

اثر افزایش دما بر روند تغییرات ماهانه سطح پوشش، عمق و آب معادل برف و تهدید منابع شرب و کشاورزی؛ مطالعه موردی (استان همدان)

علی افروزی^۱، فرشید تاران^{۲*}

^۱ دکترای آبیاری و زهکشی، دانشگاه بوعلی سینا- همدان

^{۲*} استادیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

چکیده

برف و آب حاصل از ذوب آن یکی از منابع تامین آب کشاورزی در مناطق کوهستانی مانند استان همدان است. در این مطالعه، روند زمانی بارش برف در این استان در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳ بررسی شد. برای این منظور، داده‌های سطح پوشش برف (SC)، آب معادل برف (SWE) و عمق برف (SDepth) برای ماه‌های مختلف با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای حاصل از محصول FLDAS استخراج شد. نتایج نشان داد که با افزایش ۳/۳۳ درجه سانتی‌گراد در متوسط دما در این دوره، SC با کاهش برابر ۹۰/۱۳ درصد مواجه شده است و سال‌های ۱۹۸۲ و ۲۰۲۱ به ترتیب با مجموع ۴۱۰۴۳/۰۴ و ۴۰۴۸/۱۲ کیلومتر مربع بیشترین و کمترین SC را داشته‌اند. به طور میانگین، پوشش برف در ماه‌های می تا اکتبر وجود نداشته و در آوریل و نوامبر ناچیز (به ترتیب ۱۷۰/۱۰ و ۲۸۶/۷۲ کیلومتر مربع) بوده است. ژانویه بیشترین SC را با ۵۱۸۲/۲۲ کیلومتر مربع داشته و در فوریه، مارس و دسامبر نیز پوشش برف مشاهده شده که هم‌زمان با اواخر پاییز تا اوایل بهار ایران است. نتایج آزمون‌های من-کندال و شیب تایل-سن نشان داد که روند SC، SDepth و SWE در ژانویه، فوریه و مارس کاهش و معنی‌دار بوده است. در هر چهار ماه ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر، روند دمای هوا افزایشی و روند بارش کاهش یافته است. در ژانویه و دسامبر، SC به ترتیب تندترین و ملایم‌ترین شیب کاهش را داشته است. مقادیر ضریب پیرسون بیانگر همبستگی معکوس و معنی‌دار (در سطح ۰/۰۱) SC، SWE و SDepth با دماست. در کل، همبستگی این پارامترها با دما در مقایسه با بارش بیشتر بوده است، به ویژه در فوریه و مارس که دمای بیشتری نسبت به دسامبر و ژانویه داشته‌اند. بنابراین، با توجه به تغییر اقلیم و افزایش دمای جهانی و نقش مهم برف در تامین آب استان همدان و تاثیرپذیری زیاد آن از دما، عواملی مانند مدیریت، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی استفاده از منابع آب این استان ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تصویرهای ماهواره‌ای، چگالی برف، شیب تایل-سن، من-کندال، همبستگی پیرسون

مقدمه

آب حاصل از ذوب برف و در نتیجه، وقوع خسارت‌های جبران‌ناپذیری شود. بنابراین، اندازه‌گیری سطح پوشیده شده از برف و آب معادل آن، در کنار دیگر اطلاعات مانند چگالی برف، به ویژه در مناطقی که برف سهم زیادی از بارش‌ها را دارد، برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع ضروری است، زیرا اطلاعات مفیدی در مورد وقایع هیدرولوژیکی پیش رو و منابع آبی در دسترس قرار خواهد داد. با این همه، امکان اندازه‌گیری آن در بسیاری از مناطق به علت شرایط سخت محیطی وجود ندارد. داده‌های اندازه‌گیری شده در یک نقطه نیز قابل تعمیم به سطح وسیع حوضه نیست. بنابراین، استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای می‌تواند یکی از روش‌های بررسی تغییرات زمانی و مکانی توزیع برف در هر منطقه مطرح باشد. اکثر روش‌های کارآمد پایش پیوسته پوشش برف بر پایه سنجنش از دور^۱ با تصویرهای ماهواره‌ای هستند. استفاده از این تصویرها به دلیل وسعت برداشت بالا و توانایی تصویربرداری از منطقه در زمان‌های مختلف با دقت زیاد، در مقایسه با داده‌های نقطه‌ای ایستگاه‌های زمینی بسیار باصرفه‌تر و کارآمدتر است. این ویژگی‌ها زمانی برجسته‌تر می‌شوند که بدانیم سطوح پوشیده از برف دائماً در اثر عوامل اقلیمی دچار تغییر می‌شوند. در این میان، محصول MODIS^۲ به دلیل دقت و قدرت تفکیک زمانی و مکانی مناسب به طور گسترده‌ای در سال‌های اخیر برای بررسی تغییرات توزیع پوشش برف در سراسر جهان به کار گرفته شده است. این محصول و تصویرهای ماهواره‌ای مشابه، ابزارهایی مفید برای حل مشکل داده‌برداری میدانی پوشش برف، به خصوص در مقیاس زمانی روزانه هستند (Tekeli et al., 2005).

ایران کشوری در حال توسعه با اقلیم خشک و نیمه‌خشک در نیم‌کره شمالی است که سالانه سطح زیادی از آن تحت

