



Assessment of The Impact of Climate Change Through the Last Two Decades and the Next Two Decades on the Temperature and Precipitation Parameters of Alamkuh Glacier Using Satellite Images and CMIP5 Scenarios

H. Motiee^{1*}, A.R. Motiee², and S. Mortaz Hejri²

Abstract

In this research, the impact of climate change on the snow and ice covering of Alamkuh glacier in Mazandaran province was assessed using LANDSAT-7, LANDSAT-8 satellite images as well as the regression trends of historical data of precipitation and temperature in the last two decades (2000-2020) as well as projection of GCM models with CMIP5 scenarios over the next two decades (2020-2040). Projected data were evaluated using GCM models including EC-EARTH, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, MIRO-C5 and MPI-ESM-MR for the period of 2020-to 2040. The observation data were used with 35-year period (1984- 2014) and LARS-WG-6 was used for GCM models downscaling. The least error method (including RMSE and R2) was used to find the model in which the predicted data best fit the historical period data; the MIRO-C5 model had the lowest error among the 5 models. The results obtained for the last twenty years showed a gradual decrease in the surface of the snow and ice of Alamkuh region, especially in the summer, demonstrating the gradual decline of this glacier. Complete melting of the glacier in summer poses a serious threat to the downstream water resources of the area and the environment around the glacier.

Keywords: AOGCM Models, Alamkuh Glacier, LARS-WG6, Satellite Imagery, LANDSAT.

Received: July 27, 2021

Accepted: October 5, 2021

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در دو دهه گذشته و دو دهه آینده بر پارامترهای دما و بارش یخچال علم کوه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سناریوهای CMIP5

همایون مطیعی^{۱*}، امیررضا مطیعی^۲ و سحر مرتاض هجری^۲

چکیده

در این تحقیق به تأثیرات تغییرات اقلیم بر یخچال علم کوه در استان مازندران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای LANDSAT-7 و LANDSAT-8 و همچنین رگرسیون داده‌های مشاهداتی بارش و دما در دو دهه گذشته (۲۰۰۰-۲۰۲۰) و مدل‌های AOGCM با سناریوهای CMIP5 برای پیش‌بینی وضعیت یخچال در دو دهه آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۰) پرداخته شده است. داده‌های پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل‌های AOGCM شامل EC-EARTH، GFDL-CM3، HadGEM2-ES، MIRO-C5 و MPI-ESM-MR برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ و با یک دوره ۳۵ ساله مشاهده شده در سال‌های ۱۹۸۴-۲۰۱۴ مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها از مدل LARS-WG نسخه ۶٫۰ استفاده شد. برای یافتن بهترین مدل که داده‌های پیش‌بینی‌شده با داده‌های دوره تاریخی تناسب داشته باشند از روش تعیین کمترین خطا (شامل RMSE و R²) استفاده شد و مدل‌های EC-EARTH و MIRO-C5 دارای خطای کمتری در بین ۵ مدل بودند. محاسبات نشان می‌دهند که منفی شش درصد (-۶٪) کاهش بارندگی و نه درصد افزایش دما (۹٪) نسبت به دوره مشاهداتی در این منطقه به‌وجود می‌آید. همچنین، نتایج بدست آمده در این تحقیق در طی بیست سال گذشته نشان‌دهنده کاهش بارش، افزایش دما و کاهش تدریجی سطح برف و یخ علم کوه به‌خصوص در فصل تابستان می‌باشد و زوال تدریجی این یخچال را در پی دارد. ذوب کامل برف و یخ یخچال در فصل تابستان تهدید جدی برای منابع آب پایین دست منطقه و محیط‌زیست اطراف این یخچال مهم می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدل‌های AOGCM، یخچال علم کوه، LARS-WG6،

تصاویر ماهواره‌ای، LANDSAT.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۵/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۳

1- Associate Professor, Civil, Water and Environmental Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: h_motiei@sbu.ac.ir

2 M.Sc. Graduate, Civil, Water and Environmental Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.3.9.4](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.3.9.4)

۱- دانشیار، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۰ امکان‌پذیر است.



۱- مقدمه

برف و یخ موجود در قله‌های کوهستانی و یخچال‌های طبیعی نقش مهمی در تأمین آب شیرین به‌خصوص در رودخانه‌های پایین دست آنها در آسیای جنوبی و آسیای میانه برای میلیون‌ها نفر ایفا می‌کنند و ممکن است رودخانه‌های دائمی را به رودخانه‌های فصلی تبدیل کند. از این رو کاهش حجم آنها چالش‌های عمده‌ای را به وجود خواهد آورد که کمبود شدید آب در نیمه دوم تابستان و دوره‌های پاییز می‌باشد (Lutz et al., 2014; Huss and Hock, 2018).

تحقیقات بر روی یخچال‌های هیمالیا که توسط Immerzeel et al. (2003) انجام شده است، افزایش قابل توجه دبی رودخانه‌ها در حوضه پایین‌دست دامنه کوه‌های هیمالیا را نشان می‌دهد. در پژوهشی (You et al., 2017) با بررسی و ارزیابی مطالعات تغییرات آب و هوایی مشاهده‌شده در منطقه هیمالیا و کوهستان‌های آن به این نتیجه رسیدند که ذوب یخ ناشی از تغییرات آب و هوایی در این حوضه از رودخانه موجب تأثیرات عظیمی بر معیشت شمار زیادی از جمعیت به‌ویژه در مناطق پایین‌دست خواهد شد.

از شروع قرن بیستم، حدود ۸۰ درصد از پوشش برف کوهستان کلیمانجارو کاهش پیدا کرده است و پوشش آن در دهه سوم قرن بیست و یکم تقریباً از بین خواهد رفت (Zierl and Bugmann, 2005). در کوه‌های آلپ سوییس، نگرانی عمده در حال حاضر بر تغییرات اقلیمی متمرکز است که موجب کاهش سطح یخچال‌های طبیعی می‌شود. کاهش سطح یخچال‌های طبیعی در آینده موجب کاهش دبی حاصل از ذوب شدن یخ تغذیه کننده نیروگاه برق-آبی در کشور سوییس است که ۷۵ درصد از برق مصرفی کشور را تولید می‌کند و در حدود ۶۰ درصد آن با ذخیره مجدد تولید می‌شود (Swiss Federal Office for Energy, 2003; Haerberli et al., 2007). همچنین، افزایش یک درجه‌ای دما در حوضه کوه‌های آلپ سبب کاهش حدود ۴۰ درصدی مساحت و ۵۰ درصدی حجم یخچال‌های طبیعی آن منطقه شده است (Jasper et al., 2004).

بر اساس تحقیقات انجام شده در مورد اثرات ذوب شدن سریع‌تر یخچال‌های کانادا و تأثیر آن بر منابع آب پایین دست چه سطحی و چه زیرزمینی بخصوص در کوه‌های راکی کانادا واقع در ایالت‌های آلبرتا و بریتیش کلمبیا، همانند دیگر مناطق جهان، گرمایش جهانی تأثیر خود را بر یخچال‌های این منطقه گذاشته و به‌علت ذوب سریع‌تر یخ‌ها منابع آب زیرزمینی و دبی رودخانه افزایش نشان می‌دهد (Castellazzi et al., 2019). همچنین، در یک تحقیق دیگر، اثرات تغییر اقلیم بر یخچال Peyto در ایالت آلبرتا بررسی و مشخص شد که سطح و حجم این یخچال در حال کاهش بوده و تا سال ۲۱۰۰

گرمایش جهانی و تغییر اقلیم که تا یک تا دو دهه پیش در حد یک نظریه مطرح می‌شد، امروزه به‌صورت واقعی روی داده و اصلی‌ترین خطر جهانی برای بشریت شده است. بر اساس گزارش‌های متعدد هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم و به‌خصوص گزارش ششم ۲۰۲۱ (IPCC, 2021)، تأثیرات تغییرات اقلیم بر منابع مختلف زمین به ویژه منابع آب در سراسر جهان از جمله در آسیای غربی و آسیای مرکزی در حال اتفاق است. مشکلات مربوط به منابع آب در آسیای غربی و مرکزی بسیار چالش‌برانگیز بوده چراکه تغییرات کاهشی در مقدار موجودیت آب باعث ایجاد شرایط شدید خشکسالی می‌شود.

بر اساس گزارش تحقیقاتی ناسا^۱ در سال ۲۰۱۹، گرمایش جهانی به قدری تشدید شده است که در تابستان ۲۰۱۹ در قطب شمال و گرینلند تنها در طی یک روز ۱۱ میلیارد مترمکعب یخ ذوب شده است. همچنین براساس گزارش‌های سازمان هواشناسی جهانی (WMO, 2019)، آسیای غربی و خاورمیانه یکی از بدترین دوران‌های تاریخی را از نظر خشکسالی و کاهش میزان بارش‌ها را می‌گذرانند. کشورهایی مانند ایران با خشکسالی شدید همراه با بیش از ۱۵ سال کاهش بارندگی و افزایش دمای هوا مواجه هستند (Karimi et al., 2018) و منابع آب در سراسر کشور مورد تهدید جدی هستند. به استناد مؤسسه تحقیقات آب در سال ۲۰۱۸ مقدار بارش‌ها در سال ۱۳۹۷ مقایسه با میانگین بارندگی در یک دوره ۵۰ ساله، ۳۰ درصد کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که دو سوم کشور با بحران کمبود منابع آب روبرو است که همین امر باعث کاهش حجم آب دریاچه‌ها، سد‌ها و رودخانه‌ها در اکثر مناطق کشور شده است.

