیک به ۰/۰۱ می‌باشد. اگر مقدار صفر برای این ضریب در نظر گرفته شود در واقع بارندگی هیچ‌گونه تأثیری بر ذوب برف نخواهد داشت (لیو ۲۰۰٤، بهره‌مند ۲۰۰٦، زینی وند و دی اسمدت ۲۰۰۹).

با توجه به نتایج جدول ۲ مشخص می‌گردد که در هر دو دوره مدل از نظر شبیه‌سازی حجم آبی و هم‌چنین شبیه‌سازی جریان رودخانه دارای دقت خوبی می‌باشد. اما بهترین معیار ارزیابی مربوط به جریان‌های زیاد می‌باشد که در دو دوره واسنجی و ارزیابی به‌ترتیب دارای ضریب ناش- ساتکلیف ۰/۷۷ و ۰/٦۷ می‌باشند و مناسب‌بودن عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب را

تایید می‌نماید. دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جریان‌های زیاد حوضه باراریه مشابه با نتایج تحقیقات بهره‌مند (۲۰۰۶) و زینی‌وند (۲۰۰۹) می‌باشد که هر دو محقق در گزارشات خود به این نکته اشاره کرده‌اند که مدل در شبیه‌سازی جریان‌های زیاد از دقت بالایی برخودار است.

جدول ۱- معرفی و مقدار واسنجی شده پارامترهای ورودی مدل WetSpa.

	علامت	پارامتر	مقدار واسنجی شده
۱	K_i	فاکتور بی‌بعد جریان زیرسطحی (-)	۰/۷۵۰۱۱۱
۲	K_g	ضریب افت آب زیرزمینی (day^{-1})	۰/۰۰۰۵۱
۳	K_{ss}	رطوبت اولیه خاک (mm)	۰/۹۶۸۱۲
٤	k_{ep}	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل (mm)	۰/۱٤٥٦۱
٥	G_0	ذخیره اولیه آب زیرزمینی (mm)	۳۰/٦۹۸۰۰
٦	G_{max}	بیشینه ذخیره آب زیرزمینی (mm)	۲۸٥/۸٦۹
۷	T_0	ضریب درجه حرارت آستانه (°C)	۰/۱۱۱۳۹
۸	K_{snow}	ضریب درجه روز درجه حرارت ($mm\ °C day^{-1}$)	۰/۸۰۱۱۷
۹	k_{rain}	ضریب روز درجه بارش ($°C day^{-1}$)	٥/٦۲۲۹۰*۱۰$^{-۷}$
۱۰	k_{run}	توان رواناب سطحی برای شدت بارندگی صفر (-)	۷/۸۲۹٤٦
۱۱	p_{max}	بیشینه شدت بارش ($mm day^{-1}$)	٦۷/۰۹۲۰

جدول ۲- مقادیر معیارهای کارایی مدل در دوره واسنجی و ارزیابی.

نمایه	دوره واسنجی (٪)	دوره ارزیابی (٪)
انحراف مدل	-۰/۹۹	-٥/۳۷
نمایه ناش - ساتکلیف	٦٦/۷۸	٦۹/۲۱
نمایه ناش - ساتکلیف جریان‌های کم	٦۱/٦۷	٥٦/۹۹
نمایه ناش - ساتکلیف جریان‌های زیاد	۷٦/٦۳	٦٦/۷۹

