



بررسی روند متغیرهای اقلیمی مؤثر بر پوشش برف و آب معادل برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های زمینی در کوهستان سبلان - شمال غرب ایران

زهرا اصغرپور^۱، مهدی ثاقبیان^۲، کریم امینی نیا^{۳*}، علی پناهی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵

چکیده

آب حاصل از ذوب پوشش برف در مناطق کوهستانی به سبب تأخیر زمان ذوب و توزیع تدریجی رواناب نقش بسیار مهمی در درتأمین نیازهای آبی در طول ماه های بعدی دارد. در پژوهش حاضر با استفاده از سری تصاویرسنجنده لندست و داده‌های ایستگاه زمینی در طول دوره ۲۱ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰) روند تغییرات بیشینه و کمینه مساحت پوشش برف (SCA)، (SWE)، بارش، آب معادل برف (SWE)، نسبت برف به بارش و همچنین دمای کمینه، بیشینه، فصلی، ماهانه و متوسط سالانه هوا، و نیز رابطه تغییرات SCA و SWE با متغیرهای بارش و دما با روش رگرسیون چندگانه گام به گام مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که کمینه SCA (عمدتاً برای ماه آوریل) با نرخ سالانه ۱/۶۲ هکتار و در مجموع برای دوره مطالعاتی در حدود ۳۴ هکتار با روندی معنی دار (در سطح ۵ درصد) کاهش یافته است. علاوه بر آن در بین متغیرهای اقلیمی، دمای بیشینه فصل زمستان با نرخ سالانه حدود ۰/۱۲ درجه سانتی گراد طی دوره ۲۱ ساله در حدود ۲/۵ درجه سانتی گراد افزایش یافته است. نتایج مدل رگرسیونی نیز نشان داد که SAC بیشینه و کمینه علاوه بر متغیر SWE به ترتیب با دمای کمینه سالانه و دمای بیشینه ماه سپتامبر دارای ضریب همبستگی چندگانه (R) برابر با ۰/۶۷ و ۰/۶۴ می باشد. همچنین ضریب همبستگی چندگانه SWR با متغیرهای SWE، دمای بیشینه تابستان و دمای کمینه سالانه حدود ۰/۹۴ تعیین شد. در مجموع نتایج حاصله نشان داد که در ارتفاعات سبلان پوشش یخچالی به طور معنی داری کاهش یافته است. با توجه به نقش مهم رواناب حاصل از ذوب برف در تأمین نیاز آبی منطقه، ادامه این روند و کاهش ذخایر یخچالی در بلند مدت، مدیریت منابع آب متکی به برف در منطقه مورد مطالعه را با چالش جدی مواجه خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم، ارتفاعات سبلان، پوشش برف، منابع آب، من-کندال

مقدمه

کاهش جذب سطحی تابش خورشیدی تأثیر می‌گذارد و از این رو، بر اقلیم منطقه‌ای و جهانی از طریق فعل و انفعالات زمین و جو تأثیر می‌گذارد (Jiang et al., 2020). در مناطق مرتفع و کوهستانی آب قابل دسترس بیشتر به صورت نزولات جوی جامد^۷ تولید می‌شود و از آنجایی که این بارش‌ها در دوره‌های مرطوب سال اتفاق می‌افتد، بنابراین ذوب تدریجی

کوه‌ها به عنوان «نقاط داغ»^۵ آب و هوایی در نظر گرفته می‌شوند و تغییرات آن می‌تواند آنچه را که در جاهای دیگر اتفاق می‌افتد، پیش‌بینی یا تقویت کنند (Pepin et al., 2022). پوشش برف به دلیل آلوده^۶ بالا و رسانایی گرمایی پایین، به طور قابل توجهی بر میزان انرژی سطحی و شار حرارتی با

^۴ گروه جغرافیا، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

^۵ Hotspots

^۶ Albedo

^۷ Solid precipitation

^۱ گروه جغرافیا، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران.

^۲ گروه عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران.

^۳ گروه جغرافیا، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران.

(*) نویسنده مسئول: karimaminini@iaui.ac.ir

نحوه ارجاع مقاله:

اصغرپور، ز.، ثاقبیان، م.، امینی نیا، ک.، پناهی، ع. ۱۴۰۵. بررسی روند متغیرهای اقلیمی مؤثر بر پوشش برف و آب معادل برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های زمینی در کوهستان سبلان - شمال غرب ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۴(۱): ۳-۲۰. DOI: 10.22125/agmj.2026.501020.1178

Asgharpour, Z., Saghebian, M., Amininia, K., Panahi, A. 2026. Investigating the trend of changes in snow cover and water resources and the impact of climatic parameters on it using satellite images and ground data in Sabalan Mountains - Northwestern Iran. Journal of Agricultural Meteorology, 14(1): 5-19. DOI: 10.22125/agmj.2026.501020.1178

طیف وسیعی از بخش‌ها مفید باشد، اما اگر با رویدادهای شدید مثل سیلاب هم همراه نباشد، این اثرات مفید تنها در کوتاه‌مدت تا میان‌مدت امکان‌پذیر است و در بلندمدت با ذوب برف و یخچال‌های طبیعی، منابع آب کاهش می‌یابد (Latif et al., 2020). نقش ناهنجاری‌های اقلیمی در مقیاس بزرگ، به‌ویژه آن‌هایی که مربوط به لائینا هستند، در شکل‌گیری خشک‌سالی‌ها در خاورمیانه و در نتیجه خشک شدن و گرم شدن اقلیم منجر به کاهش آب معادل برف (SWE) و ذوب زودتر برف می‌شود (Barlow et al., 2016). به طور کلی با خشک شدن اقلیم، پیش‌بینی شده است که در آینده نسبت بارش برف به باران کاهش یافته که این امر به شدت بر روی کاهش رواناب تأثیرگذار خواهد بود (Newton et al., 2021; Tuel et al., 2022; Yao et al., 2022). در واقع با کاهش پوشش برف و کمبود آب ناشی از آن زندگی بیش از یک میلیارد نفر در سراسر جهان تحت تأثیر قرار خواهد داد (Faquseh and Grossi, 2024). بارش برف عمدتاً در ارتفاعات بالا و در مناطقی که دسترسی به آن با مشکلات و چالش همراه است، رخ می‌دهد، به همین سبب ساخت و نگهداری ایستگاه‌های هواشناسی نیز در این مناطق مرتفع دشوار است (Goodarzi et al., 2023). بنابراین به سبب کمبود داده‌های زمینی در این مناطق، در بسیاری از مطالعات از تصاویر ماهواره‌ای برای تعیین منطقه پوشیده از برف (SCA)^۲ و آب معادل برف (SWE) مربوط به آن استفاده شده است (Jiang et al., 2020; Tang et al., 2021; 2022; Hao et al., 2022; Stillinger et al., 2023; Largeron et al., 2020). یافته‌های محققان نشان می‌دهد که روند تغییرات منابع آب برف در مناطق و حوضه‌های آبخیز مختلف می‌تواند حتی در فواصل کوچک، بسیار متفاوت باشد (Smith and Yilmaz, 2020; Pulliainen, 2020; Bookhagen, 2020). چنان‌که (et al., 2019) با کاربرد تصاویر مودیس در خاور نزدیک، نشان دادند که مقادیر برف انباشت^۳ به ویژه در ارتفاعات بالاتر با روند معنی‌داری در حال کاهش است. نتایج پژوهش Olefs et al., (2020) در اتریش با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی حاکی از آن است که طی دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۰،

برف سبب کاهش دبی اوج رواناب فصلی شده و تأخیر در خروج آن از حوضه‌های آبخیز نقش ارزنده‌ای در تأمین آب و مدیریت آب دارد (Ahmadi et al., 2023). به طور معمول سهم ذوب برف در جریان رودخانه در حوضه‌های کوهستانی بر سایر منابع رواناب در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی غالب است (Shea et al., 2021) و علی‌رغم آن‌که معمولاً مناطق کوهستانی درصد مساحت کمتری از حوضه زهکشی رودخانه‌ها را در بر می‌گیرد، اما کاهش پوشش برفی در این مناطق به طور قابل ملاحظه‌ای میزان رواناب در پایین‌دست را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Bass et al., 2023). ذوب برف انباشته شده بخش بزرگی از دبی رودخانه و تأمین نیازهای انسان و اکوسیستم را به ویژه در فصل بهار و تابستان در پایین‌دست‌ها بر عهده دارد (Musselman et al., 2022; Tuel et al., 2022). در این مناطق برف مانند یک مخزن آب جامد طبیعی مهم برای توزیع مجدد منابع آب بین ماه‌ها عمل کرده (Qi et al., 2020) و ضمن تأمین نیاز آب آشامیدنی بیش از یک ششم جمعیت جهان از بخش‌های دیگر مانند تولید برق آبی، آبیاری و صنعت پشتیبانی می‌کند (Tang et al., 2022). تأثیر تغییرات اقلیمی انسانی در حال کاهش برف‌های فصلی در سطح جهان است و با توجه به اتکای طولانی مدت به برف در مدیریت آب، کاهش برف پیامدهای بالقوه فاجعه‌باری بر منابع آب دارد (Siirila-Woodburn et al., 2021). تغییرات دما و بارش نقش بسیار حیاتی بر منابع هیدرولوژیکی کوهستان دارد (Pepin et al., 2022). یخچال‌های طبیعی کوهستانی (HMG^۱) که برج‌های آبی جهان نامیده می‌شوند، در برابر اثرات تغییرات آب و هوایی آسیب‌پذیر بوده و بنابراین به سرعت در حال کوچک شدن هستند (IPCC, 2021; Liu et al., 2022; Nanni et al., 2023). به طوری که کاهش وسعت یخچال‌های کوهستان‌های آسیا در دهه‌های اخیر در نتیجه افزایش دمای تابستان مشاهده شده است (Bhattacharya et al., 2021). افزایش دما در آینده و تغییرات بارندگی هم بر تجمع برف و هم بر زمان و مقدار رواناب فصلی تأثیر می‌گذارد (Shea et al., 2021). با وجود آن‌که افزایش دما و در نتیجه افزایش جریان رواناب تابستانی، می‌تواند برای

³ Snowpack¹ High mountain glaciers² Snow-covered area

عمق برف (HS)^۱، مدت پوشش برف (SCD)^۲ و ساعات احتمالی برف‌انباشت (SP)^۳ فصلی (نوامبر تا آوریل) کاهش یافته است. (Notarnicola (2022) نیز در یک مطالعه با تصاویر ماهواره‌ای در مقیاس جهانی نشان داده است که طی دوره ۳۸ سال اخیر (۱۹۸۲-۲۰۲۰) سطح پوشش برفی $2/7 \pm 3/6$ درصد کاهش یافته است. (Smith and Bookhagen (2020) استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مناطق کوهستانی آسیا نشان دادند که از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۶ پوشش برفی غالباً دارای روند کاهشی بوده، در حالی که در مناطق قراقروروم^۴، هندوکش^۵ و کونلون شان^۶ دارای روندهای افزایشی بوده است. (Musselman et al., (2022 از روند افزایشی ذوب برف در فصل زمستان است که این امر موجب کاهش منابع آب برفی در مقیاس قاره شده است. (Altemimi et al., (2023 با کاربرد تصاویر لندست در سلیمانیه^۷ در شمال شرق عراق به این نتیجه رسیدند که پوشش برفی طی دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۲ به طور قابل توجهی کاهش یافته است. کاهش مداوم توده برف کوهستانی در خاور نزدیک تصویر تیره‌ای را برای دسترسی به آب در آینده در این منطقه تحت تنش آبی ترسیم می‌کند (Yilmaz et al., 2019). با توجه به این که پیش‌بینی می‌شود بارش برف در حوضه‌های آبخیز ایران طی دوره آبی کاهش خواهد یافت (Ahmadi et al., 2023) و یافته‌های برخی پژوهش‌ها حاکی از آن است که طی دهه‌های اخیر بارش جامد در برخی مناطق شمال غرب ایران دچار تغییرات است (Ostadi et al., 2021) و دمای منطقه نیز افزایش یافته است (Kazemzadeh and Malekian, 2018). بنابراین پایش تغییرات برف جهت مدیریت منابع آبی ضرورت دارد. در شمال غرب ایران نزولات جوی در فصول سرد سال بیش‌تر به صورت برف است. به دلیل وسعت مناطق کوهستانی در این نواحی، ذخایر برفی در طول سال ماندگار بوده و بنابراین مدیریت این ذخایر آبی جهت تأمین آب مصرفی (شرب، صنعتی و کشاورزی) ضروری است.

