



شبیه‌سازی سطح پوشش برف و رواناب ناشی از ذوب آن در حوزه آبخیز هرو - دهنو در استان لرستان

حمید کریمی^۱، حسین زینی‌وند^۲، ناصر طهماسبی‌پور^۳، علی حق‌زاده^۳ و میرحسین میریعقوب‌زاده^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشگاه لرستان

۲- دانشیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه لرستان، (نویسنده مسئول: hzeinivand@gmail.com)

۳- استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه لرستان

۴- استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۲

چکیده

با توجه به اهمیت برف در بسیاری از مناطق، لازم است که رواناب حاصل از آن برای استفاده بهینه پیش‌بینی گردد. همچنین به علت ابرناکی مناطق برف‌گیر در فصل زمستان، اطلاع از سطح پوشیده از برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مشکل است، بنابراین جهت مدیریت بهتر منابع آب در مناطق کوهستانی، استفاده از روش‌های کمکی برای اطلاع از سطح پوشیده از برف ضروری می‌باشد. بدین منظور حوزه آبخیز هرو - دهنو در استان لرستان با مساحت ۲۶۳ کیلومترمربع به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. در این مطالعه، مدل هیدرولوژیکی WetSpa که از روش منطقی اصلاح‌شده مبتنی بر رطوبت خاک برای شبیه‌سازی رواناب و از روش درجه-روز برای شبیه‌سازی ذوب برف استفاده می‌کند، در حوزه آبخیز هرو - دهنو به‌کاربرده شد. مدل توزیعی مکانی فیزیکی WetSpa فرآیندهای مختلف هیدرولوژیکی از جمله شبیه‌سازی ذوب برف را به‌صورت سلولی و در گام زمانی ساعتی و روزانه با استفاده از روش درجه-روز و روش بیان انرژی انجام می‌دهد. در این تحقیق نتایج سطح پوشیده از برف با تصاویر ماهواره‌ای (MODIS) و جریان شبیه‌سازی‌شده به روش درجه-روز با مقادیر اندازه‌گیری شده در خروجی حوزه مقایسه گردید. جهت شبیه‌سازی با مدل WetSpa از داده‌های اقلیمی روزانه یک دوره آماری ۴ سال (۱۳۸۹_۱۳۸۵) شامل: بارش، دما، تبخیر، دبی و ۳ نقشه مرجع مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، بافت خاک و کاربری اراضی با دقت اندازه سلول ۱۰۰×۱۰۰ متری استفاده شد. با توجه به نتایج، معیار ارزیابی ناش-ساتکلیف برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۰۳۴ و ۰/۶۵۵ به دست آمد؛ بنابراین مدل WetSpa دارای قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی جریان رودخانه و رواناب ناشی از ذوب برف در گام زمانی روزانه می‌باشد. همچنین با مقایسه پوشش برف مستخرج از مدل با پوشش برف تصاویر ماهواره‌ای MODIS در دوره‌های زمانی یکسان مشخص شد که پوشش برف شبیه‌سازی‌شده با پوشش برف مشاهده‌ای تطابق خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: درجه - روز، سطح پوشش برف، هیدرولوژی برف، MODIS، WetSpa

مقدمه

سالانه به شکل برف بوده و نقش مؤثر جریان آب ناشی از ذوب برف در ایجاد رواناب اهمیت دارد (۶). شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب ناشی از ذوب برف در عرصه‌های مختلفی کاربرد داشته که ازجمله آن‌ها تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت، کنترل و هشدار سیل، تفرجگاه، مدیریت مخازن تولید برق و غیره را می‌توان نام برد. (۲۴). در هیدرولوژی کاربردی پیش‌بینی جریان اوج و شبیه‌سازی هیدرو گراف سیل در مسیل یا رودخانه یک فرآیند خیلی پیچیده است، زیرا نوسان متغیرهای هیدرولوژیکی در مکان و زمان به‌عنوان یک تابعی از ورودی‌های آب و هوایی، تغییرپذیری مکانی ناشی از توپوگرافی و کاربری اراضی و انواع خاک است (۱۱). تاکنون مدل‌های مختلفی جهت تعیین و برآورد ذوب برف ارائه شده است. به‌طور کلی مدل‌ها، روابط ساده‌شده‌ای از کل سیستم می‌باشند که بیانگر واقعیت‌های موجود در آن سیستم هستند. استفاده از مدل‌های مختلف، زمینه را برای تمهید اطلاعات و پیش‌بینی آینده فراهم می‌کند و به‌طور کلی هدف نهایی استفاده از مدل‌ها، تصمیم‌گیری صحیح و دقیق راجع به مسائل هیدرولوژی است (۱).

بیرویدان و همکاران (۲) به‌منظور تخمین رواناب حاصل از ذوب برف و بررسی دقت مدل‌های شبیه‌سازی، مدل SRM را

هیدرولوژی برف از شاخه‌های علم هیدرولوژی است. ریزش برف و انباشته شدن آن در حوزه‌های کوهستانی از منابع آبی بسیار مهم در این حوزه‌ها است. بر اساس بررسی‌های انجام‌گرفته حدود ۶۰ درصد آب‌های سطحی و ۵۷ درصد آب‌های زیرزمینی کشور در مناطق برف‌گیر قرار داشته و از آب حاصل از برف تغذیه می‌کنند (۱۸). همچنین برف شکلی از بارش است که به دلیل تأخیر زمانی بین زمان وقوع آن و زمان تولید رواناب و تغذیه سفره آب زیرزمینی، رفتار متفاوتی با دیگر شکل‌های بارش دارد (۱۹). علاوه بر این، با عنایت به درصد بالای میزان آلودگی برف نقش مهمی در بیان تابشی زمین بر عهده دارد (۴). پوشش برف یک پدیده مهم در هیدرولوژی است، ازاین‌رو مدل‌سازی انباشت و ذوب برف در مکان‌هایی که در آن ذوب برف نقش قابل‌توجهی در جریان رواناب و تعادل آب دارد، اهمیت دارد (۱۰). ذوب برف بستگی زیادی به خصوصیات برف هنگام ریزش، شرایط آب و هوایی به‌خصوص دمای هوا و بارش‌های گرم و همچنین شرایط جغرافیایی حوزه دارد. شبیه‌سازی ذوب برف برای دوره‌های زمانی مشخص در مناطق با درجه حرارت کمتر از دمای آستانه ذوب، به این دلیل که بخش زیادی از بارش

توزیع یافته مکانی WetSpa، برای پیش‌بینی رواناب و شبهه‌سازی انباشت و ذوب برف به روش درجه-روز (Degree - day) استفاده شد. علاوه بر این مدل قادر است پوشش برف را برای دوره شبهه‌سازی نیز پیش‌بینی کند. از آنجایی که طیف‌سنج تصویربرداری با قدرت تفکیک متوسط (MODIS) فرصت خوبی برای مطالعه توزیع برف به‌صورت روزانه فراهم می‌کند (۷). لذا از پوشش برف تصاویر ماهواره‌ای MODIS در روزهای فاقد ابر جهت مقایسه با پوشش برف مستخرج از مدل استفاده شد.

هدف اول از انجام این مطالعه شبهه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از مدل توزیعی مکانی WetSpa است. همچنین هدف دوم این مقاله مقایسه سطح برف شبهه‌سازی شده توسط مدل WetSpa با سطح برف تصاویر سنجنده MODIS است.

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز هرو - دهنو در استان لرستان قرار دارد. این حوزه یکی از سرشاخه‌های رودخانه کرخه است که آب آن به خلیج فارس می‌ریزد. حوزه هرو - دهنو حداقل ۲۲° ۳۳' الی ۳۲° ۳۳' عرض شمالی و ۴۱° ۴۸' الی ۵۹° ۴۸' طول شرقی قرار دارد. مساحت این حوزه تا محل قرارگیری ایستگاه هیدرومتری دهنو که خروجی حوزه است حدود ۲۶۳ کیلومترمربع است. حداکثر ارتفاع حوزه ۲۹۶۰ متر، حداقل ارتفاع حوزه ۱۷۵۷ متر (خروجی حوزه، ایستگاه هیدرومتری دهنو) و ارتفاع میانگین حوزه ۲۱۵۲ متر می‌باشد (۹). کلیه‌ای نقشه‌های مورد استفاده در این مطالعه منطبق بر یک سیستم سولوی ۱۰۰×۱۰۰ متری در نرم‌افزار ArcGIS است؛ بنابراین مدل ارتفاعی رقومی از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شد. نقشه کاربری اراضی شامل سه کاربری اراضی، جنگل مخلوط (۱۰۰/۲۸) کیلومترمربع برابر ۳۸/۰۶ درصد مساحت حوزه، مرتع (۱۴۳/۸۳) کیلومترمربع برابر ۵۴/۶ درصد مساحت حوزه) و پوشش گیاهی طبیعی (۱۹/۳۲) کیلومترمربع برابر ۷/۳۴ درصد مساحت حوزه) است. نقشه بافت خاک حوزه شامل ۴ نوع بافت خاک شنی لومی (۸۶/۹۳) کیلومترمربع برابر ۳۳ درصد مساحت حوزه)، شنی رسی لومی (۴/۲۱) کیلومترمربع برابر ۱/۶ درصد مساحت حوزه)، رسی لومی (۵۰) کیلومترمربع برابر ۱۹ درصد مساحت حوزه) و رسی (۱۲۲/۲۹) کیلومترمربع برابر ۴۶/۴ درصد مساحت حوزه) است. همچنین از داده‌های اقلیمی یک دوره آماری ۴ ساله (مهر ۱۳۸۵ تا شهریور ۱۳۸۹) شامل ۴ ایستگاه باران‌سنجی (هواشناسی دورود، هرو دهنو، چم‌چیت و تیره دو رود)، ۲ ایستگاه تبخیر سنجی (هواشناسی دورود و هرو دهنو)، ۱ ایستگاه دماسنجی (هرو - دهنو) و از داده‌های جریان ایستگاه هیدرومتری هرو - دهنو استفاده شد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی، توپوگرافی، ایستگاه‌های باران‌سنجی و شبکه آبراهه حوزه آبخیز مورد مطالعه در استان لرستان را نشان می‌دهد.