در جدول ۳ مقادیر بارش (P) رخ داده در ٥ سال دوره شبیه‌سازی نشان داده شده است که این بارش در واقع جمع بارندگی (Rain) و برف (Snow) می‌باشد. مدل با توجه به مقدار ضریب درجه حرارت آستانه (T_0) که در این حوضه برابر با ۰/۱۱ سِلسیوس است مقداری از بارش را به‌صورت برف شبیه‌سازی می‌کند. در زمانی که مقدار درجه حرارت از این آستانه کم‌تر باشد و بارش رخ دهد مدل آن را به‌صورت برف در نظر می‌گیرد و این روند تا زمانی ادامه دارد که متوسط درجه حرارت هوا از این مقدار آستانه بالاتر رود که در آن هنگام برف تجمع یافته ذوب خواهد شد. با توجه به جدول ۳ مشخص می‌شود که در سال آبی ۸۳-۸۲، ۳٤/۸۲٪ از بارش سالانه به‌صورت برف بوده است که این نسبت برای سال‌های آبی بعدی به‌ترتیب برابر با ۲۹/٦٤٪، ۳۱/٤۹٪، ۲۷/۳٤٪ و ٥٦/۹۷٪ می‌باشد. بیشترین نسبت مربوط به سالی آبی ۸۷-۸٦ می‌باشد که دارای کم‌ترین میزان بارش سالانه می‌باشد و علت این امر زمان وقوع بارش در این سال آبی می‌باشد که بیشتر بارش در فصل زمستان رخ داده است و همین علت سبب افزایش میزان برف نسبت به بارندگی در این سال شده است. جدول ٤ میزان متوسط ماهانه برخی مقادیر مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه باراریه در دوره ٥ ساله شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقادیر سالانه برخی از مولفه‌های بیلان سطحی حوضه بارارایه.

سال آبی	P (mm)	Rain (mm)	Snow (mm)	Melt (mm)
۸۲-۸۳	۳۳۲/۵۰	۲۱۶/۷۱	۱۱۵/۷۹	۱۱۵/۷۹
۸۳-۸۴	٤٥٦/٥٠	۳۲۱/۲۰	۱۳٥/۳۰	۱۳٥/۳۰
۸٤-۸٥	۲٦۷/۰۰	۱۸۲/۹۲	۸٤/۰۸	۸٤/۰۸
۸٥-۸٦	۳۸٦/٥	۲۸۰/۸۲	۱۰٥/٦۸	۱۰٥/٦۸
۸٦-۸۷	۱٤۰/٥۰	٦۰/٤٤	۸۰/۰٦	۸۰/۰٦

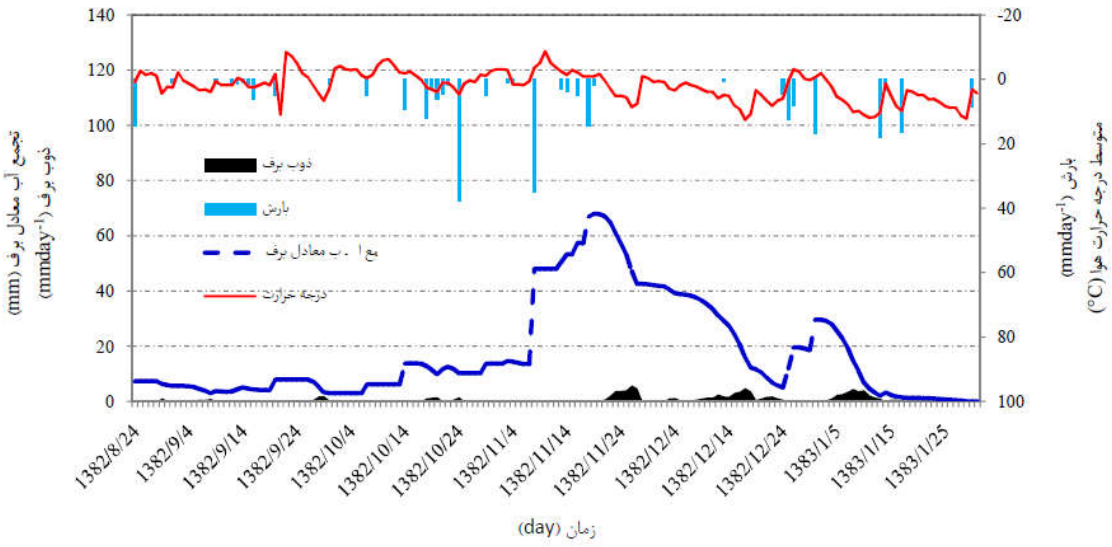
با توجه به جدول ٤، بارش برف در این حوضه از آبان ماه شروع می‌گردد و تا فروردین ماه ادامه دارد. لیکن عمده‌ترین بارش‌های برف در ماه‌های آذر، دی و بهمن می‌باشد. با مقایسه میزان بارش برف و میزان ذوب برف می‌توان دریافت که میزان ذوب برف در ماه‌های آبان، آذر و بهمن کم‌تر از بارش برف می‌باشد. در مقابل این برف در حوضه ذخیره گشته و باعث می‌گردد که ذوب برف در ماه‌های اسفند و فرودین بیشتر از بارش برف آن باشد و ذوب برف تا ماه اردیبهشت ادامه دارد و در دبی پایه رودخانه مؤثر است. از ماه خرداد تا انتهای فصل خشک برف در حوضه نقشی ایفا نمی‌کند.

