



Assessment of Climate Change Impacts on Snow-Runoff Processes A Case Study: Zayandehroud River Basin

A. Ahmadi^{1*}, A. Khoramian² and H.R. Safavi³

Abstract

In this paper, the climate change impacts on snowmelt-runoff processes in upstream of Zayandehroud river basin, the sub-basin upstream of Ghaleh Shahrokh hydrometry station, has been studied. For this purpose daily and eight days MODIS snow cover products have been used to monitor snow cover changes as effective variables in SRM runoff-rainfall model. As a preprocessing step, the accuracy of MODIS products in snow cover assessment are evaluated by the observed land data. The results indicated that the accuracy of the daily snow product in overall, clear sky conditions, and eight day product is 73.4, 92.1 and 84.2 percent, respectively. The snowmelt runoff is modeled in the sub-basin utilizing extracted snow cover, temperature, and precipitation variables and SRM model parameters. The modeling results indicated acceptable performance of SRM in calibration and validation procedures. In this research, the HadCM3 model data under A2 and B2 emission scenarios is utilized. SDSM model have been used to downscale GCM data. The results showed a decreasing trend in precipitation over the case study area for the upcoming decades. Finally using GCM downscaled outputs and the developed snowmelt model, the future runoff in two periods of 2011-2040 as a near future and 2071-2099 as a far future are evaluated under climate change condition. Results showed that annual runoff will decrease and seasonal winter runoff will increase. Also the seasonal runoff in spring will significantly decrease.

Keywords: Snowmelt, Climate change, MODIS, SRM, Snow-Runoff model

Received: August 21, 2014

Accepted: September 19, 2014

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر فرآیند تبدیل برف به رواناب، مطالعه موردی: حوضه آبریز زایندهرود

آزاده احمدی^{۱*}، امین خرمیان^۲ و حمیدرضا صفوی^۳

چکیده

در این مقاله اثر تغییر اقلیم بر رواناب ناشی از ذوب برف در بالادست حوضه آبریز زایندهرود در زیرحوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری قلعه شاهرخ مورد مطالعه قرار گرفته است. برای نیل به این هدف از محصولات روزانه و هشت روزه پوشش برف سنجنده مودیس برای پایش پوشش برف در بالادست حوضه آبریز زایندهرود به عنوان یکی از متغیرهای مهم در مدل شبیه‌سازی برف-رواناب SRM استفاده شده است. به عنوان پیش‌نیازی بر استفاده از این محصولات، دقت آن‌ها در تشخیص پوشش برف بوسیله مقایسه با برداشت‌های انجام شده در ایستگاه‌های زمینی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقایسه مشخص گردید، محصول روزانه پوشش برف دارای دقت کلی ۷۳/۴٪ و در شرایط هوای صاف دارای دقت ۹۲/۱٪ می‌باشد. دقت محصول هشت روزه پوشش برف در منطقه مورد مطالعه نیز ۸۴/۲٪ برآورد گردید. با استفاده از پوشش برف استخراج شده و متغیرهای دیگر مدل و همچنین تعیین مشخصه‌های مدل، شبیه‌سازی ذوب برف در زیرحوضه مورد مطالعه انجام گرفت که نتایج در مراحل کالیبراسیون و صحت‌سنجی نشان دهنده دقت قابل قبول این مدل در شبیه‌سازی رواناب در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در این بررسی از مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 استفاده گردید. برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های خروجی مدل گردش عمومی نیز از مدل آماری SDSM استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد بارش در دهه‌های آینده روندی کاهشی خواهد داشت. نهایتاً با استفاده از خروجی‌های ریزمقیاس‌سازی شده مدل گردش عمومی شبیه‌سازی برف-رواناب برای دو بازه ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ به عنوان آینده نزدیک، و ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۹ به عنوان آینده دور انجام گرفت، که نتایج نشان دهنده کاهش حجم رواناب سالانه در زیرحوضه، کاهش شدید رواناب تولید شده در فصول بهار و تابستان و افزایش رواناب در فصول زمستان و پاییز می‌باشد.

کلمات کلیدی: ذوب برف، تغییر اقلیم، داده‌های مودیس، SRM، مدل

برف-رواناب

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۵/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۶/۲۸

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, aahmadi@cc.iut.ac.ir

2-MSc. Graduated Student, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*- Corresponding Author

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- کارشناس ارشد، دانش‌آموخته دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

*- نویسنده مسئول

می‌باشد که پرتاب این قبیل ماهواره‌ها از سال ۱۹۹۸ با EOS AM- موسوم به ترا^۳ آغاز گردید. در سال ۲۰۰۰، ماهواره EOS PM-1 موسوم به آکوا^۴ پرتاب گردید. در هر کدام یک از این ماهواره‌ها سنجنده مودیس^۵ نیز قرار گرفته شد. در ماهواره آکوا سنجنده AMSR-E^۶ نیز قرار داده شده است که برای سنجش عمق آب معادل برف مورد استفاده قرار می‌گیرد. سنجنده مودیس دارای ۳۶ باند طیفی از طول موج ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر می‌باشد (MODIS Website). با استفاده از این سنجنده به شکل گسترده‌ای به سنجش و ذخیره‌سازی اطلاعات مربوط به پوشش برف در مقیاس جهانی به صورت روزانه و هشت روزه پرداخته شده است. Klein and Barnett (2003) در ارزیابی دقت محصول روزانه پوشش برف^۷ سنجنده مودیس، با استفاده از داده‌های زمینی به این نتیجه رسیدند که نتایج مقایسه با تصاویر NOHRSC در ۱۶۹ روز در فصل ذوب برف سال آبی ۲۰۰۱-۲۰۰۰، نشان دهنده ۸۶٪ تطابق میان این دو می‌باشد.

Maurer et al. (2003) به مقایسه تصاویر روزانه پوشش برف سنجنده مودیس و تصاویر استخراج شده NOHRSC در دو حوضه آبریز رودخانه کلمبیا و رودخانه میسوری با یکدیگر و با داده‌های ایستگاه‌های زمینی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد در تمامی تصاویر، سنجنده مودیس نسبت به تصاویر NOHRSC درصد بیشتری از منطقه را به صورت برف دسته بندی می‌کند و در هر دو منطقه میزان خطا در تشخیص پوشش برف در تصاویر مودیس کم‌تر است. Tekeli et al. (2005) برای مدل‌سازی برف-رواناب با استفاده از مدل SRM^۸ از محصول هشت روزه پوشش برف سنجنده مودیس برای استخراج تغییرات پوشش برف در شرق ترکیه استفاده کردند. نتایج این بررسی نشان دهنده دقت ۶۲ تا ۸۲ درصدی محصول روزانه پوشش برف در استخراج پوشش برف در منطقه می‌باشد. Parajka and Blöschl (2006) به بررسی دقت تصاویر روزانه پوشش برف مودیس در اتریش پرداختند، گرچه نتیجه این مطالعه نشان دهنده دقت ۹۵٪ تصاویر روزانه مودیس در شرایط آسمان صاف می‌باشد، اما وجود پوشش ابر روزانه به طور میانگین در ۶۳٪ اتریش مانع بزرگی جهت استفاده از این تصاویر ارزیابی گردید.

Wang et al. (2008) به بررسی دقت محصول هشت روزه پوشش برف و ماسک ابر سنجنده مودیس در ژینجیانگ شمالی چین پرداختند. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد، دقت محصول هشت روزه در تشخیص پوشش برف ۹۴٪ و در تشخیص زمین عاری از پوشش برف ۹۹٪ می‌باشد. Tahir et al. (2011) در حوضه آبریز رودخانه‌ای در شمال پاکستان، اثر سناریوهای تغییر اقلیم مختلف را

برف به عنوان یکی از مهمترین عوامل مؤثر در بیلان آبی مناطق کوهستانی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در حوضه‌های کوهستانی بخش عمده‌ای از بارندگی به صورت برف نازل می‌شود و جریان حاصل از ذوب برف قسمت اعظم رواناب در فصول بهار و تابستان را تشکیل می‌دهد. رواناب حاصل از ذوب برف در تأمین منابع آب آشامیدنی و کشاورزی و تغذیه سفره‌های زیرزمینی مؤثر بوده و در برخی موارد منشأ بروز سیلاب‌های مخرب می‌باشد. بنابراین شناخت دقیق ویژگی‌های برف در زمان و مکان به منظور مدیریت صحیح و مؤثر منابع آب حائز اهمیت بسیار است.