مدل مورد استفاده

WetSpa یک مدل پیوسته توزیعی هیدرولوژیکی -

در حوزه آبخیز زیارت به کار بردند. آنان میزان رواناب خالص ناشی از ذوب برف را برآورد کردند. همچنین از طریق آزمون (t) به مقایسه رواناب مشاهداتی حاصل از اندازه‌گیری مستقیم، با رواناب برآورد شده از مدل SRM پرداختند سپس نتیجه گرفتند بین ارقام دو روش اختلاف معنی‌داری وجود ندارد اما عواملی همانند شرایط فیزیکی حوزه، وجود اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژی همراه با دقت اولیه مدل، اهمیت دارد. وفاخواه (۲۵) باهدف شبهه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف به کمک شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و داده‌های اندازه‌گیری در حوزه آبخیز طالقان، نتیجه گرفت که شبکه عصبی مصنوعی و نیرو فازی هر دو دارای کارایی بالایی در پیش‌بینی جریان بوده و دخالت دادن ارتفاع آب معادل برف باعث افزایش کارایی ساختار شبکه می‌شود. شن‌سوی و اوی زال (۲۶) به‌منظور ارزیابی روش‌های پیش‌بینی سطح پوشش برف با استفاده از داده‌های MODIS^۱ و استخراج منحنی تخلیه برف (SDC)^۲ برای هر ارتفاعی و اصلاح پیش‌بینی تخلیه در یک روز جلوتر به‌صورت روزانه با استفاده از سطوح پوشیده از برف و پیش‌بینی عددی داده‌های آب‌وهوا (NWP)^۳ به‌طور خاص برای حوزه آبخیز بالادست رودخانه فرات در کشور ترکیه نتیجه گرفتند که به‌طور کلی کاربرد مدل نتایج امیدوارکننده‌ای برای پیش‌بینی سطح پوشش برف و رواناب با کارایی به ترتیب بالاتر از ۰/۶ و ۰/۸۵ ارائه می‌دهد. زینی‌وند و دست (۳۲ و ۳۰) از طریق روش بیان انرژی با استفاده از مدل توزیعی مکانی با پایه فیزیکی (WetSpa) به شبهه‌سازی سطح پوشش برف و پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف در حوزه آبخیز سد لتیان پرداختند. نتایج نشان داد که سطح پوشش برف شبهه‌سازی شده با سطح پوشش برف سنجنده MODIS تطابق خوبی دارد. همچنین با مقایسه هیدروگراف‌های شبهه‌سازی شده و مشاهداتی با دقت ۸۷ درصد در شبهه‌سازی بر اساس معیار ارزیابی ناش - ساتکلیف نتیجه گرفتند تطابق بسیار خوبی بین داده‌های شبهه‌سازی مدل و مشاهداتی وجود دارد. میرجعفری (۱۴) با شبهه‌سازی سطح پوشیده از برف و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن با مدل پویا و قطعی WetSpa در حوزه آبخیز قره‌سو (اردبیل) از دو روش شاخص دما و تعادل انرژی در شبهه‌سازی ذوب برف استفاده کرد و نتیجه گرفت که روش تعادل انرژی در شبهه‌سازی هیدرولوژیکی حوزه برف‌گیر رودخانه قره‌سو نتایج بهتری را نشان می‌دهد. همچنین در مقایسه بین نتایج شبهه‌سازی سطح پوشیده از برف با دو روش شاخص دما و تعادل انرژی با تصاویر ماهواره‌ای MODIS نشان داد که انطباق خوبی بین این تصاویر، به‌ویژه در روش تعادل انرژی وجود دارد. رحمان و همکاران (۲۲) به‌منظور شبهه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف و روند ذوب شدن یخچال‌های طبیعی از مدل SWAT در حوزه آبخیز بالادست رود رون^۴ در سوئیس استفاده کردند. آنان نشان دادند عملکرد مدل هم از نظر بصری و هم از نظر آماری رابطه خوبی بین جریان مشاهداتی و شبهه‌سازی شده دارد.

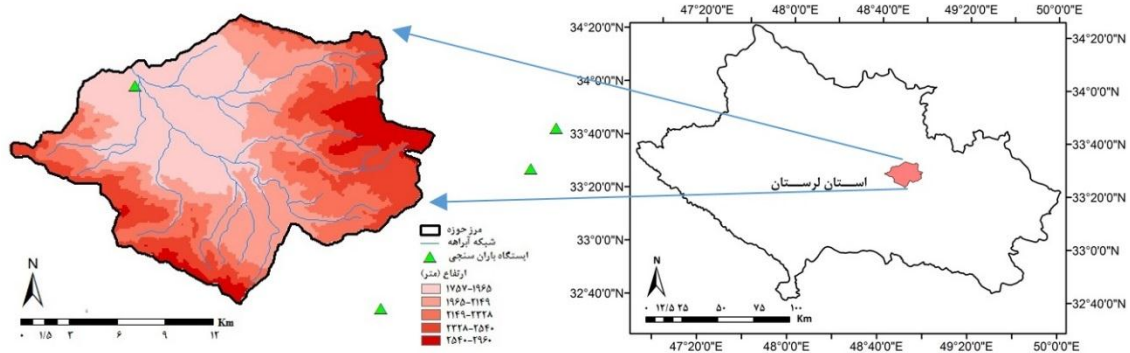
در این مقاله جهت شبهه‌سازی رواناب، بر ریزش باران و ذوب برف تأکید شده است. در این راستا از مدل هیدرولوژیکی

1- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
3- Numerical Weather Prediction

2- Snow Depletion Curve
4- Rhone River

زون گیاه، زون ریشه، زون انتقال (سطح خاک) و زون اشباع در نظر گرفته شده است.

فیزیکی برای انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و جو است که در اصل توسط وانگ و همکاران توسعه یافته است (۲۷). برای هر سلول شبکه، چهار لایه در جهت عمودی در



شکل ۱- مدل ارتفاعی رقومی، موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و شبکه آبراهه همراه با موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Geographic location of Horo-Dehno watershed, showing watershed stream network, digital elevation model (DEM) and location of precipitation stations

ادامه روش درجه - روز در مدل WetSpa تشریح می‌گردد. شاخص مفهومی دما یا همان درجه - روز، یک رویکرد فیزیکی در شرایط عدم دسترسی به داده‌های تابش است (۱۲). هنگامی که درجه حرارت هوا زیر دمای پایه ذوب برف T_0 است، بارش و تجمع برف در تاج پوشش بوته گیاهان و در سطح خاک صورت می‌گیرد. برف انباشته شده زمانی که درجه حرارت از دمای T_0 بالاتر رود شروع به ذوب شدن می‌کند. علاوه بر این، ذوب برف در اثر حرارت منتقل شده از باران به برف در نظر گرفته شده است. در مدل، حجم آب حاصل از ذوب برف هنگامی که به سطح خاک می‌رسد به بارش خالص اضافه می‌شود. آب حاصل از ذوب نهایی برف به این صورت محاسبه می‌شود (۳۰):

$$M = \text{Max} [0, (k_{\text{snow}} + k_{\text{rain}} P)(T_a - T_0)] \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

شرایط و ویژگی‌های برف متغیر است. با این حال می‌توان K_{snow} ، T_0 و K_{rain} را واسنجی کرد. دما و پوشش برف در اغلب موارد در یک حوزه کوهستانی متفاوت است و در بسیاری از موارد اطلاعات کامل اقلیمی از مناطق کوهستانی در دسترس نیست. برای منظور کردن تغییرات زیاد درجه حرارت به ازای ارتفاع، گزینه‌ای برای تطبیق سری مرجع برای هر سلول شبکه‌ای به وسیله اصلاح گرادیان در مدل به قرار زیر وجود دارد.

$$MV_i = MV_{\text{ref}} + \beta_s (H_i - H_{\text{ref}}) \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

مرجع (میلی متر بر روز)، H_i و H_{ref} ارتفاع در سلول i و ایستگاه مرجع و β_s متغیر گرادیان آب و هوایی است (۳۰).