یخچال‌های طبیعی کره زمین از منابع ارزشمند آب در کره زمین هستند که در زمستان آب را به‌صورت یخ ذخیره کرده و در تابستان رها می‌سازند و از منابعی هستند که به شدت تحت تأثیر گرم شدن و تغییرات اقلیمی قرار دارند (Kohler et al., 2018) و طبق گزارش NSIDC در سال ۲۰۱۶، حجم آنها در آینده کاهش قابل توجهی خواهند داشت. یخچال‌ها تقریباً ۱۰ درصد از سطح زمین (حدود ۱۶ میلیون کیلومتر مربع) را پوشش می‌دهند، در حالی که در آخرین عصر یخبندان پوشش یخچال‌ها ۳۲ درصد از سطح زمین را در برمی‌گرفت (NSIDC, 2017). از یخچال‌های معروف جهان می‌توان به یخچال هیمالیا، یخچال‌های اروپا مانند یخچال آلپ در سوییس و یخچال‌های ایسلند و یخچال‌های متعدد در آمریکای شمالی (کانادا و آمریکا) نظیر یخچال‌های آلاسکا، یخچال‌های رشته کوه‌های راکی اشاره کرد.

یخچال‌های ایران از نوع کوهستانی هستند که در پنج منطقه مهم کوهستانی ایران به نام‌های دماوند، اشترانکوه، سبلان، تخت‌سلیمان و زردکوه گسترش یافته‌اند (WRI, 2018). سطح کل یخچال‌های ایران حدود ۴۰/۶ کیلومتر مربع است و در ارتفاع ۲۵۸۹ الی ۴۷۸۱ متر از سطح دریا واقع شده‌اند (Valdanzooj et al., 2009). اگرچه کل سطوح یخچال‌های ایران در مقایسه با بسیاری از یخچال‌های طبیعی جهان زیاد نیست اما، منبع اصلی تأمین منابع آب مناطق و حوضه‌های مجاورشان هستند. مطالعات بر روی یخچال‌های ایران نشانگر کاهش سطح و حجم ناشی از افزایش دمای متوسط کشور ایران است. Morid and Hosseini Safa (2013) حجم یخچال‌های ایران را محاسبه کردند و نتیجه گرفتند که کاهش حجم یخچال‌های ایران در دهه‌های آینده منجر به نابودی کامل آنها خواهد شد.

هدف از این پژوهش، ارزیابی وضعیت پوشش برف و یخ یخچال علم‌کوه در منطقه کوهستانی تخت‌سلیمان در دو دهه گذشته و آینده تحت تأثیر گرمایش جهانی و تغییر اقلیم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های تغییر اقلیم است که چه از نظر زیست‌محیطی بر جنگل‌های پایین‌دست و چه از نظر اثرات آن بر رودخانه پایین دست سردآبرود دارای اهمیت زیادی در منطقه شمال ایران می‌باشد.

۲- روش‌ها و مواد

برای برآورد اثرات تغییرات اقلیم در یک منطقه از روش‌های آماری گوناگونی مانند میانگین متحرک، معادلات رگرسیون و همچنین شبیه‌سازی مدل‌های گردش جهانی (AOGCMs) استفاده می‌شود که اختصاراً GCM هم گفته می‌شوند. مدل‌های GCM متعددی در جهان وجود دارد که توسط کشورهای مختلف توسعه داده شده‌اند که معروف‌ترین این مدل‌ها عبارتند از: گروه مدل‌های GFDL (آمریکا)، GISS (آمریکا)، CanESM2 (کانادا)، MIRO-C (ژاپن)، CESM1 (آمریکا)، HadGEM (انگلیس)، CSIRO (استرالیا) و MPI (آلمان). مدل‌های GCM در بسیاری از مراجع تغییر اقلیم مانند (IPCC, 2013) توضیح داده شده‌اند.

به طور کلی برای پیش‌بینی و بازتاب تأثیرات تغییرات اقلیم منابع آب یک منطقه در آینده، خروجی مدل‌های GCM باید با شرایط آب و هوایی تاریخی (Base) مقایسه شود. به طور خاص از سال ۲۰۱۳ سناریوها در قالب دسته‌بندی CMIP5 نامیده می‌شوند و به صورت RCP2.6، RCP4.5، RCP6.5 و RCP8.5 دسته‌بندی می‌شوند (Stocker, 2014). در بین این سناریوها، RCP2.6 خوش‌بینانه‌ترین سناریو و سناریو RCP8.5 بدبینانه‌ترین است. لازم به توضیح است که

این یخچال با احتمال ۸۰-۹۰ درصد حجم خود را از دست خواهد داد (Kehrl et al., 2014).

در یک تحقیق دیگر توسط Shannon et al. (2019) اثرات تغییر اقلیم بر یخچال‌های جهان با استفاده از سناریوهای CMIP5 مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه شد که تا پایان قرن بیست و یکم بسیاری از یخچال‌های جهان با کاهش شدید حجم یخ‌های خود روبرو شده و یا کاملاً از بین می‌روند. در ایران نیز تحقیقات زیادی در مورد اثرات تغییر اقلیم در مناطق مختلف در طی دو دهه گذشته صورت گرفته است. اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب ایران با مدل‌های مختلف GCM توسط Afshar and Fahmi (2019) مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه‌گیری کردند که تأثیر این پدیده بر روی تشدید خشکسالی‌ها و سیلاب‌های ناگهانی ایران بطور موثری در دهه‌های آینده وجود خواهد داشت. در یک تحقیق دیگر توسط Dinpashoh et al. (2019) اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق، با استفاده از داده‌های تاریخی ۳۶ ایستگاه هواشناسی در غرب و شمال غرب ایران، این نتیجه بدست آمد که میزان تبخیر و تعرق به دلیل افزایش دما ناشی از گرمایش جهانی در این منطقه از ایران حال افزایش بوده است. Shirkhodaei et al. (2020) با تحقیقی که در مورد اثرات تغییر اقلیم بر حوضه سد کرخه و رواناب ورودی به سد با استفاده از سناریوهای CMIP5 و مدل IHACRES انجام دادند به این نتیجه رسیدند که کاهش بارش و افزایش دما در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۰) وجود خواهد داشت و این تغییرات منجر به کاهش رواناب ورودی به سد کرخه خواهد گردید. (Ghasemi et al. 2014) با استفاده از سه مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM، LARS-WG و شبکه عصبی مصنوعی به بررسی تغییرات دمایی سواحل جنوبی دریای خزر طی دوره اقلیمی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و آینده ۲۰۱۰-۲۰۴۰ پرداخته‌اند. بر اساس نتایج مدل LARS-WG طی دوره آماری آینده، افزایش دما تا یک درجه سانتی‌گراد برای همه ماه‌ها تشخیص داده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد به ترتیب مدل SDSM، LARS-WG و شبکه عصبی مصنوعی کمترین خطا را داشته است. (Heidari et al. 2019) با استفاده از مدل‌های CMIP5 و روش ریزمقیاس‌نمایی LRAS-WG6 به ارزیابی تغییرات بارش در شمال غرب ایران پرداختند و نتیجه گرفتند که تا سال ۲۰۷۰ میزان بارش در کل برای همه مدل‌ها کاهشی خواهد بود. (Karimi et al. 2014) تغییرات یخچال‌های منطقه علم‌کوه را با استفاده از سنجش دور مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند که سطح یخی مناطق بدون واریزه یخچال‌های منطقه تخت سلیمان به طور میانگین در حدود ۵۵ درصد نسبت به مساحت اولیه خود کاهش یافته است.

می‌باشند. در این تحقیق، نسخه ششم LARS-WG که با سناریوهای CMIP5 قابل استفاده می‌باشد برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های GCM استفاده شده است.

مدل LARS-WG یک مدل تصادفی تولیدکننده آب و هوا است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های یک سایت مشخص تحت شرایط آب و هوایی حال و آینده مورد استفاده قرار گیرد. داده‌ها در قالب یک مجموعه سری روزانه از متغیرهای آب و هوایی شامل بارش (میلی‌متر)، حداکثر و حداقل دما (سانتی‌گراد) و تابش خورشید مورد استفاده قرار می‌گیرند (Semenov and Barrow, 2002). این مدل میانگین سری زمانی داده‌های شبیه‌سازی‌شده مصنوعی را مطابق با ویژگی‌های آماری ایستگاه مشاهده‌ای مورد مطالعه تولید می‌کند. تولید داده‌ها در سه مرحله انجام می‌شود: واسنجی، ارزیابی و ایجاد اطلاعات هواشناسی. برای پیش‌بینی داده‌های هیدرولوژیکی، با استفاده از مدل‌های CMIP5 نسخه ششم این نرم‌افزار مورد استفاده قرار می‌گیرد. نسخه ششم LARS-WG از پنج مدل جهانی GCM یعنی EC-EARTH، GFDL-CM3، HadGEM2-ES، MIRO-C5 و MPI-ESM-MR استفاده می‌کند. لازم به توضیح است که این پنج مدل در کشورهای مختلف (فرانسه، آمریکا، انگلیس، ژاپن و آلمان) ساخته شده و در نرم‌افزار LARS-WG6 بصورت استاندارد در برنامه داده‌ها (دیتا بیس) آن وجود دارند. خصوصیات مدل‌های GCM مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- یخچال علم کوه و رودخانه سردآبرود

یخچال علم کوه واقع در کوهستان تخت‌سلیمان با ارتفاع ۴۸۴۵ متر و مختصات جغرافیایی با عرض ۳۶،۳۷ و طول ۵۰،۹۶ درجه، منبع اصلی رودخانه سردآبرود (Valdanzooj et al., 2009) در شمال ایران می‌باشد.