برف منبعی مهم برای تأمین آب بخش کشاورزی، تولید برق، ذخایر آب‌های زیرزمینی و آب رودخانه‌ها محسوب می‌شود. این منبع طبیعی از این جهت بااهمیت است که آب را در زمستان با میزان تقاضای اندک ذخیره و در فصل گرم با میزان تقاضای زیاد آزاد می‌کند (Darlane et al., 2017). جریان برف ذوب شده می‌تواند در فصل‌های کم‌آب بسیار مفید باشد. در نواحی خشک و نیمه‌خشک، برف منبعی اساسی برای آب شیرین محسوب می‌شود (Ye and Grimm, 2013). برف با خصوصیات ذاتی تابشی (آلبیدوی بالا) و دمایی (هدایت دمایی پایین) خود می‌تواند فعل و انفعالات انرژی و آب بین اتمسفر و سطح زمین را تعدیل کند (Shresta et al., 2014). در واقع، پوشش برف نقش مستقیمی بر فرایند تبادل انرژی بین سطح زمین و اتمسفر دارد، زیرا به دلیل آلبیدوی بالا، مقدار قابل توجهی از تابش خورشیدی ورودی را منعکس می‌کند (Tekeli et al., 2005) و دیگر اینکه در فصل زمستان به عنوان عایق با هدایت گرمایی ضعیف عمل می‌کند و از آزاد شدن گرما از سطح زمین جلوگیری می‌کند (Zhang, 2005). تغییرات قابل توجه مکانی-زمانی توزیع برف در مقیاس حوضه می‌تواند در تعیین زمان و مقدار ذوب برف در فصل بهار مهم باشد. این تغییرات می‌تواند احتمال وقوع خشکسالی و ایجاد رواناب را افزایش دهد (Shresta et al., 2014). از این رو، در مطالعه فرایندهای هیدرولوژیکی و تغییر اقلیم، سطح پوشش برف نقش مهمی بازی می‌کند. پوشش برف به دما و تغییرات زیست محیطی حساس است (Lopez et al., 2008; Xin et al., 2015) و می‌تواند نشانگری خوب برای تغییرات اقلیمی محلی و جهانی باشد (She et al., 2015). نبود اطلاعات کافی و صحیح از ذخایر برفی می‌تواند منجر به استفاده نامناسب از

2. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

1. Remote sensing

اثر افزایش دما بر روند تغییرات ماهانه سطح پوشش، عمق و آب معادل برف و تهدید منابع شرب و کشاورزی

موجب ذوب شدن برف شده است. صلاحی و نخستین روحی (Salahi and Nakhostinrouhi, 2019) تغییرات سطح پوشش برف حوضه بالیقلوچای را برای زمستان‌های ۹ سال (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳) بررسی و برای این کار از تصویرهای NOAA-AVHRR استفاده کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که وضعیت برف‌گیری منطقه در شمال غرب و جنوب غرب به دلیل قرار گرفتن کوهستان سبلان و ارتفاعات بزقوش مناسب است. حداکثر و حداقل سطح پوشش برف به ترتیب در دی ماه ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ با $1182/7$ و $33/8$ کیلومتر مربع برابر با $94/9$ و $2/7$ درصد مساحت حوضه بود که حاکی از تغییرات بسیار شدید سطح پوشش برف و در نتیجه، آسیب‌پذیری منابع آب وابسته به ذوب برف در منطقه بود.

در دیگر کشورهای جهان نیز در مورد تغییرات پوشش برف مطالعات متعددی شده است. خالی و همکاران (Khali et al., 2002) برای بررسی روند مکانی-زمانی پوشش برف در دره زانسکار هند بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ از MODIS استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد که روند پوشش برف در این دوره با کاهش چشمگیر همراه نبوده است. حداکثر و حداقل پوشش برف به ترتیب برابر با ۹۶ درصد و ۳۲ درصد بود که در ماه‌های مارس و اوت اتفاق افتاد. مقایسه داده‌های MODIS و اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه واحد تحقیقات اقلیمی عدم تطابق قابل توجهی نشان نداد. لی و همکاران (Lee et al., 2005) نتایج به‌دست آمده از MODIS را با نقشه‌های به‌دست آمده از مرکز ملی سنجش از دور هیدرولوژیکی عملیاتی (NOHRSC) برای پوشش برف حوضه ریو گراند شمالی در سال ۲۰۰۱ مقایسه کردند و نتیجه گرفتند آب معادل برف به دست آمده از هر دو روش با اندازه‌گیری‌های میدانی مطابقت دارد ولی در مجموع، نقشه‌های MODIS

پوشش برف قرار می‌گیرد. بخش زیادی از اقتصاد ایران وابسته به کشاورزی^۱ است و برف یکی از منابع اصلی ذخیره آب برای مصرف کشاورزی و شرب در فصل‌های گرم سال است. بنابراین، پایش زمانی سطوح پوشیده از برف^۲، آب معادل برف^۳ و عمق برف^۴ در نواحی مختلف ایران به ویژه مناطق کوهستانی پربارش در غرب و شمال غرب دارای اهمیت بسیاری است. بر این اساس، در مورد توزیع برف و روندهای کاهش و افزایش سطح پوشش برف در ایران مطالعاتی شده است. قاسمی‌فر و همکاران (Ghasemifar et al., 2015) با استفاده از MODIS و بر مبنای ویژگی‌های توپوگرافیکی، به بررسی توزیع مکانی-زمانی پوشش برف در ایران طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ پرداختند و نشان دادند که پوشش برف در شیب‌های ۴۴/۹ تا ۸۹/۸ درصد بالاتر از شیب‌های صفر تا ۴۴/۹ درصد است. این محققان اضافه کردند که بین پوشش برف و ارتفاع ارتباط مستقیمی وجود دارد به طوری که پوشش برف در نواحی مرتفع به صد در صد نیز می‌رسد. داریان و همکاران (Dariane et al., 2017) با استفاده از MODIS تغییرات مکانی-زمانی پوشش برف را در منطقه البرز بررسی کردند و دریافتند که پوشش برف در این منطقه در دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ روندی کاهشی داشته است. سلیمانی و همکاران (Solaimani et al., 2018) با استفاده از تصویرهای MODIS به پایش تغییرات مکانی-زمانی پوشش برف در استان کردستان در بازه زمانی ۱۷ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۳۷۹) پرداختند و نتیجه گرفتند که با توجه به ارتباط تغییرات پوشش برف با داده‌های سینوپتیک بارش و دمای منطقه، تصویرهای به دست آمده دقت مناسبی در استخراج سطح پوشش برف دارند. این محققان می‌گویند تحلیل ارتباط ذوب برف با داده‌های هواشناسی نشان می‌دهد که روند افزایشی دما در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد

3. Snow water equivalent

4. Snow depth

1. Agricultural-based economy

2. Snow cover

چین در دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ استفاده کردند و نتیجه گرفتند که ذوب برف در مارس شروع می شود و در اوت به حداقل خود می رسد. سلکوویتز و فورستر Selkowitz and Forster (2016) با استفاده از لندست TM و ETM+ و بر اساس شاخص NDS روشی برای تهیه نقشه های پوشش برف برای شرایط اقلیمی و توپوگرافی گوناگون معرفی کردند. نتایجی که این محققان به دست آوردند دارای دقت بالا با مقدار R برابر با ۰/۸۸ بود. کوتز و همکاران Kuter et al. (2018) سطح پوشش برف را در نواحی کوهستانی اروپا از آوریل ۲۰۱۳ تا دسامبر ۲۰۱۶ با استفاده از یک روش رگرسیونی و MODIS با مقدار R برابر با ۰/۸۸ تخمین زدند. چن و همکاران Chen et al. (2020) برای ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی پوشش برف در سین کیانگ چین در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ از MODIS استفاده کردند و نتیجه گرفتند که حداکثر و حداقل پوشش برف به ترتیب در ژانویه و ژوئیه-اوت رخ داد. تغییر قابل توجهی در تعداد روزهای دارای پوشش برفی در این دوره مشاهده نشد. بین پوشش برف و دمای ماهانه همبستگی وجود داشت. گو و همکاران Guo et al. (2022) تغییرات مکانی-زمانی پوشش برف را در حوضه رودخانه یارلونگ چین در دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ ارزیابی و برای بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر این تغییرات از MODIS استفاده کردند. یافته های آنها حاکی از ناهمگنی مکانی-زمانی زیاد در حوضه بود. حداکثر و حداقل پوشش برف به ترتیب در زمستان و تابستان رخ داد. در بهار و پاییز پوشش برف به طور قابل توجهی با دما و بارش همبستگی داشت.

همدان یکی از استان های پربرف ایران و اقتصاد آن تا حدی زیادی به کشاورزی وابسته است. بارش برف در این استان در تامین آب مورد نیاز بخش کشاورزی و شرب نقش پررنگی دارد. با این همه، تحقیقی در مورد تغییرات زمانی پوشش برف در این استان و ارتباط آن با تغییر پارامترهای

مناسب تر از نقشه های NOHRSC بوده است. تکلی و همکاران Tekeli et al. (2005) با استفاده از MODIS به تهیه نقشه های پوشش برف در حوضه رودخانه فرات در شرق ترکیه برای فصل زمستان سال های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ پرداختند و آنها را با داده های میدانی مقایسه کردند. این محققان گزارش دادند تطابق نتایج دو روش در محدوده ۶۲ تا ۸۲ درصد است. وانگ و همکاران Wang et al. (2005) پوشش برف بهار را در کانادا برای دوره ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۰ بررسی و از داده های اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) و رادومتر پیشرفته با وضوح بسیار بالا (AVHRR) استفاده کردند و نتیجه گرفتند که پوشش برف بالاتر از مقدار واقعی تخمین زده شده است. لوپز و همکاران Lopez et al. (2008) با بررسی پوشش برف در میدان یخچالی پاتاگونیا شمالی در شیلی برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ با استفاده از شاخص NDS و MODIS، حداقل و حداکثر مساحت پوشش برف را به ترتیب برابر با ۳۶۰۰ کیلومتر مربع و ۱۱۶۲۳ کیلومتر مربع در مارس ۲۰۰۰ و اوت ۲۰۰۱ مشاهده کردند. یانگ و همکاران Yang et al. (2014) از تصویرهای ماهواره ای هواشناسی برای بررسی توزیع پوشش برف در چین برای زمستان های سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ و ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲ استفاده کردند. دقت تصویرها برابر با ۹۱/۲۸ درصد بود. مارکین و همکاران Marchane et al. (2015) سطح پوشش برف را در مقیاس روزانه در رشته کوه های اطلس در مراکش در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ بررسی و بر مبنای یک الگوریتم مکانی-زمانی از MODIS استفاده کردند. مقایسه اطلاعات میدانی اندازه گیری شده در پنج ایستگاه برف سنجی نشان داد که دقت نقشه های به دست آمده از MODIS برابر با ۸۹ درصد است. توزیع زمانی برف با دقت بسیار خوب و خطای متوسط ۹/۴ تا ۱۱/۴ روز تخمین زده شد. شی و همکاران She et al. (2015) از MODIS و Aqua برای به دست آوردن پوشش روزانه و تغییرات مکانی و زمانی برف در حوضه تیزینافو

اثر افزایش دما بر روند تغییرات ماهانه سطح پوشش، عمق و آب معادل برف و تهدید منابع شرب و کشاورزی

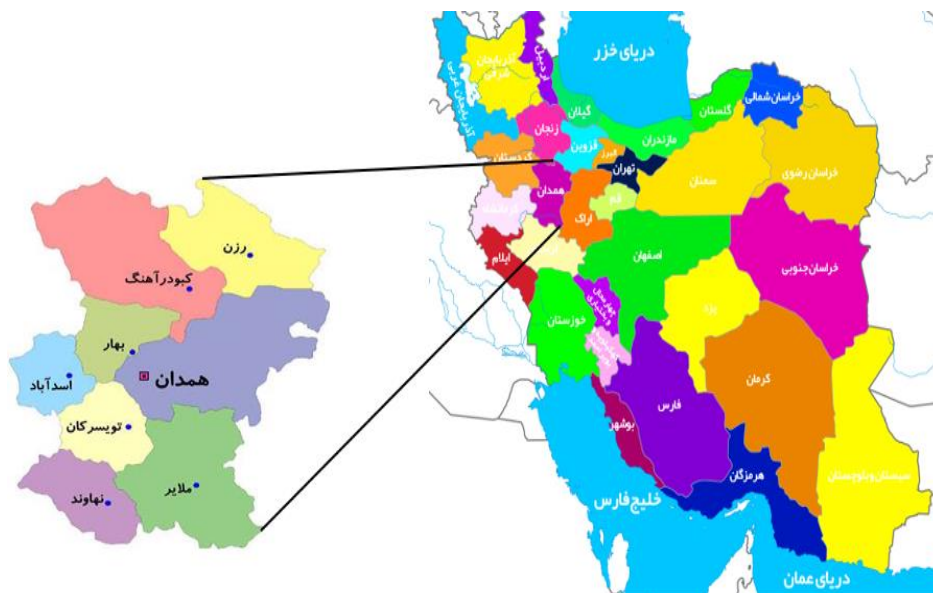
دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی قرار دارد. این استان در غرب ایران و ارتفاع متوسط ۱۶۷۵ متر از سطح دریا قرار گرفته است. بلندترین و پست‌ترین نقاط آن به ترتیب ۳۵۷۴ متر و ۱۴۲۰ متر از سطح دریا در ارتفاعات الوند و محل خروج رودخانه گاماسیاب از استان در دشت نهاوند قرار دارد. همدان یکی از استان‌های کوهستانی و سرد با بارش برف فراوان در زمستان و معتدل در تابستان محسوب می‌شود. با توجه به اطلاعات به دست آمده از ایستگاه‌های مورد مطالعه، متوسط بارندگی استان همدان در دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ برابر با ۳۲۶ میلی‌متر بوده است. بخش کشاورزی در همدان به دلیل موقعیت جغرافیایی و کیفیت خاک آن سهم زیادی در اقتصاد این استان دارد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و نقشه رقوم ارتفاعی استان همدان را نشان می‌دهد.