فرآیندهای هیدرولوژیکی در نظر گرفته شده در مدل شامل بارش، برگاب، اختلاف تراز، رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر و تعرق، تراوش، رواناب تأخیری، جریان زیرزمینی و بیلان آب در زون ریشه و زون اشباع است. بیلان کلی آب برای سلول رستری، مرکب از بیلان آب برای گیاه، خاک لخت و قسمت‌های غیر قابل نفوذ هر سلول است (۱۱). در مدل WetSpa جهت شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف، دو روش شامل روش انرژی بالانس و روش درجه - روز وجود دارد؛ که در این مطالعه به علت کمبود داده‌های ورودی از به کار بردن روش بیلان انرژی صرف نظر گردید و روش درجه - روز استفاده شد. شبیه‌سازی ذوب برف بر اساس روش درجه - روز با استفاده از داده‌های دمای روزانه صورت می‌گیرد. در

که در آن، M : میزان آب حاصل از ذوب روزانه برف در سلول i (میلی متر در روز)، T_a : میانگین درجه حرارت روزانه هوای سلول i (درجه سانتی‌گراد)، T_0 : دمای پایه ذوب برف یا دمای آستانه ذوب برف (درجه سانتی‌گراد)، K_{snow} : فاکتور میزان ذوب برف (ذوب روزانه بر درجه سانتی‌گراد) و K_{rain} : ضریب درجه - روز ناشی از حرارت منتقل شده از بارش باران (روز در درجه سانتی‌گراد) است. درجه حرارت بحرانی T_0 اغلب به طور مستقیم با ۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌شود. فاکتور میزان ذوب برف K_{snow} پارامتر مؤثری است و با

که در آن، MV_i : متغیر آب و هوایی در سلول i (میلی متر بر روز)، MV_{ref} : متغیر آب و هوایی در ایستگاه آب و هوایی

درجه روز - دما (K_{snow})، ضریب درجه روز - باران (K_{rain})، مؤلفه رواناب سطحی برای شدت بارندگی نزدیک صفر (K_{run})، حداکثر شدت بارش (P_{max})، فاکتور تصحیح برای تبخیر و تعرق پتانسیل (K_{ep})، مقدار رطوبت نسبی اولیه (K_{ss})، بیش‌ترین ذخیره آب زیرزمینی (G_{max})، دمای پایه ذوب برف (T_0) است.

معیارهای ارزیابی دقت مدل WetSpa

برای ارزیابی نتایج آماری خروجی از این مدل علاوه بر معیار کیفی مشاهده تطابق هیدروگراف‌ها معیارهای آماری زیر نیز مورد استفاده قرار گرفت.

انحراف مدل (MB)^۱: اختلاف میانگین نسبی بین دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مقادیر کوچک MB نمایان‌گر نتایج مطلوب مدل‌سازی است. مقدار ایده‌آل این معیار (رابطه ۳) صفر است.

کارایی معیار ناش و ساتکلیف (NSE^2): یک ضریب بی‌بعد به صورت رابطه (۴) است. این معیار نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی بوده و شامل استاندارد واریانس باقی‌مانده‌ها می‌شود. معیار NSE از مقادیر منفی بی‌نهایت تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر شود نشان‌دهنده تناسب بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشد. معیار ناش - ساتکلیف برای جریان‌های کم (NSL^3): این معیار (رابطه ۵) لگاریتم ناش - ساتکلیف است که برای جریان‌های کم مناسب است. درواقع با این معیار کیفیت شبیه‌سازی جریان‌های کم ارزیابی می‌گردد و بهترین آن یک است. معیار ناش - ساتکلیف برای جریان‌های زیاد (NSH^4): این معیار (رابطه ۶) نیز همان ناش - ساتکلیف است که برای جریان‌های زیاد مناسب است. در این رابطه وزن بیش‌تری به جریان‌های زیاد اختصاص یافته است. بهترین آن یک است ($RMSE^5$): معیار ریشه میانگین مربعات خطا این معیار (رابطه ۶) همواره مثبت بوده و بهترین مقدار آن صفر است؛ که نشان‌دهنده عملکرد مدل است.

ورودی‌ها، پارامترها و نحوه اجرای مدل WetSpa

تهیه یک پایگاه داده جامع برای اجرای مدل WetSpa در یک آبخیز خاص به معنی تعیین کامل ساختار زهکشی آبخیز، توزیع مکانی کلاس‌های کاربری اراضی، نوع خاک و مجموعه داده‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد نیاز پروژه می‌باشد (۱۶). ورودی‌های مدل WetSpa شامل دو نوع داده، نقشه‌های پایه به صورت رستری و در قالب اسکی فایل، همچنین داده‌های اقلیمی شامل بارش، دما، تبخیر و جریان است. پس از آماده کردن سه نقشه پایه، مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، نقشه بافت خاک و نقشه کاربری اراضی در نرم‌افزار ArcGIS 10، نقشه‌ها به نرم‌افزار 3.2 ArcView منتقل می‌شود و سایر نقشه‌های پارامترهای رقومی - هیدرولوژیکی بر اساس این سه نقشه پایه و جدول‌های ویژه مورد استفاده مدل WetSpa، ساخته می‌شود. درمجموع ۳۰ نقشه برای اجرای مدل WetSpa مورد نیاز می‌باشد که همگی آن‌ها بر اساس سه نقشه پایه در نرم‌افزار ArcView ساخته می‌شوند. پس از تهیه سه نقشه پایه و تولید نقشه‌های توزیعی و آماده‌سازی اطلاعات هواشناسی و پارامترهای عمومی مدل، زمینه برای اجرای اولیه مدل فراهم می‌شود.

پارامترهای مدل WetSpa

در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف با مدل WetSpa جهت واسنجی (Calibration) دقیق، ۱۱ پارامتر قراردادی در نظر گرفته شده است. پارامترهای مذکور فیزیکی بوده و در کنترل رواناب هیدروگراف خروجی نقش مهمی دارند؛ اما تعیین نمودن آن‌ها در مقیاس شبکه سلولی مشکل می‌باشد، بنابراین برای کسب نتایج بهتر واسنجی این پارامترها در مقابل داده‌های رواناب مشاهده‌ای ترجیح داده می‌شود (۶). پارامترهای عمومی مدل در بخش شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف عبارت‌اند از: فاکتور مقیاس برای محاسبات جریان زیرسطحی (K_i)، ضریب افت آب‌های زیرزمینی (K_g)، ذخیره اولیه آب‌های زیرزمینی (G_0)، ضریب

$$MB = \frac{\sum_{i=1}^n (Qs_i - Qo_i)}{\sum_{i=1}^n Qo_i} \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qo_i - \overline{Qo})^2} \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

$$NSL = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\ln(Qs_i + \varepsilon) - \ln(Qo_i + \varepsilon)]^2}{\sum_{i=1}^n [\ln(Qo_i + \varepsilon) - \ln(\overline{Qo} + \varepsilon)]^2} \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qo_i + \overline{Qo})(Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qo_i + \overline{Qo})(Qo_i - \overline{Qo})^2} \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

1- Model bias

2- Nash Sutcliffe Efficiency

3- Nash Sutcliffe coefficient for low flow

4- Nash Sutcliffe coefficient for high flow

5- Root Mean Square Error

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_i)^2}{n}}$$

رابطه‌ی (۷)

مکانی، توانائی تشخیص ابر/ برف و پوشش سراسری MODIS است (۳ و ۵). با به‌کارگیری تصاویر پردازش‌شده مورد اشاره، دیگر نیازی به اعمال تصحیحات رایج جهت بارزسازی برف از ابر (شاخص NDSI) در تصاویر سنجنده MODIS نخواهد بود.

در این مطالعه تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر سنجنده MODIS (MOD10A1) استفاده شد. دلیل استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر در این تحقیق جهت محاسبه سطح پوشیده از برف، این است که باندهای مادون قرمز و مادون قرمز میانی که برای تشخیص برف به کار می‌رود در محدوده قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر قرار می‌گیرند. تصاویر انتخاب‌شده متعلق به ۳ مقطع زمانی قبل از ذوب برف، در حین ذوب برف و بعد از ذوب برف می‌باشند.