در دهه‌های اخیر پوشش برف در بیشتر مناطق، خصوصاً در فصول بهار و تابستان کاهش یافته است. IPCC (2008) بیان می‌کند که افزایش دما در دهه‌های متوالی باعث تغییرات بزرگ مقیاس در چرخه هیدرولوژیکی مانند افزایش بخار آب موجود در اتمسفر، تغییر الگو و شدت بارش، تغییر در وقایع حدی^۱، کاهش پوشش برف و ذوب گسترده یخ و تغییر در رطوبت خاک و رواناب می‌گردد. تغییرات اقلیمی می‌تواند عملکرد سازه‌های آبی موجود را در تولید انرژی برقابی و همچنین مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی و کنترل سیلاب تحت تأثیر قرار دهند. شاید بتوان گفت یکی از عمده اثرات پدیده تغییر اقلیم در پژوهش‌های کاربردی منابع آب به چالش کشیدن این پیش فرض سنتی در مطالعات هیدرولوژیکی باشد که تجارب و داده‌های هیدرولوژیکی قبلی می‌توانند راهنمای خوبی برای شرایط آینده باشند. این موضوع انجام مطالعات تغییر اقلیم را تبدیل به بخشی ضروری و مهم در بررسی جنبه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی و خصوصاً مباحث مدیریت منابع آب می‌کند (Stern, 2007).

استخراج پوشش برف و تغییرات آن از اطلاعات مهم در ارزیابی‌های هیدرولوژیکی فرآیند برف-رواناب می‌باشند. یکی از مشکلات پیش رو در زمینه مطالعه برف، دشواری پایش وضعیت پوشش برف در ایستگاه‌های برف‌سنجی می‌باشد. کمبود داده‌های زمینی در این زمینه و نقطه‌ای بودن داده‌های زمینی موجود، استفاده از تکنولوژی سنجش از دور را جهت پایش برف در منطقه مورد توجه قرار داده است. سنجش از دور فرصت خوبی برای پایش و ارزیابی مشخصه‌های مختلف مدل برف در سطوح منطقه‌ای و جهانی، فراهم آورده است (Hall et al., 2005). جدیدترین سری از سنجنده‌های برف به برنامه سیستم مشاهده‌کننده زمین^۲ سازمان ناسا می‌باشد. این برنامه متشکل از یک سری ماهواره‌ها با مدارهای نزدیک به قطب

کردند. این مدل سپس به مدل SWAT^۱ وصل شده تا ضمن بهره گیری از الگوریتم تولید داده آن، رواناب حوضه نیز محاسبه گردد. روش پیشنهادی تخمین رواناب، برای مناطق کوهستانی برفگیر و با کمبود داده پیشنهاد شده است. فتاحی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل SRM رواناب روزانه حاصل از ذوب برف را با استفاده از اطلاعات برف بدست آمده از تصاویر هشت روزه سنجنده MODIS در حوضه آبریز بازفت شبیه‌سازی کردند. نتایج کاربرد مدل، نشانگر قابلیت کاربرد مدل برای حوضه‌های دیگر منطقه می‌باشد.

در زمینه سنجش پوشش برف، آخرین سنجنده و الگوریتم توسعه داده شده در این زمینه سنجنده مودیس می‌باشد. مطالعات بررسی تصاویر این سنجنده حاکی از صحت کافی این سنجنده در استخراج پوشش برف می‌باشد. گرچه وجود اختلاف در ارزیابی‌های مختلف صحت این سنجنده، ارزیابی صحت برای منطقه مورد مطالعه را ضروری به نظر می‌رساند. با وجود این که وجود پوشش ابر در استفاده از تصاویر این سنجنده محدودیت ایجاد می‌کند اما در آخرین مطالعات صورت گرفته استفاده از محصول هشت روزه پوشش برف توانسته است تا حدی این مشکل را برطرف سازد. در بررسی منابع مطالعاتی مشخص گردید که در بررسی اثر تغییر اقلیم بر برفاب، روش‌های مورد استفاده در تولید سناریوهای اقلیمی تا کنون روش استفاده از سناریوهای فرضی و یا در موارد معدود استفاده از داده‌های خروجی مدل‌های گردش عمومی به شکل بزرگ مقیاس زمانی بوده است. به همین دلیل در این تحقیق از داده‌های ریز مقیاس شده زمانی و مکانی مدل‌های گردش عمومی استفاده شده است که یکی از نوآوری‌های تحقیق می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از تکنولوژی سنجش از راه دور و اطلاعات سنجنده مودیس، پوشش برف در محدوده مطالعه استخراج گردیده و بر اساس آن مدل‌سازی برف-رواناب با استفاده از مدل SRM انجام شده است. سپس اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر رواناب ناشی از برف بررسی شده است.

۲- روش انجام کار

در این مقاله به منظور تکمیل اطلاعات زمینی پوشش برف، با استفاده از محصولات MOD10A1 و MOD10A2 سنجنده مودیس، پوشش برف در زیر حوضه قلعه‌شاهرخ در حوضه آبریز زاینده‌رود استخراج گردیده و صحت داده‌های محصول و روند تغییرات در طول دوره آماری بررسی شده است. پس از حصول اطمینان از داده‌های ماهواری در تخمین پوشش برف، مدل‌سازی برف-رواناب با استفاده از مدل SRM انجام گرفته و مدل توسعه یافته با داده‌های تاریخی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. سپس سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های گردش عمومی و

بر رواناب ناشی از ذوب برف بررسی کردند. در این تحقیق نیز از محصول MOD10A2، برای استخراج پوشش برف و سناریوهای فرضی افزایش دما و کاهش پوشش برف به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم استفاده شده است. در این تحقیق سناریوهای افزایش دما و تغییرات پوشش برف به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته اند و اثر توأم این دو عامل فقط در سناریوی ۲۰٪ افزایش پوشش برف به همراه ۴ درجه افزایش دما به طور همزمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. (Tang and Lettenmaier (2010) برای پیش‌یابی جریان در حوضه آبریز رودخانه‌ای در کالیفرنیا از محصول روزانه پوشش برف (MOD10A1) استفاده و توانایی تفکیک برف توسط این سنجنده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد بیشترین میزان خطا در تشخیص پیکسل‌های بدون برف است و توانایی تفکیک صحیح برف در ارتفاعات بالاتر از ارتفاعات پائین می‌باشد.

در ایران نیز تحقیقاتی در مورد تخمین سطح پوشش برف و همچنین تدوین مدل‌های شبیه‌سازی برف-رواناب انجام شده است. نجف‌زاده و همکاران (۱۳۸۳) تغییرات سطح پوشش برف یکی از زیر حوزه‌های آبریز زاینده رود (پلاسجان) با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA در سال‌های ۷۱-۱۳۷۰ و ۷۲-۱۳۷۱ استخراج کردند. از داده‌های زمینی و تغییرات سطح پوشش برف در سال آبی ۱۳۷۱ برای واسنجی مدل SRM استفاده کردند. پرهت و همکاران (۱۳۸۴) رواناب ناشی از برف را حوضه آبریز خراسان به استفاده از مدل SRM به همراه سطح پوشش برف بدست آمده از تصاویر ماهواره NOAA شبیه‌سازی کردند. دینی و همکاران (۱۳۸۶) از داده‌های سنجنده AVHRR و سنجنده MODIS و به کارگیری دو روش قرار دادن آستانه در داده‌ها به منظور شناسایی سطوح برفگیر در ارتفاعات البرز مرکزی استفاده کردند. سپس با استفاده از همبستگی میان عناصر اقلیمی دمای ۲/۹ درجه سانتیگراد به عنوان آستانه ریزش برف و ارتفاع متناظر صفر درجه به عنوان خط ماندگاری برف محاسبه شد. دهقانی و همکاران (۱۳۸۹)، به بررسی جریان ورودی به نیروگاه‌های آبی کوچک در حوضه‌های برفی فاقد آمار پرداختند. دهقانی با استفاده از مدل SRM و شبکه عصبی مصنوعی به شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه آبریز سردآبرود پرداخت. در این مطالعه پوشش برف در منطقه با استفاده از داده‌های سنجنده AVHRR ماهواره NOAA استخراج گردیده است. نتایج این مطالعه نشان داد که اگر با استفاده از آمار سه سال شبکه عصبی مصنوعی مورد آموزش قرار گیرد می‌تواند نتایج بهتری از مدل SRM ارائه کند.