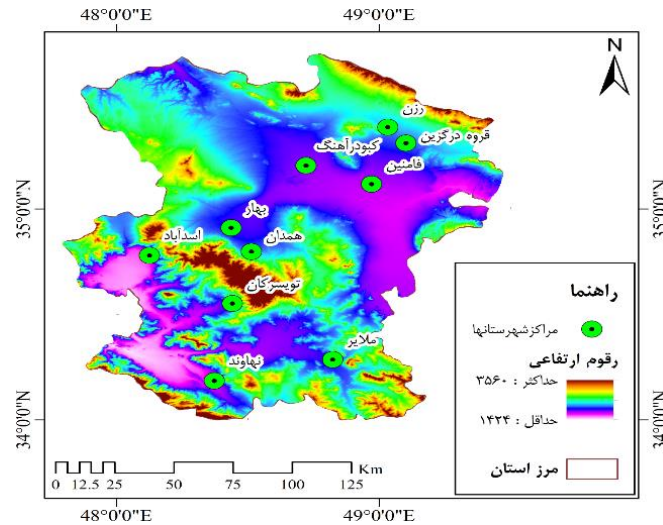
اقلیمی مهم مانند دما و بارش وجود ندارد. با توجه به اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات بارش برف در گذر زمان، هدف مطالعه حاضر بررسی توزیع زمانی پوشش برف در استان همدان بین ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳ است. برای این منظور، داده‌های سطح پوشش برف، عمق برف و حجم آب معادل برف در ماه‌های مختلف سال در این دوره با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای به دست آمده از محصول FLDAS تخمین زده شد. سپس روند افزایشی یا کاهش‌ی این داده‌ها تعیین شد و میزان همبستگی آنها با پارامترهای هواشناسی دما و بارش به دست آمد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه استان همدان است که با مساحت ۱۹۵۴۵/۸۲ کیلومتر مربع (۱/۲ درصد از وسعت ایران) در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۷





شکل ۱- موقعیت استان همدان در ایران و نقشه رقوم ارتفاعی آن

Fig. 1. The Location of Hamedan Province in Iran and its DEM

محصول در عرض و طول جغرافیایی به ترتیب ۹۰ تا ۶۰- درجه و ۱۸۰ تا ۱۸۰- درجه با دقت مکانی ۰/۱'×۰/۱' به صورت ماهانه با فرمت netCDF است و تصویرهای آن از ژانویه ۱۹۸۲ تا کنون در دسترس است. با دریافت این محصول در بین بازه زمانی ژانویه ۱۹۸۲ تا دسامبر ۲۰۲۳ در برش استان همدان، پارامترهای سطح پوشش برف، عمق برف و حجم آب معادل برف استخراج شد.

تعیین روند تغییرات و همبستگی با دما و بارش

آزمون من-کندال^۲

برای بررسی روند افزایشی، کاهشی یا ثابت داده‌ها طی فاصله‌های زمانی مشخص در دوره مورد نظر، از آزمون غیرپارامتری من-کندال استفاده شد:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

داده‌های هواشناسی

داده‌های دمای متوسط و بارش ماهانه برای سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳ از ایستگاه هواشناسی فرودگاه همدان دریافت شد. این ایستگاه با عرض و طول جغرافیایی به ترتیب ۳۴ درجه و ۵۲ دقیقه و ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه در میدان فرودگاه همدان واقع شده است. طبق بررسی‌ها، داده‌های دما و بارش ایستگاه فرودگاه تقریباً با میانگین استان برابر است. این ایستگاه در مرکز استان قرار دارد و به همین دلیل انتخاب شد.

تصویرهای ماهواره‌ای

برای استخراج مقادیر ماهانه پارامترهای سطح پوشش برف، حجم آب معادل برف (SWE) و عمق برف (SDepth) از محصول^۱ FLDAS استفاده شد که از Noah 3.6.1 Land Surface Model به دست آمده است (McNally, 2018). این

$$(1)$$

². Mann-Kendall

¹- Famine Early Warning Systems Network—FEWS NET—Land Data Assimilation System

اثر افزایش دما بر روند تغییرات ماهانه سطح پوشش، عمق و آب معادل برف و تهدید منابع شرب و کشاورزی

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\operatorname{VAR}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (3)$$

$$Z_m = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{VAR}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{VAR}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

همبستگی پیرسون^۲

از روش پیرسون برای تعیین همبستگی توزیع زمانی پوشش برف با دو پارامتر هواشناسی دما و بارش استفاده شد:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

که در آن، n تعداد داده‌ها، X_i و Y_i مقادیر دو متغیر، و \bar{X} و \bar{Y} به ترتیب میانگین آنها هستند. ضریب همبستگی بین دو متغیر در واقع برابر با کوواریانس آنها تقسیم انحراف معیار آنهاست. ضریب همبستگی پیرسون بین -1 و 1 تغییر می‌کند، به طوری که $r=1$ و $r=-1$ به ترتیب بیانگر رابطه مستقیم کامل و رابطه معکوس کامل بین دو متغیر هستند. رابطه مستقیم یا مثبت نشان می‌دهد که اگر یکی از متغیرها افزایش یا کاهش یابد، دیگری نیز افزایش یا کاهش می‌یابد. رابطه معکوس یا منفی بیان می‌کند که اگر یکی از متغیرها افزایش یابد، متغیر دیگر کاهش می‌یابد و بر عکس. وقتی $r=0$ باشد، بین دو متغیر رابطه خطی وجود ندارد.