نتایج و بحث

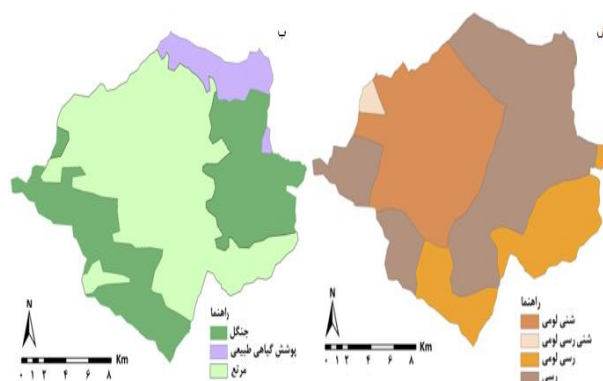
نقشه‌های مورد استفاده در مدل WetSpa

سه نقشه پایه مورد نیاز مدل که قبلاً مورد اشاره قرار گرفت در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. در مدل WetSpa، کلیه مؤلفه‌های بیلان آبی و عوامل هیدرولوژیک مدل به صورت توزیعی - مکانی بوده و به صورت نقشه قابل ارائه می‌باشند (۱۳). علاوه بر نقشه‌های بالا ۲۷ نقشه دیگر نیز در مدل WetSpa ساخته شد که به علت محدودیت تعداد صفحات از نشان دادن آن‌ها صرف نظر گردید. همچنین در این مطالعه مدل WetSpa در نرم افزار ArcView جهت شبیه‌سازی در سطح حوزه، حوزه آبخیز را به ۱۳۵ زیر حوزه تقسیم می‌کند که در شکل (۳) نشان داده شده است.

که در این روابط Q_{Si} دبی شبیه‌سازی‌شده، Q_{Oi} دبی مشاهداتی در گام زمانی i (مترمکعب بر ثانیه)، $\overline{Q_o}$ نشان‌دهنده میانگین جریان مشاهداتی، N تعداد گام‌های زمانی است. ε مقدار قراردادی جزئی جهت اجتناب از مقدار صفر در مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، Q_o دبی اندازه‌گیری شده (مترمکعب بر ثانیه) و Q_i دبی محاسبه‌شده است.

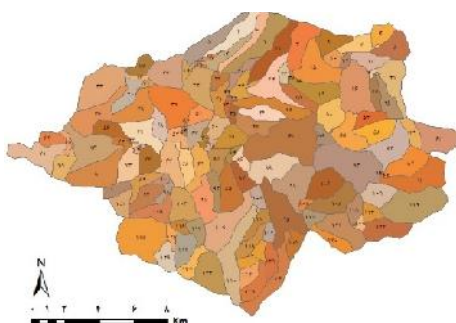
تصاویر ماهواره‌ای

در این مطالعه جهت مقایسه و راستی آزمایی مدل در بخش پیش‌بینی پوشش برف، از تصاویر پردازش‌شده (Product Images) سنجنده MODIS (MODIS/Terra) (Snow Cover Daily L3 Global 500 m SIN Grid) که از طریق پایگاه اینترنتی (<http://reverb.echo.nasa.gov>) سازمان ناسا ایالات متحده آمریکا در دسترس می‌باشد، استفاده شد. سنجنده MODIS یکی از تجهیزات کلیدی در ماهواره ترا و آکوا^۲ محسوب می‌شود. مسیر حرکت ماهواره ترا از شمال به سمت جنوب بوده و به گونه‌ای که هر روز صبح از خط استوا عبور می‌کند درحالی‌که ماهواره آکوا از جنوب به سمت شمال حرکت کرده به گونه‌ای که هر روز عصر از استوا می‌گذرد. ماهواره ترا در تاریخ ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ماهواره آکوا در چهارم می ۲۰۰۲ میلادی به فضا پرتاب شد (۴). سنجنده MODIS دارای ۳۶ باند در محدوده طیفی ۰/۴۱ تا ۱۴/۵ میکرومتر بوده و قدرت تفکیک آن در زاویه عمود به سطح زمین ۲۵۰ متر در ۲ باند (باندهای ۱ و ۲)، ۵۰۰ متر در ۵ باند (باندهای ۳ تا ۷) و ۱۰۰۰ متر در ۲۹ باند (باندهای ۸ تا ۳۶) طیفی است (۱۵ و ۲۰). تصاویر پوشش برف MODIS یکی از محصولات ژئوفیزیکی به دست آمده از MODIS هستند؛ که از مزایای محصول این سنجنده، بهتر شدن قدرت تفکیک



شکل ۲- الف: نقشه بافت خاک حوزه آبخیز هرو - دهنو، ب: نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز هرو- دهنو

Figure 2. Soil map (a) and Landuse map of the Horo-Dehno watershed



شکل ۳- تقسیم حوزه آبخیز هرو - دهنو به ۱۳۵ زیر حوزه در نرم‌افزار ArcView جهت استفاده در مدل WetSpa
Figure 3. Division of Horo-Dehno watershed to 135 sub-watersheds in ArcView software for the use in the WetSpa model

WetSpa ابتدا جهت مشخص‌شدن مقادیر اولیه پارامترها واسنجی دستی انجام می‌شود، سپس پارامترهای نزدیک به پارامترهای بهینه در واسنجی خودکار شناسایی شده و شبهه‌سازی مطلوب به صورت یک فرآیند مکرر با اجرا کردن بسته نرم‌افزاری مدل و بر اساس بالاترین مقدار معیار ارزیابی ناش - ساتکلیف به انجام می‌رسد. جدول (۲) مقادیر اولیه پارامترها را همراه با مقادیر واسنجی شده نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۳) نتایج حاصل از آنالیز حساسیت پارامترهای مدل که با استفاده از PEST (مدل مستقل برآورد پارامترها)، به دست آمده، ارائه شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، پارامتر K_{ss} (فاکتور مقدار رطوبت نسبی اولیه) بیش‌ترین حساسیت و پارامتر K_{rain} (ضریب درجه-روز باران) کم‌ترین حساسیت را دارا است.

شبهه‌سازی سطح پوشش از برف

یکی از مشکلات مطالعه پوشش برف توسط تصاویر ماهواره‌ای ابرناکی بسیار زیاد روزهای برفی است. در تحقیقات مختلف با اعمال شاخص‌های جداسازی پوشش برف از ابر اقدام به حل این مشکل می‌کنند. مدل WetSpa نیز با شبهه‌سازی پوشش برف می‌تواند به عنوان یکی از منابع پوشش برف برای مطالعات هیدرولوژی برف استفاده شود. در شکل ۸، سه تصویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS که حداقل ابرناکی را داشتند با پوشش برف شبهه‌سازی شده توسط مدل WetSpa مقایسه شده است.

شبهه‌سازی، واسنجی و اعتبارسنجی مدل WetSpa

شبهه‌سازی فرآیند محاسبه جریان بر اساس پارامترهای مدل به گونه‌ای که با جریان مشاهده‌ای مطابقت و رفتارهای هیدرولوژیکی را تقلید نماید، نامیده می‌شود (۱۵). پس از اجرای مدل اقدام به شبهه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوزه در یک دوره ۴ ساله (به صورت سال آبی) شد. در فرآیند واسنجی که پس از شبهه‌سازی مدل انجام می‌شود، مقادیر پارامترهای مدل به اندازه‌ای تغییر می‌یابند که هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی بهترین برازش را ایجاد کنند. در این مطالعه داده‌های سه سال (۱۳۸۵/۰۷/۰۱ تا ۱۳۸۸/۰۶/۳۱) برای دوره واسنجی و داده‌های سال چهارم (۱۳۸۸/۰۷/۰۱ تا ۱۳۸۹/۰۶/۳۱) برای دوره اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. جدول (۱) نتایج شبهه‌سازی دوره واسنجی و اعتبارسنجی بر اساس معیار ارزیابی ناش - ساتکلیف و ناش - ساتکلیف برای جریان‌های بالا و کم را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۴)، (۵)، (۶) و (۷) مقادیر جریان روزانه شبهه‌سازی شده به صورت گرافیکی، توسط مدل WetSpa در مقایسه با مقادیر جریان مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری هرو - دهنو در طی ۴ سال را نشان می‌دهد. به علت تأکید این مطالعه بر شبهه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف از ارائه کل دوره آماری مورد مطالعه به صورت نمودار صرف نظر گردید.