کوهستان سبلان (ساوالان در زبان ترکی)، کوه آتشفشانی خاموش در شمال غرب ایران است که در دهانه مخروطی آن دریاچه‌ای بسیار زیبا تشکیل شده که در طول سال پوشیده از برف و یخ می‌باشد. ارتفاعات این کوهستان نقش مهمی در تأمین آب رودخانه‌های پایین‌دست دارد، به طوری که (Goodarzi et al., (2023 با کاربرد تصاویر ماهواره‌ای مودیس و مدل بارش-رواناب SRM^۸ در حوضه آبخیز Ajichai در جنوب و جنوب شرقی کوهستان سبلان، نشان دادند که در ارتفاعات کمتر از ۲۰۰۰ متر، ذوب برف به طور متوسط تنها ۲۳ درصد از کل رواناب را تشکیل می‌دهد، این نسبت با ارتفاع افزایش می‌یابد، در حالی که در مناطق با ارتفاع بالای ۳۰۰۰ متر به ۸۷ درصد می‌رسد. (Mostafazadeh et al., (2024 با مطالعه رودخانه‌هایی که از کوهستان سبلان سرچشمه می‌گیرند، نشان داده است که رژیم هیدرولوژیکی و شاخص‌های جریان رودخانه‌های مورد مطالعه تحت تأثیر تغییرات بارش و دما تغییر کرده است. با توجه به این که تاکنون تغییرات پوشش برف و منابع آب برف (SWR)^۹ در کوهستان سبلان در دوره‌های زمانی گذشته، بررسی و مطالعه نشده است و همچنین ارتباط بین روند تغییرات پوشش برفی و SWR با روند تغییرات پارامترهای اقلیمی بارش و دما در این کوهستان ناشناخته بوده، بنابراین هدف از پژوهش حاضر این است که با کاربرد اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های زمینی ایستگاه هواشناسی، روند تغییرات پوشش برفی و SWR کوهستان سبلان و ارتباط آن با پارامترهای اقلیمی مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۵۷۴/۷۸ کیلومتر مربع در ارتفاعات کوهستان سبلان در شمال غرب ایران، قسمت مرکزی استان اردبیل در زون ۳۸ سیستم تصویر UTM^{۱۰} واقع

⁷ Sulaymaniyah

⁸ Snowmelt Runoff Model

⁹ Snow water resources

¹⁰ Universal Transverse Mercator

¹ Snow depth

² Snow cover duration

³ Potential snowmaking hours

⁴ Karakoram

⁵ Hindu Kush

⁶ Kunlun Shan

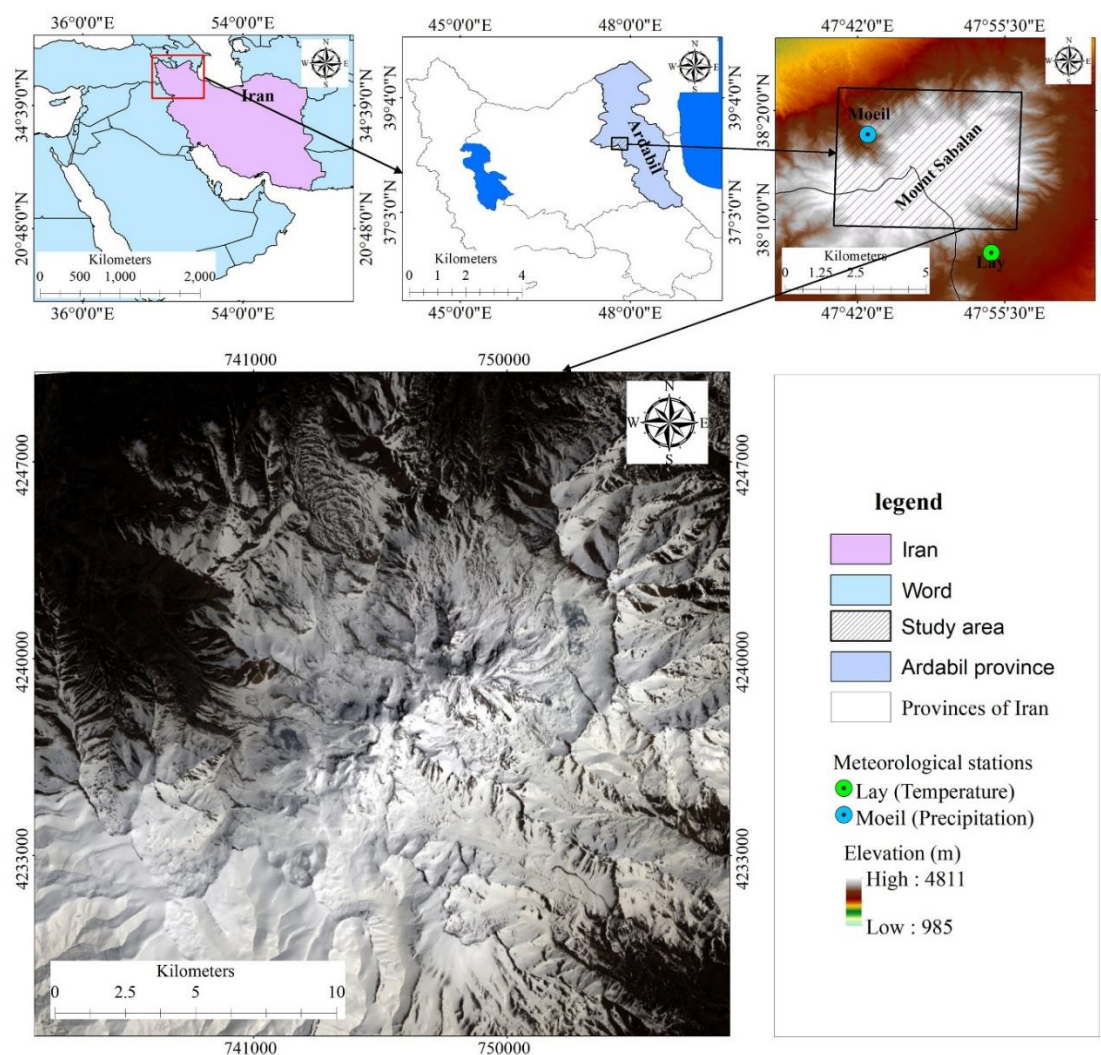
شده است (شکل ۱). کاربری غالب این منطقه مرتعی بوده که عمدتاً بهره‌برداران آن جوامع عشایری و روستایی منطقه است. منطقه مورد مطالعه در دامنه ارتفاعی ۴۸۱۱-۱۴۷۷ متر قرار داشته و ارتفاع متوسط آن در حدود ۳۰۴۹ متر است. شیب متوسط منطقه مورد مطالعه نیز ۳۳ درصد است. این منطقه از شرق به غرب به ترتیب از کوه‌های مهمی تشکیل شده که می‌توان به سه قله معروف سبلان بزرگ یا سلطان سبلان با ارتفاع ۴۸۱۱ متر، حرم یا حارام با ارتفاع ۴۶۱۲ متر و آغام یا کسری ۴۵۷۳ متر اشاره نمود. یخچال‌های سبلان بر اساس مطالعات (Schweizer 1970) در دامنه ارتفاعی ۴۷۰۰-۴۰۰۰ قرار گرفته است. ارتفاعات پایین‌تر غالباً ۵ ماه از سال دارای پوشش برفی می‌باشد که به مدد این ذخایر برفی قسمت عمده آب شرب و کشاورزی منطقه تأمین می‌شود. بسیاری از سرشاخه‌های رودخانه‌های مهم منطقه آذربایجان همچون بالغلی‌چای، نیرچای، خیاوچای و غیره از ارتفاعات سبلان سرچشمه می‌گیرد که نقش بسیار مهمی در تأمین منابع آب شرب و زراعی منطقه دارد. بر اساس اطلاعات ۲۱ سال (۲۰۲۰-۲۰۰۰) ایستگاه موئیل بارش سالانه حدود ۳۸۰ میلی‌متر است. اطلاعات ایستگاه لای (۲۰۲۰-۲۰۰۰) نیز نشان می‌دهد که مقدار متوسط، حداکثر و حداقل دمای سالانه به ترتیب ۸/۰۲، ۱۳/۲۵ و ۲/۷۸ درجه سانتی‌گراد است.

داده‌های مورد استفاده

ماهواره سری لندست با استفاده از حسگرهای ^۱TM، ^۲ETM+ و ^۳OLI از وضوح مکانی^۴ نسبتاً بالایی برخوردار بوده، بنابراین می‌تواند توزیع پوشش برف را به صورت یکپارچه ارائه دهد (Altemimi et al., 2023)، به طوری که در مقایسه با ماهواره مودیس برای نقشه برداری پوشش برف در مطالعات منطقه‌ای مناسب است (Donmez et al., 2021). بنابراین در پژوهش حاضر از اطلاعات باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای سری لندست ۸، ۷ و ۵ سطح ۱ استفاده گردید. تصاویر سری لندست به دلیل قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری و پهنای نوار ۱۸۵ کیلومتری و چرخه تکرار تصویربرداری ۱۶ روزه، منبع

قابل اعتمادی جهت بررسی تغییرات پوشش برف است و به دلیل دسترسی رایگان به آرشیو تصاویر لندست، این داده‌ها یکی از بهترین داده‌های ماهواره‌ای است که می‌تواند راه‌حل‌های قابل توجه در پیشرفت نقشه‌برداری پوشش برف فراهم کند. در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، انتخاب زمان مناسب تصاویر اخذ شده بسیار مهم می‌باشد. برف فصلی در کوهستان‌های بلند آسیا (HMA)^۵ از اکتبر تا مارس و آوریل انباشته می‌شود و به طور معمول در حدود آوریل به اوج خود می‌رسد و در ژوئیه تا اکتبر کاهش می‌یابد (Liu et al., 2021). بنابراین با مد نظر قرار دادن زمان حداکثر پوشش برف و ذوب شدن برف ارتفاعات سبلان، برای تهیه نقشه‌حداکثر پوشش برفی در ۲۱ سال متوالی (۲۰۲۰-۲۰۰۰)، به غیر از سال ۲۰۰۳، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۸ در تمامی ۱۶ تصاویر مربوط به ماه آوریل دریافت گردید و در ۵ سال ذکر شده به دلیل شرایط ابرناکی زیاد از تصاویر ماه مارس استفاده شد. برای نقشه‌برداری پوشش برفی دائمی یا یخچال به غیر از سال ۲۰۰۳، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹، ۲۰۱۱، ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ در تمامی ۱۴ سال تصاویر ماه سپتامبر به کار گرفته شد در ۷ سال مذکور هم به سبب ابرناک بودن شرایط جوی و هم وقوع بارش برف زودرس در ارتفاعات، از تصاویر ماه اوت استفاده شد تا تأثیر کمتری بر نتایج بگذارد. در مجموع ۴۲ تصویر سری لندست ۱۶ تصویر سنجنده OLI، ۱۴ تصویر ETM+ و ۱۲ تصویر TM با گذر^۶ ۱۶۷ و ردیف^۷ ۳۳ از سایت نقشه‌برداری زمین‌شناسی آمریکا (USGS)^۸ دریافت گردید. از نظر تئوری آب معادل برف (SWE) تخمینی از ارتفاع آبی است که اگر کل برف به طور آبی ذوب شود، مشاهده می‌شود (Elias et al., 2021; Fontrodona et al., 2023). در حالی که بازیابی وسعت پوشش برف از داده‌های ماهواره‌ای نسبتاً آسان است، بازیابی آب معادل برف (SWE) به ویژه در زمین‌های پیچیده کوهستانی، با تصاویر ماهواره‌ای اغلب نادرست است (Largerone et al., 2020). بنابراین در پژوهش حاضر اطلاعات بارش از جمله SWE از ایستگاه هواشناسی موئیل و برای پارامتر دما از ایستگاه لای استفاده شد.