نتایج و بحث

با توجه به مقادیر به دست آمده از تصویرهای ماهواره‌ای برای دوره ۴۲ ساله ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳ مشخص شد که سال ۱۹۸۲ با مجموع ۴۱۰۴۳/۰۴ کیلومتر مربع بیشترین و سال

که در آنها، n تعداد داده‌ها، X_i و X_j به ترتیب آمین و زمین داده، q تعداد گروه‌های ایجاد شده (با داده‌های برابر و بیشتر از دو عضو)، t_p تعداد داده‌های برابر در p مین گروه، و Z_m مقدار آماره من-کندال است. $Z_m < 0$ بیانگر روند کاهشی و $Z_m > 0$ بیانگر روند افزایشی در سری داده‌هاست. اگر $|Z_m| > 2.58$ و $|Z_m| > 1.96$ باشد، روند به ترتیب در سطح ۱ و ۵ درصد معنی‌دار و گرنه غیرمعنی‌دار است (Mann, Kendall, 1975).

آزمون شیب تایل-سن^۱

در این روش، تغییرات در مقادیر سری زمانی بر اساس محاسبه شیب تغییرات بین کلیه جفت داده‌های مشاهداتی (X_i, X_j) است:

$$\beta = \frac{x_i - x_j}{i - j}, i > j \quad (5)$$

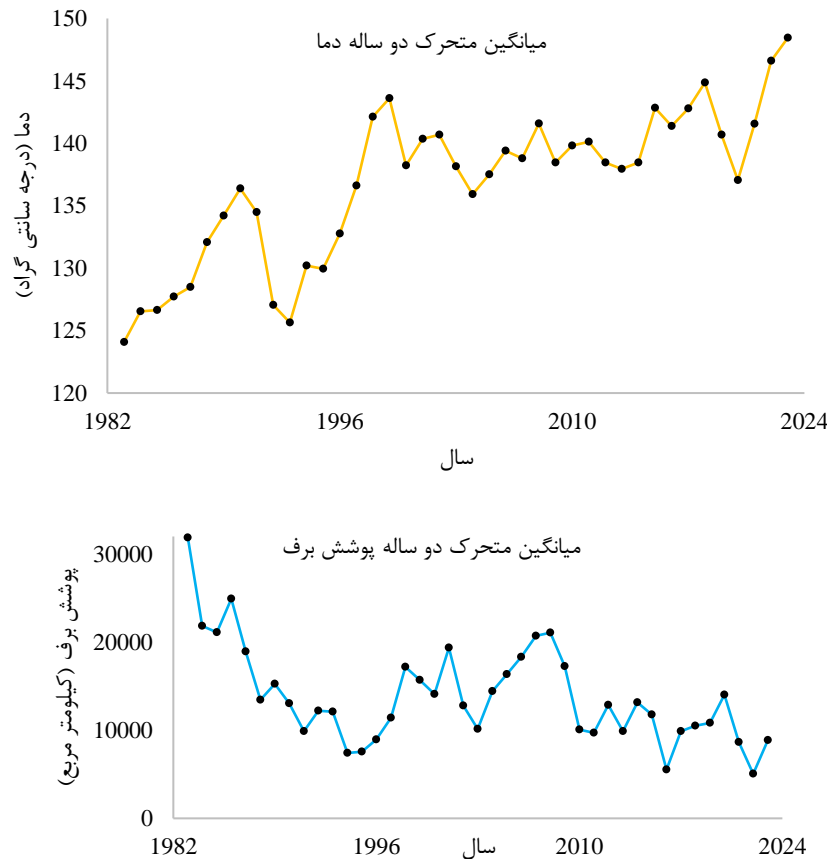
به ازای n داده، تعداد کل شیب‌ها برابر با $n \times \frac{n-1}{2}$ است. میانگین شیب‌های محاسبه شده به عنوان مقدار متوسط شیب سری زمانی در نظر گرفته می‌شود. مقدار مثبت و منفی شیب میانه به ترتیب بیانگر روند صعودی و نزولی است (Theil, 1950; Sen, 1968).

². Pearson correlation

1. Theil-Sen slope

کوهستان الوند همدان گزارش کردند که تغییر اقلیم، روند تند افزایش دما و گرم تر شدن هوا موجب کاهش شدید ارتفاع برف در دوره ۳۰ ساله ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵ شده است. مطابق شکل ۳، میانگین ماهانه SC در این دوره نشان می دهد که پوشش برف در ماه های می تا اکتبر وجود نداشته است و در دو ماه آوریل و نوامبر نیز در مقایسه با ماه های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر بسیار ناچیز (به ترتیب ۱۷۰/۱۰ و ۲۸۶/۷۲ کیلومتر مربع) و قابل صرف نظر است. در میان این چهار ماه، ژانویه بیشترین میانگین SC را با ۵۱۸۲/۲۲ کیلومتر مربع داشته است.

۲۰۲۱ با مجموع ۴۰۴۸/۱۲ کیلومتر مربع کمترین سطح پوشش برف (SC) را داشته اند. این داده ها حاکی از کاهش ۹۰/۱۳ درصدی SC در ۴۲ سال است که با توجه به افزایش متوسط دما از ۹/۴۹ درجه سانتی گراد به ۱۲/۸۲ درجه سانتی - گراد (۳۵/۰۸ درصد) در این دوره قابل درک است. شکل ۲، نمودار میانگین متحرک دو ساله را برای درک بهتر روند کاهش سطح پوشش برف و روند افزایشی دما از سال ۱۹۸۲ تا سال ۲۰۲۳ نشان می دهد. مریانجی و عباسی (Maryanaji and Abbasi, 2016) در بررسی تغییرات بارش برف در



شکل ۲- میانگین متحرک دو ساله دما و سطح پوشش برف در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳

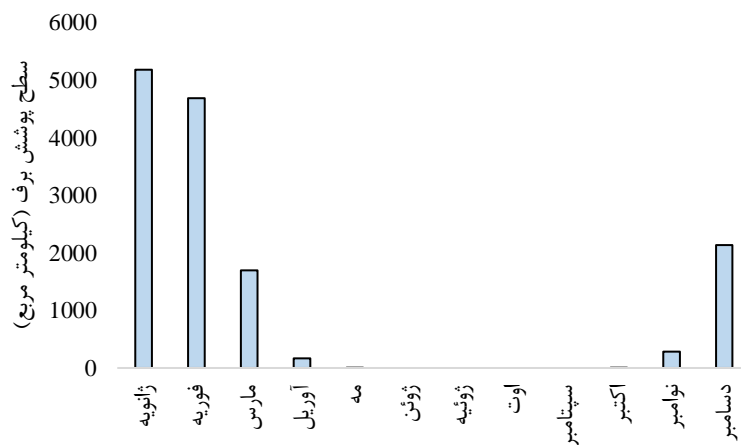
Fig. 2. The two-year moving average of temperature and snow cover in the period 1982-2023