پارامترهای بهینه‌شده

در این مطالعه واسنجی مدل در دو مرحله واسنجی دستی و واسنجی خودکار با کمک نرم‌افزار PEST انجام شد. در مدل

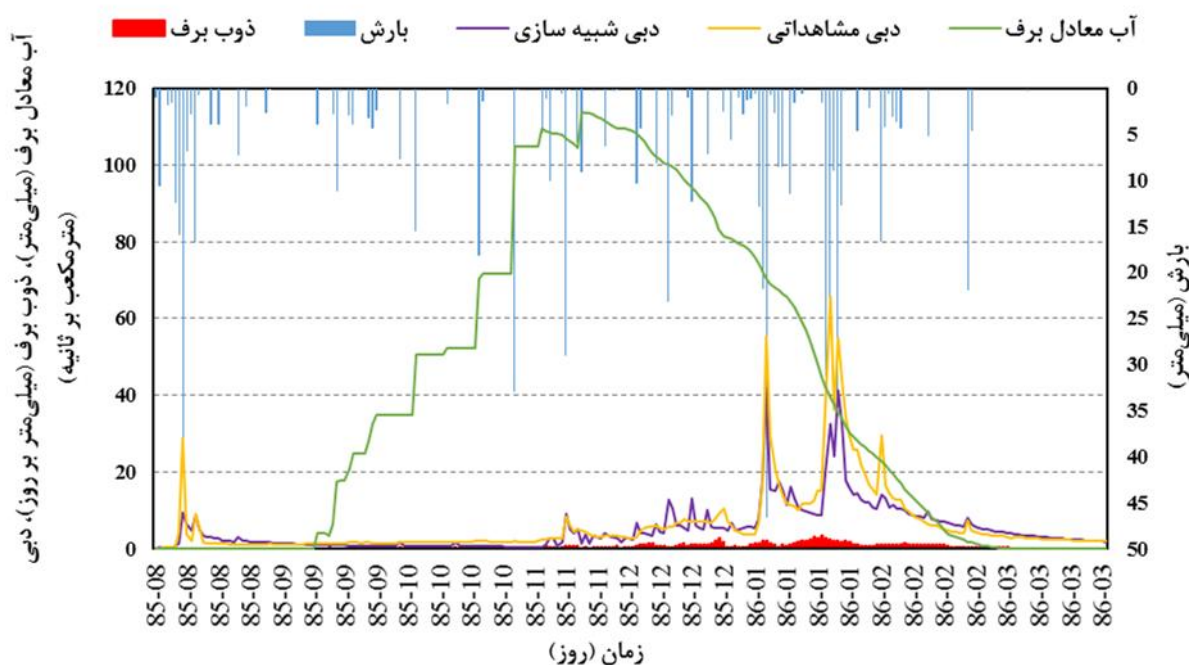
جدول ۱- شاخص‌های ارزیابی مدل WetSpa در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای شبهه‌سازی جریان
Table 1. Evaluation criteria for the assessment of model performance

معیار ارزیابی	واسنجی	اعتبارسنجی
انحراف مدل (Bias)	-۰/۱۴۶۶	۰/۲۰۶۴
ناش - ساتکلیف (NSE)	۰/۷۰۳۴	۰/۶۵۵
ناش - ساتکلیف برای جریان‌های کم (NSL)	۰/۶۱۱۲	۰/۷۹۰۳
ناش - ساتکلیف برای جریان‌های زیاد (NSH)	۰/۷۳۹۸	۰/۷۱۱۲
ریشه میانگین مربعات خطا	۱/۲۲	۰/۷۷

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی شده و آنالیز حساسیت مدل برای شبیه‌سازی جریان در حوزه آبخیز هرو - دهنو

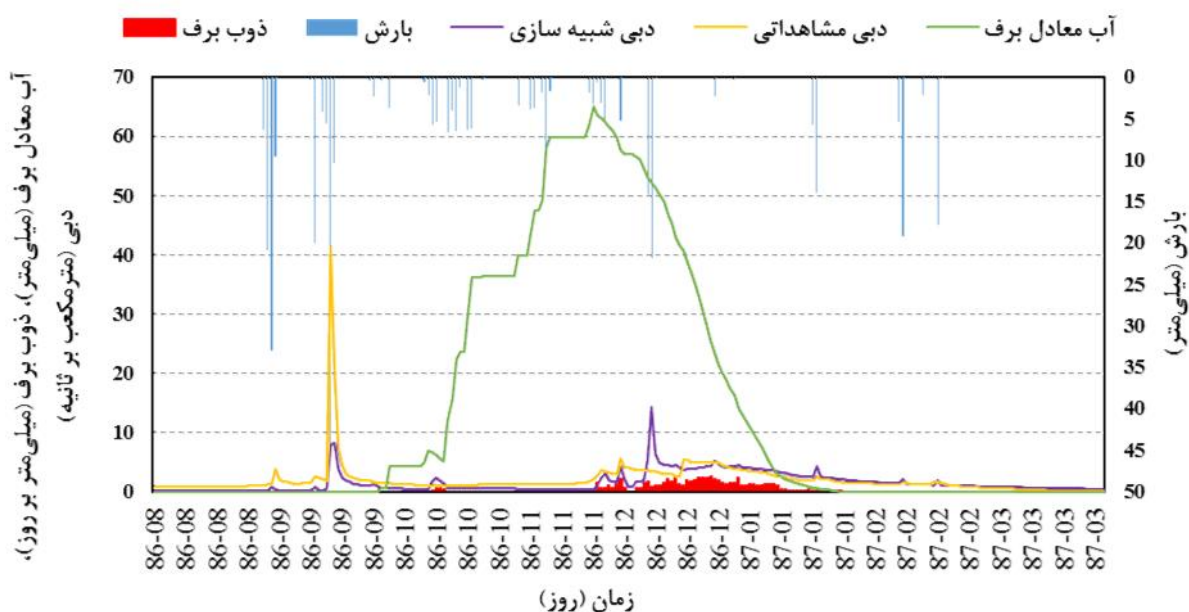
Table 2. Optimal Values of Calibrated Parameters and Model Sensitivity Analysis for Flow Simulation in Hero-Dehnow Basin

پارامتر	مشخصه	پارامترهای اولیه	بعد از واسنجی	حساسیت نسبی پارامتر	رتبه پارامتر
Ki	محاسبات جریان زیرسطحی	۱/۳	۲/۰۹۶	۰/۱۰۹۲۸۳	۳
Kg	ضریب افت آب‌های زیرزمینی	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۱۸۹	۰/۰۱۷۰۸۶۱۷	۷
Kss	مقدار رطوبت نسبی اولیه	۰/۹	۰/۷۲۸	۰/۴۵۳۳۱۵	۱
Kep	تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل	۰/۳	۰/۳۵	۰/۱۴۴۰۶	۲
G0	ذخیره اولیه آب‌های زیرزمینی	۳۵	۲۵/۰۲۳	۰/۰۱۱۸۴۳۱	۹
Gmax	بیش‌ترین ذخیره آب زیرزمینی	۱۳۰۰	۳۹۰/۹۷	۰/۰۲۰۰۶۸۰۳	۶
T0	دمای پایه ذوب برف	۰/۵	۰/۶	۰/۰۱۰۹۰۹۴۴	۱۰
Ksnow	ضریب درجه-روز دما	۱	۰/۲۴۹	۰/۱۰۳۷۱۵	۴
Krain	ضریب درجه - روز باران	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۰۰۵۴	۱۱
Krun	مؤلفه رواناب سطحی	۶/۹	۷/۴	۰/۰۸۷۶۱۶۳۳	۵
Pmax	شدت بارندگی	۵۰۰	۳۵۱	۰/۰۱۵۹۶۶۱۴	۸



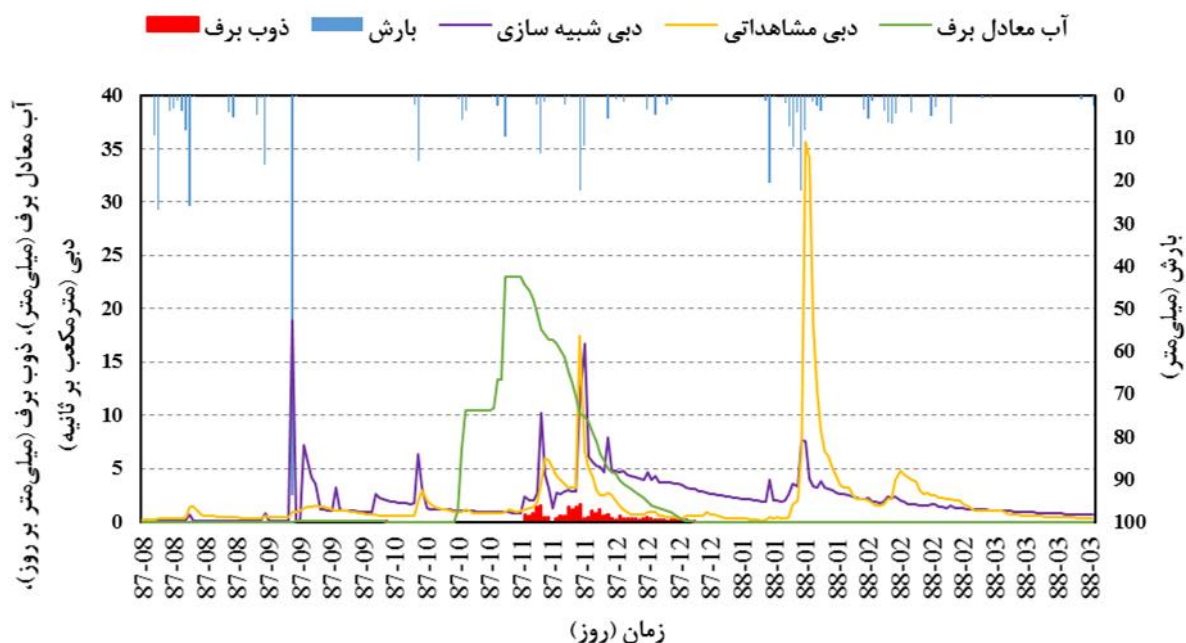
شکل ۴- متوسط بارش روزانه، دما، متوسط روزانه آب معادل برف شبیه‌سازی شده، ذوب برف شبیه‌سازی شده همراه با هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده جریان از تاریخ ۱۳۸۵/۰۸/۰۱ تا تاریخ ۱۳۸۶/۰۳/۳۱ در ایستگاه هیدرومتری هرو - دهنو