دلور و همکاران (۱۳۹۰) با توجه به معادله بیلان برفی و الگوریتم ذوب برف SRM، بودجه برفی منطقه به صورت توزیعی محاسبه

به نام نشانه طیفی امکان پذیر می‌گردد. نشانه طیفی در واقع نموداری است که در آن درصد بازتابش صورت گرفته از یک طول موج الکترومغناطیس با دامنه مشخص رسم می‌گردد. با استفاده از این ویژگی، شاخصی که برای تشخیص برف به کار گرفته می‌شود، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش برف^۱ می‌باشد. این شاخص عبارتست از اختلاف نرمال شده دو باند، که یکی در طیف مرئی و دیگری در طیف نزدیک فروسرخ می‌باشد (هال و همکاران، ۱۹۹۵). در سنجنده مودیس این کار در سنجنده ماهواره ترا با استفاده از باندهای ۴ و ۶ و در سنجنده ماهواره آکوا با استفاده از باندهای ۴ و ۷ انجام می‌گیرد. معادلات ۱ و ۲ بیانگر شاخص NDSI در هر دو ماهواره می‌باشند.

$$NDSI (Terra) = \frac{Band\ 4 - Band\ 6}{Band\ 4 + Band\ 6} \quad (1)$$

$$NDSI (Aqua) = \frac{Band\ 4 - Band\ 7}{Band\ 4 + Band\ 7} \quad (2)$$

به طور معمول حد آستانه ۰/۴ برای تفکیک برف مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین صورت که اگر شاخص NDSI برای یک پیکسل مشخص بیشتر از ۰/۴ باشد آن پیکسل به عنوان پیکسل برفی طبقه بندی خواهد گردید. الگوریتم تشخیص پوشش برف در سنجنده مودیس بر این اساس طراحی گردیده است (Hall et al., 1995).

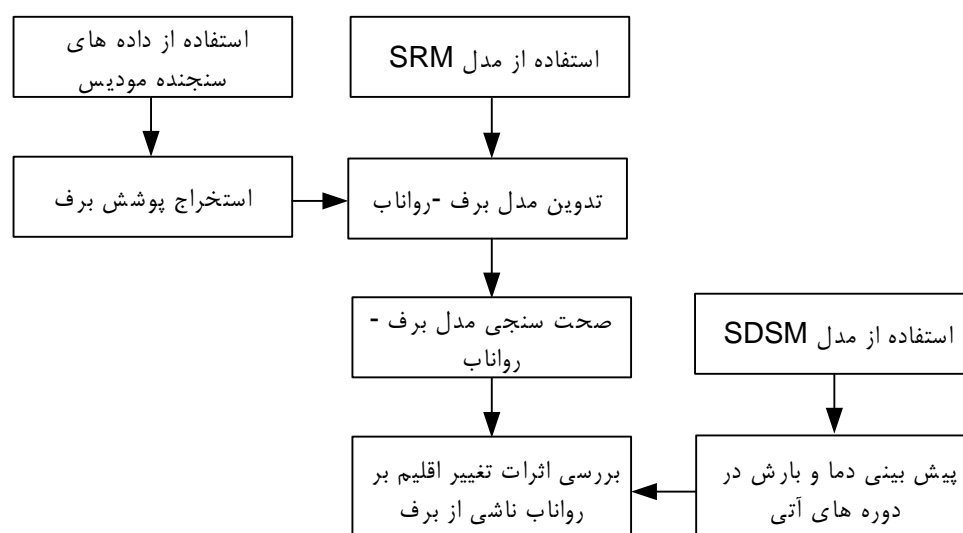
محصولات با یک تصویر با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر با پوشش ۲۳۳۰ در ۲۳۳۰ کیلومتر شروع می‌شوند. مرور مطالعات انجام شده قبلی نشان می‌دهد محصولات روزانه و هشت روزه پر کاربردترین

ریزمقیاس‌سازی خروجی با کاربرد روش‌های آماری برای بالادست حوضه آبریز استخراج گردیده و تأثیر آن بر رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از این سناریوها مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱ ارتباط مراحل مختلف برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر ذوب برف- رواناب آورده شده است. در ادامه توضیحاتی در مورد روش استخراج پوشش برف، تدوین مدل برف- رواناب و مدل پیش‌بینی بارش و دما تحت سناریوهای تغییر اقلیم ارائه شده است.

۱-۲- استخراج پوشش برف

یکی از متغیرهای بسیار مهم و اساسی در شبیه‌سازی ذوب برف، پوشش برف در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. با توسعه فناوری سنجنش از دور در دهه‌های اخیر پایش پوشش برف تسهیل گردیده است. سنجنده‌های مختلفی در سنجنش پوشش برف کاربرد دارند. سنجنده انتخابی به دقت مکانی و زمانی مورد نیاز و همچنین تا حدود زیادی به قابلیت دسترسی به داده‌های آن بستگی دارد. در مطالعات انجام شده قبلی سنجنده مودیس به علت قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب و همچنین دسترسی رایگان به بانک اطلاعاتی آن کاربرد بیشتری داشته است. البته در تحقیقات قدیمی‌تر بیشتر سنجنده AVHRR از سری ماهواره‌های NOAA مورد استفاده قرار می‌گرفته است، که با توجه به دقت پائین‌تر آن نسبت به سنجنده مودیس، اطلاعات سنجنده مودیس در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت.

تفکیک برف از اجسام دیگر، مسئله‌ای اساسی در تحلیل تصاویر ماهواره‌ای از سنجنده‌های مختلف است. این امر به کمک مفهومی



شکل ۱- ارتباط و توالی مراحل مختلف این تحقیق

مساحت حوضه و یا زون (Km^2)، k : ضریب فروکش جریان که نشان دهنده نرخ کاهش دبی در یک دوره زمانی بدون تاثیر ذوب برف و بارش باران می باشد.

پوشش برف یکی از ورودی های بسیار مهم مدل می باشد. مدل SRM تغییرات پوشش برف را به صورت منحنی هایی که نمایانگر تغییرات درصد پوشش برف در منطقه در برابر زمان می باشد، دریافت می کند. این منحنی ها موسوم به منحنی های فروکش پوشش برف^{۱۱} می باشند.

۲-۳- مدل آماری ریزمقیاس کردن SDSM

مدل آماری ریزمقیاس کردن توسط Wilby et al. (2002) به عنوان ابزاری برای ریزمقیاس کردن به روش آماری توسعه یافته است. مبنای این مدل رگرسیون چندمتغیره می باشد و برای پیش بینی متغیرهای اقلیمی چون بارش و دما در درازمدت با توجه به سیگنال های بزرگ مقیاس اقلیمی استفاده می شود. از آنجا که در مدل ریز مقیاس آماری ساخت داده های هواشناسی با استفاده از ترکیب دو روش احتمالاتی و رگرسیونی صورت می گیرد، لذا در طبقه بندی مدل های مختلف ریز مقیاس کردن، مدل آماری ریز مقیاس کردن از جمله بهترین مدل ها می باشد. در این مدل برای هر ماه از سال یک مدل رگرسیون خطی چندمتغیره بین متغیرهای پیش بینی کننده بزرگ مقیاس منتخب (متغیرهای مستقل) و متغیر پیش بینی شونده (بارش و یا دما)، به عنوان متغیر وابسته، تدوین می گردد. پیش بینی کننده های بزرگ مقیاس مناسب با استفاده از تحلیل های همبستگی بین متغیرهای پیش بینی کننده، همبستگی جزئی بین پیش بینی کننده ها و پیش بینی شونده ها و همچنین با توجه به حساسیت فیزیکی میان پیش بینی کننده ها و پیش بینی شونده ها، در محدوده حوضه مطالعاتی، انتخاب می شوند (Wilby and Dawson, 2007).