جدول ۴- میزان متوسط ماهانه تعدادی از مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه بارارایه در دوره ۵ ساله شبیه‌سازی (۱۳۸۳-۱۳۸۲ تا ۱۳۸۷-۱۳۸٦).

مولفه	ماه											
	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
P (mm)	۰/٥۰	۲٤/٥۰	۳۹/۹۰	٤۸/۸۰	٦۳/۰۰	٥٦/٦۰	٤۸/٦۰	۲٥/٤۰	۸/٦۰	۰/٦۲	۰/۲٥	۰/۰۰
Rain (mm)	۰/٥۰	۲۱/٥٤	۲۰/۰۷	۱۹/۹٥	۲٥/۰٦	٥۰/۱۳	٤۰/۷٦	۲٥/٤۰	۸/٦۰	۰/٦۳	۰/۲٥	۰/۰۰
Snow (mm)	۰/۰۰	۲/۲٦	۲۰/٤۳	۲۹/۲٥	۳۷/۹٤	٦/٤۷	۷/۸٤	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
T (°C)	۱٥/۲٤	۹/۹٤	۳/٦۲	-۱/۲۰	۱/٤۱	٦/۲۲	۱۰/۸۷	۱۷/۱۲	۲۰/٤٦	۲۲/۷٥	۲۲/۲۱	۱۹/۸۲
Melt (mm)	۰/۰۰	۰/۲۰	۳/٥٤	۱/۷۰	۱٦/۸٤	۳۷/۸۹	۳۷/۱٤	٦/۸۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

به‌منظور بررسی نحوه روند تجمع و ذوب برف در مقیاس روزانه دو سال آبی که بیش‌ترین نسبت برف به بارش را دارا می‌باشد انتخاب گردید. دوره اول که مربوط به سال آبی ۸۳-۸۲ می‌باشد از ۲٤ ام آبان ماه سال ۱۳۸۲ شروع و تا ۳۱ ام فروردین سال ۱۳۸۳ ادامه یافته است. در شکل ۲ تمامی اطلاعات در مورد بارش،