⁵ High Mountain Asia⁶ Path⁷ Row⁸ The United States Geological Survey¹ Thematic Mapper² Enhanced Thematic Mapper Plus³ Operational Land Imager⁴ Spatial resolutions



شکل ۱- موقعیت کوهستان سبلان در شمال غرب ایران (ردیف بالا-چپ)، مرکز استان اردبیل (ردیف بالا-وسط) به همراه موقعیت ایستگاه‌های بارش و دما (ردیف بالا-راست)

Figure 1- Location of Sabalan Mountain in northwest Iran (top-left row), the center of Ardabil Province (top-middle row) along with the locations of precipitation and temperature stations (top-right row).

برف سالانه، دمای متوسط، حداقل، حداکثر در مقیاس سالانه، فصلی و به صورت ماهانه از این ایستگاه استخراج شد. جهت کنترل کیفیت داده‌های پارامترهای اقلیمی برداشت‌شده، از نظر وجود داده‌های پرت و مشکوک، همگنی و تصادفی بودن مورد آزمون قرار گرفت. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار SPSS، آزمون همگنی و تصادفی بودن و استقلال داده‌ها، به ترتیب با روش غیر نموداری ران تست و آزمون ناپارامتری من-ویتنی مورد بررسی قرار گرفت.

این ایستگاه‌ها نزدیکترین ایستگاه‌های به کوهستان سبلان است که در ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متری دامنه سبلان تاسیس شده‌اند. ایستگاه باران‌سنجی موئیل در موقعیت طول جغرافیایی $47^{\circ} 33' 28''$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 23' 17''$ و در ارتفاع ۲۲۰۰ متری از سطح دریا، در شمال غربی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. ایستگاه لای در طول جغرافیایی $47^{\circ} 54' 27''$ و عرض جغرافیایی $38^{\circ} 6' 55''$ و در ارتفاع ۲۰۳۸ متری از سطح دریا در جنوب شرقی و به فاصله ۴ کیلومتر از محدوده مورد مطالعه واقع شده است (شکل ۱). در پژوهش حاضر پارامترهای اقلیمی بارش سالانه، آب معادل

۰/۳۲ انتخاب شد. قبل از محاسبه NDSI، خطاهای اتمسفری، هندسی و رادیومتری تصاویر ماهواره‌ای دریافت شده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که غالب تصاویر دریافتی دارای سیستم مختصات بود، بنابراین نیازی به تصحیح هندسی نبود. جهت تصحیح رادیومتریکی، مقادیر DN^3 تصویر به تابش^۴ کالیبره شد و با استفاده از ماژول^۵ FLAASH تصحیح اتمسفری گردید. یکی دیگر از مسائل چالش برانگیز در مرحله پیش پردازش تصاویر سنجنده ETM^+ تصحیح خطای نوارهای سیاه (گپ یه خطوط نوارشدگی) می باشد که با نام SLC^y-off مشهور هست. به منظور رفع این خطا از افزونه Landsat Gapfill در محیط نرم افزار ENVI 5.3 استفاده گردید.

منابع آب برف (SWR)^۸

پس از محاسبه شاخص NDSI، نقشه پوشش برف (SCA) طی ۲۱ سال تهیه شد. مقادیر ارتفاع آب معادل برف (SWE) سالانه نیز از ایستگاه موئیل استخراج شد. با کسر مساحت پوشش برفی ماه اوت و سپتامبر از مساحت پوشش برفی ماه مارس و آوریل مساحت پوشش برفی که طی فصل گرما ذوب و به رواناب تبدیل شده به دست آمد. به این ترتیب با تعیین مساحت پوشیده برفی ذوب شده (SCA) و ضرب آن در ارتفاع آب معادل برف (SWE) مقادیر حجم آب برف (SWR) از طریق معادله ۲ محاسبه شد.

$$SWR = SCA \times SWE \quad (2)$$

که در آن SCA و SWE به ترتیب مساحت برف و ارتفاع آب معادل حسب متر، SWR حجم آب حسب متر مکعب می باشد.

بررسی روند تغییرات پارامترها

به منظور بررسی روند تغییرات پارامترهای، بارش، دما، NDSI و SWE از آزمون من-کندال^۹ استفاده شد. این آزمون روند افزایشی یا کاهشی یکنواخت را در داده های مناطق مورد مطالعه از نظر آماری مورد بررسی قرار می دهد (Asfaw et al., 2018). این آزمون توسط Mann (1945) ارائه گردید و

شاخص پوشش برفی نرمال شده (NDSI)^۱

برف را می توان با استفاده از شاخص NDSI از سطوح دیگر متمایز کرد (Dozier et al., 1989). زیرا برف در طول موج کوتاه مادون قرمز ($SWIR^2$) بسیار جذب کننده (بازتاب کم) و در طول موج های مرئی (VIS) بسیار بازتابنده است (Stillinger et al., 2023). بنابراین NDSI از طریق تفاوت بازتاب یک باند مرئی (معمولاً سبز) و باند مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) با تقسیم بر بازتاب کل دو باند طبق معادله ۱ محاسبه می شود (Tong et al., 2020; Poussin et al., 2023).

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \quad (1)$$

مقدار NDSI از -۱ تا +۱ متغیر است و از نظر تئوری مقادیر بالاتر از صفر، وجود برف را نشان می دهد (Poussin et al., 2023). مقدار آستانه بهینه NDSI در منابع مختلف بیش از ۰/۱ تا بیش از ۰/۴ عنوان شده است که توجه با انواع پوشش زمین متفاوت می باشد، بنابراین استفاده از یک مقدار ثابت ممکن است منجر به عدم قطعیت قابل توجهی شود (Hao et al., 2022). چنان که از نظر تئوری مقادیر NDSI از صفر (مثلاً جنگل های پوشیده از برف) تا ۱ (مثلاً، دشت پوشیده از برف) متفاوت است (Riggs et al., 2015). در شرایط بدون ابری و زاویه ارتفاع بالای خورشید، مقادیر NDSI بالاست و در شرایطی که برف در سایه قرار گرفته باشد، مقادیر NDSI کاهش می یابد (Da Ronco et al., 2020). پوشش ابری اساساً قابلیت سنجنش از دور نوری برای نقشه برداری پوشش برف را در مناطق کوهستانی کاهش می دهد، چرا که ابرها مقادیر NDSI مثبت دارند که معمولاً از ۰/۴- تا ۰/۴+ متغیر است (Stillinger et al., 2019). بنابراین بهترین آستانه NDSI ممکن است بسته به شرایط منظر، عمق برف و فصل متفاوت بوده و ضرورت دارد که با دقت با توجه به منطقه مورد مطالعه انتخاب شده تا دقت نقشه برداری پوشش برف بهبود یابد (Poussin et al., 2023). به همین سبب در پژوهش حاضر با آزمون و خطا، مقادیر بهینه آستانه NDSI برای ماه های مارس و آوریل در حدود ۰/۱۵ و برای ماه سپتامبر و اوت در حدود

⁶Fast Line of sight Atmospheric Analysis of Spectral Hyper cubes

⁷ Scan Line Corrector

⁸ Snow water resources

⁹ Mann-Kendall

¹ Normalized Difference Snow Index

²Shortwave infrared

³Digital Numbers

⁴Radiance

⁵Module

است که جهت نرمال بودن داده‌ها از آزمون کلموگراف-اسمیرنوف^۴ و همراستایی چندگانه متغیرها از عامل تورم واریانس (VIF^۵) استفاده گردید.

نتایج و بحث

روند تغییرات بارش و برف

پس از پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای و محاسبه NDSI و اعمال آستانه بهینه مساحت پوشش برفی ماه‌های مارس و آوریل (حداکثر پوشش برفی) و ماه‌های اوت و سپتامبر (ذوب حداکثری پوشش برفی) طی ۲۱ سال (۲۰۲۰-۲۰۰۰)، محاسبه شد. در شکل ۲ نقشه پوشش برفی ماه آوریل در چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۷، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده متوسط مساحت پوشش برفی ماه آوریل طی ۲۱ سال در حدود ۳۲۲۹۶ هکتار بوده که بیش‌ترین وسعت آن با ۴۸۴۹۱ هکتار مربوط به سال ۲۰۰۳ و کمترین آن با ۱۱۸۱۵ هکتار مربوط به سال ۲۰۰۸ می‌باشد. در شکل ۳ نقشه پوشش برفی ماه‌های اوت و سپتامبر در ۸ مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۲، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ با بزرگنمایی مناسب نشان داده شده است. نتایج حاصله نشان داد که مقدار متوسط پوشش برفی (عمدتاً یخچال) طی ۲۱ سال در ماه‌های مذکور در حدود ۳۴ هکتار بوده که بیش‌ترین وسعت با ۷۲ هکتار مربوط به سال ۲۰۰۰ و کمترین آن با ۸ هکتار مربوط به سال ۲۰۱۸ است. بارش متوسط طی ۲۱ سال در منطقه مورد مطالعه ۳۸۰ میلی‌متر بوده که از این مقدار حدود ۹۱ میلی‌متر (۲۴ درصد) را آب معادل برف (SWE) به خود اختصاص داده است. طی این مدت متوسط منابع آب برفی در منطقه مورد مطالعه حدود ۳۱ میلیون متر مکعب بوده که بیش‌ترین مقدار آن با ۷۹ میلیون متر مکعب مربوط به سال ۲۰۰۳ و کمترین آن با مقدار ۶ میلیون متر مکعب مربوط به سال ۲۰۰۹ می‌باشد.

سپس در سال ۱۹۶۶ توسط Kendall توسعه یافت (Kendall, 1975) و در همان سال‌ها مورد توجه سازمان هواشناسی جهانی (WMO^۱) قرار گرفت (da Silva et al., 2015). مقادیر مثبت و منفی Z در این آزمون به ترتیب نشان دهنده افزایش و کاهش روند است (Huang et al., 2017). این آزمون بر مبنای مقایسه فرض صفر و یک بوده و در نهایت در مورد پذیرش و یا رد فرض صفر، تصمیم‌گیری می‌نماید. فرض صفر این آزمون مبتنی بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها است و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. بنابراین چنانچه مقدار p-value پایین (معمولاً $>0/05$) نشان دهنده روند آماری معنی‌دار (افزایش یا کاهش) است، در حالی که مقدار p-value بزرگتر از $0/05$ به معنای آن است که روند تغییرات معنی‌داری نیست (Faquseh and Grossi, 2024). در آزمون من-کندال شیب خط روند سری داده‌ها با روش تخمین گر سن^۲ مورد محاسبه قرار داده می‌شود که توسط Thiel (1950) و Sen (1968) ارائه شده است. در واقع برآوردگر شیب سن یک روش آماری برای تخمین شیب یک رابطه خطی بین دو متغیر می‌باشد (Faquseh and Grossi, 2024). در این بررسی جهت محاسبه آزمون من-کندال و شیب سن از افزونه XLSTAT در محیط برنامه Excel استفاده گردید.