۳- مطالعه موردی

حوضه آبریز زاینده رود در حد فاصل طول های جغرافیایی $50^{\circ}02'$ و $45^{\circ}45'$ و عرض های جغرافیایی $31^{\circ}15'$ و $33^{\circ}45'$ در منطقه مرکزی ایران به وسعت ۲۹۰۰۰ کیلومتر مربع قرار دارد. حوضه آبریز سد زاینده رود به وسعت ۴۲۰۰ کیلومتر مربع مهم ترین زیرحوضه آبریز این منطقه به لحاظ آوردها و مدیریت منابع سطحی می باشد. عمده آوردهای سد زاینده رود، خود از دو زیرحوضه اصلی پلاسجان و کوه رنگ تأمین می گردد. زیرحوضه بالادست ایستگاه قلعه شاهرخ از کوه های کوه رنگ سرچشمه می گیرد با توجه به محل قرارگیری ایستگاه های هیدرومتری قلعه شاهرخ در پایین دست زیرحوضه

محصولات می باشند. مشکل عمده ای که در استفاده از محصول روزانه پوشش برف (MOD10A1) وجود دارد، حضور پوشش ابر در این تصاویر و پوشاندن سطوح برفی توسط لایه های ابر می باشد. این مسئله امکان استفاده از این محصول را برای تعیین سطوح برفی با مشکل روبه رو می سازد. برای رفع این مشکل محصول ماکزیمم پوشش برف هشت روزه (MOD10A2) تهیه شده است.

الگوریتم تهیه این محصول بدین شکل می باشد که مقادیر یک پیکسل برای ۸ روز پشت سر هم مورد مقایسه قرار می گیرد و در صورتی که در یکی از ۸ روز مقدار پیکسل معادل وجود برف باشد، پیکسل متناظر در محصول هشت روزه برف در نظر گرفته خواهد شد. این منطق باعث حداقل کردن پوشش ابر در تصاویر خواهد شد (Riggs et al., 2006).

در این مقاله کارایی محصولات MOD10A1 و MOD10A2، با استفاده از داده های ایستگاه های زمینی موجود برای چند ماه خاص از سال مورد ارزیابی قرار گرفته است و از محصول برتر جهت استخراج پوشش برف در کلیه ماههای سال استفاده شده است.

۲-۲- مدل بارش- رواناب SRM

مدل SRM به منظور شبیه سازی و پیش بینی جریان روزانه در حوضه های کوهستانی که ذوب برف در آن ها غالب می باشد توسط Martinec (1975) طراحی گردید. معادله اصلی مورد استفاده در مدل SRM معادله ۳ می باشد. بر اساس این معادله رواناب ناشی از ذوب برف و باران به صورت روزانه محاسبه می گردد و به جریان باقی مانده از روز قبل اضافه گردیده و تبدیل به دبی روزانه حوضه می شود. (۳)

$$Q_{n+1} = [c_{sn} a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + c_{rn} P_n] \frac{A \cdot 10000}{86400} (1 - k_{n+1}) + Q_n k_{n+1}$$

که در آن Q : میانگین دبی روزانه ($m^3 s^{-1}$)، c : ضریب رواناب که بیانگر تلفات به صورت نسبت می باشد (بارش/رواناب). c_s : ضریب رواناب برف و c_r : ضریب رواناب باران، a : فاکتور درجه-روز ($cm^{\circ} C^{-1} d^{-1}$) نشان دهنده عمق برفاب ناشی از یک درجه-روز، T : تعداد درجه روز ($^{\circ} C d$)، DT : تصحیح بوسیله نرخ گرادیان دما هنگامی که دما از ایستگاه مبنای نواحی ارتفاعی بیرون یابی می گردد. S : نسبت مساحت پوشیده از برف به کل مساحت، P : بارش مشارک کننده در تولید رواناب (cm)، A :

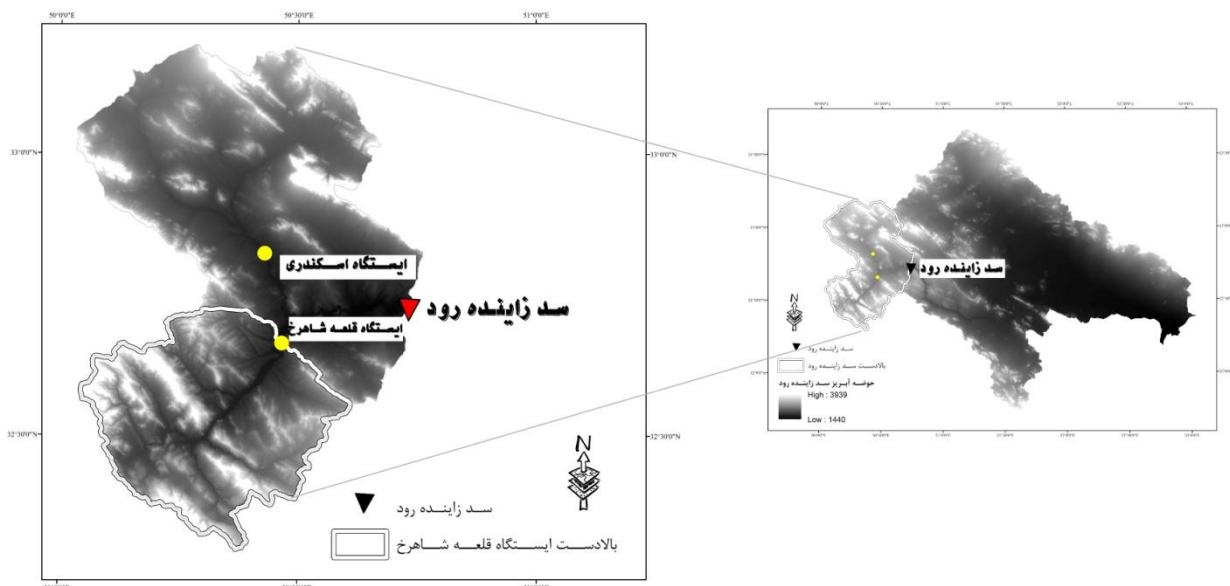
به صورت یک بار در ماه صورت گرفته است. در هر برداشت ۷ تا ۱۰ نمونه از منطقه برداشت گردیده و عمق برف، چگالی، خیس و خشک بودن برف، و ابری و یا آفتابی بودن مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. در این داده‌ها وضعیت ابری بودن هوا نیز به صورت توصیفی ثبت شده است که برای ارزیابی پوشش ابر تصاویر مورد استفاده قرار گرفت.

کوه‌رنگ، زیرحوضه بالادست این ایستگاه به منظور بررسی آورد انتخاب گردید. در شکل ۲ محل قرارگیری ایستگاه قلعه شاهرخ و حوضه بالادست آن نمایش داده شده است. در این مطالعه از سه دسته داده استفاده گردیده است که به شرح زیر می‌باشد و در ادامه توضیح مختصری در مورد هر بخش از داده‌ها آمده است.

• داده‌های ایستگاه‌های برف سنجی منطقه

• **محصول MOD10A1 و MOD10A2 سنجنده مودیس**
محصولات سنجنده مودیس از فوریه ۲۰۰۰ موجود می‌باشند. طول دوره آماری داده‌های زمینی نیز از ژانویه ۱۹۹۸ تا مارس ۲۰۱۰ می‌باشد. به همین دلیل دوره آماری مارس ۲۰۰۰ تا مارس ۲۰۱۰ به عنوان فصل مشترک برداشت‌های زمینی و سنجش‌های ماهواره‌ای

داده‌های زمینی مورد استفاده در این تحقیق ایستگاه‌های برف سنجی موجود در بالادست زیر حوضه قلعه شاهرخ در حوضه آبریز زاینده‌رود می‌باشند که مختصات و ارتفاع آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. دوره آماری برداشت‌ها در ایستگاه‌های برف سنجی از سال ۱۳۷۶ تا سال ۱۳۸۸ می‌باشد. برداشت داده‌ها در ماه‌های دی، بهمن و اسفند و