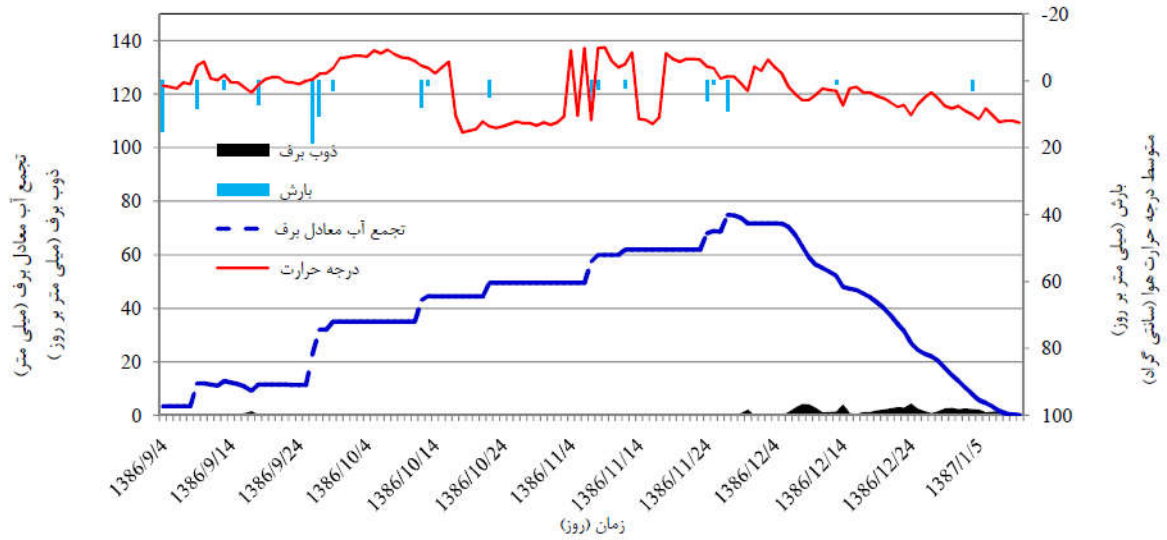
دما، تجمع برف و میزان ذوب برف در مقیاس روزانه ارائه شده است. از ۲٤ ام آبان ماه تا ۱۹ ام بهمن ماه میزان تجمع برف به بیش‌ترین مقدار خود یعنی ٦۷/۹۵ میلی‌متر از آب معادل می‌رسد و از این به بعد شاهد ذوب برف در حوضه هستیم تا ۲٤ ام اسفند ماه که میزان برف موجود در حوضه به مقدار ٤/۹٤ میلی‌متر از آب معادل می‌رسد و در روز ۲۵ ام اسفند ماه شاهد بارشی معادل با ۱۲/۵۰ اتفاق افتاد و با توجه به درجه حرارت متوسط حوضه که برابر با ۰/٦ سِلسیوس می‌باشد مدل ۵/٦۰ میلی‌متر از آن را به‌صورت بارندگی در نظر گرفته است و باقی‌مانده آن را که معادل با ٦/۹۰ میلی‌متر می‌باشد را به‌صورت برف شبیه‌سازی کرده است و به‌همین دلیل صعود منحنی میزان برف موجود در حوضه دیده می‌شود به‌نحوی‌که این افزایش تا اولین روز فروردین ماه ادامه دارد که در این روز میزان برف موجود در حوضه معادل با ۲۹/٦۲ میلی‌متر از آب معادل است و ادامه ذوب برف رخ داده است تا تمامی برف موجود در حوضه در تاریخ ۳۱ ام فروردین ماه ذوب می‌شود.



شکل ۲- میزان متوسط بارش، متوسط درجه حرارت، آب معادل برف و ذوب برف در مقیاس روزانه برای بازه زمانی ۱۳۸۲/۸/۲۴ تا ۱۳۸۳/۱/۳۱ در حوضه باراریه.

دوره دوم مربوط به سال آبی ۸۷-۱۳۸٦ می‌باشد که از تاریخ ۱۳۸٦/۹/٤ شروع و تا ۱۳۸۷/۱/۱۱ ادامه دارد و در شکل ۳ تمامی اطلاعات در مورد بارش، دما، تجمع برف و میزان ذوب برف در مقیاس روزانه ارائه شده است. در این دوره میزان تجمع برف از تاریخ شروع دوره تا ۱۳۸٦/۱۲/۵ به‌صورت پیوسته ادامه دارد که در این تاریخ به بیش‌ترین مقدار خود که معادل با ۷۱/۵۵ میلی‌متر از آب معادل می‌رسد. بیش‌ترین میزان بارش برف شبیه‌سازی شده در مقیاس روزانه در این دوره متعلق به روز ۱۳۸٦/۹/۲٦ می‌باشد که مدل از ۱۸/۵۰ میلی‌متر بارش رخ داده در سطح حوضه ۱۱/۹۳ میلی‌متر از آن را به‌صورت برف شبیه‌سازی کرده است و لازم به ذکر است که در این روز میزان متوسط درجه حرارت حوضه برابر با ۰/٤۵- سِلسیوس بوده است. از تاریخ ۵ام اسفند ماه به بعد به‌صورت پیوسته و روزانه ذوب برف رخ داده است و در نهایت تمامی برف‌های موجود در حوضه در تاریخ ۱۱ام فروردین ماه ذوب می‌شود. با توجه به معیارهای ارزیابی مدل مشخص

می‌گردد که مدل در بخش شبیه‌سازی جریان رودخانه از دقت قابل قبولی برخوردار است و مدل جریان‌های زیاد را با دقت بالاتری شبیه‌سازی کرده است و این نکته توسط گبرمسکل و همکاران (۲۰۰۲)، بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۷) و زینی‌وند و دی‌اسمدت (۲۰۰۹) گزارش شده است.