در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) در گزارش ششم خود مدل‌های CMIP6 را در دسترس قرار داده است و این مدل‌ها توسط بسیاری از محققین در حال ارزیابی و مقایسه آنان با مدل‌های CMIP5 می‌باشند (Bourdeau and Hasanzadeh, 2021; Kim et al., 2020; McBride et al., 2020). به‌علت اینکه در زمان انجام این تحقیق روش ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG که در این پژوهش از آن استفاده شد برای مدل‌های CMIP6 هنوز بطور کامل بسط داده نشده است به همین دلیل از مدل‌های CMIP5 استفاده شد.

۲-۱- مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG6.0

مدل‌های GCM (مدل‌های جفت اتمسفری-اقیانوسی گردش عمومی جو) در یک محدوده وضوح بزرگ‌مقیاس (در محدوده سلولی ۱۰۰-۳۰۰ کیلومتر) اجرا می‌شوند و به همین دلیل نیاز است تا خروجی‌های مدل‌ها برای مطالعات محلی ریزمقیاس شوند، در حالی که ریزمقیاس‌نمایی به فرآیندی گفته می‌شود که خروجی مدل‌های GCM با وضوح بزرگ مقیاس را به وضوح ریزمقیاس تبدیل می‌کند تا دقت اثرات تغییر اقلیم بر یک منطقه را افزایش دهد.

روش‌های ریزمقیاس‌نمایی به دو روش تقسیم می‌شوند: روش‌های آماری و روش‌های دینامیک که روش‌های آماری نسبت به روش‌های دینامیکی کاربردهای گسترده‌تری پیدا کرده‌اند (Wood et al., 2004; Zoo and Yang, 2012; Wilby, 2012).

از جمله روش‌های ریزمقیاس‌نمایی می‌توان به روش فاکتور تغییر، LARS-WG و SDSM اشاره کرد (Anandhi et al., 2001; Willeby et al., 2001) که که دو روش آخر از الگوریتم‌های پیچیده‌تر (Chen et al., 2011) بهره می‌برند و به صورت نرم‌افزاری

Table 1- GCM models characteristics
جدول ۱- مشخصات مدل‌های GCM

CMIP5 Model ID	Institute and Country of Origin	Ocean horizontal resolution (°lat x °lon)	Atmosphere horizontal resolution (°lat x °lon)	Atmosphere Eq. resolution	
				Lat (Km)	Long (Km)
EC-EARTH	EC-EARTH, Europe(France)	1.0×0.8	1.1×1.1	120	120
GFDL-CM3	NOAA, GFDL, USA	1.0×1.0	2.5×2.0	275	220
HadGEM2-ES	MOHC, UK	1.0×1.0	1.9×1.2	210	130
C5-MIRO	JAMSTEC, Japan	1.6×1.4	1.4×1.4	155	155
MPI-ESM-MR	MPI-N, Germany	0.4×0.4	1.9×1.9	210	210

یافته است (کمتر از یک میلیون مترمکعب در سال). مقدار کمی از آب رودخانه سردآبرود برای کشاورزی استخراج می‌شود در حالی که بخش عمده‌ای از آب آن به دریای خزر می‌ریزد. با این حال به علت عبور از شهر کلاردشت، ناحیه جنگلی عباس‌آباد و روستاهای مسیر خود، نقش مهمی در حوضه دریای خزر از لحاظ زیست‌محیطی ایفا می‌کند.

رودخانه سردآبرود ۶۷ کیلومتر طول و مساحت حوضه آبریز آن بیش از ۴۳۰ کیلومتر مربع است که در طول سال دارای یک جریان دائمی است. نرخ دبی متوسط سالانه در یک دوره داده‌برداری ۲۰ ساله، ۴۳/۵ میلیون مترمکعب با حداکثر حجم ۱۶۹ میلیون مترمکعب و حداکثر دبی لحظه‌ای ۳۰ مترمکعب در ثانیه در سال آبی ۱۹۸۵-۱۹۸۶ برای این رودخانه ثبت شده است (IWMC, 2017). ایستگاه هواشناسی کلاردشت در مجاورت شهر کلاردشت یکی از مهم‌ترین مناطق این حوضه یخچالی است. دمای متوسط سالانه مثبت ۱۰ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه آن ۴۵۰ میلی‌متر است. در این تحقیق ابتدا روش رگرسیون برای یافتن روندهای دما، بارش و دبی رودخانه با استفاده از داده‌های روزانه مشاهده‌ای مورد استفاده قرار گرفت.

به این رودخانه به این دلیل سردآبرود می‌گویند که از آب‌های بیش از حد سرد ناشی از ذوب یخ و برف یخچال علم‌کوه به وجود آمده است. یخچال علم‌کوه با مساحت تقریبی بین پنج کیلومتر مربع تا هشت کیلومتر مربع (فقط یخ) شاخه اصلی رودخانه سردآبرود را تغذیه می‌کند (Azizi, 1985).

مساحت این یخچال در زمان بارش برف بسیار بیشتر می‌شود که تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق این مساحت محاسبه شده است. این رودخانه جز رودخانه‌های منحصر به فرد حوضه دریای خزر است. ویژگی این منطقه، حوضه باریک و محدود آن است (شکل ۱). که دبی‌های اوج آن در دوره فصل بهار رخ می‌دهد.

همانند دیگر یخچال‌های جهان، سطح و حجم یخچال علم‌کوه در حال کاهش تدریجی است، بر اساس گزارش‌های مؤسسه تحقیقات آب (WRI, 2018)، یخچال علم‌کوه در طول سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۸، ۱/۶۱ متر از عمق یخ خود را از دست داده است که معادل ۲۳ سانتی‌متر در سال است. به عبارت دیگر، بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۸ (هفت سال)، حدود ۲/۶ میلیون مترمکعب حجم یخ در این منطقه کاهش

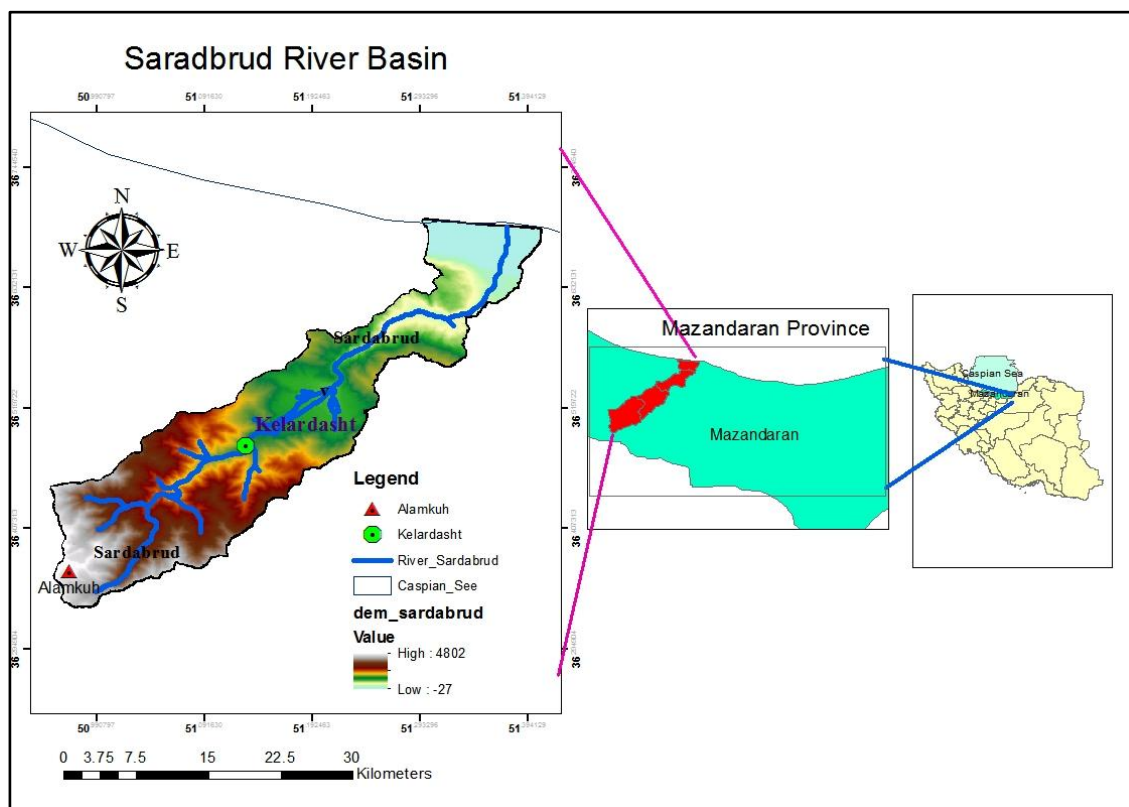


Fig. 1- Alamkuh glacier and Sardabrud basin in Mazandaran province
 شکل ۱- موقعیت یخچال علم‌کوه و حوضه آبریز سردآبرود در استان مازندران

شکل ۲ روند افزایشی دما و روند کاهشی مقدار بارش‌ها در ایستگاه هواشناسی کلاردشت (IWMC-2017) را طی دهه‌های گذشته نشان می‌دهد که علت آن را با احتمال بالا می‌توان ناشی از تأثیرات تغییرات اقلیمی جهانی قلمداد کرد. شکل ۳ دبی متوسط سالانه ۶۰ سال از سال ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۰ را نشان می‌دهد که در ایستگاه هیدرومتری کلاردشت در پایین‌دست رودخانه اندازه‌گیری شده است (IRWM, 2017). همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، روند تغییرات میزان دبی رودخانه با کاهش بارش‌ها به‌صورت کاهشی است.