شکل ۲- حوضه آبریز زاینده‌رود و موقعیت زیرحوضه ایستگاه هیدرومتری قلعه شاهرخ

جدول ۱- موقعیت و مشخصات ایستگاه‌های برف سنجی در زیر حوضه قلعه شاهرخ

| ردیف | کد ایستگاه | نام ایستگاه | مختصات جغرافیائی | | |
|------|------------|-------------|------------------|------------|--------------|
| | | | طول (درجه) | عرض (درجه) | ارتفاع (متر) |
| ۱ | ۱۳۵-۴۲ | بارده | ۵۰ - ۳۲ | ۳۲ - ۳۳ | ۲۴۲۰ |
| ۲ | ۱۱۵-۴۲ | چلگرد | ۵۰ - ۰۸ | ۳۲ - ۲۸ | ۲۴۰۰ |
| ۳ | ۱۳۱-۴۲ | دره‌گاو | ۵۰ - ۱۸ | ۳۲ - ۳۴ | ۲۲۰۰ |
| ۴ | ۱۳۳-۴۲ | سودرجان | ۵۰ - ۲۳ | ۳۲ - ۳۰ | ۲۳۸۰ |
| ۵ | ۱۲۵-۴۲ | قلعه‌شاهرخ | ۵۰ - ۲۵ | ۳۲ - ۴۰ | ۲۲۲۰ |
| ۶ | ۱۲۹-۴۲ | قلعه‌مرغ | ۵۰ - ۱۳ | ۳۲ - ۳۲ | ۲۳۰۰ |
| ۷ | ۱۱۹-۴۲ | محمدآباد | ۵۰ - ۰۸ | ۳۲ - ۳۲ | ۲۳۶۰ |
| ۸ | ۱۱۷-۴۲ | نصیرآباد | ۵۰ - ۱۸ | ۳۲ - ۲۲ | ۲۴۵۰ |

ایستگاه‌ها شامل عمق برف، چگالی، خیس و خشک بودن برف، و ابری و یا آفتابی بودن در ماه‌های دی، بهمن و اسفند می‌باشد و به صورت یک بار در ماه صورت گرفته است.

با استفاده از مقایسه انجام گرفته صحت تصاویر MOD10A1 در مقایسه با داده‌های زمینی ۷۳/۴٪ ارزیابی گردید. داده‌های زمینی ثبت شده مربوط به وضعیت ابری بودن هوا دارای دقت نبوده و بر اصول استنتاجی مشخصی استوار نبودند و تنها برای هر برداشت وضعیت هوا در دو ستون به عنوان ابری و یا آفتابی ثبت گردیده بود. بخش عمده این عدم تطابق به این قسمت از اطلاعات باز می‌گردد، کما این که در بررسی انجام شده مشخص گردید که میزان تطابق در داده‌های ابری ثبت شده ۳۴/۲٪ می‌باشد. در مرحله بعد با حذف داده‌های ابری، میزان تطابق در شرایط هوای صاف به ۹۲/۱٪ افزایش یافت. به همین دلیل هر تصویر به هشت روز تحت پوشش خود تعمیم داده شد و این داده‌های تعمیم داده شده برای مقایسه با داده‌های زمینی مورد استفاده قرار گرفت. این موضوع از این حیث قابل توجه می‌باشد که در استفاده از این محصول برای استخراج تغییرات پوشش برف در منطقه، عملاً این تعمیم انجام خواهد گرفت و مسئله مهم میزان قابلیت اعتماد به این تعمیم می‌باشد که با ارزیابی دقت تفکیک محصول به شکل توضیح داده شده این قابلیت اعتماد نیز به نوعی مورد سنجش قرار خواهد گرفت.

جدول ۲- نتایج تطابق داده‌های زمینی و محصول MOD10A1 و MOD10A2

| محصول MOD10A2 | | | محصول MOD10A1 | | | داده‌های زمینی MOD10 |
|---------------|------|-----|---------------|------|-----|----------------------|
| برف | زمین | ابر | برف | زمین | ابر | |
| ۱۴۲ | ۱۲ | ۱ | ۲۲۲ | ۵۰ | ۳ | برف |
| ۶ | ۷۸ | ۰ | ۲ | ۷۶ | ۰ | زمین |
| ۳۸ | ۳۷ | ۳۹ | ۱ | ۰ | ۰ | ابر |

نتایج نشان می‌دهد، میزان تطابق میان داده‌های زمینی و داده‌های بدست آمده از محصول MOD10A2 دارای ۸۴/۲٪ تطابق با یکدیگر می‌باشند. قرار دادن این نتیجه در کنار نتایج مطالعات دیگر نظیر مطالعه Zhou et al. (2005) که نشان دهنده برآورد بهتر رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از محصول MOD10A2 به جای محصول MOD10A1 می‌باشد، می‌تواند استفاده از محصول MOD10A2 را برای استخراج پوشش برف در مطالعه موردی توجیه نماید.

استخراج گردید. این دوره دارای ۳۵۴ روز برداشت زمینی و تصویر ماهوارای جهت مقایسه نتایج بود. این محصول که به نام MOD10A1 شناخته می‌شود، از پایگاه Reverb به آدرس <http://reverb.ech.nasa.gov> تهیه گردید. تصاویر برای منطقه ایران با تعریف محدوده جغرافیایی حوضه مورد مطالعه و محدوده زمانی مورد نیاز تهیه گردید. در مجموع ۱۵۴ تصویر MOD10A1 از کلکسیون ویرایش پنج محصولات سنجنده مودیس، متناظر با زمان‌های برداشت داده‌های زمینی تهیه گردید.

• داده‌های لازم برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم

از میان ایستگاه‌های موجود در منطقه، بر اساس وجود حداقل ۳۰ سال طول دوره آماری و محل قرارگیری ایستگاه‌ها، ایستگاه چلگرد انتخاب گردید. بازه زمانی ۳۰ ساله از سال آبی ۵۹-۶۰ تا ۸۸-۸۹ مورد انتخاب قرار گرفت. همچنین به منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم، از خروجی‌های مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریو A1 و B1 استفاده گردید. با توجه به موقعیت جغرافیایی حوضه شبکه 14X-22Y از شبکه‌بندی منطقه آفریقا به عنوان شبکه مینا انتخاب گردید.

اطلاعات پیش‌بینی‌کننده‌ها در مدل SDSM، از پایگاه CCIS^{۱۲} (<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?Scenarios>) تهیه گردید. اطلاعات دریافتی شامل سه فایل زیر بود:

۱- 2001-1961 NCEP: اطلاعات پیش‌بینی‌کننده‌های روزانه از سایت NCEP

۲- 2099-1961 H3A2: خروجی‌های مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹

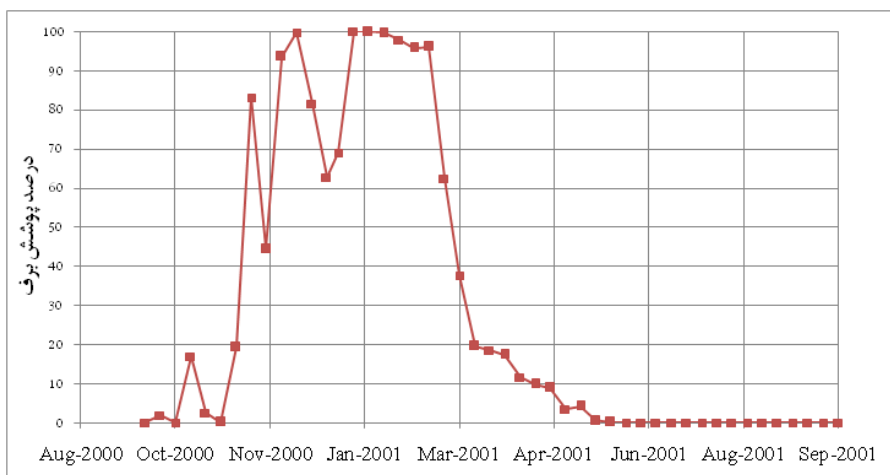
۳- 2099-1961 H3B2: خروجی‌های مدل HadCM3 تحت سناریوی B2 از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹

این اطلاعات شامل ۲۶ سیگنال شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نرمال شده می‌باشند. بازه زمانی ۱۹۹۶-۱۹۶۱ برای کالیبراسیون و بازه ۲۰۰۱-۱۹۹۷ برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت.