رابطه بین روند تغییرات پارامترهای اقلیمی و پوشش برف

به منظور بررسی رابطه بین روند تغییرات پارامترهای اقلیمی و پوشش برف و منابع آب برف (SCA و SWR)، تغییرپذیری سری زمانی پارامترهای دما و بارش با تغییرپذیری سری زمانی SCA و SWR با تحلیل رگرسیون چندگانه، تجزیه و تحلیل شد. در رگرسیون چندگانه، رابطه خطی بین مجموعه متغیرهای مستقل اقلیمی (دما و بارش) با متغیر وابسته (SCA و SWR) مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از رگرسیون گام‌به‌گام^۳ استفاده گردید. لازم به ذکر

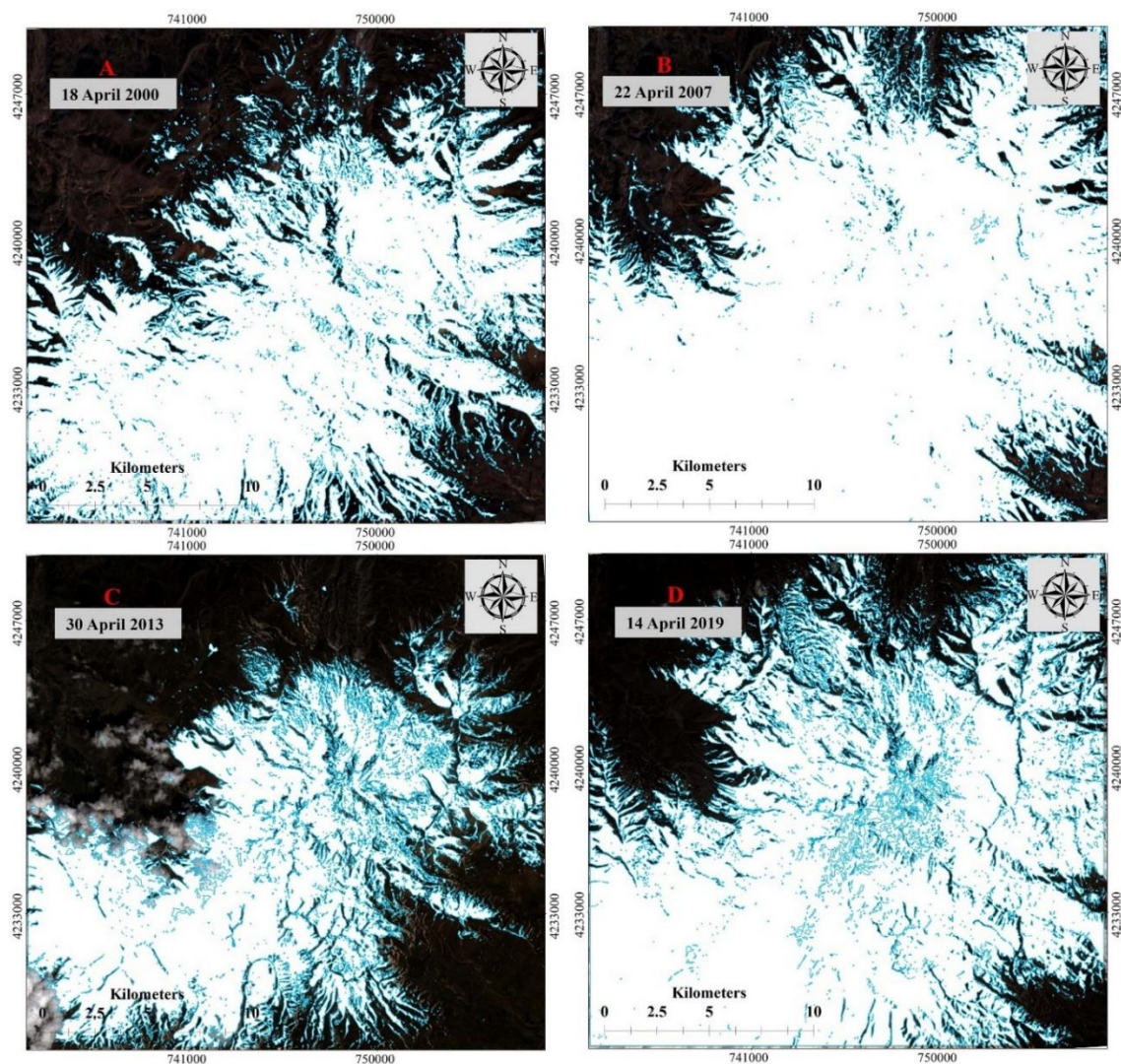
^۴ Kolmogorov-Smirnov

^۵ Variance Inflation Factor

^۱ World Meteorological Organization

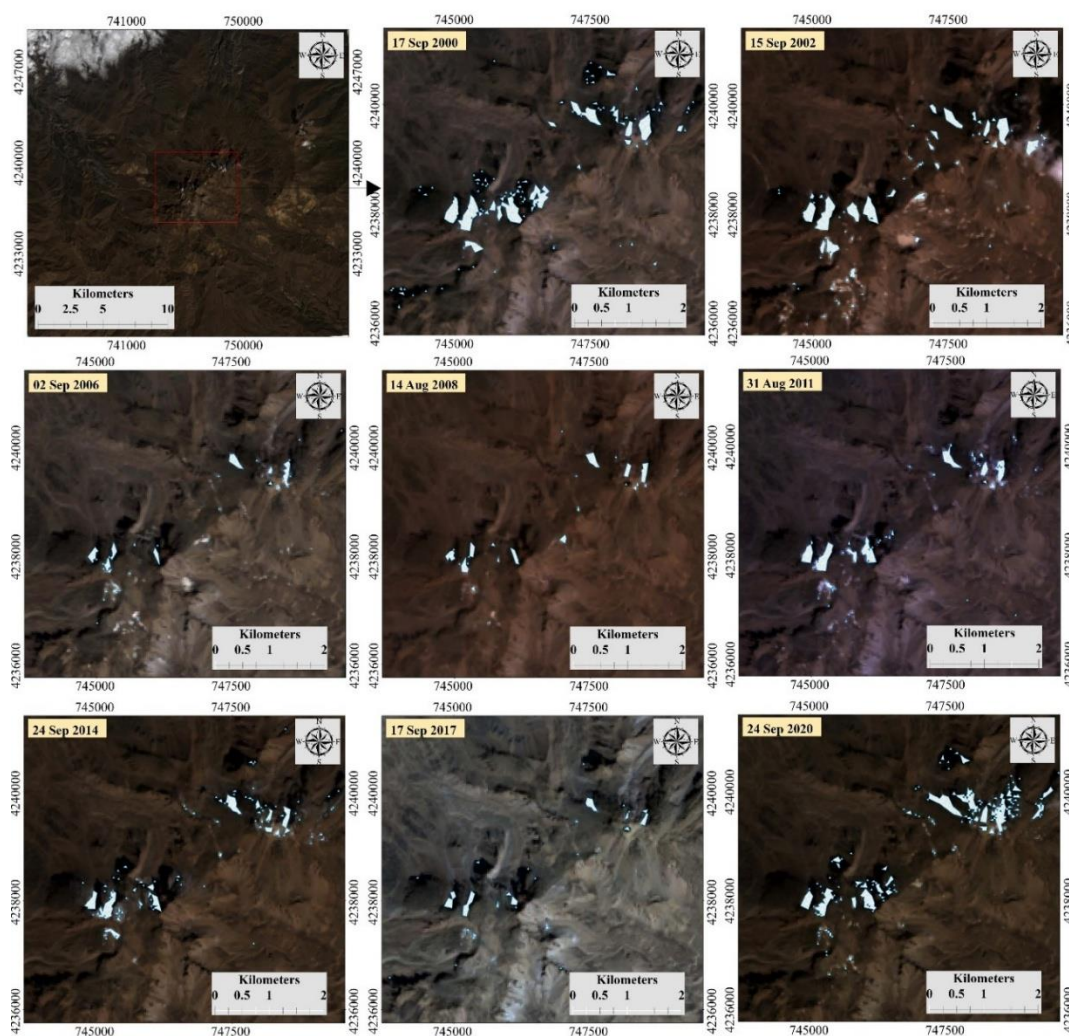
^۲ Sen's estimator

^۳ Step Wise



شکل ۲- پوشش برفی (SCA) ماه آوریل در چهار مقطع زمانی سال‌های ۲۰۰۰ (ردیف بالا-چپ)، ۲۰۰۷ (ردیف بالا-راست)، ۲۰۱۳ (ردیف پایین-چپ) و ۲۰۱۹ (ردیف پایین-راست)

Figure 2 - Snow cover (SCA) in April in four time periods: 2000 (top-left row), 2007 (top-right row), 2013 (bottom-left row) and 2019 (bottom-right row)



شکل ۳- منطقه مورد مطالعه (ردیف بالایی-چپ)، پوشش برفی (SCA) ماه‌های اوت و سپتامبر در هشت مقطع زمانی سال‌های ۲۰۰۰ (ردیف بالایی-وسط)، ۲۰۰۲ (ردیف بالایی-چپ)، ۲۰۰۶ (ردیف میانی-چپ)، ۲۰۰۸ (ردیف میانی-وسط)، ۲۰۱۱ (ردیف میانی-راست)، ۲۰۱۴ (ردیف پایین-چپ)، ۲۰۱۷ (ردیف پایین-وسط) و ۲۰۱۹ (ردیف پایین-راست)

Figure 2- Study area (top-left row), snow cover (SCA) in August and September in eight time periods: 2000 (top-middle row), 2002 (top-left row), 2006 (middle-left row), 2008 (middle-middle row), 2011 (middle-right row), 2014 (bottom-left row), 2017 (bottom-middle row) and 2019 (bottom-right row)

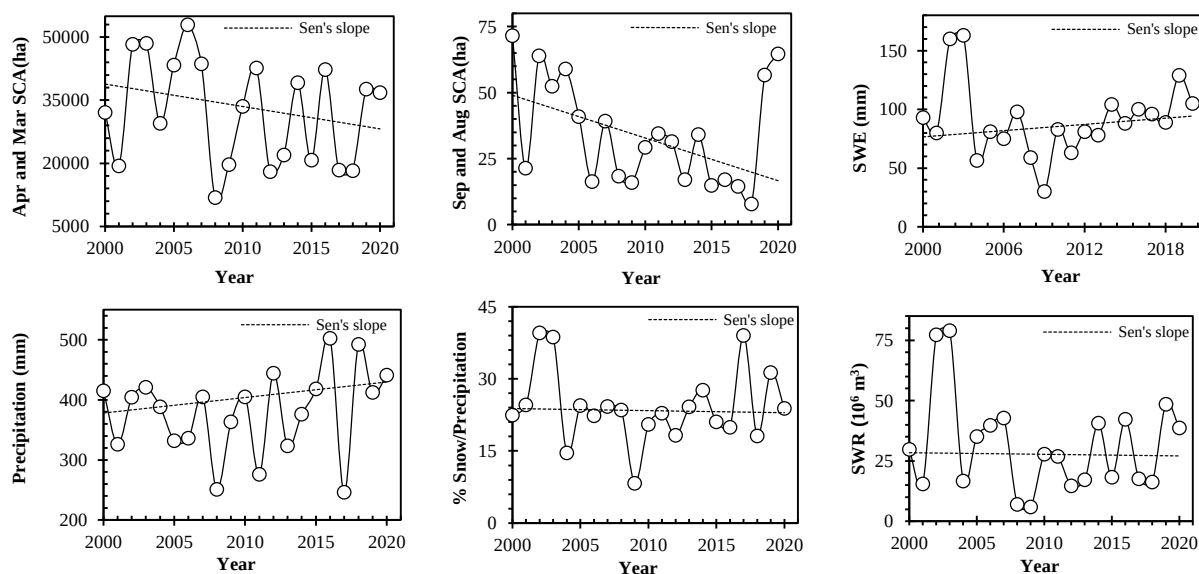
از پارامتر پوشش برفی ماه اوت و سپتامبر، سایر پارامترهای داری روند کاهشی یا افزایشی معنی‌دار در سطح ۵ درصد نبود، اما همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، شیب سن پوشش برف ماه مارس و آوریل کاهش یافته، در حالی که شیب سن پارامتر آب معادل برف (SWE) و بارش دارای اندکی افزایش است. در شیب سن نسبت برف به بارش و منابع آب برف (SWR) روند کاهشی و افزایشی قابل ملموسی مشاهده نمی‌شود.