Figure 4. Graphical comparison between observed and calculated daily flow, using WetSpa model at Hero-Dehno between 23/10/2006 and 21/06/2007 as calibration period and daily precipitation, temperature, calculation of cumulative snow water equivalent, and snowmelt using degree-day method



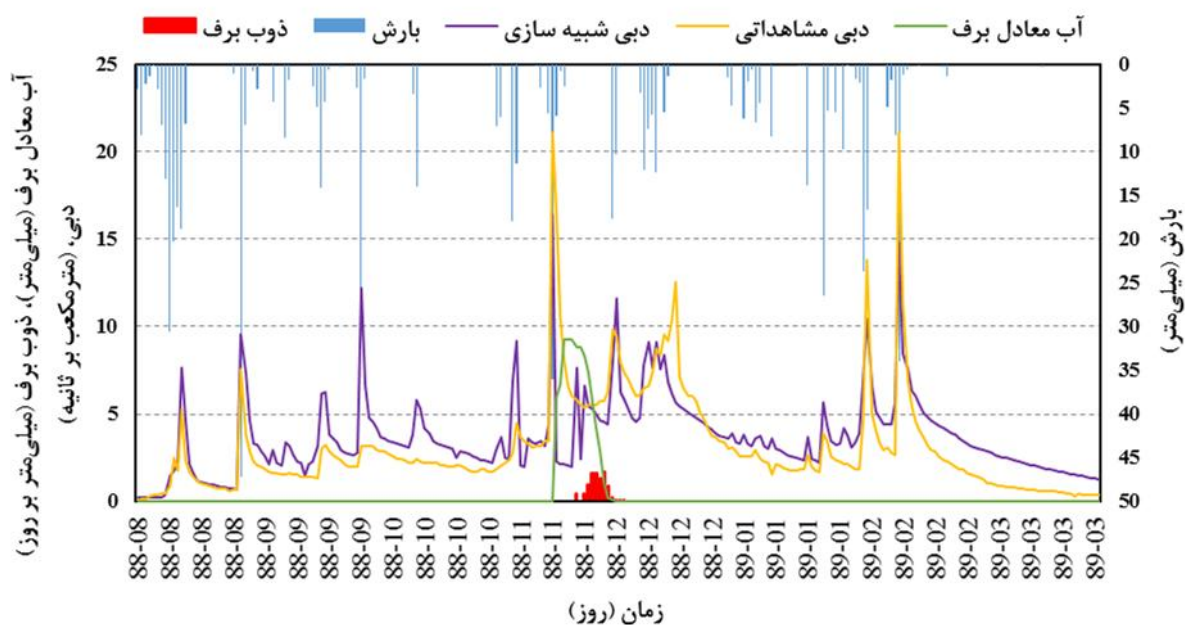
شکل ۵ - متوسط بارش روزانه، دما، متوسط روزانه آب معادل برف شبه‌سازی شده، ذوب برف شبه‌سازی شده همراه با هیدروگراف مشاهده‌ای و شبه‌سازی شده جریان از تاریخ ۱۳۸۶/۰۸/۰۱ تا تاریخ ۱۳۸۷/۰۳/۳۱ در ایستگاه هیدرومتری هرو - دهنو

Figure 5. Graphical comparison between observed and calculated daily flow, using WetSpa model at Horo-Dehno between 23/10/2007 and 20/06/2008 as calibration period and daily precipitation, temperature, calculation of cumulative snow water equivalent, and snowmelt using degree-day method.



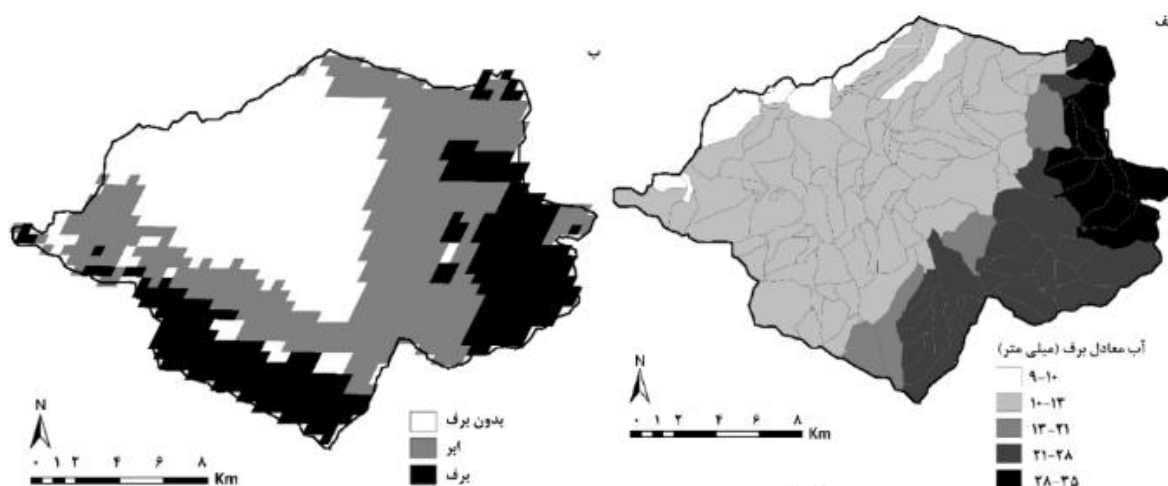
شکل ۶ - متوسط بارش روزانه، دما، متوسط روزانه آب معادل برف شبه‌سازی شده، ذوب برف شبه‌سازی شده همراه با هیدروگراف مشاهده‌ای و شبه‌سازی شده جریان از تاریخ ۱۳۸۷/۰۸/۰۱ تا تاریخ ۱۳۸۸/۰۳/۳۱ در ایستگاه هیدرومتری هرو - دهنو

Figure 6. Graphical comparison between observed and calculated daily flow, using WetSpa model at Horo-Dehno between 22/10/2008 and 21/06/2009 as calibration period and daily precipitation, temperature, calculation of cumulative snow water equivalent, and snowmelt using degree-day method.



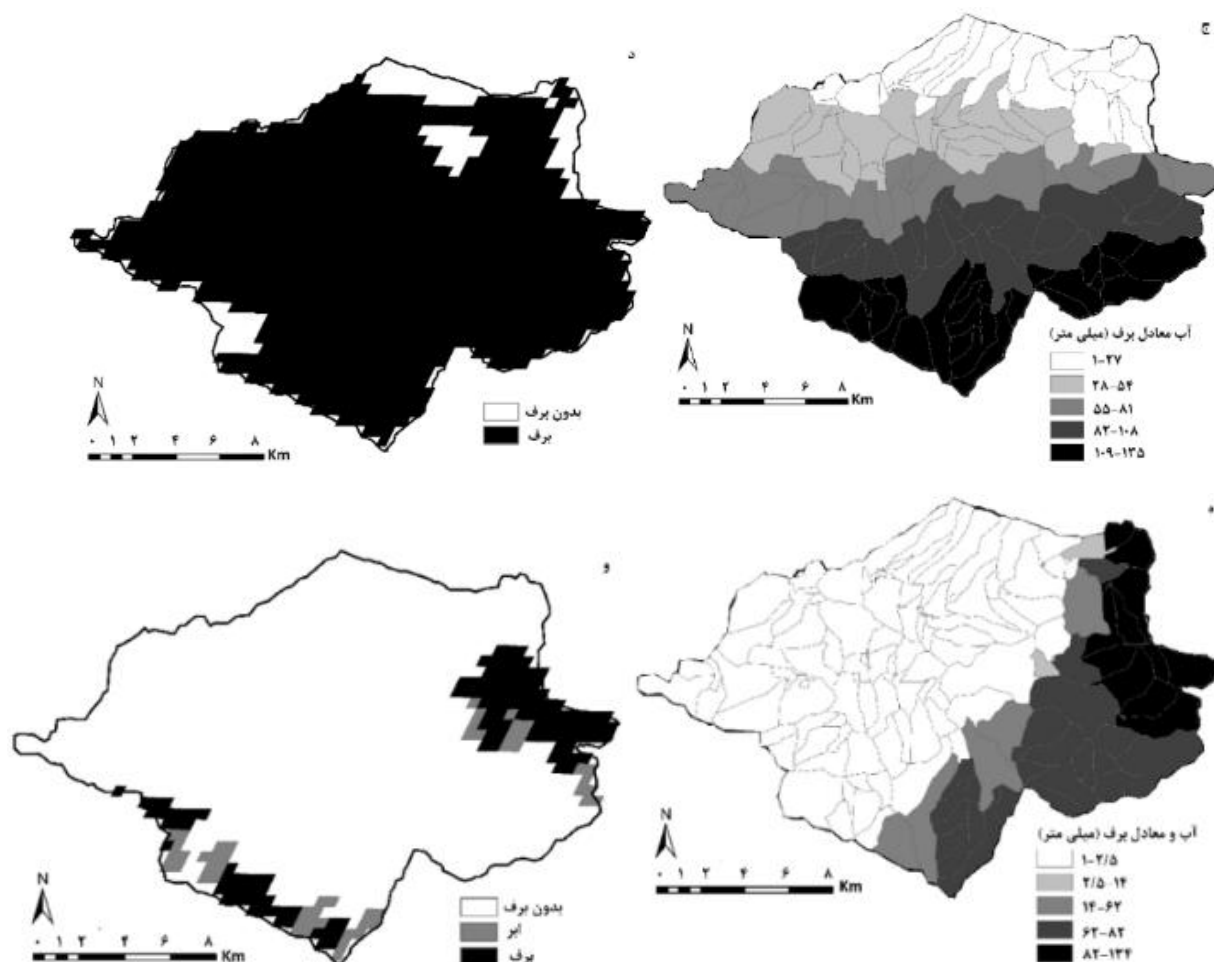
شکل ۷ - متوسط بارش روزانه، دما، متوسط روزانه آب معادل برف شبیه سازی شده، ذوب برف شبیه سازی شده همراه با هیدروگراف مشاهده ای و شبیه سازی شده جریان از تاریخ ۱۳۸۸/۰۸/۰۱ تا تاریخ ۱۳۸۹/۰۳/۳۱ در ایستگاه هیدرومتری هرو دهنو