۴- نتایج

۴-۱- استخراج پوشش برف

منظور ارزیابی دقت تصاویر استفاده شده، تصاویر و داده‌های زمینی در محل ایستگاه‌ها با یکدیگر مقایسه شدند و تطابق آن‌ها با یکدیگر در تشخیص ابری بودن، وجود برف و یا عدم وجود برف استخراج گردید. نتایج این تطابق در جدول ۲ آورده شده است. داده‌های زمینی



شکل ۳- تغییرات درصد پوشش برف در حوضه آبریز ایستگاه قلعه شاهرخ در سال آبی ۲۰۰۰-۲۰۰۱

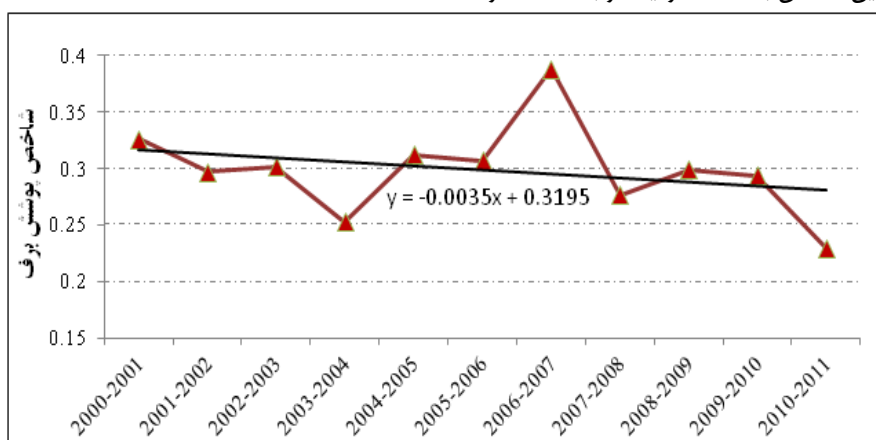
بودجه برفی غنی تر در منطقه مورد مطالعه می باشد. این شاخص برای ۱۱ سال آبی استخراج گردید که نتایج آن در شکل ۴ آورده شده است. نتایج نشان دهنده وجود روند کاهشی پوشش در زیرحوضه مورد مطالعه می باشد.

۲-۴- تدوین مدل شبیه سازی برف- رواناب SRM

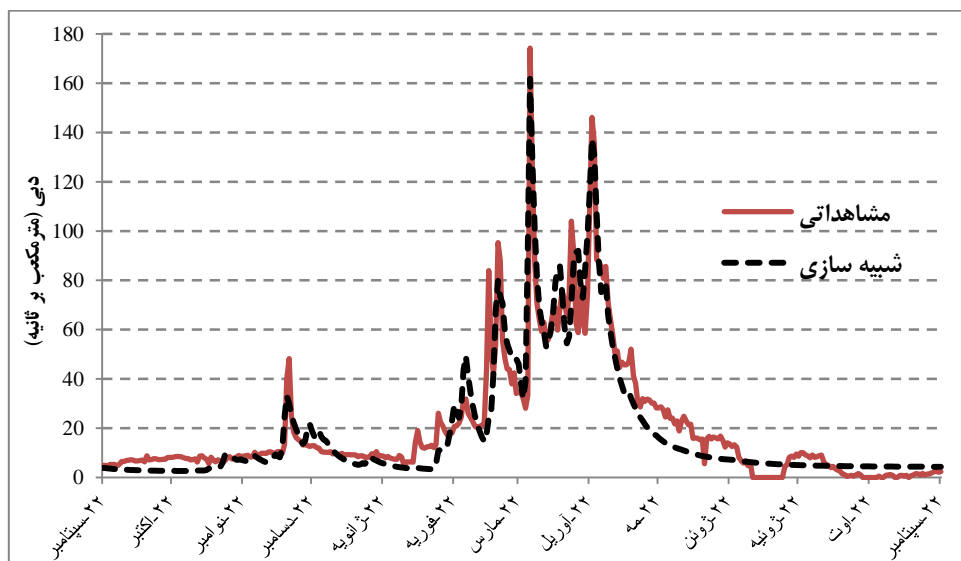
ضرایب ثابت مدل SRM شامل ضریب درجه-روز، نرخ گرادیان دما، درجه حرارت بحرانی و ضریب فروکش می باشد. برای تعیین ضریب درجه-روز و نرخ گرادیان دما از آمار ایستگاه های برف سنجی منطقه استفاده گردید. نرخ گرادیان دما در منطقه با استفاده از مطالعات انجام شده قبلی با استفاده از ۳۰ ایستگاه و با $R^2=0.74$ ، معادل با -0.07 درجه سانتیگراد بر متر انتخاب گردید. ضریب فروکش جریان با استفاده از تحلیل اطلاعات دبی روزانه ایستگاه قلعه شاهرخ استخراج گردید.

پس از بررسی دقت و تطابق تصاویر، با استفاده از تصاویر محصول MOD10A2 تغییرات پوشش برف در طول دوره آماری این تصاویر به منظور استفاده در مدل SRM و همچنین آشکارسازی روند تغییرات در ۱۱ سال آبی که توسط سنجنده مودیس پوشش داده می شود، استخراج گردید. بدین منظور از ۵۱۷ تصویر MOD10A2 برای استخراج این تغییرات در دو زیرحوضه بالادست ایستگاه قلعه شاهرخ استفاده گردید و با محاسبه نسبت تعداد پیکسل های برفی به تعداد کل پیکسل ها، درصد پوشش برف در هر تصویر محاسبه شد. در شکل ۳ نمونه منحنی تغییرات استخراج شده آورده شده است.

برای ۱۱ سال آبی ۲۰۰۰-۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰-۲۰۱۱ منحنی های پوشش برف برای هر دو زیرحوضه استخراج گردیدند. به منظور آشکارسازی روند تغییرات بودجه برفی در ۱۱ سال گذشته از شاخصی که بیانگر تعداد روزهای معادل با پوشش برف ۱۰۰٪ در طول سال آبی می باشد استفاده گردید. هر چقدر این شاخص به عدد ۱ نزدیک تر باشد، نشانگر



شکل ۴- تغییرات شاخص پوشش برف در سال های مختلف و روند آن در منطقه مورد مطالعه



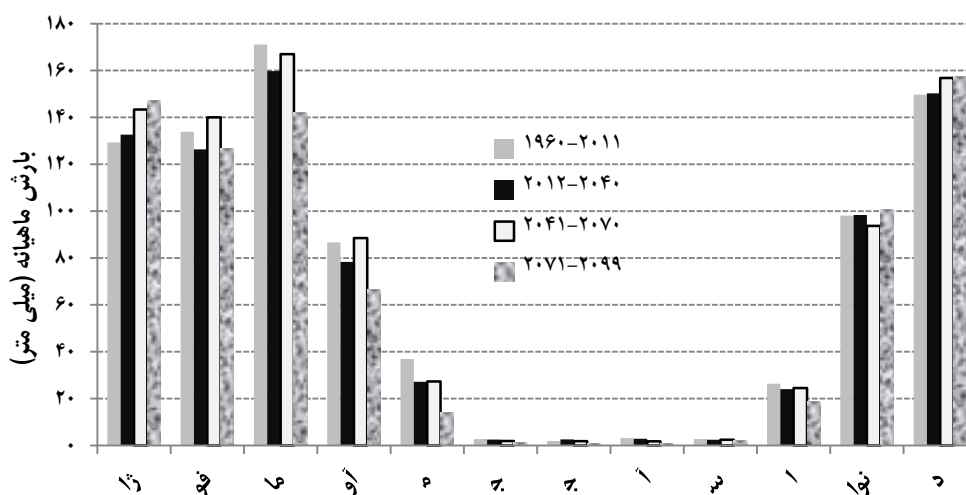
شکل ۵- رواناب شبیه سازی شده و مشاهداتی در ایستگاه قلعه شاهرخ در دوره کالیبراسیون

برای استفاده از اطلاعات دبی روزانه ایستگاه قلعه شاهرخ دبی تونل‌های کوه‌رنگ ۱ و ۲ از آن کسر گردید. بدین منظور دبی روزانه هر روز در برابر دبی روز بعد آن رسم گردید و منحنی پوش با استفاده از این نقاط استخراج شد. در شکل ۵ تغییرات رواناب در دوره کالیبراسیون مدل برای زیرحوضه قلعه شاهرخ آورده شده است که دارای تطابق نسبی با اطلاعات تاریخی می‌باشد.