شکل ۳- میزان متوسط بارش، متوسط درجه حرارت، آب معادل برف و ذوب برف در مقیاس روزانه برای بازه زمانی ۱۳۸۶/۹/۰۴ تا ۱۳۸۷/۱/۱۱ در حوضه باراریه.

نتیجه‌گیری کلی

هدف از مطالعه حاضر بررسی نحوه فرآیند شکل‌گیری برف و ذوب آن در حوضه رودخانه باراریه نیشابور می‌باشد. برای رسیدن به این هدف از مدل توزیعی WetSpa با قابلیت تعیین و ترسیم مقادیر تجمع برف، میزان آب معادل برف، میزان ذوب برف و تغییرات ذخیره برفی برای سطح حوضه استفاده گردید. در این تحقیق با استفاده از برنامه PEST، اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه و پارامترهای مربوط به ذوب برف در این حوضه گردید و بر اساس نتایج مشخص گردید که T_0، درجه حرارت پایه یا آستانه شکل‌گیری و ذوب برف برابر با ۰/۱۱ سِلسیوس، K_{snow}، ضریب روز-درجه حرارت برابر با ۰/۸۰۱۱۷ و k_{rain}، ضریب روز-درجه بارش برابر با $۵/۶۲۲۹۰*۱۰^{-۷}$ می‌باشد. بر اساس نتایج مشخص شد که در مواقع بارش تا زمانی که درجه حرارت کمتر از ۰/۱۱ درجه سِلسیوس باشد در سطح حوضه شاهد تجمع برف خواهیم بود و جریان رودخانه تنها متاثر از دبی پایه خواهد بود و زمانی که درجه حرارت هوا در سطح حوضه از مقدار ۰/۱۱ درجه سِلسیوس فراتر رود، شاهد ذوب برف خواهیم بود. نتایج حاصل از مقایسه اطلاعات شبیه‌سازی و مشاهداتی و با توجه به ضریب ناش - ساتکلیف برابر با ۰/۷۷ و ۰/۶۷ در دو دوره واسنجی و ارزیابی، حاکی از توانمندی و سودمندی مدل مذکور در تخمین رواناب ناشی از ذوب برف می‌باشد. با توجه به مؤلفه‌های بیلان محاسبه شده هر سال مشخص شد که سالانه حدود ۳۰ درصد از بارش رخ داده در سطح حوضه تبدیل به برف می‌شود و این نسبت تنها در سال ۸۷-۸۶ به ۵۷ درصد افزایش پیدا کرده است و علت در این سال بوده است که بیشترین مقدار بارش در فصل سرد آن سال رخ داده است. بر اساس مولفه‌های بیلان ماهانه مشخص گردید که به‌صورت متوسط دو ماه دی و بهمن بیش‌ترین مقدار

تجمع برف و دو ماه اسفند و فروردین بیش‌ترین مقدار ذوب برف را به‌خود اختصاص داده‌اند.

منابع مورد استفاده

دلاور م، مرید س و نیکبخت ن، ۱۳۹۰. شبیه‌سازی توزیعی ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی فاقد داده (مطالعه موردی حوضه امامزاده داوود). مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال ۷، شماره ٤، صفحه‌های ٤١ تا ٥٠.

رحمتی ح، ۱۳۹۲. مدل‌سازی بیلان سطحی توسط مدل WetSpa (مطالعه موردی حوضه بارارید). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی. ۱۱۲ صفحه.

رسولی ع و سلام ا، ۱۳۸٦. محاسبه آب معادل از پوشش برفی با پردازش سنجنده MODIS. مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۱۰، صفحه‌های ۲۳-۲٦.