شکل ۲ روند افزایشی دما و روند کاهشی مقدار بارش‌ها در ایستگاه هواشناسی کلاردشت (IWMC-2017) را طی دهه‌های گذشته نشان می‌دهد که علت آن را با احتمال بالا می‌توان ناشی از تأثیرات تغییرات اقلیمی جهانی قلمداد کرد. شکل ۳ دبی متوسط سالانه ۶۰ سال از سال ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۰ را نشان می‌دهد که در ایستگاه هیدرومتری کلاردشت در پایین‌دست رودخانه اندازه‌گیری شده است (IRWM, 2017). همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، روند تغییرات میزان دبی رودخانه با کاهش بارش‌ها به‌صورت کاهشی است.

۳- بررسی تصاویر ماهواره‌ای از وضعیت برف و یخ علم کوه در دو دهه گذشته

در این تحقیق از ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ از تصاویر LANDSAT-8 و قبل از ۲۰۱۳ از تصاویر LANDSAT-7 استفاده شد (ماهواره LANDSAT-8 در سال ۲۰۱۳ و ماهواره LANDSAT-7 در تاریخ ۱۹۹۰ به فضا پرتاب شدند). جدول ۲ نشان‌دهنده اطلاعات^۳ این تصاویر می‌باشد (USGS, 2016).

در این تحقیق، تصاویر ماهواره‌ای LANDSAT-8 و

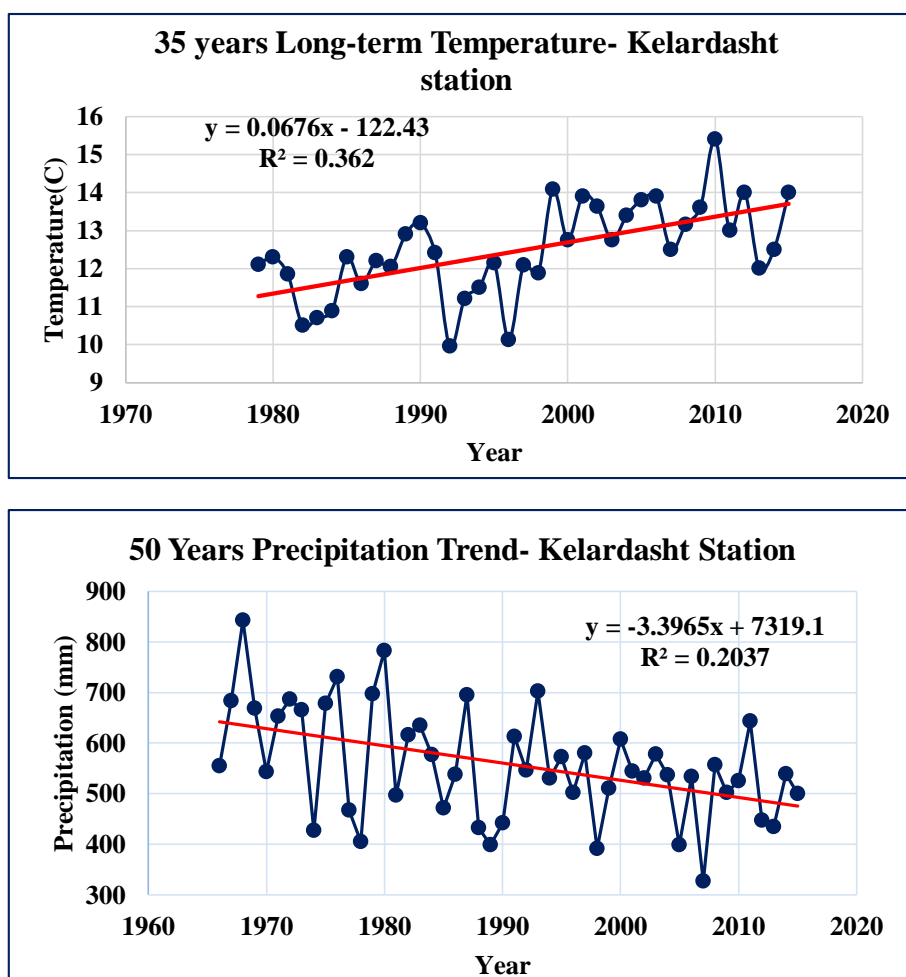


Fig. 2- Observation temperature and precipitation trends in Kelardasht station (1966-2015)
شکل ۲- روند افزایشی دما و کاهش مقدار بارش مشاهداتی در ایستگاه کلاردشت ۱۹۶۶-۲۰۱۵

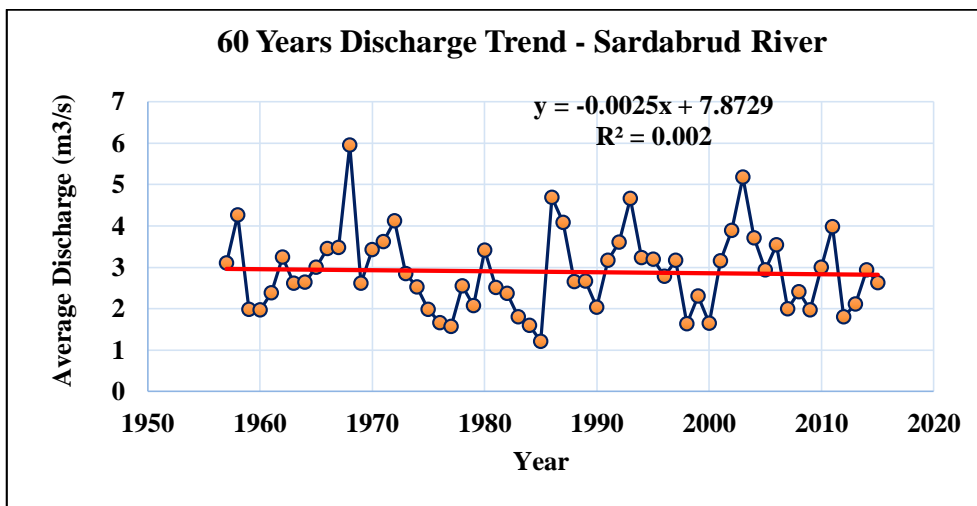


Fig. 3- Long term discharge trend (1957-2015) of Sardabrud river
 شکل ۳- روند دبی‌های بلندمدت (۱۹۵۷-۲۰۱۵) رودخانه سردآبرود

Table 2- Metadata of images
 جدول ۲- اطلاعات (Metadata) تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

Path & Row	Image Format	Bands Numbers	Projection System	Resolution	Satellite
Path165 Row- 035	GeoTiff	11	UTM 39 N	30 *30 m	LANDSAT-8
Path165 Row- 035	GeoTiff	8	UTM 39 N	30 *30 m	LANDSAT-7

- شناسایی و جدا نمودن سطح پوشیده از برف و یخ با حذف تمامی سطوح غیر از برف و یخ از تصویر و ایجاد یک لایه رستری که فقط حاوی کلاس سطح برف و یخ باشد؛
 - تهیه یک لایه پلیگنی از تصویر رستری برف و یخ در ArcGIS؛
 - محاسبه سطح و محیط لایه پلیگنی برف و یخ (لایه دارای سیستم تصویری (پروژکشن) می‌باشد).

۴- آنالیز نتایج و بحث

۴-۱- آنالیز تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر شکل ۴ مقایسه بارزی از تفاوت سطح یخچال پوشیده از برف و یخ را در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۰ در ماه‌های ژوئیه (تبر و مرداد) نشان می‌دهند که این کاهش بسیار قابل توجه است. لازم به توضیح است که این تصاویر با رنگ آمیزی مجازی^۶ می‌باشند. شکل ۵ مقایسه لایه‌های مختلف سطح برف و یخ یخچال در سال‌های مختلف در محیط ArcGIS را نشان می‌دهد.

شکل ۶ نمودار تغییرات سطح پوشش برفی و یخ یخچال علم‌کوه را از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ در ماه‌های گرم سال که دما افزایش داشته است

برای محاسبه سطح برف و یخ یخچال در این دوره زمانی با استفاده از کلاس‌بندی منطقه با روش غیر نظارت‌شده (Unsupervised) در برنامه پردازش تصویر از روش‌های محاسبه سطح با لایه‌های برداری^۴ پلیگنی در محیط GIS استفاده شد. مراحل انجام این محاسبات (پروسه) به شرح زیر می‌باشد:

بعد از دانلود تصاویر ماهواره‌ای با همه باندها از پایگاه داده‌های جغرافیایی ایالات متحده^۵ (USGS -Earth Explorer)، مراحل بدست آوردن سطح پوشیده از برف و یخ یخچال در برنامه آنالیز تصاویر مورد استفاده (مانند برنامه Image Analysis در ArcGIS) بصورت زیر انجام می‌شود:

- ساخت یک تصویر ترکیبی (کمپوزیت) از باندهای مورد نیاز (سبز، قرمز و آبی)؛
- برش تصویر از محدوده منطقه مورد مطالعه (Clip) علم‌کوه؛
- کلاس‌بندی تصاویر برای مشخص کردن نوع پوشش زمین. در این تحقیق از کلاس‌بندی غیر نظارت شده استفاده گردید که توسط برنامه آنالیز تصویر انجام می‌شود؛

۴-۲- اثرات تغییر اقلیم در آینده و انتخاب مدل GCM

برای ارزیابی خروجی‌های GCM از شبیه‌سازی دما و بارش در مقایسه با داده‌های تاریخی از آماره‌های شاخص تعیین (R^2)، خطای میانگین مجذور مربعات (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) و مقایسه آنها با یکدیگر استفاده شده است. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است تمام پنج مدل GCM دارای تخمین‌های قابل قبول شاخص RMSE، R^2 و MAE هستند. بین نتایج مدل‌ها، اختلاف معنی‌داری وجود ندارد، تمامی مدل‌ها می‌توانند به عنوان یک مدل مرجع برای استفاده در مرحله بعدی انتخاب شوند. با این حال همان‌طور که مقایسه نتایج خطاها نشان داده می‌دهد مدل‌های EC-EARTH و MIRO-5 مقادیر RMSE و MAE کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارا می‌باشند. با توجه به نظر (Deblas et al., 2018)، EC-EARTH یک مدل GCM اروپایی با عملکرد بالا برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی است. در این مقاله، نتایج مدل شناخته‌تر MIRO-C5 کشور ژاپن مورد مطالعه قرار گرفتند.