۳-۴- تدوین مدل ریزمقیاس آماری SDSM

در این مرحله از خروجی‌های مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریو A1 و B1 استفاده گردید. اطلاعات پیش‌بینی‌کننده‌ها در مدل SDSM، شامل ۲۶ سیگنال شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نرمال شده می‌باشند. بازه زمانی ۱۹۶۱-۱۹۹۶ برای کالیبراسیون و بازه

۱۹۹۷-۲۰۰۱ برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. پیش‌بینی‌کننده مؤثر با استفاده از ابزار Screen Variables و با مقایسه همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی‌شونده‌ها در طول دوره کالیبراسیون، تعیین گردیدند. برای بارش در بالادست ایستگاه‌های قلعه شاهرخ بر اساس بررسی نتایج ضرایب همبستگی، ۵ پیش‌بینی‌کننده رطوبت نسبی در نزدیکی سطح^{۱۳}، سرعت منطقه‌ای در ۸۵۰ هکتوپاسکال^{۱۴}، فشار هوای میانگین در تراز دریا^{۱۵} و ورتیسیتته در ۵۰۰ هکتوپاسکال^{۱۶} و قدرت جریان هوا در ۵۰۰ هکتوپاسکال^{۱۷} انتخاب گردیدند. در شکل ۶ نمونه‌ای از خروجی این مدل، بارش ماهانه در بالادست ایستگاه قلعه شاهرخ تحت سناریوی اقلیمی A2 نشان داده شده است.



شکل ۶- تغییرات بارش ماهانه در بالادست ایستگاه قلعه شاهرخ تحت سناریوی A2

ذوب برف و تبدیل بیشتر برف به رواناب در فصل زمستان و کاهش ذخیره برف در فصل تابستان و همچنین کاهش بارش‌های بهاره باشد. در جدول ۴ میزان تغییرات حجم رواناب و بارش در ماه‌های سپتامبر تا مارس و آوریل تا اگوست و همچنین کل سال آورده شده است.

همانطور که در شکل ۸ نشان داده می‌شود، در شبیه‌سازی رواناب برای شرایط تغییر اقلیم در آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۷۱) در زیرحوضه بالادست ایستگاه قلعه شاهرخ، حجم کل رواناب کاهش یافته است. حجم رواناب در فصول زمستان و پاییز افزایش قابل توجه و در فصول بهار و تابستان کاهش شدید را نشان می‌دهد. همچنین دبی حداکثر کاهش یافته و از ماه‌های مارس و آوریل به دسامبر و ژانویه تغییر زمان داده است.

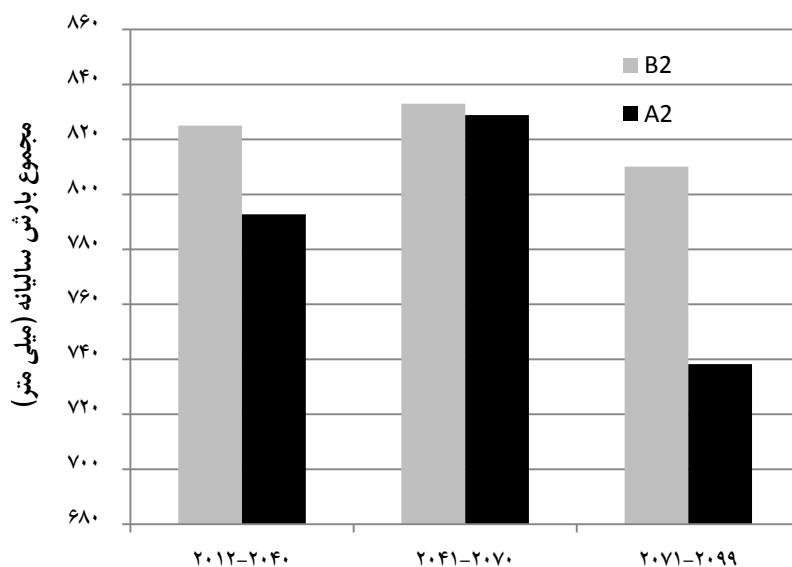
۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در زمینه پایش پوشش برف، سنجنده مودیس و قابلیت استفاده از محصولات روزانه و هشت روزه آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از دقت خوب این سنجنده در تفکیک پوشش برف می‌باشد، اگرچه وجود پوشش ابر در محصول روزانه این سنجنده استفاده از این محصول را با مشکل رو به رو می‌سازد ولی با استفاده از محصول هشت روزه این مشکل تا حد زیادی مرتفع می‌گردد. در شبیه‌سازی ذوب برف با مدل SRM، نتایج کالیبراسیون و صحت‌سنجی نشان دهنده عملکرد قابل قبول این مدل در برآورد

همچنین در شکل ۷، بارش سالیانه در بالادست ایستگاه قلعه شاهرخ تحت سناریوی A2 و B2 نشان داده شده است. طبق خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل HadCM3 و برای دو سناریوی A2 و B2 بارش در فصل زمستان اندکی افزایش و در فصل پاییز و بهار کاهش را نشان می‌دهد که این مسئله می‌تواند باعث کاهش رواناب تولیدی در فصل بهار و افزایش رواناب در فصل زمستان گردد. در جدول ۳ خلاصه نتایج اثرات تغییر اقلیم بر بارش و دمای منطقه آورده شده است. نتایج بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش نشان دهنده وجود روند کاهشی در بارش منطقه در طی دهه‌های آینده می‌باشد. کاهش در بدترین حالت ۱۲ درصد پیش‌بینی گردیده است. سناریوی A2 روند تغییرات شدیدتر و بدبینانه‌تری را نسبت به سناریوی B2 نشان می‌دهد. بررسی تغییرات دما نشان می‌دهد روند افزایشی در دمای منطقه مورد مطالعه وجود خواهد داشت. روند این تغییرات در دهه‌های منتهی به قرن بیست و دوم شدیدتر بوده و در بدبینانه‌ترین حالت تا ۵ درجه سانتیگراد افزایش را نشان می‌دهد.

۴-۴- ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب

اطلاعات بارش و دما برای شرایط تغییر اقلیم در آینده نزدیک و دور در مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب SRM وارد و رواناب خروجی شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی رواناب برای شرایط تغییر اقلیم در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱) در زیرحوضه بالادست ایستگاه قلعه شاهرخ تغییرات حجم رواناب در کل سال چشم‌گیر نبوده است ولی حجم رواناب در فصل زمستان افزایش و در فصل بهار کاهش را نشان می‌دهد. دلیل عمده این تغییرات می‌تواند افزایش دما و اثر آن بر



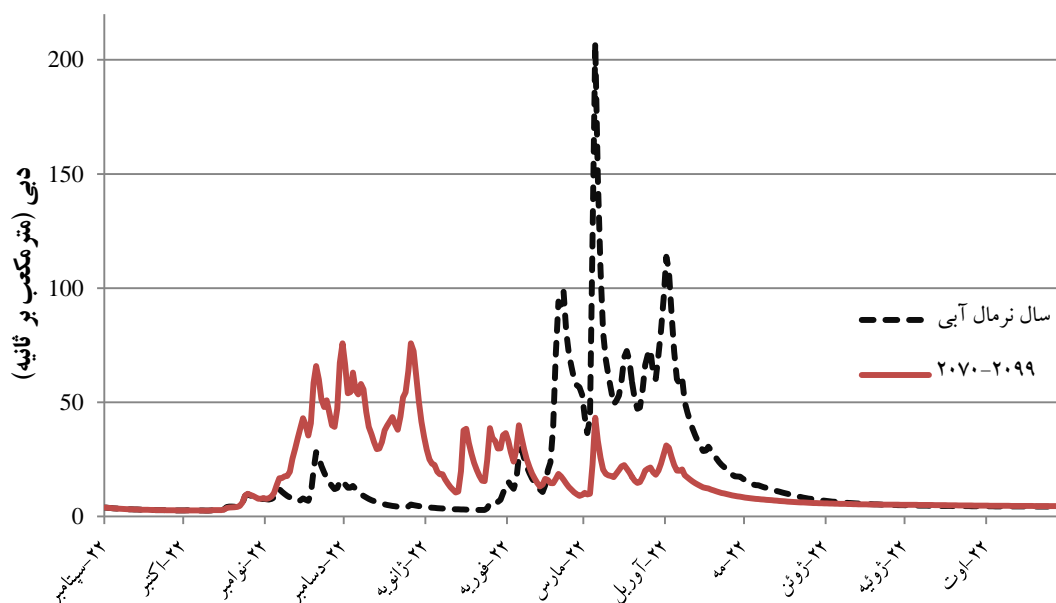
شکل ۷- تغییرات مجموع سالانه بارش در بالادست ایستگاه قلعه شاهرخ تحت دو سناریوی A2 و B2