شرافتی ا، ذهبیون ب و ابریشم‌چی ا، ۱۳۹۳. پیش‌یابی جریان ماهانه ورودی به سد طرق واقع در استان خراسان شمالی با استفاده از ترکیب مدل ذوب برف SWEG و مدل پیش‌یابی جریان رودخانه SSP. مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست، شماره ۱، صفحه‌های ۱ تا ۱۷.

شریفی مب و شهاب‌فر ع‌ر، ۱۳۸۳. ارزیابی رواناب حاصل از ذوب برف در یک حوضه آبریز با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی. طرح تحقیقاتی شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان، ١٤٧ صفحه.

فتاحی ا، دلاور م و قاسمی ا، ۱۳۹۰. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل SRM مطالعه موردی حوضه آبریز بازفت. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۲۰، شماره ۲۳، صفحه‌های ۱۲۹ تا ١٤١.

معتمدی ع و صدقی ح، ۱۳۹۲. هیدرولوژی برف، انتشارات ارکان دانش، اصفهان، چاپ اول، ٢٦٠ صفحه.

معروفی ص، طبری ح، زارع ابیانه ح و شریفی، مر، ۱۳۸۹. بررسی تأثیر باد بر توزیع مکانی برف انباشت در یکی از زیرحوضه‌های کارون (مطالعه موردی: زیرحوضه صمصامی)، مجله مهندسی آبیاری و آب، شماره ۱. صفحه‌های ۳۱ تا ٤٣.

میریعقوب زاده مح، قنبرپور مر و حبیب نژاد روشن م، ۱۳۹۰. مدل‌سازی جریان ناشی از ذوب برف با استفاده از مدل هیدرولوژیکی رواناب حاصل از ذوب برف (مطالعه موردی: حوضه سد کرج). مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال ۷، شماره ۳، صفحه‌های ٤٠ تا ٥٢.

وظیفه دوست م، سمیع‌پور ف، اشرف زاده ا و موسوی سع، ۱۳۸۹. تعیین سهم رواناب ناشی از ذوب برف در آورد رودخانه پلرود، طرح تحقیقاتی شرکت آب منطقه‌ای گیلان، ۹۱ صفحه.

یعقوبی ف و بهره‌مند ع، ۱۳۹۰. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی- مکانی WetSpa در حوضه چهل‌چای در استان گلستان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۸جلد شماره ۳. صفحه‌های ۱۸۵ تا ۲۰۵.

Arora M, Kumar R, Kumar N and Malhotra J. 2016. Hydrological Modeling and Stream Flow Characterization of Gangotri glacier. Springer press.

Bahremand A, De Smedt F, Corluy J, Liu YB, Poorova J, Velcicka L and Kunikova E. 2007. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany-Hornad watershed, Slovakia. Water Resources Management 21: 1373-1391.

Bahremand A. 2006. Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Bales RC and Cline D, 2003. Snow hydrology and water resources (Western United Sates). Pp. 443-459. Potter T.D and Colman B.R. Handbook of Weather, Climate and Water: Dynamics, Climate, Physical Meteorology, Weather Systems, and Measurements. Wiley.

De Smedt F, Liu YB and Gebremeskel S. 2000. Hydrological Modeling on a Catchment Scale using GIS and Remote Sensed Land Use Information. Pp. 295-304. Brebbia C A (eds). Risk Analysis II. WTI press, Boston.

Gebremeskel S, Liu YB and De Smedt F. 2002. GIS based distributed modeling for flood estimation. Pp. 98-109. Proceedings of the Twenty-Second Annual American Geophysical Union Hydrology Days. 1-4 April, Colorado state university، USA.

Liu, YB. 2004. Development and Application of a GIS-based Hydrological Model for Flood Prediction and Watershed Management, PhD Thesis, Faculty of Engineering, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Morid S, Gosain AK and Keshari AK. 2004. Response of different snowmelt algorithms to synthesized climate data for runoff simulation. Journal of the Earth and Space Physics 1: 1-9.

Wang Z, 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.

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.

Zeinivand H and De Smedt F. 2009. Hydrological modeling of snow accumulation and melting on river basin scale. Water Resources Management 23(11): 2271-2287.