جدول ۵ اختلاف میانگین ماهانه بارش و دما را در دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۰) در مقایسه با دوره مشاهداتی برای مدل MIRO-C5 با سناریوی RCP8.5 نشان می‌دهد. بر اساس این مقایسه افزایش دما در تمامی ماه‌های سال در دوره‌های آینده با میانگین ۱ درجه سانتیگراد در تمامی ماه‌ها مشاهده می‌شود. از مقایسه دوره‌های مشاهداتی و آینده نتیجه‌گیری می‌شود که تغییرات آب و هوایی منجر به افزایش دما و کاهش بارش در ماه گرم سال یعنی ژوئیه (تیر و مرداد) شده است.

نشان می‌دهد. معادله خط رگرسیون با ضریب منفی $-۸/۲$ نشان دهنده روند کاهشی پوشش سطح برف و یخ یخچال می‌باشد که ناشی از افزایش دما و ذوب بیشتر یخ‌ها و کاهش بارش جامد در ماه‌های سرد سال به علت تغییرات اقلیمی می‌باشد که در بخش‌های بعدی مقاله به آن پرداخته خواهد شد. روند خط رگرسیون نشان می‌دهد سطح برف و یخ یخچال در طی دو دهه گذشته در ماه‌های تابستان به شکل معنی‌داری کاهش یافته است که این کاهش از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ و با محاسبه درصد کاهش از خط رگرسیون در شکل ۶، بالای ۶۰٪ می‌باشد.

برای معنی‌دار بودن مدل رگرسیونی آزمون‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به آزمون واریانس (ANOVA)، ضریب تعیین r^2 ، آزمون دوربین-واتسون، و آزمون هم خطی، آزمون نرمال بودن داده‌ها اشاره کرد (Naghetini, 2017). ضریب تعیین (R^2) که مقدار آن بین صفر و یک قرار دارد نشان‌دهنده این است که هرچقدر این مقدار به یک نزدیکتر باشد خطای حاصل از خط رگرسیون کمتر می‌باشد. با توجه به اینکه ضریب تعیین خط رگرسیون نمودار شکل ۶ برابر با $۰/۸۸$ شده است می‌توان نتیجه گرفت که خطای داده‌ها کم بوده و روند کاهشی معنی‌دار می‌باشد. در آزمون نرمال بودن داده‌های بدست آمده، از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده گردید (Levesque, 20017) و با بدست آوردن فرم منحنی سطوح محاسبه شده که از حالت نرمال تبعیت می‌کند (نمودار سمت راست در شکل ۶) معلوم می‌گردد که داده پرت و با خطای زیاد در محاسبات وجود ندارد. ضرایب چولگی (Skewness) برابر با $۰/۹$ و کشیدگی (Kurtosis) برابر با $۰/۱$ که هر دو در رنج $(-۲+۲)$ قرار دارند موید نرمال بودن داده‌ها می‌باشد.

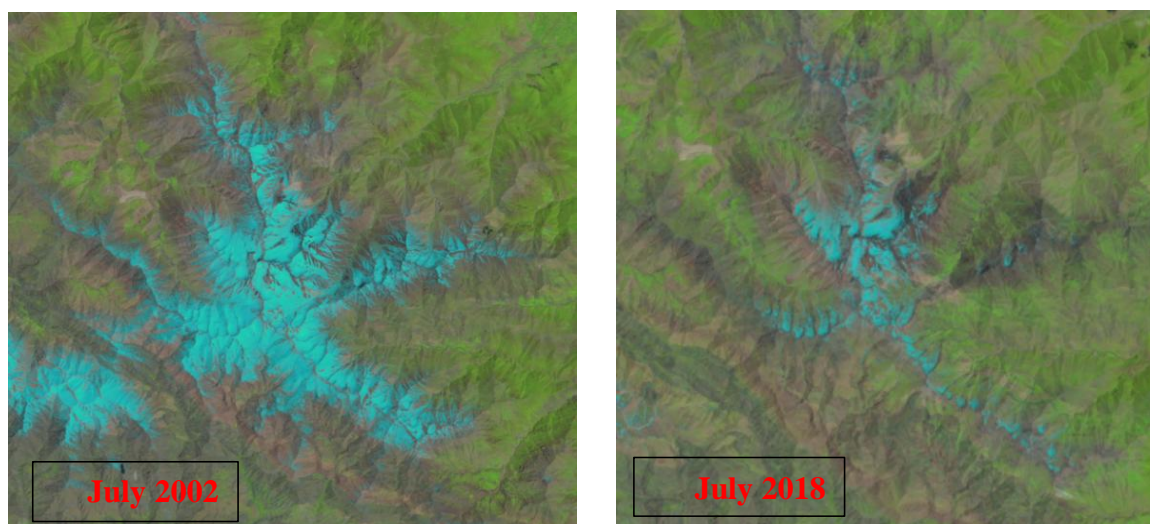


Fig. 4- Landsat-7 image of 2002 (left) and Landsat-8 image of 2018 (right)

شکل ۴- تصویر ماهواره‌ای LANDSAT-7 سال ۲۰۰۲ (چپ) و تصویر ماهواره‌ای LANDSAT-8 سال ۲۰۱۸ (راست)

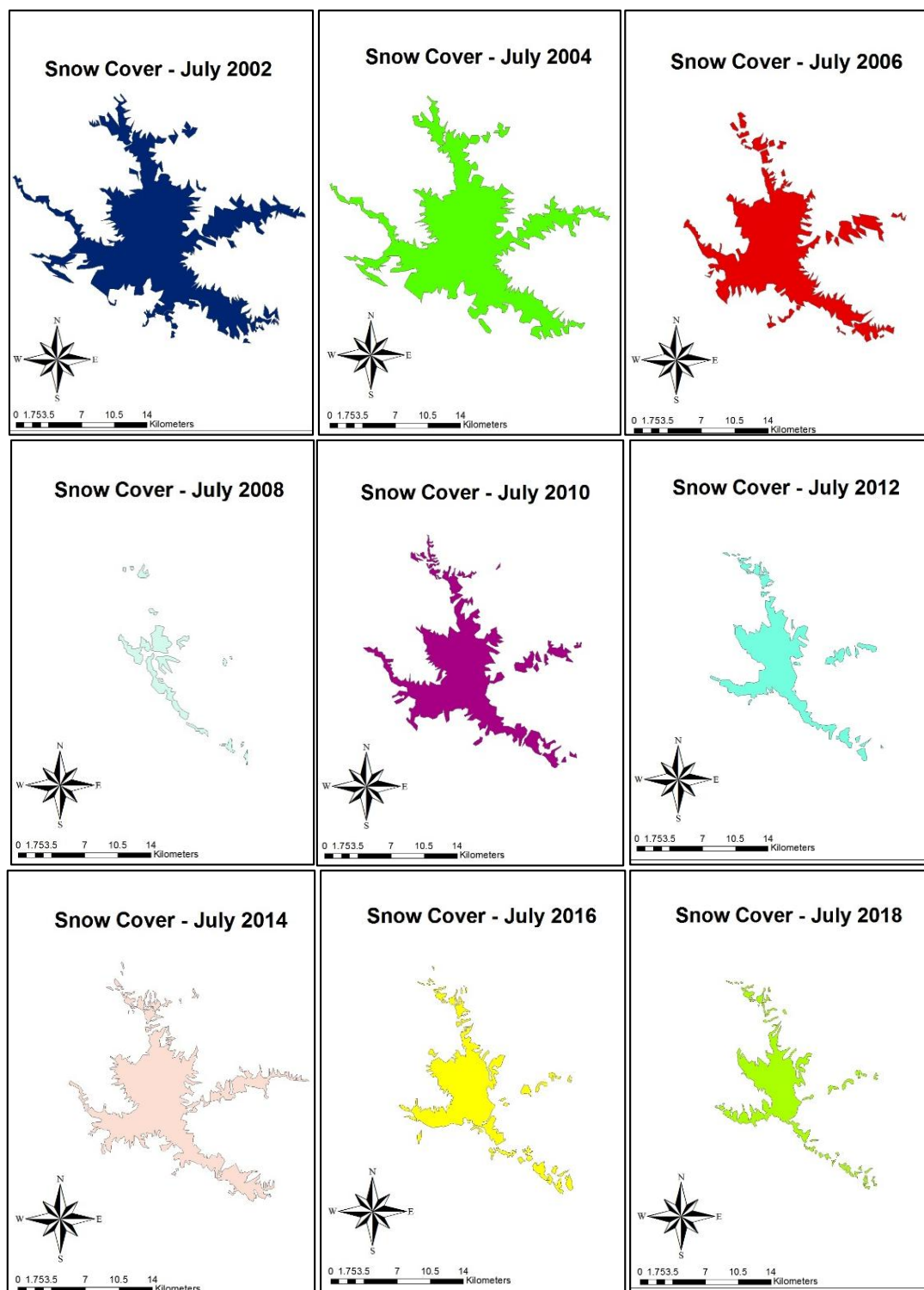
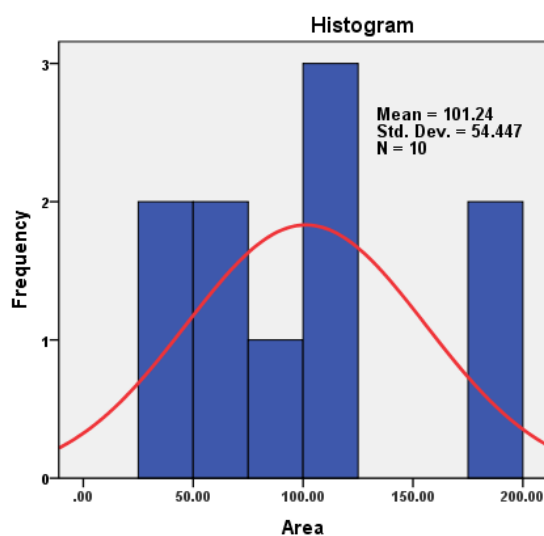
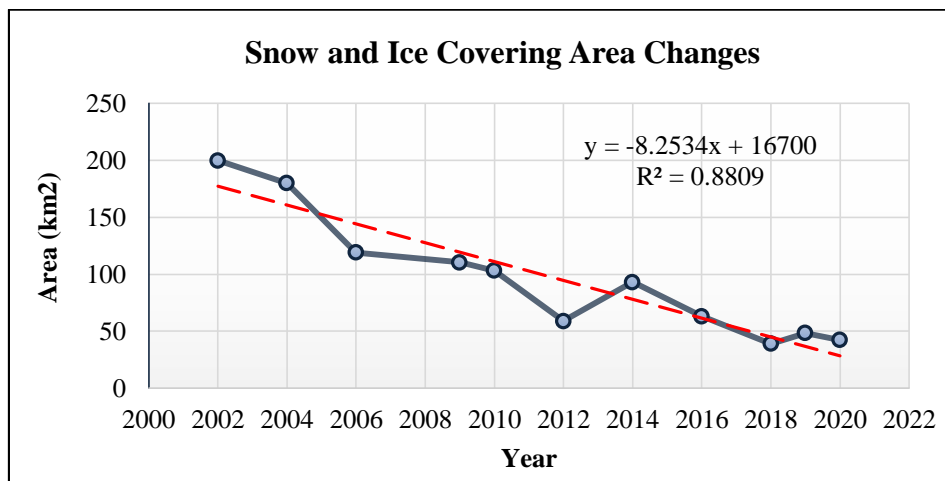