بررسی روند تغییرات پوشش برفی حداکثر و حداقل (SCA)، بارش، آب معادل برف (SWE) نسبت برف به باران و منابع آب برفی (SWR) در ۲۱ سال اخیر نشان داد که تنها پوشش برفی حداقل (ماه‌های اوت و سپتامبر) طی این دوره با p -value حدود ۰/۰۳۲ در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ دارای روند کاهشی است، به طوری که سالانه با نرخ ۱/۶۲ هکتار کاهش یافته و در مجموع ۲۱ سال از وسعت مناطق برفی و یخچالی ۳۴ هکتار کاسته شده است (جدول ۱). اگر چه غیر

جدول ۱- آماره‌های آزمون من-کندال و شیب سن NDVI

Table 1- Mann-Kendall test statistics and NDVI Sen slope

Parameter	Mann-Kendall statistic (Z)	Sen slope (β)	p-value
March and April snow cover	-0.190	-534.245	0.239
August and September snow cover	-0.343	-1.616	0.032
Precipitation	0.167	2.578	0.304
Snow water equivalent (SWE)	0.205	0.898	0.204
Snow to precipitation ratio	-0.095	-0.044	0.566
Snow water resources (SWR)	-0.019	-0.068	0.928



شکل ۴- روند تغییرات پارامترهای مساحت پوشش برفی (SCA) مارس و آوریل (خط بالایی-چپ)، SCA اوت و سپتامبر (خط بالایی-وسط)، (آب معادل برف) SWE (خط بالایی-راست)، بارش (خط پایینی-چپ)، نسبت برف به بارش (خط پایینی-وسط) و منابع آب برف (SWR) (خط پایینی-راست)

Figure 3 - Trend of changes in parameters of snow cover area (SCA) in March and April (top-left line), SCA in August and September (top-middle line), (snow water equivalent) SWE (top-right line), precipitation (bottom-left line), snow to precipitation ratio (bottom-middle line) and snow water resources (SWR) (bottom-right line)

درجه سانتی‌گراد بوده است. بنابراین طی دوره ۲۱ ساله دمای حداکثر فصل زمستان حدود ۲/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. در بین پارامترهای مورد بررسی پس از حداکثر دمای زمستان، پارامتر دمای حداقل ماه مارس با مقدار p -value حدود ۰/۵۳ به مقدار معنی‌داری ۵ درصد آستانه ($p\text{-value} > 0/05$) نزدیک است. بنابراین می‌توان عنوان کرد که حداقل دمای ماه مارس نیز در سطح اطمینان ۹۰ درصد (معنی‌داری ۱۰ درصد)، با نرخ سالانه (شیب سن) ۰/۰۴۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و طی ۲۱ سال مورد مطالعه در حدود ۱ درجه سانتی‌گراد با افزایش مواجه شده است.

روند تغییرات دما

روند تغییرات دمای حداکثر، حداقل و متوسط سالانه، فصل بهار، تابستان و زمستان و همچنین ماه‌های مارس، آوریل، اوت و سپتامبر در طول دوره آماره ۲۱ سال با آزمون من-کندال مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (جدول ۲). نتایج نشان داد که فقط پارامتر دمای حداکثر زمستان با p -value حدود ۰/۰۵ در طول دوره آماری مورد مطالعه در سطح معنی‌داری ۵ درصد دارای روند افزایشی معنی‌دار بوده، به طوری که نرخ سالانه افزایش آن (شیب سن) در حدود ۰/۱۲

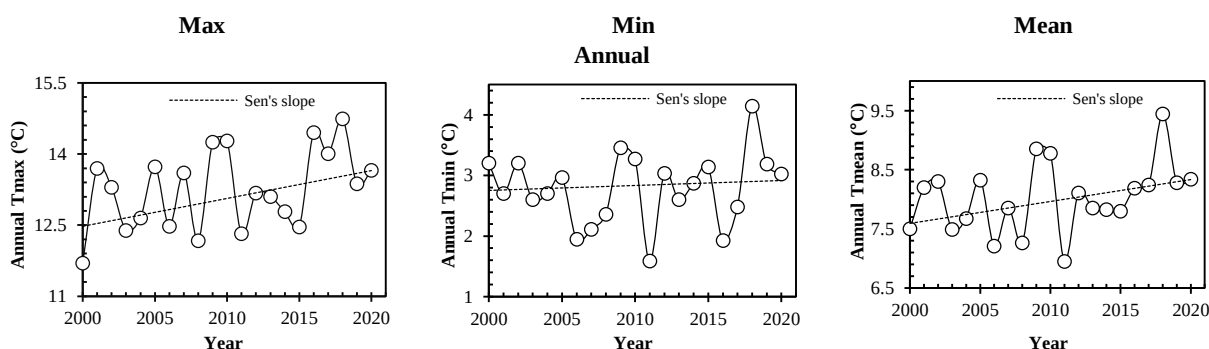
Table 2 - Mann-Kendall test statistics and Sen slopes of annual, seasonal and monthly temperature

جدول ۲- آماره‌های آزمون من-کندال و شیب سن سالانه، فصلی و ماهانه دما

Parameter	Mann-Kendall statistic (Z)	Sen slope (β)	p-value
Max temperature	Annual	0.267	0.058
	Spring	0.105	0.020
	Summer	0.086	0.029
	Winter	0.314	0.117
	March	0.210	0.084
	April	-0.038	0.833
	August	0.029	0.012
	September	0.005	1.000
Min temperature	Annual	0.033	0.856
	Spring	0	1.000
	Summer	-0.171	0.291
	Winter	0.210	0.040
	March	0.105	0.045
	April	-0.019	0.928
	August	-0.182	0.263
	September	-0.196	0.227
Mean temperature	Annual	0.248	0.037
	Spring	0.067	0.011
	Summer	-0.043	0.809
	Winter	0.248	0.088
	March	0.167	0.076
	April	-0.076	0.651
	August	-0.076	0.651
	September	-0.114	0.487

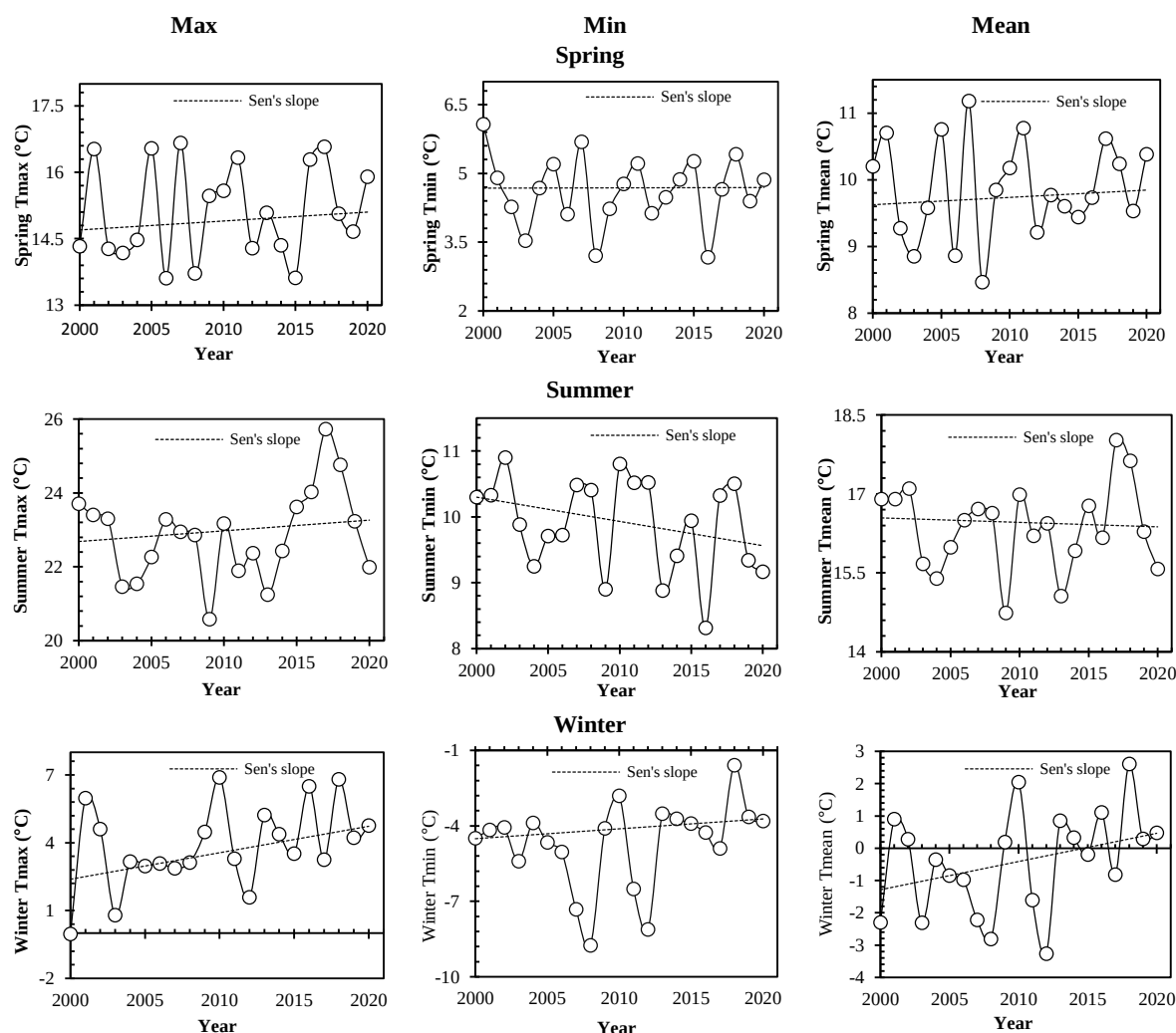
که این پارامترها با افزایش مواجه شده است. علاوه بر آن افزایش دمای حداکثر بهار، تابستان و دمای حداقل و متوسط زمستان و همچنین کاهش دمای حداقل تابستان، قابل ملموس تر می‌باشد (شکل ۴).