اثر افزایش دما بر روند تغییرات ماهانه سطح پوشش، عمق و آب معادل برف و تهدید منابع شرب و کشاورزی

سانتی گراد، بالاترین دمای متوسط و بعد از سال‌های ۱۹۹۵ با ۶ میلی‌متر، ۲۰۲۱ با ۸/۹۱ میلی‌متر، ۲۰۱۷ با ۹/۰۳ میلی‌متر و ۱۹۸۷ با ۹/۳۰ میلی‌متر، کمترین بارش را داشته است. به عبارتی، دمای متوسط و بارش در ژانویه ۲۰۱۵ از ۸۸ درصد طول دوره به ترتیب بیشتر و کمتر بوده است. بنابراین، ماندگاری برف روی زمین به حداقل مقدار خود در دوره مورد نظر رسیده است. به طور میانگین، طی ۴۲ سال سطح پوشش برف در ماه ژانویه ۵۱۸۲/۲۲ کیلومتر مربع بوده است که نزدیک‌ترین مقدار به آن، مربوط به ژانویه ۲۰۰۳ با ۵۰۹۱/۱۱ کیلومتر است. دمای متوسط و بارش در ژانویه ۲۰۰۳ به ترتیب ۰/۳۳ درجه سانتی‌گراد و ۵۳/۲۰ میلی‌متر بوده‌اند. تصویر ماهواره‌ای سطح پوشش برف در ماه ژانویه ۲۰۰۳ نیز در شکل ۳ ارائه شده است.

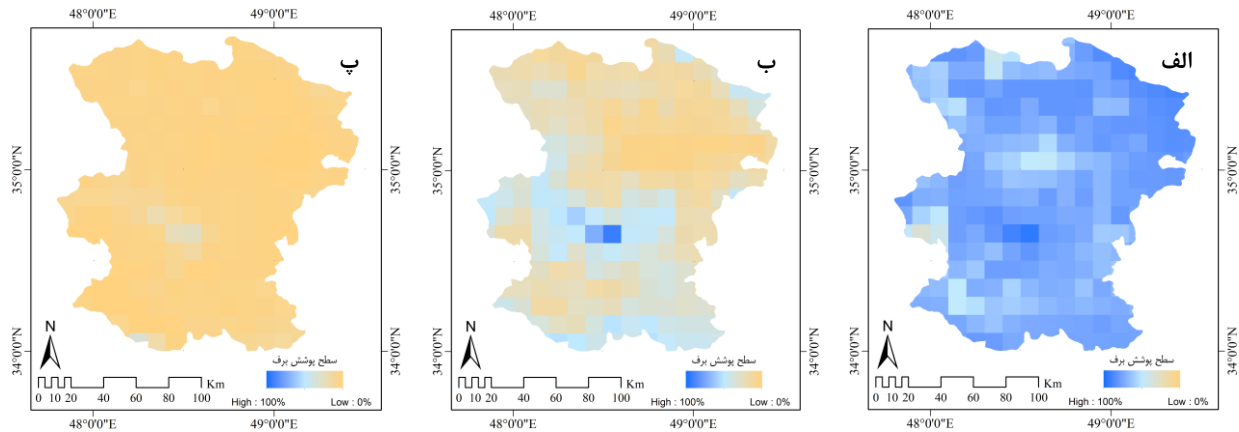
میانگین SC در دوره مورد مطالعه در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر به ترتیب ۳۶/۶۰، ۳۳/۰۹، ۱۱/۹۹ و ۹۶/۷۵ درصد از کل SC سال بوده است که مجموعاً ۹۶/۷۵ درصد را تشکیل می‌دهند. بنابراین، تحلیل‌ها فقط روی چهار ماه ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر بوده است. این ماه‌ها در واقع از اواخر پاییز تا اوایل بهار ایران را در برمی‌گیرند که بارش برف در استان سردسیر همدان نیز در همین دوره زمانی رخ می‌دهد.

در شکل ۴ تصویرهای ماهواره‌ای بیشترین و کمترین سطح پوشش برف در ماه ژانویه مشاهده می‌شود که به ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ و برابر با ۱۳۸۶۳ و ۸۰۳ کیلومتر مربع بوده است. این مقادیر با توجه به مقدار دمای متوسط و بارش ژانویه در این دو سال قابل توجیه و درک است. دمای متوسط در ژانویه ۲۰۰۸ برابر با ۱۰/۳۹- درجه سانتی‌گراد بوده که کمترین دما در ماه‌های ژانویه دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳ است. از طرف دیگر، بارش در ژانویه ۲۰۰۸ برابر با ۵۳/۱۰ میلی‌متر بوده که با توجه به مقادیر میانگین و میانه بارش ماه‌های ژانویه در دوره مورد نظر (به ترتیب ۳۰/۳۸ و ۲۹/۷۷ میلی‌متر)، مقدار قابل توجهی است. در واقع، در این دوره ۴۲ ساله، بعد از سال‌های ۲۰۱۹ با ۶۲/۳۲ میلی‌متر، ۱۹۸۳ با ۵۹ میلی‌متر و ۲۰۰۳ با ۵۳/۲۰ میلی‌متر، ژانویه ۲۰۰۸ بیشترین بارش را داشته است. بنابراین، این دمای حداقل و بارش زیاد باعث ماندگاری بیشتر پوشش برف روی زمین در سال ۲۰۰۸ شده است. در ژانویه ۲۰۱۵، با دمای متوسط ۲/۰۲ درجه سانتی‌گراد و بارش ۹/۸۰ میلی‌متر، استان همدان یکی از گرم‌ترین و کم‌بارش‌ترین ژانویه‌ها را پشت سر گذاشته است. در واقع، ژانویه ۲۰۱۵ بعد از سال‌های ۲۰۱۰ با ۴/۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۹۸۷ با ۲/۵۸ درجه سانتی‌گراد، ۲۰۱۶ با ۲/۴۲ درجه سانتی‌گراد و ۱۹۹۵ با ۲/۲۱ درجه



شکل ۳- میانگین ماهانه SC در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳

Fig. 3. The monthly average of SC in the period 1982-2023



شکل ۴- سطح پوشش برف در ماه ژانویه: الف) حداکثر - سال ۲۰۰۸، ب) متوسط - سال ۲۰۰۳ و پ) حداقل - سال ۲۰۱۵

Fig. 4. The snow cover in January, (a) maximum- 2008, (b) average- 2003, (c) minimum- 2015

ذخیره برفی دسامبر (سال قبل) و ژانویه و تاثیر آن در ماه فوریه است. همین اتفاق در مورد مارس و دسامبر نیز صادق است. مارس نسبت به دسامبر SC کمتر ولی SWE بیشتری دارد. در واقع، ذخیره برفی دسامبر (سال قبل) و دو ماه پیشین، یعنی ژانویه و فوریه، موجب بیشتر بودن SWE مارس نسبت به SWE دسامبر شده است.