Fig. 5- Comparison of snow and ice areas- GIS layers of Alamkuh in different years (2002-2018)
شکل ۵- مقایسه لایه‌های پلگنی GIS سطح برف و یخ علم کوه در سال‌های مختلف (۲۰۱۸-۲۰۰۲)



Statistic	Value
N	10
Valid	10
Missing	0
Std. Error of Mean	17.21752
Std. Deviation	54.44658
Variance	2964.430
Skewness	.782
Std. Error of Skewness	.687
Kurtosis	-.273
Std. Error of Kurtosis	1.334
Range	160.86
Minimum	39.11
Maximum	199.97

Fig. 6- Decreasing trend of Alamkuh snow and ice cover
 شکل ۶- نمودار روند کاهش سطح برف و یخ علم کوه

Table 4- RMSE, R² and MAE coefficients for temperature and precipitation- outputs of GCM models
 جدول ۴- مقادیر RMSE، R² و MAE برای بارش و دمای خروجی مدل های GCM

Model	Precipitation			Temperature		
	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE
EC-EARTH	4.12	0.87	3.04	3.18	0.85	2.69
GFDL-CM3	10.57	0.914	9.08	4.33	0.88	3.37
HadGEM2	4.8	0.87	3.74	3.92	0.83	3.12
MIRO-C5	3.54	0.86	3.2	3.42	0.83	2.97
MPI-ESM-MR	7.2	0.88	5.6	3.83	0.82	3.22

Table 5- Comparison of monthly average of temperature and precipitation of RCP-8.5 scenario of MIRO-5 with observation data

جدول ۵- مقایسه مقادیر میانگین ماهانه دما و بارش توسط مدل MIRO-C5 (RCP8.5) با دوره مشاهداتی

Month	Temperature (C)			Precipitation (mm/month)		
	MIRO-C5	T observed	Temp. diff	MIRO-C5	P observed	Precip. diff
Jan	-4.07	-3.05	1.01	43.56	43.42	0.14
Feb	-3.65	-1.89	1.76	41.18	47.27	-6.09
Mar	0.30	1.33	1.03	56.04	55.59	0.45
Apr	6.57	7.60	1.03	51.22	51.26	-0.04
May	10.64	11.51	0.88	41.47	48.67	-7.20
Jun	14.73	15.19	0.47	17.33	17.42	-0.09
Jul	17.55	18.49	0.94	7.42	11.78	-4.36
Aug	17.10	17.93	0.83	12.39	10.31	2.08
Sep	13.87	15.18	1.31	11.25	12.25	-1.00
Oct	8.54	9.59	1.05	30.15	37.93	-7.78
Nov	3.05	3.96	0.91	46.11	50.47	-4.36
Dec	-1.61	-0.84	0.77	48.10	44.72	3.38

شکل ۷ نمودار داده‌های دمای ماهانه و شکل ۸ نمودار بارش ماهانه مدل‌های GCM مورد استفاده در این تحقیق را برای دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در مقایسه با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهند. دما در دو سناریوی مذکور بیشتر از دمای داده‌های مشاهداتی است و این نشان می‌دهد که دما در آینده افزایش خواهد یافت و بارش‌ها کاهش را نشان می‌دهند.

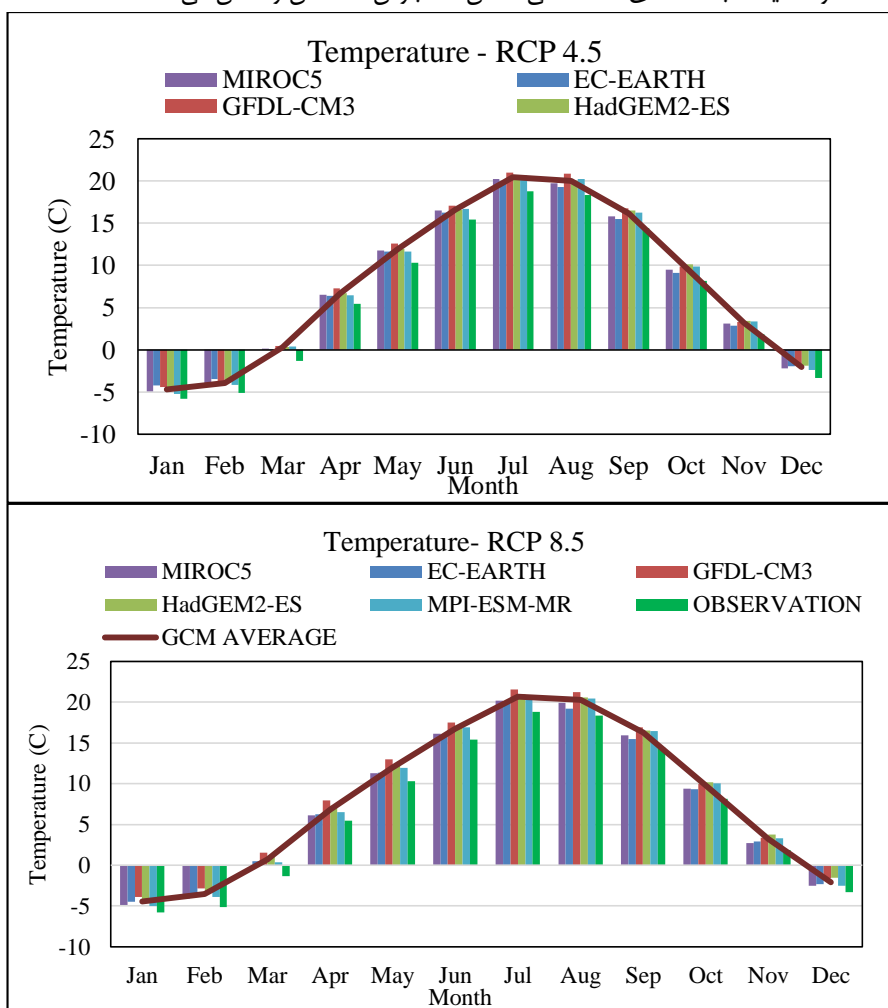


Fig. 7- Projected temperature for RCP-4.5 and RCP-8.5 of GCM models
 شکل ۷- دمای پیش‌بینی شده برای سناریوهای RCP-4.5 و RCP-8.5 مدل‌های GCM