Figure 7. Graphical comparison between observed and calculated daily flow, using WetSpa model at Horo-Dehno between 23/10/2009 and 21/06/2010 as validation period and daily precipitation, temperature, calculation of cumulative snow water equivalent, and snowmelt using degree-day method



شکل ۸- پوشش برف شبیه سازی شده به وسیله مدل WetSpa در سمت راست (الف، ج، ه) به ترتیب در تاریخ های ۱۳۸۷/۱۱/۱۷، ۱۳۸۶/۰۱/۲۷، ۱۳۸۷/۱۰/۲۵ و پوشش برف تصاویر MODIS در سمت چپ (ب، د، و) در همان تاریخ ها

Figure 8. MODIS SCA output (left) and the correspondent modelled SCA and snow water equivalent SWE simulation (right); MODIS SCA output for the Horo-Dehno watershed for 05/02/2009 (a1), 14/01/2009 (b1), 16/04/2007 (c) and modelled SCA and SWE simulation for the Horo-Dehno watershed for 05/02/2009 (a2), 14/01/2009 (b2) and 16/04/2007 (c3)



ادامه شکل ۸- پوشش برف شبهه‌سازی شده به وسیله مدل WetSpa در سمت راست (الف، ج، ه) به ترتیب در تاریخ‌های ۱۳۸۷/۱۱/۱۷، ۱۳۸۷/۱۰/۲۵، ۱۳۸۶/۰۱/۲۷ و پوشش برف تصاویر MODIS در سمت چپ (ب، د، و) در همان تاریخ‌ها

Continue Figur 8. MODIS SCA output (left) and the correspondent modelled SCA and snow water equivalent SWE simulation (right); MODIS SCA output for the Horo-Dehno watershed for 05/02/2009 (a1), 14/01/2009 (b1), 16/04/2007 (c) and modelled SCA and SWE simulation for the Horo-Dehno watershed for 05/02/2009 (a2), 14/01/2009 (b2) and 16/04/2007 (c3)

وجود سه پارامتر مؤثر در برآورد ذوب برف در فرآیند واسنجی پارامترهای مدل، شبهه‌سازی دقیق‌تری از میزان جریان رواناب سطحی را به دست می‌دهد (۱۷). شکل ۴ و ۷ نشان می‌دهد، تطابق خوبی بین نتایج شبهه‌سازی و مشاهداتی در حوزه آبخیز هرو - دهنو وجود دارد. همچنین با مقایسه‌ی چشمی بین پوشش برفی پیش‌بینی‌شده با مدل WetSpa و تصاویر سنجنده MODIS در دوره زمانی یکسان (شکل ۸) مشخص شد که پوشش برف شبهه‌سازی شده با پوشش برف مشاهده‌ای تطابق خوبی دارد. نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های زینی وند و دسمت (۲۹، ۳۱) هم‌خوانی دارد.

تولید رواناب بستگی به شدت باران، وضعیت رطوبت خاک و ذوب برف دارد. در این مطالعه تجمع و ذوب برف توسط یک روش درجه - روز شبهه‌سازی شده است. همین مسئله مشخص می‌کند که هرگونه نقص در سیستم اندازه‌گیری درجه حرارت روزانه هوا می‌تواند در شبهه‌سازی مدل تأثیرگذار

با توجه به نتایج حاصل از کاربرد مدل WetSpa (جدول ۱)، معیار ارزیابی ناشی - ساتکلیف برای شبهه‌سازی جریان رودخانه در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۰۳۴ و ۰/۶۵۵ به دست آمد. علاوه بر این، بر اساس مقادیر سایر معیارهای ارزیابی ارائه شده در بخش نتایج (جدول ۱) شامل معیارهای هیدرولوژیکی، آماری و مقایسه گرافیکی نمودارهای شبهه‌سازی (شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷)، عملکرد مدل قابل قبول می‌باشد؛ بنابراین مدل WetSpa دارای قابلیت مناسبی در شبهه‌سازی جریان رودخانه و رواناب ناشی از ذوب برف در گام زمانی روزانه می‌باشد. از دلایل موفقیت مدل WetSpa در شبهه‌سازی جریان و رواناب ناشی از ذوب برف، می‌توان به استفاده مدل از داده‌های فیزیکی، مانند نقشه‌های DEM، کاربری اراضی، بافت خاک و استفاده از یک معادله تقریبی موج پخش برای مسیریابی جریان کانال و جریان زیرزمینی اشاره کرد (۹، ۲۸، ۳۲). همچنین مدل WetSpa به واسطه

شبیه‌سازی در آن‌ها بالا به نظر برسد اما در مدل‌های توزیعی مکانی مانند مدل WetSpa که تغییرات متغیرها را در گام‌های زمانی روزانه و حتی ساعتی و با دقت اندازه سلولی شبیه‌سازی می‌کنند رسیدن به دقت بالای ۵۵ درصد می‌تواند بسیار رضایت‌بخش باشد (۲۳). به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مدل WetSpa بدون استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور در خصوص اطلاع از سطح پوشش برف در دوره شبیه‌سازی توانسته است هم شبیه‌سازی مناسبی ارائه دهد و هم سطح پوشش برف را شبیه‌سازی کند. این ویژگی که یک مدل توزیعی مکانی بارش رواناب قادر باشد با استفاده از پارامترهای مربوط به انباشت و ذوب برف پیش‌بینی درستی از پوشش برف ارائه دهد، می‌تواند در زمینه‌ی مدیریت و اطلاع از پوشش برف مناطق برف‌گیر راهگشا باشد؛ بنابراین، برای پیش‌بینی سطح پوشش و میزان رواناب حاصل از ذوب برف در مناطق کوهستانی و برف‌گیر به‌کارگیری مدل توزیعی مکانی WetSpa پیشنهاد می‌گردد.