با وجود معنی‌داری روند افزایشی دمای حداکثر زمستان در سطح ۵ درصد، هیچ کدام از پارامترهای دمای سالانه و فصلی طی ۲۱ سال دارای روند تغییرات معنی‌دار نیست، اما بررسی شیب سن دمای حداکثر و متوسط سالانه نشان داد



شکل ۴- روند تغییرات سالانه و فصلی پارامترهای حداکثر (چپ)، حداقل (وسط) و متوسط (راست) دما به ترتیب از بالا به پایین، سالانه (ردیف اول)، بهار (ردیف دوم)، تابستان (ردیف سوم) و زمستان (ردیف آخر)

Figure 4 - Annual and seasonal change trends in maximum (left), minimum (middle) and average (right) temperature parameters, from top to bottom, annual (first row), spring (second row), summer (third row) and winter (last row) respectively.



ادامه شکل ۴

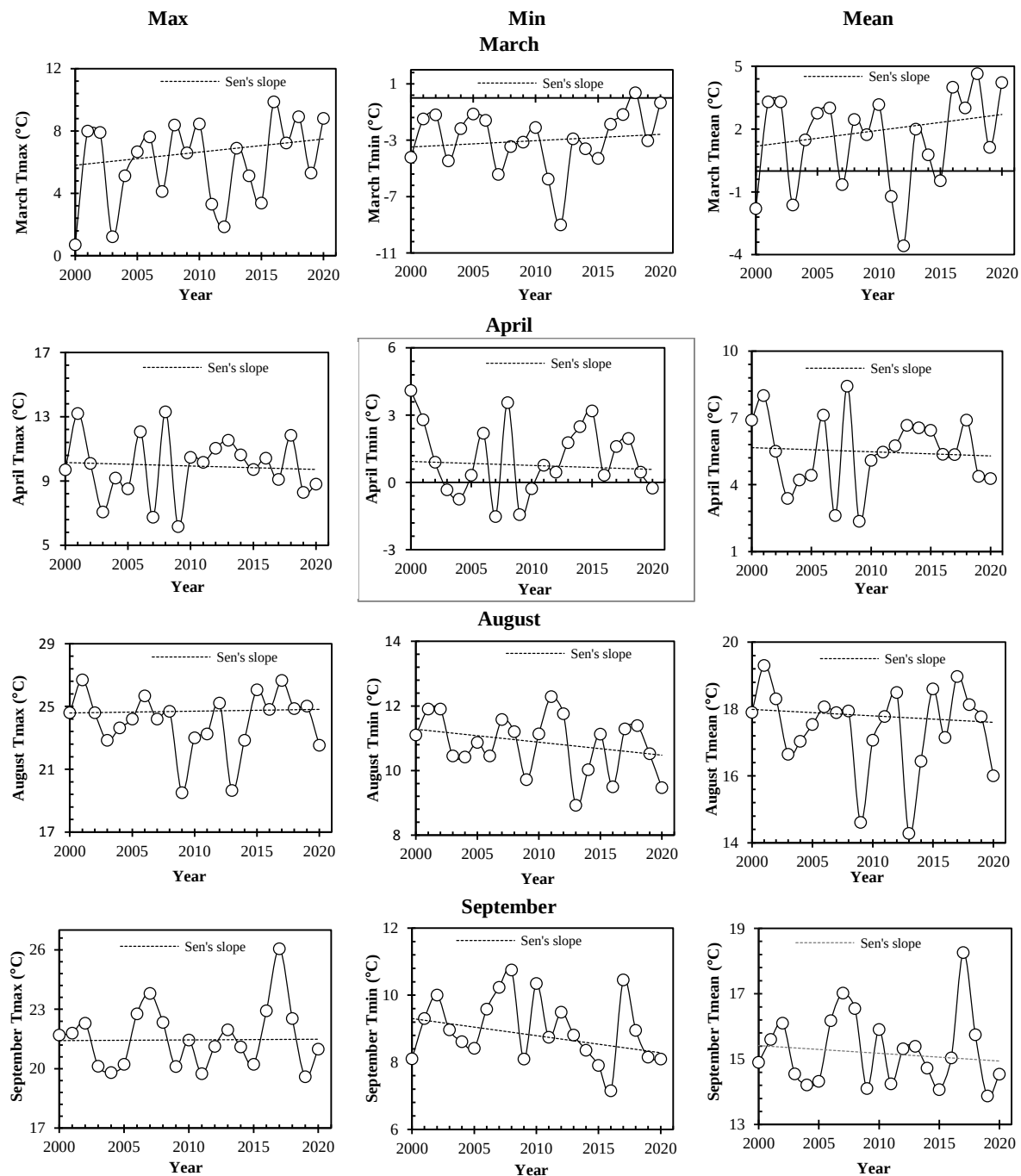
Figure 4 continued

است. SCA ماه‌های مارس و آوریل در مدل ۱، با SWE دارای ضریب تعیین (R^2) حدود ۰/۲۷ در سطح معنی‌داری ۵ درصد می‌باشد که با ورود دمای حداقل سال در مدل ۲، مقدار R^2 در حدود ۰/۱۸ افزایش یافته و به این ترتیب SCA ماه‌های مارس و آوریل با SWE و دمای حداقل سال در مدل ۲ در سطح معنی‌داری ۵ درصد، به R^2 حدود ۰/۴۵ رسیده است. SCA ماه‌های اوت و سپتامبر در مدل ۱، با SWE در سطح معنی‌داری ۵ درصد دارای R^2 حدود ۰/۲۳ است. با ورود پارامتر دمای حداکثر سپتامبر در مدل ۲، مقدار R^2 در حدود ۰/۱۷ افزایش یافته و در نهایت SCA ماه‌های اوت و سپتامبر با SWE و دمای حداکثر سپتامبر در مدل ۲ دارای R^2 حدود ۰/۴۰ در سطح معنی‌داری ۵ درصد می‌باشد.

اگر چه غیر از دمای حداقل مارس که در سطح معنی‌داری ۱۰ درصد، دارای روند افزایشی است، هیچ کدام از پارامترهای دمای ماهانه طی ۲۱ سال دارای روند تغییرات معنی‌دار نیست، اما شیب سن دمای متوسط مارس نیز با افزایش مواجه شده است. همچنین نتایج حاصل از بررسی شیب سن حاکی از آن بود که دمای حداقل ماه اوت و سپتامبر، دارای کاهش قابل ملموس‌تری می‌باشد (شکل ۵).

نتایج مدل رگرسیونی

نتایج مربوط به رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام پوشش برفی (SCA) ماه‌های مارس و آوریل و ماه‌های اوت و سپتامبر، همچنین منابع آب برف (SWR) با تمام پارامترهای اقلیمی دما و بارش در جدول ۳ نشان داده شده



شکل ۵- روند تغییرات ماهانه پارامترهای حداکثر (چپ)، حداقل (وسط) و متوسط (راست) دما به ترتیب از بالا به پایین، مارس (ردیف اول)، آوریل (ردیف دوم)، اوت (ردیف سوم) و سپتامبر (ردیف آخر)

Figure 5- Monthly trend of maximum (left), minimum (middle) and average (right) temperature parameters, from top to bottom, March (first row), April (second row), August (third row) and September (last row) respectively.

۵ درصد به ۰/۸۷ رسیده است. با توجه به اینکه مقدار عامل تورم واریانس در تمامی روابط رگرسیونی ساده و چندگانه (VIF) کمتر از ۱۰ می‌باشد، بنابراین همخطی جدی بین متغیرهای مورد استفاده در تحلیل رگرسیون خطی چندگانه وجود ندارد (جدول ۳).

منابع آب برف (SWR) در مدل ۱ با SWE دارای ۰/۷۸ R^2 در سطح معنی‌داری ۱ درصد بوده که با وارد شدن پارامترهای دمای حداکثر تابستان در مدل ۲ و دمای حداقل سالانه در مدل ۳، مقدار R^2 به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۳ افزایش یافته و در نهایت مقدار R^2 با SWR، SWE، دمای حداکثر تابستان و دمای حداقل سال در مدل ۳ در سطح معنی‌داری

روند تغییرات بارش و پوشش و منابع آب برف

نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات بارش، آب معادل برف (SWE) و نسبت برف به بارش طی ۲۱ سال (۲۰۲۰-۲۰۰۰) نشان داد که هیچ کدام از پارمترهای مذکور در سطح معنی داری ۵ درصد دارای روند کاهشی و یا افزایشی نمی باشد. این نتیجه با یافته های (Ostadi et al., (2021) مشابهت دارد، چنان که محققان مذکور با مطالعه روند تغییرات بارش جامد سالانه در شمال غرب ایران، نشان دادند که اگر چه در برخی از ایستگاه ها شاهد روند کاهشی معنی دار در بارش جامد هستیم، اما در ایستگاه اردبیل در نزدیکی کوهستان سبلان طی دوره ۲۰۱۸-۱۹۸۵ تغییرات بارش جامد دارای روند معنی دار کاهشی یا افزایشی نمی باشد. (Pepin et al., (2022) نیز عنوان کردند که اگر

چه افزایش گرمایش در ارتفاعات بالاتر در برخی مناطق جهان وجود دارد، اما افزایش بارندگی در کوه ها ضعیف تر از مناطق کم ارتفاع در سراسر جهان است. بر اساس یافته های پژوهش حاضر مساحت پوشش برف (SCA) در ماه های مارس و آوریل (زمان حداکثر پوشش برفی) طی دور ۲۱ سال بر اساس شیب سن سالانه با نرخ سالانه ۵۳۴ هکتار کاهش یافته است، اما بر مبنای آزمون روند من-کندال، این تغییرات کاهشی در سطح ۵ درصد معنی داری نمی باشد. با این وجود SCA ماه های اوت و سپتامبر (زمان حداقل پوشش برفی) که عمدتاً مربوط به یخچال های مناطق مرتفع (بالای ۴۰۰۰ متر از سطح دریا) است، طی ۲۱ سال اخیر با نرخ سالانه ۱/۶۲ هکتار کاهش یافته و در ۲۱ سال وسعت آن حدود ۳۴ هکتار کاهش پیدا کرده است.

جدول ۳- تحلیل رگرسیون چندگانه گام به گام بین پوشش برف (SCA) و منابع آب برف (SWR) با پارامترهای اقلیمی

Table 3- Stepwise multiple regression analysis between snow cover (SCA) and snow water resources (SWR) with climatic parameters

(y)	Models	Climatic parameter (x)	Equation	R	R ²	R ² Change	Sig.	VIF
March and April SAC	1	SWE	$y=205.35x+13599.23$	0.515	0.265	0.265	0.017	
	2	X1: SWE and X2: Annual minimum temperature	$y=221.82x_1-8990.52x_2+37127.84$	0.669	0.447	0.182	0.025	
August and September SAC	1	SWE	$y=0.31x+5.86$	0.486	0.236	0.236	0.025	
	2	X1: SWE and X2: September maximum temperature	$y=0.33x_1-5.21x_2+116.23$	0.636	0.404	0.168	0.037	
SWR	1	SWE	$y=0.57x-20.23$	0.884	0.781	0.781	0.000	1
	2	X1: SWE and X2: Summer maximum temperature	$y=0.60x_1-3.78x_2+67.26$	0.914	0.836	0.055	0.024	
	3	X1: SWE, X2: Summer maximum temperature and X3: Annual minimum temperature	$y=0.61x_1-3.78x_2-6.41x_3+79.85$	0.934	0.872	0.036	0.044	

این روند کاهشی بر اساس آزمون من-کندال نیز در سطح ۵ درصد معنی داری است. تغییرات SCA طی سال های گذشته در اقصی نقاط جهان گزارش شده است، چنان که (Notarnicola (2022) در مقیاس جهانی، Yılmaz et al., (2019) در مقیاس منطقه خاور نزدیک، Olefs et al., (2020) در اتریش و (Altemimi et al., (2023) در شمال عراق به کاهش پوشش برف اذعان کرده اند. با این وجود در برخی مناطق دیگر پوشش برف افزایش یافته، به طوری که (Smith and Bookhagen (2020) در برخی مناطق کوهستانی آسیا همچون پامیر، قراقورام، هندوکش، و کونلون شان افزایش حجم برف را نشان دادند. بنابراین در