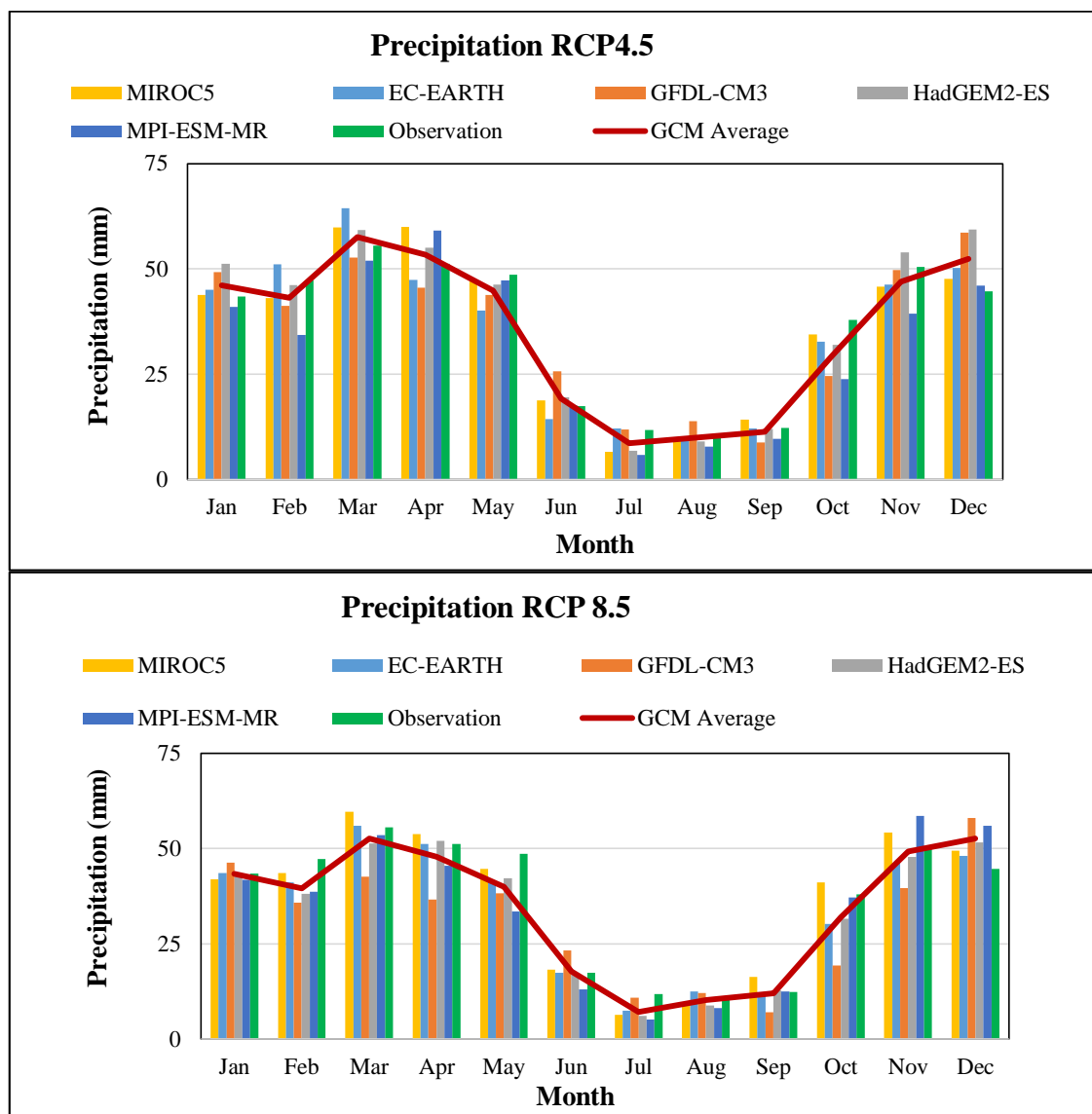


Fig. 8- Projected precipitation for RCP-4.5 and RCP-8.5 of GCM models
 شکل ۸- بارش پیش‌بینی شده برای سناریوهای RCP-4.5 و RCP-8.5 مدل‌های GCM

مجموع متوسط ماهانه بارش پیش‌بینی شده آینده در سال حدود ۴۰۶ میلی‌متر اما مجموع بارش‌های مشاهده‌شده در سال حدود ۴۳۱ میلی‌متر است. تفاوت بین این دو مقدار نشان‌دهنده کاهش ۶/۱ درصدی مقدار بارش در آینده است. جدول ۶ درصد تغییرات دما و بارش سالانه را بین دوره پایه و آینده نشان می‌دهد. شکل ۱۱ تفاوت مقادیر ماهانه دما و بارش بین دوره‌های مشاهده‌شده و آینده مدل MIRO-C5 را برای سناریوی RCP8.5 نشان می‌دهد.

با توجه به انتخاب مدل MIRO-5 برای محاسبه دما و بارش آینده علم کوه، این مقادیر بصورت متوسط ماهانه محاسبه شده که در شکل ۹ مقایسه متوسط دمای ماهانه مشاهده‌شده و متوسط دمای مدل MIRO-5 نشان داده شده است. همانطور که شکل ۹ نشان می‌دهد منحنی حاصل از مدل MIRO-5 (خط سبزرنگ) برای بارش در ماه‌های اول فصل‌های زمستان، بهار و تابستان پایین‌تر از منحنی حاصل از مقادیر مشاهده‌شده (خط قرمز رنگ) می‌باشد و فقط در پاییز بیشتر از مقادیر مشاهده‌شده است. همچنین، در شکل ۱۰ مشخص است که دمای متوسط ماهانه در آینده در کلیه ماه‌ها (خط سبز) بیشتر از دمای متوسط ماهانه مشاهده‌شده (خط قرمز) می‌باشد.

Table 6- Temperature and precipitation percentage difference of base data and future data

Temperature	Precipitation
$\Delta T = 9\%$	$\Delta P = -6\%$

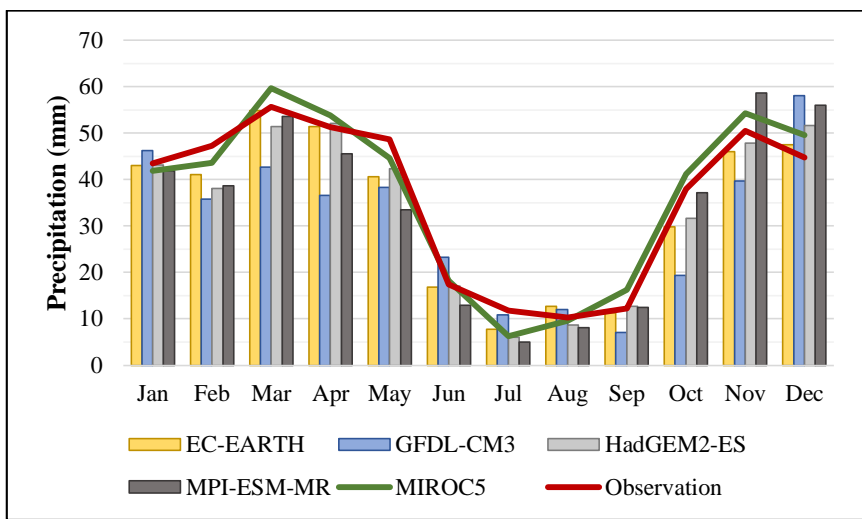


Fig. 9- Comparison of monthly average precipitation: observed with MIRO-5 model (RCP8.5: 2020-2040)

شکل ۹- مقایسه متوسط ماهانه بارش مشاهداتی و متوسط بارش مدل MIRO-C5 (RCP8.5: 2021-2040)

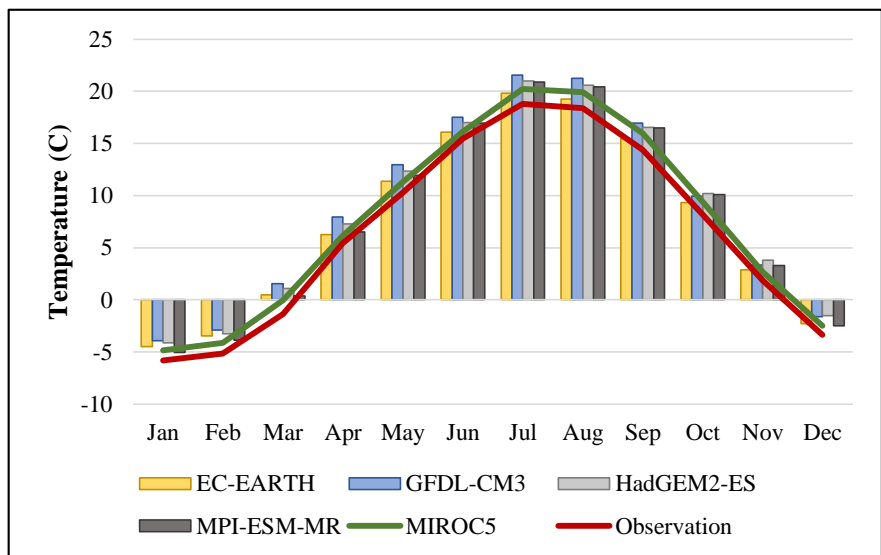


Fig. 10- Comparison of monthly average temperature: Observed with MIRO-5 model (RCP8.5: 2020-2040)

شکل ۱۰- مقایسه متوسط ماهانه دمای مشاهداتی و متوسط دمای مدل MIRO-C5 (RCP8.5: 2020-2040)