باشد. به‌طور مثال هنگامی که بارش به‌صورت باران باشد، به دلیل پایین بودن درجه حرارت هوا مدل نوع بارش را به‌صورت برف فرض می‌نماید و باران صورت گرفته در محاسبه رواناب وارد نمی‌شود در نتیجه هیدروگراف شبیه‌سازی شده پایین‌تر از هیدروگراف مشاهداتی است. لذا شبیه‌سازی ذوب برف فرآیندی بسیار پیچیده است که جهت گرفتن نتایج دقیق به مجموعه‌ای از آمار و اطلاعات معتبر و درست وابسته است. در این تحقیق از مدل WetSpa برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی از جمله تجمع و ذوب برف، رواناب و سطح پوشش برف استفاده شد. سپس جریان شبیه‌سازی شده با جریان اندازه‌گیری شده در ایستگاه آب‌سنجی خروجی حوزه و سطح پوشش برف شبیه‌سازی شده مدل با سطح پوشش برف تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS مقایسه گردید. با توجه به اینکه مدل‌های یکپارچه تغییرات زمانی کوتاه‌مدت را در نظر نمی‌گیرند و از تغییرات میانگین‌گیری می‌کنند همچنین در مرحله شبیه‌سازی تغییرات هم از میانگین داده‌های مشاهداتی استفاده می‌کنند و طبیعی است که به‌دقت

منابع

1. Beven, K.J. 2012. Rainfall-Runoff Modeling: The Primer, Second Edition. Wiley. Chichester. UK. 457 pp.
2. Birodian, N. and N. Jandaghi. 2006. Estimation of snowmelt runoff by using SRM model and comparison with hydrographic data in Ziarat River Basin. Journal of Agriculture Science Natural Resource, 12(6): 181-188(In Persian).
3. Entezami, H. 2010. Estimation of snowmelt runoff using MODIS satellite images in Saggez watershed (Kurdistan province). M.Sc thesis, University of Tehran. Tehran, Iran. 80 pp (In Persian).
4. Fathzadeh, A. 2008. Estimate the spatial distribution of snow water equivalent in Karaj watershed using remote sensing and energy balance model. Ph.D.dissertation. University of Tehran. Tehran, Iran, 200 pp (In Persian).
5. Flueraru, C., G. Stancalie, E. Savin and V. Craciuescu, 2006. Validation of MODIS Snowcover Products in Romania. Methodology and Conclusions. Geographic information science, Visegrad Hungary.
6. Foroutan Danseh, M. 2013. Simulation of land use change scenarios and urbanization impacts on erosion and sediment using WetSpa model in Ziarat watershed. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Gorgan. Iran. 104 pp (In Persian).
7. Jain. S.K., A. Goswami and A.K. Saraf. 2008. Role of Elevation and Aspect in Snow Distribution in Western Himalaya. Water Resour Manage, 23(1): 71-83.
8. Karimi. H. 2015. Efficiency comparison of WetSpa and SRM physical models for snowmelt runoff simulation and evaluation of snowmelt empirical formula results with the WetSpa model in Horo-Dehno Watershed, Lorestan Province. M.Sc thesis, Lorestan University. 111 pp (In Persian).
9. Karimi, H., H. Zeinivand, N. Tahmasebipour, A. Haghighzadeh and M. Miryaghoubzadeh. 2016. Comparison of SRM and WetSpa models efficiency for snowmelt runoff simulation. Environ Earth Science, 75(8):1-16
10. Keskin, F., A.A. shensoy, S.A. Arda and Ü. Shorman. 2007. Application of Mike11 model for the simulation of snowmelt runoff in Yuvacik dam basin, Turkey. International Congress on River Basin Management, Antalya-Turkey, pp: 472-484.
11. Liu, Y.B. and F. De Smedt. 2004. WetSpa Extension, Documentation and User Manual. Ph.D. dissertation, Vrije Universiteit Brussel, Belgium. 315 pp.
12. Martinec, J., A. Rango and Major, E. 1983. The Snowmelt-Runoff Model (SRM) User's Manual. NASA Reference Publ. 1100, Washington, D.C., USA.
13. Matkan, A.A., H. Zeinivand, B. Bayat, A.M. Ghafourie Ruzbahani and B. Mirbagheri. 2010. Simulation of daily stream flow and the effects of land use changes using WetSpa model in GIS (Case study: Merek Watershed, Kermanshah Province). Proceedings of the First International Conference on Modeling plant, soil, Climate, the International Center for Advanced Science and Technology, Mahan, Kerman. 23 and 24 November 2010. (In Persian).
14. Mirjafari, F. 2011. Simulation of Snow Cover (case study: Gharasou River Watershed-Ardabil Province), M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University. Nour, Iran. 200 pp (In Persian).
15. Miryaghoubzadeh, M., M.R. Ghanbarpour and M. Habibnejad Roshan. 2011. Snowmelt River Flow Modeling Using SRM model (Case Study: Karaj Dam Basin). Iran-Water Resources Research, 7(3): 40-52 (In Persian).

16. Mirzaei, S. 2014. Soil Erosion and Suspended Sediment Transport Simulation and Analysis of the effects of land use changes using WetSpa model. M.Sc thesis, Lorestan University. 132 pp. (In Persian).
17. Moradipour, S., A. Bahremand, H. Zeinivand and A. Najafinejad. 2015. Distributed Simulation of Runoff in Space and Time using Wetspa Model in Taleghan Watershed. *Journal of Watershed Management Research* 6(12): 55-64 (In Persian).
18. Najafi, M.R., J. sheikhivand and G. Porhemmet. 2004. Estimation of runoff in a snow cover mountainous basin by usin SRM models (A case study of mahabad basin). *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 11(3): 111-121 (In Persian).
19. Najafzadeh, R., A. Abrishamchi, M. Tajrishy and H. Taheri shahraeeni. 2004. Stream Flow with Snowmelt Runoff Modeling Using RS and GIS (Case Study: Pelasjan sub Basin). *Journal of Water and Wastewater*. 52 pp (In Persian).
20. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
21. NASA-MODIS Websit. 2015. Available at: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php>. Accessed 19 Feb 2015.
22. Rahman, K., C. Maringanti, M. Beniston, F. Widmer, K. Abbaspour and A. Lehmann. 2012. Streamflow Modeling in Highly Managed Mountainous Glacier Watershed Using SWAT: The Upper Rhone River Watershed Case Switzerland. *Water Resources Management*, 27(2): 323-339.
23. Safari, A., F. De Smedt and F. Moreda. 2009. WetSpa model application in the distributed model intercomparison project (DMIP2). *Journal of Hydrology*, 418-419:78-89.
24. ensoy, A. and G. Uysal. 2012. The Value of Snow Depletion Forecasting Methods towards Operational Snowmelt Runoff Estimation Using MODIS and Numerical Weather Prediction Data. *Water Resources Management*, 26(12): 3415-3440.
25. US Army Corps of Engineers. 1998. Runoff from snowmelt. (EM 1110-2-1406), Washington, DC, USA.
26. Vafakhah, M. 2008. Snowmelt Runoff Simulation using Artificial Neural Network, Fuzzy logic and measurement data of snow in the watershed Taleghan. Ph.D. dissertation. University of Thehran. Thehran, Iran. 200 pp (In Persian).
27. Wang, Z.M., O. Batelaan and F. De Smedt. 1996. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Physics and Chemistry of the Earth*, 21(3): 189-193.
28. Zeinivand, H. 2015. Comparison of interpolation methods for precipitation fields using the physically based and spatially distributed model of river runoff on the example of the Gharesou basin, Iran. *Russ Meteorol Hydrol*, 40(7): 480-488
29. Zeinivand, H. and F. De Smedt. 2009a. Hydrological modeling of snow accumulation and melting on river basin scale, *Water Resources Management*, 23: 2271-2287.
30. Zeinivand, H. and F. De Smedt. 2009b. Simulation of snow covers area by a physical based model. *World Academy of Science: Engineering and Technology Journal*, 55(31): 469-474.
31. Zeinivand, H. 2009. Development of Spatially Distributed Hydrological WetSpa Modules for Snowmelt, Soil Erosion and Sediment Transport. Ph.D. dissertation, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, 238 pp.
32. 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.

Simulation of Snow Cover Area and its Runoff in Horo-Dehno Watershed in Lorestan Province

Hamid Karimi¹, Hossein Zeinivand², Naser Tahmasebipour³, Ali Haghizadeh³ and Mirhassan Miryaghoubzadeh⁴

1- MSc. Student in Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran

2- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran, (Corresponding author: hzeinivand@gmail.com)

3- Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran

4- Assistant Professor, Department of Natural Resources, Urmia University

Received: October 24, 2014

Accepted: January 9, 2016

Abstract

Given the importance of snow, it seems necessary to predict its resultant runoff for optimized usage. In addition, due to snowbound regions cloudiness in winter season, the notice of snow cover area (SCA) using satellite images is difficult. Hence, to help better water resources managing in mountainous areas using supplementary methods for simulating the SCA is necessary. As a case study, Horo-Dehno watershed in Lorestan Province with the area of 263 Km² was selected. By applying WetSpa model as a verified and promising simulation tool, snow melting runoff as well as snow cover area was simulated based on degree-day approach in Horo-Dehno watershed. Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa) is a distributed spatial-physical model that simulates different hydrological processes including snow cover area, snow accumulation and melting in a cellular manner at hourly and daily time step by employing energy balance as well as degree-day approaches. Subsequently, simulated the SCA and runoff by the model were compared to the satellite images (MODIS) and the measured discharges at the output of the watershed respectively. In this research, 4-years regional data (from 2007 to 2011) including precipitation, temperature, evaporation, runoff and three digital maps of elevation model (DEM), land use and soil texture with resolution cell size of 100 * 100 meter were used. According to the results, Nash – Sutcliffe efficiency criterion of stream-flow simulation for calibration and validation periods were 0.7034 and 0.655 respectively. Consequently, WetSpa model has promising strength for stream-flow and runoff snowmelt simulation in daily time steps. Furthermore, through comparing snow cover extracted from the model with that of MODIS satellite images at the same periods, it was revealed that simulated snow cover is in a good agreement with observed snow cover.

Keywords: Degree – day, MODIS, SCA, Snow hydrology, WetSpa