جدول ۳- تغییرات درصد بارش سالانه و تغییرات دما (درجه سانتیگراد) در بازه‌های زمانی مختلف

| سناریو | متغیر | ۲۰۴۰-۲۰۱۱ | ۲۰۷۰-۲۰۴۱ | ۲۰۹۹-۲۰۷۱ |
|--------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| A2 | بارش- قلعه شاهرخ | -۵/۹ | -۱/۶ | -۱۲/۴ |
| B2 | بارش- قلعه شاهرخ | -۲/۱ | -۱/۱ | -۳/۸ |
| A2 | دما- سینگرد | ۱/۳ | ۲/۸ | ۴/۹ |
| B2 | دما- سینگرد | ۱/۳ | ۲/۳ | ۳/۵ |

جدول ۴- تغییرات درصد بارش و رواناب در بالادست حوضه آبریز ایستگاه قلعه شاهرخ

| آینده نزدیک | | پاییز و زمستان | بهار و تابستان | کل سال |
|-------------|--------------------|----------------|----------------|--------|
| A2 | تغییرات بارش | -۲/۷ | -۱۱/۵ | -۵/۹ |
| | تغییرات حجم رواناب | +۴/۳ | -۱۸/۴ | -۷/۷ |
| B2 | تغییرات بارش | -۰/۵ | -۸/۸ | -۲/۱ |
| | تغییرات حجم رواناب | +۹/۳ | -۱۹/۵ | -۶ |
| آینده دور | | پاییز و زمستان | بهار و تابستان | کل سال |
| A2 | تغییرات بارش | -۱/۹ | -۳۱ | -۱۲/۴ |
| | تغییرات حجم رواناب | +۵۲/۳ | -۷۰/۵ | -۱۲/۵ |
| B2 | تغییرات بارش | +۳/۸ | -۱۸/۴ | -۳/۸ |
| | تغییرات حجم رواناب | +۴۴/۲ | -۵۳/۹ | -۷/۵ |



شکل ۸- رواناب شبیه‌سازی شده برای شرایط نرمال و بازه ۲۰۷۱-۲۰۹۹ تحت تأثیر سناریوی B2

رواناب در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در مرحله کالیبراسیون ضریب تعیین R2 برای زیرحوضه بالادست ایستگاه قلعه شاهخ ۰/۸۸ و در مرحله صحت سنجی ۰/۸۱ ارزیابی گردید.

در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش مشاهده گردید، مجموع بارش سالانه در طی دهه‌های آینده، روند کاهشی در پیش خواهد گرفت. تغییرات بارش در مجموع فصول پائیز و زمستان تغییرات جزئی را نشان می‌دهد. این در حالی است که کاهش بارش در فصل بهار مقدار قابل توجهی خواهد بود. از طرفی افزایش دما در آینده دور بسیار چشمگیر خواهد بود. افزایش دما در فصل زمستان با پائیز باعث کاهش بارش به صورت برف در منطقه خواهد گردید و حجم ذخیره برفی را کاهش خواهد داد. این موضوع باعث خواهد شد بارش‌های زمستانه بیشتر به رواناب تبدیل شوند و در مقابل با کاهش بارش در فصل بهار و همچنین کاهش رواناب ناشی از ذوب برف کاهش جریان در فصل بهار رخ دهد. از طرفی در فصل بهار به طور معمول با همراه شدن ذوب برف با بارش‌های بهاره باعث به وجود آمدن پیک‌های شدید می‌گردد. این در حالی است که با کاهش بارش بهاره و همچنین کاهش رواناب ناشی از ذوب برف انتظار وقوع این پیک‌ها وجود نخواهد داشت و دبی‌های حداکثر با شدت کمتر به فصل زمستان منتقل خواهند شد.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Extremes
- 2-Earth Observing System (EOS)
- 3-Terra
- 4-Aqua
- 5-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)
- 6-Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS
- 7-Daily Snow Cover Product (MOD10A1)
- 8-Snowmelt Runoff Model
- 9-Soil and Water Assessment Tool (SWAT)
- 10-Normalized Difference Snow Index(NDSI)
- 11-Snow Cover Depletion Curves
- 12-Canadian Climate Impacts Scenarios
- 13-Near Surface Relative humidity
- 14- 850 hPa Zonal Velocity
- 15-Mean Sea Level Pressure
- 16-500 hPa Vorticity
- 17-500 hPa Airflow Strength

۶- مراجع

پرهمت ج، صدقی ح، تقفیان ب (۱۳۸۴) بررسی مدل در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در

حوضه‌های بدون آمار برف (مطالعه موردی حوضه خرسان در کارون). تحقیقات منابع آب ایران، سال ۱، شماره ۱: ۱-۱۱.

دلاور م، مرید س، نیکبخت ن (۱۳۹۰) شبیه‌سازی توزیعی ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی فاقد داده (مطالعه موردی حوضه امامزاده داوود). تحقیقات منابع آب ایران، سال ۷، شماره ۴: ۴۱-۵۰.

دهقانی م، مرید س، نوروزی ع ا (۱۳۸۹) ارزیابی شبیه‌سازی رواناب حوزه‌های برفی با مدل شبیه‌سازی SRM و شبکه عصبی برای برآورد انرژی برقی در مواجهه با کمبود آمار. تحقیقات منابع آب ایران، سال ۶، شماره ۳: ۱۲-۲۴.

دینی غ، ضیائی‌ان فیروزآبادی ب، علیمحمدی سراب ع، داداشی خانقاه س (۱۳۸۶) بررسی سطوح برفگیر در البرز مرکزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌های MODIS و AVHRR و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). تحقیقات منابع آب ایران، سال ۳، شماره ۳: ۸-۱.

فتاحی ا، دلاور م، قاسمی ا (۱۳۹۰) شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل SRM مطالعه موردی حوضه آبریز بافت. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۲۰(۲۳): ۱۲۹-۱۴۱.

نجف‌زاده ر، ابریشم‌چی ا، تجربی م، طاهری شهرآیینی ح (۱۳۸۳) شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف. مجله آب و فاضلاب، شماره ۱۵(۴): ۲-۱۱.

Hall DK, Kelly REJ, Foster JL, Chang ATC (2005) Hydrological application of remote sensing: surface states: snow. Encyclopedia of Hydrological Sciences, John Wiley and Sons, Chichester.

Hall DK, Riggs GA, Salomonson VV (1995) Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. Remote Sensing of Environment 54: 127-140.

IPCC (2008) Climate change and water. Cambridge University Press, Cambridge.

Klein AG, Barnett AC (2003) Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000-2001 snow year. Remote Sensing of Environment 86(2): 162-176.

Martinec J (1975) Snowmelt Runoff Model for Streamflow Forecasts. Nordic Hydrology 6: 145-154.

Maurer EP, Rhoads JD, Dubayah RO, Lettenmaier DP (2003) Evaluation of the snow-covered area data

- Tekeli AE, Akyürek Z, Şorman AA, Şensoy A, Şorman AÜ (2005) Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing of Environment* 97 (2): 216-230.
- Wang X, Xie H, Liang T (2008) Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in Northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment* 112 (4): 1497-1513.
- Wilby RL, Dawson CW, Barrow EM (2002) SDSM- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Journal of Environmental Modeling and Software* 17: 147-159.
- Wilby RL, Dawson CW (2007) A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, User Manual, United Kingdom. Available from: <http://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/SDSMManual.pdf>
- Zhou X, Xie H, Hendrickx JMH (2005) Statistical evaluation of remotely sensed snow-cover products with constraints from streamflow and SNOTEL measurements. *Remote Sensing of Environment*: 94: 214–231.
- product from MODIS. *Hydrological Processes* 17 (1): 59-71.
- MODIS Website: <http://modis.gsfc.nasa.gov>
- Parajka J, Blöschl G (2006) Validation of MODIS snow cover images over Austria. *Hydrology and Earth System Sciences* 10 (5): 679-689.
- Riggs GA, Hall DK, Salomonson VV (2006) MODIS snow Products User Guide to Collection 5, NSIDC, 2006. http://nsidc.org/data/docs/daac/modis_v5/dorothy_snow_doc.pdf.
- Stern N (2007) *The economics of climate change: The Stern Review*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Tahir AA, Chevallier P, Arnaud Y, Neppel L, Ahmad B (2011) Modeling snowmelt-runoff under climate scenarios in the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan. *Journal of Hydrology* 409 (1-2): 104-117.
- Tang Q, Lettenmaier DP (2010) Use of satellite snow-cover data for streamflow prediction in the Feather River Basin, California. *International Journal of Remote Sensing* 31(14): 3745-3762.