پژوهش حاضر نیز اگر چه پوشش برفی در کل محدوده مورد مطالعه دارای روند کاهشی معنی دار نیست، اما در محدوده ارتفاعات بالادست جایی که عمدتاً پوشش برفی به صورت یخچال تجمع یافته است، با اطمینان بیشتری می توان گفت که ذخایر یخچالی منطقه مورد مطالعه در حال کاهش است. این نتیجه با یافته های (Bhattacharya et al., (2021) و (Nanni et al., (2023) در ارتفاعات بلند آسیا و (Tiu et al., (2022) در ارتفاعات پامیر در تاجیکستان مطابقت دارد، چنان که محققان مذکور نیز به این نتیجه رسیدند که در مناطق مورد مطالعه ذخایر یخچالی در حال کاهش هستند. علاوه بر آن (IPCC (2021) نیز گزارش کرده

است که یخچال‌های طبیعی کوهستانی به سبب تغییرات اقلیمی در حال از بین رفتن هستند. منابع آب برف (SWR) از حاصلضرب مساحت پوشش برفی ذوب شده سالانه در مقدار SWE مورد محاسبه قرار گرفت. با توجه به اینکه پوشش برفی عمده منطقه مورد مطالعه (یعنی ماه‌های مارس و آوریل) به همراه SWE سالانه دارای روند تغییرات معنی‌داری نبود، بنابراین SWR نیز دارای روند تغییرات معنی‌دار نمی‌باشد. اگر چه پوشش برفی ماه‌های اوت و سپتامبر دارای روند کاهشی معنی‌دار است، اما این ذخایر برفی عمدتاً در ارتفاعات بالا با وسعت بسیار کم (۳۴ هکتار) واقع شده است و تغییرات آن در مقایسه با وسعت بسیار زیاد پوشش برفی ماه‌های مارس و آوریل (۳۲۲۹۶ هکتار) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روند تغییرات SWR ندارد. با این حال همین یخچال‌های کوچک نیز در طولانی مدت نقش مهمی در ذخیره آب دارند، به طوری‌که Smith and Bookhagen (2020) عنوان کرده‌اند که یخچال‌هایی که در حال رشد هستند با مناطقی که روند ذخیره‌سازی آب برفی مثبت دارند، همبستگی زیادی دارند، در حالی‌که در منطقه مورد مطالعه پژوهش حاضر پوشش یخچال‌ها در حال کاهش بوده و این مسئله در بلندمدت بر کاهش SWR تأثیرگذار خواهد بود.

روند تغییرات دما

بررسی روند تغییرات دمای سالانه، فصلی و ماهانه در منطقه مورد مطالعه نشان داد که از میان ۱۶ پارامتر مورد بررسی، فقط دمای حداکثر فصل زمستان دارای روند افزایشی معنی‌دار است، به طوری‌که با نرخ افزایش ۰/۱۲ درجه سانتی‌گراد در ۲۱ سال در حدود ۲/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. این نتیجه با یافته‌های Kazemzadeh and Malekian (2018) مطابقت دارد. محققان مذکور نیز با بررسی هیدرو-اقلیم غرب دریای خزر دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۰ با پارامترهای دمای سالانه و فصلی از جمله ایستگاه لای (ایستگاه مورد استفاده در پژوهش حاضر) به این نتیجه رسیدند که علاوه بر دمای زمستان، دمای سالانه و فصل‌های دیگر نیز افزایش یافته است. اما در پژوهش حاضر طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۰ با وجود معنی‌دار بودن افزایش دمای حداکثر زمستان، دمای حداکثر سالانه و سایر فصول و دمای متوسط سالانه و فصل زمستان علی‌رغم آنکه دارای شیب سن افزایشی بوده، اما به طور

معنی‌دار روند افزایشی ندارند. به نظر می‌رسد که تفاوت‌های نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های Kazemzadeh and Malekian (2018) به سبب تفاوت در طول و دوره زمانی مورد مطالعه است.

روابط پوشش و منابع آب برف با پارامترهای اقلیمی

بررسی روابط رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام پوشش برفی (SCA) ماه‌های مارس و آوریل و ماه‌های اوت و سپتامبر و همچنین منابع آب برف (SWR) حاکی از آن بود که هر سه پارامتر در مدل ۱ با مقادیر SWE در سطح معنی‌داری ۵ درصد، بالاترین همبستگی (R) را دارند (به ترتیب ۰/۵۲، ۰/۴۹ و ۰/۸۸). با وارد شدن دمای حداقل سالانه در مدل دوم SCA ماه‌های مارس و آوریل، دمای حداکثر سپتامبر در مدل دوم SCA ماه‌های مارس و آوریل، دمای حداکثر تابستان و دمای حداقل سالانه در مدل سوم منابع آب برف (SWR) مقادیر R به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۶۴ و ۰/۹۴ در سطح معنی‌داری ۵ درصد افزایش یافت. بنابراین الگوی بارش و دما نقش مهمی در افزایش دقت همبستگی تغییرات پوشش و منابع آب برفی دارد. در مطالعات بسیاری به تأثیر الگوی بارش و به ویژه دما بر تغییرات پوشش و ذخایر آبی برف اشاره شده است، چنان‌که Newton et al., (2021) با بررسی ذخایر برفی در آلبرتا، کانادا، عنوان کرده‌اند که دمای زمستان و الگوهای بارش می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر تجمع برف و رژیم‌های ذوب تأثیر بگذارد. Bhattacharya et al., (2021) نیز در ارتفاعات آسیا نشان دادند که افزایش دمای تابستان روند بلندمدت کاهش یخچال‌ها را توضیح می‌دهد. همچنین Shea et al., (2021) در حوضه‌های آبخیز غرب کانادا نشان دادند که تغییرات دما هم بر تجمع برف و هم انرژی کل ذوب برف را تغییر می‌دهد. با توجه به مباحث مطرح شده، نتایج این پژوهش نشان داد که پوشش برفی ماه‌های اوت و سپتامبر به طور معنی‌داری در حال کاهش بوده و این کاهش علاوه بر ارتباط با SWE با دمای حداکثر تابستان نیز دارای رابطه همبستگی است. اگر چه سهم این ذخایر آبی در مقایسه با ذخایر آبی ماه مارس و آوریل ناچیز است، اما به سبب آن که در ماه‌های گرم سال از جمله ماه اوت و سپتامبر، سهم ذوب یخچال‌های طبیعی بر رواناب غالب است (Latif et al., 2020)، بنابراین افزایش دما در این ماه‌ها در آینده مدیریت آب در منطقه مورد مطالعه را با چالش همراه

شده است، بنابراین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نقش بسیار مهمی در مطالعات مربوط به برف و مدیریت منابع آبی دارد. با این وجود تصاویر ماهواره‌ای نیز از نظر دقت تفکیک مکانی و زمانی دارای محدودیت است. به همین سبب پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی از تصاویر ماهواره‌ای با دقت بیشتر همچون سنتینل-۲ یا ادغام تصاویر ماهواره‌ای برای افزایش دقت مکانی و زمانی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شود.

منابع

- Ahmadi, H., Rostami, N., Dadashi-Roudbari, A. 2023. The impact of climate change on snowfall in Iran Basins using the satellite-derived snow products and CMIP6 Bias Corrected model. *Theoretical and Applied Climatology*, 151, 603–618.
- Altemimi, D. G., Al-Lami, A. M., Hashim, B. M. 2023. Assessment the Impact of Climate Changes on Snow Cover Area Using Landsat Data in Sulaymaniyah City, Iraq. *IOP Conference Series, Earth and Environmental Science* 1213, 012112.
- Barlow, M., Zaitchik, B., Paz, S., Black, E., Evans, J., Hoell, A. 2016. A Review of Drought in the Middle East and Southwest Asia. *Journal of Climate*, 29, 8547–8574.
- Bass, B., Goldenson, N., Rahimi, S., Hall, A. 2023. Aridification of Colorado River Basin's snowpack regions has driven water losses despite ameliorating effects of vegetation. *Water Resources Research*, 59, e2022WR033454.
- Bhattacharya, A., Bolch, T., Mukherjee, K., King, O., Menounos, B., Kapitsa, V., Yao, T. 2021. High Mountain Asian glacier response to climate revealed by multi-temporal satellite observations since the 1960s. *Nature communications*, 12(1), 4133.
- Da Ronco, P., Avanzi, F., De Michele, C., Notarnicola, C., Schaeffli, B. 2020. Comparing MODIS snow products Collection 5 with Collection 6 over Italian Central Apennines. *International journal of remote sensing*, 41(11), 4174-4205.
- da Silva, R.M., Santos, C.A.G., Moreira, M., Corte-Real, J., Silva, V.C.L. and Medeiros, I.C. 2015. Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. *Natural Hazards*, 77(2), 1205-1221.
- Donmez, C., Berberoglu, S., Cicekli, S. Y., Cilek, A., Arslan, A. N. 2021. Mapping snow cover using landsat data, toward a fine-resolution

خواهد کرد. چنانکه (Latif et al., 2020) در بخش شرقی ارتفاعات هندوکش به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما در تابستان منابع آب رودخانه به صورت کوتاه افزایش می‌یابد، اما در بلند مدت با از بین رفتن ذخایر برفی و یخچالی منابع آب منطقه کاهش خواهد یافت. در واقع با افزایش دما تحت سناریوهای اقلیمی آینده کاهش سهم ذوب برف در رواناب رودخانه مضاعف خواهد شد (Tuel et al., 2022).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که در ارتفاعات سبلان در شمال غرب ایران علی‌رغم آن‌که پوشش برف ماه آوریل و منابع آب برف حاصل از ذوب برف، به طور معنی‌داری روند کاهشی یا افزایشی ندارد، اما پوشش برفی ماه سپتامبر که عمدتاً مربوط به تجمع برف در یخچال‌های ارتفاعات بالاتر است، طی ۲۱ سال در حدود ۳۴ هکتار از مساحت آن به طور معنی‌داری کاهش یافته است. این کاهش در وحله اول در ارتباط با تغییرپذیری آب معادل برف و در وهله بعدی ناشی از تغییرپذیری دمای ماه سپتامبر است. اگر چه این منابع برفی به سبب وسعت کم و روند کاهشی تدریجی آن (۱/۶۲ هکتار در سال)، اثر قابل ملموسی بر روند تغییرات منابع آب برف نداشته است، اما با ادامه این روند و از بین رفتن ذخایر برفی یخچالی در بلند مدت، مدیریت منابع آب برفی در منطقه مورد مطالعه با چالش همراه خواهد بود، چرا که این منابع غالباً در فصل گرما و شرایط کم آبی در غیاب بارش و ذوب شدن ذخایر برفی ارتفاعات پایین، سهم به سزایی در تأمین نیازهای روزافزون آب منطقه دارد. از سوی دیگر دمای حداکثر زمستان نیز در منطقه مورد مطالعه دارای روندی افزایشی معنی‌داری بوده که به نظر می‌رسد، بر تجمع برف در فصل زمستان اثرات سوئی دارد. با توجه به این‌که بر اساس سناریوهای گرمایش، افزایش دما در آینده نیز در منطقه محتمل است، بنابراین ماندگاری پوشش برفی و یخچال دائمی در ارتفاعات سبلان محتمل به نظر نمی‌رسد. به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای برای بررسی پوشش برفی و منابع آب برفی بسیار مفید و کاربردی است. با توجه به اینکه به طور معمول پوشش برفی و یخچال‌ها در مناطق کوهستانی و با دسترسی دشوار واقع