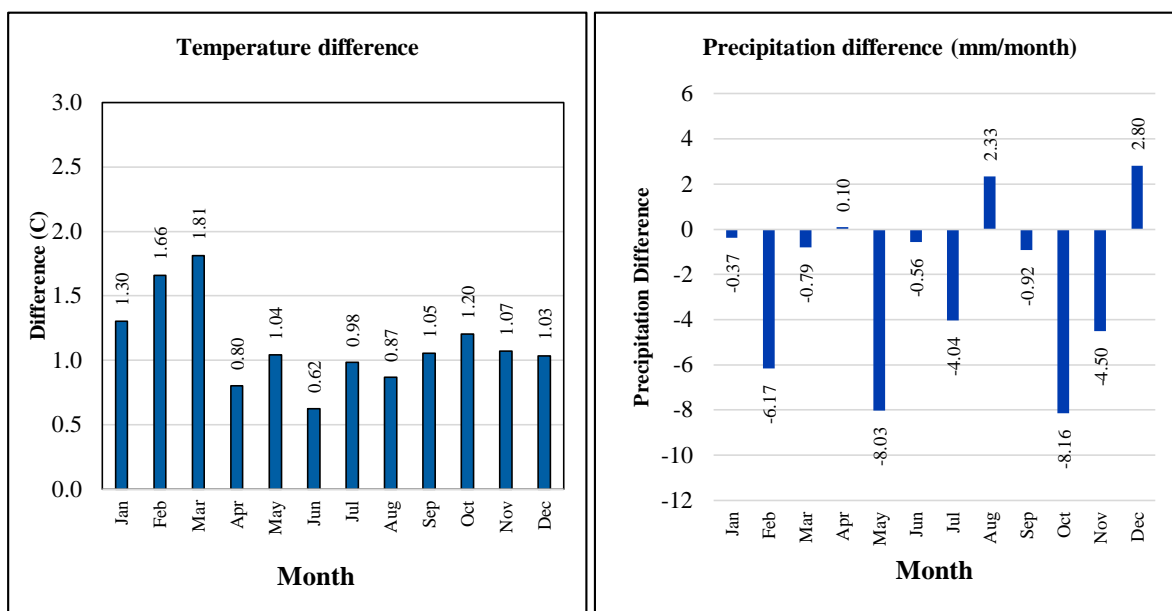


Fig. 11- Difference between monthly average of temperature and precipitation: Observed and future (MIRO-5 model, RCP8.5)

شکل ۱۱- تفاوت متوسط ماهانه دما و بارش: دوره مشاهداتی و آینده (مدل MIRO-C5:RCP8.5)

در حد ۶٪ (با مقایسه با داده‌های مشاهداتی تاریخی)، در دو دهه آینده تجربه خواهد کرد و نشان می‌دهد که در طول دهه‌های آینده همزمان با افزایش دما و متعاقباً افزایش تبخیر و تعرق، و کاهش بارش در منطقه حجم بیشتری از برف و یخ منطقه علم‌کوه ذوب شده و زوال تدریجی یخچال علم کوه را به‌خصوص در ماه‌های گرم سال به دنبال خواهد داشت که به‌شدت بر روی محیط‌زیست پایین‌دست و آب و هوای اطراف یخچال تأثیر خواهد گذاشت. نتایج این تحقیق با نتایج دیگر یخچال‌های جهان که شاهد زوال تدریجی یخ آنان می‌باشد، تطابق دارد و نشان‌دهنده وضعیتی است که ناشی از گرمایش جهانی و تغییر اقلیم می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- NASA
- 2- Change Factor (CF)
- 3- Metadata
- 4- Vector Layers
- 5- <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- 6- False Color
- 7- Coefficient of Determination

۵- نتیجه‌گیری

اثرات گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر یخچال‌های جهان به طرز بی‌سابقه‌ای در حال ذوب کردن یخ آنها می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که اکثر یخچال‌های بزرگ و مهم جهان تا آخر قرن بیست و یکم بیش از ۷۰٪ از حجم خود را از دست می‌دهند. اگرچه یخچال‌های ایران از نظر مقیاس جهانی کوچک هستند با این وجود نقش زیادی در منطقه‌ای که قرار گرفته‌اند از نظر منابع آب و رودخانه‌های پایین دست آنها به‌عهده دارند.

در این تحقیق، تصاویر LANDSAT-7 و LANDSAT-8 برای تعیین وضعیت پوشش برفی و یخ علم‌کوه در دو دهه گذشته مورد بررسی قرار گرفتند که مشخص شد پوشش برف و یخ علم‌کوه در حال کاهش تدریجی بوده و این وضعیت از شروع قرن بیست و یکم تا سال 2020 بیش از ۶۰٪ کاهش در سطح پوشش برف و یخ را نشان می‌دهد. همچنین رگرسیون داده‌های مشاهداتی بارش و دما در طی سه دهه گذشته نشان از روند افزایشی دما و روند کاهشی بارش در منطقه دارد.

نتایج این تحقیق، نشان می‌دهد که با استفاده از سناریوهای مدل‌های CMIP5 منطقه علم کوه افزایش دمایی در حد ۹٪ و کاهش بارشی

۶- مراجع

- Afshar N R, & Fahmi H (2019) Impact of climate change on water resources in Iran. *International Journal of Energy and Water Resources* 3(1):55-60
- Anandhi A, Frei A, Pierson D C, Schneiderman E M, Zion M S, Lounsbury D, and Matonse A H (2001) Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment. *Water Resources Research* 47(3):P.W03501
- Azizi A (1985) AlamKuh 4845. Kuh-Eski Press, pp. 96
- Bourdeau-Goulet SC and Hassanzadeh E (2021) Comparisons between CMIP5 and CMIP6 models: Simulations of climate indices influencing food security, infrastructure resilience, and human health in Canada. *Earth's Future* 9(5):p.e2021EF001995
- Castellazzi P, Burgess D, Rivera A, Huang J, Longuevergne L, and Demuth MN (2019) Glacial melt and potential impacts on water resources in the Canadian Rocky Mountains. *Water Resources Research* 55(12):10191-10217
- Chen J, Brissette FP, and Leconte R (2011) Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology* 401(3-4):190-202
- Dinpashoh Y, Jahanbakhsh-Asl S, Rasouli A A, Foroughi M, & Singh V P (2019) Impact of climate change on potential evapotranspiration (Case study: West and NW of Iran). *Theoretical and Applied Climatology* 136(1):185-201
- Haerberli W, Hoelzle M, Paul F, and Zemp M (2007) Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: The European Alps. *Annals of Glaciology* 46:150-160
- Heidari Tasheh S, Mofidi A, Heidari A (2019) Assessment of precipitation variation in west-north of Iran with GCM models. *Geography and Natural Hazards* 29(8):133-155 (In Persian)
- Huss M and Hock R (2018) Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change* 8(2):135-140
- Immerzeel WW, Pellicciotti F, and Bierkens M F P (2013) Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds. *Nature Geoscience* 6(9):742-745
- Ghasemi A, Habibi A, Maral A (2016) Assessment of rainfall variations in South Alborz region in future with CMIP5 models. *First Climate Change Conference Proceeding, Tehran*
- IPCC (2013) What is a GCM?. Data Distribution Center, http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- IPCC (2013) Climate Change 2013, The Physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Stocker, T. F., Qin, D.
- IPCC (2021) AR6 Climate Change 2021, The Physical science basis., At: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i>
- Iran Water Management Company (IWMC) (2017) Meteorology Kelardasht report. At: <https://www.wrm.ir/>
- Jasper K, Calanca P, Gyalistras D, and Fuhrer J (2004) Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Climate Research* 26(2):113-129
- Karimi N, farajzadeh M, Sharifi K (2015) Analysis of climate change impact on glacier by using remote sensing data (Case study: Alamkouh glacier). Ph.D. Thesis, Tarbiyat Moderess University, Tehran
- Karimi V, Karami E and Keshavarz M (2018) Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture* 17(1):1-15
- Kehrl LM, Hawley RL, Osterberg EC, Winski DA and Lee AP (2014) Volume loss from lower Peyto Glacier, Alberta, Canada, between 1966 and 2010. *Journal of Glaciology* 60(219):51-56
- Kim YH, Min SK, Zhang X, Sillmann J, Sandstad M (2020) Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes* 1(29):100269
- Levesque R (2007) SPSS programming and data management. A Guide for SPSS and SAS Users
- Lutz A F, Immerzeel WW, Shrestha AB, and Bierkens MFP (2014) Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change* 4(7):587-592
- McBride LA, Hope AP, Cauty TP, Bennett BF, Tribett WR, and Salawitch RJ (2020) Comparison of CMIP6 historical climate simulations and future projected warming to an empirical model of global climate. *Earth System Dynamics Discussions* 1-59
- Morid S, Hosseini Safa H (2013) the role of iran's glaciers on river flows and an estimate of their volumes. *Geographical Researches Journal* 28(3):17-32

- Naggettini M ed., (2017) Fundamentals of statistical hydrology. Switzerland: Springer International Publishing
- International Water Association (IWA) (2018) Urban drought forces Iran to seek resolution. <https://www.thesourcemagazine.org/urban-drought-forces-iran-to-see-resolution>
- NASA (2019) <https://earthobservatory.nasa.gov/images/145392/warm-weather-brings-major-melting-to-greenland>
- Shannon S, Smith R, Wiltshire A, Payne T, Huss M, Betts R, Caesar J, Koutroulis A, Jones D, and Harrison S (2019) Global glacier volume projections under high-end climate change scenarios. *The Cryosphere* 13(1):325-350
- Semenov MA, Barrow EM, and Lars-Wg A (2002) A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Man Herts UK. Titus, J.G. and Anderson, K.E., 2009. Coastal sensitivity to sea-level rise: A focus on the Mid-Atlantic region (Vol. 4). Climate Change Science Program
- Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, and Midgley PM (2014) Climate Change (2013), The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of IPCC the Intergovernmental Panel on Climate Change
- USGS (2016) Using the USGS Landsat8 product. US Department of the Interior-US Geological Survey–NASA
- Valdanzooj M, Rezaei Y, Vaziri F (2009) Assessment of Alamkuh glacier with satellite imagery. *Earth Science Journal* 18(70):2-13
- Water Research Institute (WRI) (2018) <http://wri.ac.ir>
- Wilby RL (2001) Downscaling summer rainfall in the UK from North Atlantic Ocean temperatures. *Hydrology and Earth System Sciences* 5(2):245–257
- World Meteorology Organization (WMO) (2019) <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-confirms-past-4-years-were-warmest-record>
- Wood AW, Leung LR, Sridhar V, and Lettenmaier DP (2004) Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change* 62(1-3):189-216
- Zierl B and Bugmann H (2005) Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. *Water Resources Research* 41:W02028