- Largerion, C., Dumont, M., Morin, S., Boone, A., Lafaysse, M., Metref, S., Cosme, E., Jonas, T., Winstral, A. Margulis, S.A. 2020. Toward snow cover estimation in mountainous areas using modern data assimilation methods, A review. *Frontiers in Earth Science*, 8, 325.
- Latif, Y., Ma, Y., Ma, W., Muhammad, S., Adnan, M., Yaseen, M., Fealy, R. 2020. Differentiating Snow and Glacier Melt Contribution to Runoff in the Gilgit River Basin via Degree-Day Modelling Approach. *Atmosphere*, 11(10), 1023.
- Liu, B., Zou, X., Yi, S., Sneeuw, N., Li, J., Cai, J. 2022. Reconstructing GRACE-like time series of high mountain glacier mass anomalies. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113177.
- Mann, Henry B. 1945. Nonparametric Tests Against Trend, *Econometrica*, 13, 245-259.
- Mostafazadeh, R., Nasiri Khiavi, A. Ghabelnezam, E. 2025. Temporal changes and flow pattern analysis using Colwell indices in mountainous rivers. *Environment, Development and Sustainability* 26, 7757-77.
- Musselman, K.N., Addor, N., Vano, J.A. et al. 2021. Winter melt trends portend widespread declines in snow water resources. *Nature Climate Change*, 11, 418-424.
- Nanni, U., Scherler, D., Ayoub, F., Millan, R., Herman, F., Avouac, J. P. 2023. Climatic control on seasonal variations in mountain glacier surface velocity. *The Cryosphere*, 17(4), 1567-1583.
- Newton, B. W., Farjad, B., Orwin, J. F. 2021. Spatial and Temporal Shifts in Historic and Future Temperature and Precipitation Patterns Related to Snow Accumulation and Melt Regimes in Alberta, Canada. *Water*, 13(8), 1013.
- Notarnicola, C. 2022. Overall negative trends for snow cover extent and duration in global mountain regions over 1982-2020. *Scientific Reports* 12, 13731.
- Olefs, M., Koch, R., Schöner, W., Marke, T. 2020. Changes in Snow Depth, Snow Cover Duration, and Potential Snowmaking Conditions in Austria, 1961-2020—A Model Based Approach, 11, 1330.
- Ostadi, E., Jahanbakhsh, S., Rostamzadeh, H., Rezaibanafsheh, M., Khorshiddust, A. M. 2021. Spatio-temporal trend analysis of solid precipitation in Northwest Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(17), 1709.
- Pepin, N. C., Amone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., et al. 2022. Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, 60, e2020RG000730.
- water-resistant snow index. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 281-294.
- Dozier, J. 1989. Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9.
- Elias, E., James, D., Heimel, S., Steele, C., Steltzer, H., Dott, C. 2021. Implications of observed changes in high mountain snow water storage, snowmelt timing and melt window. *Journal of Hydrology, Regional Studies*, 35, 100799.
- Faquseh, H., Grossi, G. 2024. Trend analysis of precipitation, temperature and snow water equivalent in Lombardy region, northern Italy. *Sustain. Water Resources Management*, 10, 18.
- Fontrodona-Bach, A., Schaeffli, B., Woods, R., Teuling, A. J., Larsen, J. R. 2023. NH-SWE, Northern Hemisphere Snow Water Equivalent dataset based on in situ snow depth time series. *Earth System Science Data*, 15, 2577-2599.
- Goodarzi, M. R., Sabaghzadeh, M., Niazkar, M. 2023. Evaluation of Snowmelt Impacts on Flood Flows Based on Remote Sensing Using SRM Model. 15, 1650.
- Hao, X., Huang, G., Zheng, Z., Sun, X., Ji, W., Zhao, H., Wang, J., Li, H., and Wang, X. 2022. Development and validation of a new MODIS snow-cover-extent product over China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 1937-1952.
- Huang, J., Islam, A. R. M. T., Zhang, F., Hu, Z. 2017. Spatiotemporal analysis the precipitation extremes affecting rice yield in Jiangsu province, southeast China. *International Journal of Biometeorology* 61, 1863-1872.
- IPCC, Climate Change 2021, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, in press.
- Jiang, Y., Chen, F., Gao, Y., He, C., Barlage, M., Huang, W. 2020. Assessment of uncertainty sources in snow cover simulation in the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 125(18), e2020JD032674.
- Kazemzadeh, M., Malekian, A. 2018. Changeability evaluation of hydro-climate variables in Western Caspian Sea region, Iran. *Environmental earth sciences*, 77, 1-12.
- Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods, second ed. (New York, Hafner).

- Smith, T., Bookhagen, B. 2020. Assessing Multi-Temporal Snow-Volume Trends in High Mountain Asia From 1987 to 2016 Using High-Resolution Passive Microwave Data. *Frontiers in Earth Science*, 8, 559175.
- Stillinger, T., Rittger, K., Raleigh, M. S., Michell, A., Davis, R. E., Bair, E. H. 2023. Landsat, MODIS, and VIIRS snow cover mapping algorithm performance as validated by airborne lidar datasets. *The Cryosphere*, 17(2), 567-590.
- Stillinger, T., Roberts, D. A., Collar, N. M., Dozier, J. 2019. Cloud masking for Landsat 8 and MODIS Terra over snow-covered terrain, Error analysis and spectral similarity between snow and cloud. *Water Resources Research*, 55(7), 6169-6184.
- Tang, Z., Deng, G., Hu, G., Zhang, H., Pan, H., Sang, G. 2022. Satellite observed spatiotemporal variability of snow cover and snow phenology over high mountain Asia from 2002 to 2021. *Journal of Hydrology*, 613, 128438.
- Theil, H. 1950. A rank invariant method of linear and Polynomial regression analysis, Part3, Netherlands Academic van wetten schappen. *Proceedings*, (53), 1379-1412.
- Tong, R., Parajka, J., Komma, J., Blöschl, G. 2020. Mapping snow cover from daily Collection 6 MODIS products over Austria. *Journal of Hydrology*, 590, 125548.
- Tuel, A., El Moçayd, N., Hasnaoui, M. D., and Eltahir, E. A. B. 2022. Future projections of High Atlas snowpack and runoff under climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 571-588.
- Yao, T., Bolch, T., Chen, D., Gao, J., Immerzeel, W., Piao, Sh., Su, F., Thompson, L., Wada, Y., Wang, L., Wang, T., Wu, G., Xu, B., Yang, W., Zhang, G., Zhao, P. 2022. The imbalance of the Asian water tower. *Nature reviews earth and environment*, 3, 618-632.
- Yilmaz, Y. A., Aalstad, K., Sen, O. L. 2019. Multiple Remotely Sensed Lines of Evidence for a Depleting Seasonal Snowpack in the Near East. *Remote Sensing*, 11, 483.
- Poussin, C., Timoner, P., Chatenoux, B., Giuliani, G., Peduzzi, P. 2023. Improved Landsat-based snow cover mapping accuracy using a spatiotemporal NDSI and generalized linear mixed model. *Science of Remote Sensing*, 7, 100078.
- Pulliainen, J., Luojus, K., Derksen, C., Mudryk, L., Lemmetyinen, J., Salminen, M., Norberg, J. 2020. Publisher Correction, Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018. *Nature*, 582(7813), E18.
- Qi, W., Feng, L., Liu, J., Yang, H. 2020. Snow as an important natural reservoir for runoff and soil moisture in Northeast China. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 125, e2020JD033086.
- Riggs, G. A., Hall, D. K., Román, M. O. 2015. MODIS snow products collection 6 user guide. National Snow and Ice Data Center, Boulder, CO, USA, 66, 545.
- Schweizer, G. 1970. Der Kuh-E-Sabalan (Nordwestiran), Beiträge zur Gletscherkunde und Glacialgeomorphologie vorder asiatischer Hochgebirge. *Tübinger Geographic Studies*, 34(3), 163-178.
- Sen P.K. 1968. Estimates of the regression coefficients based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.
- Shea, J. M., Whitfield, P. H., Fang, X., Pomeroy, J. W. 2021. The Role of Basin Geometry in Mountain Snowpack Responses to Climate Change. *Water and Hydrocomplexity*, 3, 604275.
- Siirila-Woodburn, E. R., Rhoades, A. M., Hatchett, B. J., Huning, L. S., Szinai, J., Tague, C., Nico, P. S., Feldman, D. R., Jones, A. D., Collins, W. D., Kaatz, L. 2021. A low-to-no snow future and its impacts on water resources in the western United States. *Nature Reviews Earth and Environment* 2, 800-819.



Investigating the trend of changes in snow cover and water resources and the impact of climatic parameters on it using satellite images and ground data in Sabalan Mountains - Northwestern Iran

Z. Asgharpour¹, M. Saghebian², K. Amininia^{3*}, A. Panahi⁴

Received: 28/02/2023

Accepted: 21/10/2023

Abstract

Delayed and gradual melting of snow cover and resulting runoff plays a significant role in maintaining water resources demand in subsequent spring and summer seasons. Sabalan mountain in northwestern Iran remains snow-covered for approximately five months of the year. In this study, changes in the maximum and minimum snow-covered area (SCA), snow water equivalent (SWE), the snow-to-precipitation ratio precipitation, also annual, seasonal, and monthly minimum, maximum, and average temperature were examined using Landsat images and ground data for a 21-years period (2000–2020). The relationship between changes in SCA and SWE with precipitation and temperature variables was investigated by stepwise multiple regression. The findings revealed that the minimum SCA, mainly observed in April, decreased by approximately 34 hectares over 21 years at an annual rate of 1.62 hectares, (significance level of 5%). Among the climatic variables the maximum winter temperature increased by approximately 2.5°C during the 21-year period, i.e. an annual rate of 0.12°C. The regression model results indicated that the SWE was correlated to minimum and maximum SCA, and also the annual minimum temperature and the maximum September temperature, with multiple correlation coefficients (R) of 0.67 and 0.64 respectively. Furthermore, SWR showed a multiple correlation coefficient of approximately 0.94 with SWE, the maximum summer temperature, and the annual minimum temperature. The results of this study demonstrated a significant reduction in snow resources at higher altitudes of Sabalan Mountain. Considering the key role of snowmelt runoff in maintaining the water demand and long-term decreasing trend of glacier zone area, the region would face substantial water management challenges.

Keywords: Climate, Mann-Kendall, Sabalan Highlands, Snow cover, Snow water resources



¹ Department of Geography, Ah.C., Islamic Azad University, Ahar, Iran

² Department of Civil Engineering, Ah.C., Islamic Azad University, Ahar, Iran

³ Department of Geography, Ah.C., Islamic Azad University, Ahar, Iran

(*Corresponding Author Email Address: karimaminini@iau.ac.ir)

⁴ Department of Geography, TA.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

نحوه ارجاع مقاله:

اصغریپور، ز.، ثاقیبیان، م.، امینی‌نیا، ک.، پناهی، ع. ۱۴۰۵. بررسی روند متغیرهای اقلیمی مؤثر بر پوشش برف و آب معادل برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های زمینی در کوهستان سبلان - شمال غرب ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۴(۱): ۳-۲۰. DOI: 10.22125/agmj.2026.501020.1178

Asgharpour, Z., Saghebian, M., Amininia, K., Panahi, A. 2026. Investigating the trend of changes in snow cover and water resources and the impact of climatic parameters on it using satellite images and ground data in Sabalan Mountains - Northwestern Iran. Journal of Agricultural Meteorology, 14(1): 5-19. DOI: 10.22125/agmj.2026.501020.1178