در بررسی میزان بارش برف، علاوه بر SC سه پارامتر آب معادل برف، عمق برف و چگالی^۱ (SDensity) برف نیز اهمیت دارند. در جدول ۱، مقادیر میانگین این پارامترها برای چهار ماه ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر آورده شده است. نکته قابل توجه این است با اینکه SC در ژانویه بیشتر از فوریه است اما SWE در فوریه بیشتر است. این موضوع احتمالا به دلیل

جدول ۱- میانگین ماهانه SC، SWE، SDepth و SDensity در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳

Table 1. The monthly average of SC, SWE, SDepth and SDensity in the period 1982-2023

SDensity	SDepth	SWE	SC	
(کیلوگرم بر متر مکعب)	(سانتی متر)	(میلیون متر مکعب)	(کیلومترمربع)	
۱۷۲/۷۶	۵/۰۷	۱۳۲/۸۸	۵۱۸۲/۲۲	ژانویه
۱۸۳/۲۶	۵/۰۶	۱۴۷/۰۳	۴۶۸۶/۳۱	فوریه
۱۷۷/۹۷	۲/۰۲	۷۳/۰۱	۱۶۹۷/۶۱	مارس
۱۸۳/۴۷	۱/۶۷	۴۷/۸۱	۲۱۳۴/۴۰	دسامبر

۰/۰۵ معنی دار است. این سه پارامتر در دسامبر نیز روند تقریبا کاهشی داشته اند اما این روند، محسوس و معنی دار نیست. اسمیت و بوخاگن (2018) Smith and Bookhagen نیز در بررسی تغییرات فصلی SWE در مناطق کوهستانی مرتفع

با توجه به مقادیر آزمون من-کندال در جدول ۲، روند پارامترهای SC، SWE و SDepth در ژانویه، فوریه و مارس در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳ کاهشی بوده است. این روند کاهشی، در ژانویه و به ویژه در مارس در سطح ۰/۰۱ و در فوریه در سطح

^۱. Density

اثر افزایش دما بر روند تغییرات ماهانه سطح پوشش، عمق و آب معادل برف و تهدید منابع شرب و کشاورزی

آسیا در دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۹ به روند کاهشی این پارامتر اشاره کرده‌اند. با توجه به اهمیت دو پارامتر اقلیمی دما^۱ (Temp.) و بارش^۲ (Prec.) در توزیع برف (Guo et al., 2018; Solaimani et al., 2022)، روند این دو پارامتر نیز در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳ در جدول ۲ آورده شده است. مقدار Temp. در هر چهار ماه روند افزایشی داشته است. این روند افزایشی در ژانویه معنی‌دار نیست ولی در فوریه و به ویژه مارس در سطح ۰/۰۱ و در دسامبر در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. مقدار Prec. در هر چهار ماه روند کاهشی داشته است که البته معنی‌دار نیست.

جدول ۲- مقادیر آزمون من-کندال (Z_m) برای پارامترهای SC, SWE, SDepth, Temp. و Prec.
Table 2. The values of the Mann-Kendall test for SC, SWE, SDepth, Temp. and Prec.

Prec.	Temp.	SDepth	SWE	SC	
-۱/۳۲	۱/۸۵	-۲/۷۶**	-۲/۶۶**	-۲/۶۸**	ژانویه
-۰/۵۲	۲/۸۵**	-۲/۲۱*	-۲/۳۸*	-۲/۱۵*	فوریه
-۱/۳۹	۳/۷۹**	-۳/۱۸**	-۳/۲۴**	-۲/۷۷**	مارس
-۱/۲۷	۲/۲۹*	-۰/۴۳	-۰/۳۹	-۰/۱۳	دسامبر

** : معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، * : معنی‌دار در سطح ۰/۰۵

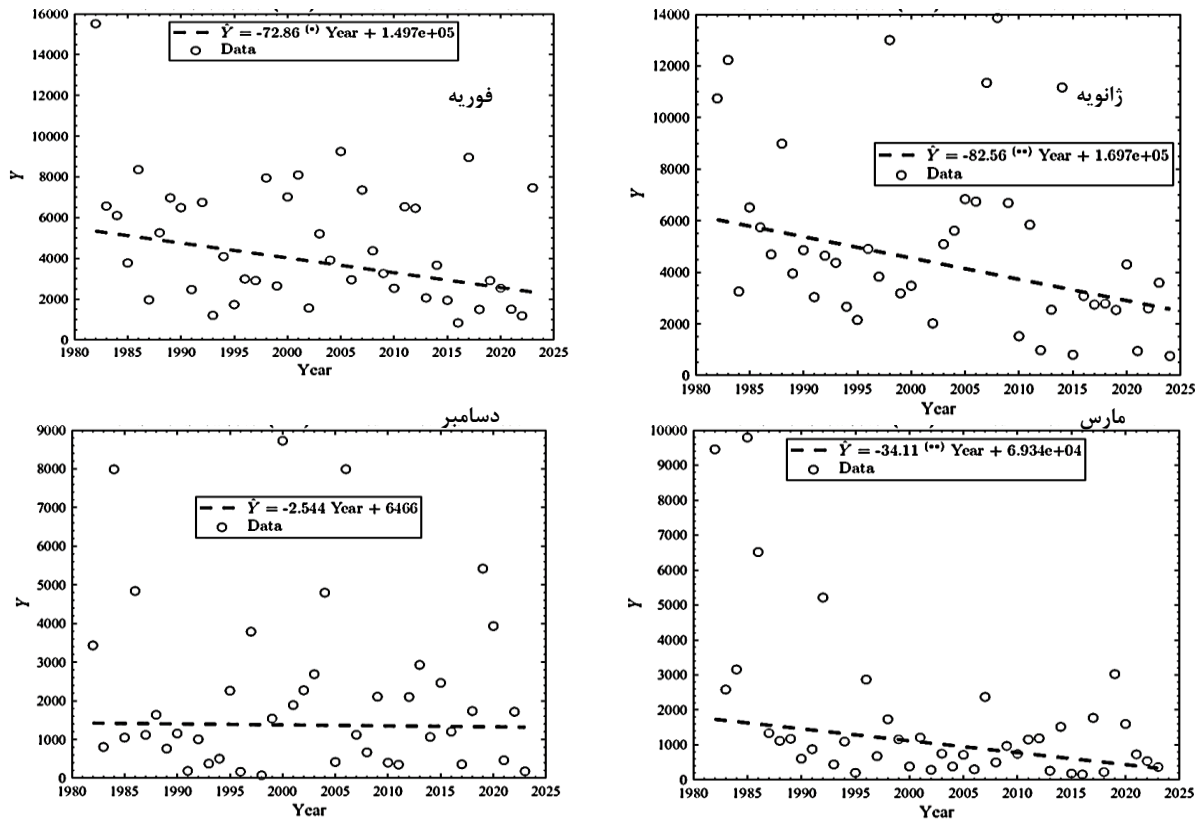
مقادیر آزمون شیب تایل-سن در جدول ۳ شیب کاهش SC, SWE, SDepth و Prec. و شیب افزایش Temp. را در ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر این جدول و شکل ۵، SC در ژانویه و دسامبر به ترتیب تندترین و ملایم‌ترین شیب کاهشی را داشته است. در مورد SWE و SDepth، تندترین شیب کاهشی با اختلافی اندک نسبت به ژانویه، مربوط به فوریه بوده و ملایم‌ترین شیب کاهشی در دسامبر اتفاق افتاده است. افزایش Temp. در دو ماه متوالی دسامبر و ژانویه ملایم‌ترین شیب و تقریباً در دو ماه متوالی فوریه و مارس تندترین شیب را در بین این چهار ماه داشته است. تندترین و ملایم‌ترین شیب کاهش Prec. به ترتیب در مارس و فوریه رخ داده است.

جدول ۳- مقادیر آزمون شیب تایل-سن (β) برای پارامترهای SC, SWE, SDepth, Temp. و Prec.
Table 3. The values of the Theil-Sen's slope test for SC, SWE, SDepth, Temp. and Prec.

β (Prec.) (میلی‌متر در سال)	β (Temp.) (درجه سانتی‌گراد در سال)	β (SDepth) (سانتی‌متر در سال)	β (SWE) (میلیون متر مکعب در سال)	β (SC) (کیلومتر مربع در سال)	
-۰/۲۹	۰/۰۷	-۰/۰۸	-۲/۱۰	-۸۲/۵۶	ژانویه
-۰/۱۰	۰/۱۲	-۰/۰۹	-۲/۳۲	-۷۲/۸۶	فوریه
-۰/۵۱	۰/۱۱	-۰/۰۳	-۱/۱۸	-۳۴/۱۱	مارس
-۰/۴۵	۰/۰۷	-۰/۰۰	-۰/۱۹	-۲/۵۴	دسامبر

². precipitation

¹. Temperature



شکل ۵- شیب کاهش سطح پوشش برف در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳

Fig. 5. The slope of snow cover reduction in the period 1982-2023

بوده است، همبستگی بیشتری با Temp. نسبت به Prec. داشته‌اند. بارت و همکاران (2005) Barnett et al. نیز در بررسی بارش برف بر نواحی برف‌خیز جهان به تاثیرات تغییر اقلیم و کاهش بارش برف در زمستان با گرم شدن جهان اشاره کرده‌اند. در مطالعات گو و همکاران (2022) Guo et al. در مورد تغییرات مکانی-زمانی SC در حوضه رودخانه یارلونگ چین در دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵، عامل محرک تغییرات SC در فصل‌های مختلف تغییر کرد. آنها گزارش کردند که تغییرات SC همبستگی ضعیفی با Temp. در زمستان و با Prec. در تابستان دارد.

مقادیر ضریب همبستگی پیرسون در جدول‌های ۴ تا ۷ حاکی از آن است که پارامترهای SC، SWE و SDepth همبستگی معکوس با Temp. داشته‌اند. این همبستگی‌ها در هر چهار ماه ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بوده‌اند. بیشترین ضریب همبستگی با Temp. مربوط به SC با $r = -0/613$ در ماه ژانویه بوده است. همبستگی این سه پارامتر با Prec. در ژانویه مستقیم و با ضریب متوسط $r = 0/424$ بیشتر از سه ماه دیگر بوده است. این همبستگی در دسامبر نیز معنی‌دار بوده است ولی در فوریه و مارس (به جز SC) معنی‌دار نبوده است. در کل، SC، SWE و SDepth به ویژه در فوریه و مارس که Temp. بیشتر از دسامبر و ژانویه

اثر افزایش دما بر روند تغییرات ماهانه سطح پوشش، عمق و آب معادل برف و تهدید منابع شرب و کشاورزی

جدول ۴- مقادیر ضریب همبستگی (r) بین SC، SWE، SDepth، Temp. و Prec. در ژانویه

Table 4. The values of correlation coefficient (r) between SC, SWE, SDepth, Temp. and Prec. in January

Prec.	Temp.	SDensity	SDepth	SWE	SC	r	
۰/۴۳۹**	-۰/۶۱۳**	-۰/۱۱۵	۰/۹۵۱**	۰/۹۶۹**	۱		SC
۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	۰/۴۶۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰			معنی داری
۰/۳۹۱*	-۰/۵۵۰**	-۰/۰۸۶	۰/۹۷۰**	۱			SWE
۰/۰۱۰	۰/۰۰۰	۰/۵۸۹	۰/۰۰۰				معنی داری
۰/۴۴۳**	-۰/۶۲۵**	-۰/۲۷۳	۱				SDepth
۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۱۳۱					معنی داری
۰/۳۰۹*	۰/۴۸۲**	۱					SDensity
۰/۰۴۶	۰/۰۰۱						معنی داری
-۰/۵۵۹**	۱						Temp.
۰/۰۰۰							معنی داری
۱							Prec.
							معنی داری

** : معنی دار در سطح ۰/۰۱، * : معنی دار در سطح ۰/۰۵

جدول ۵- مقادیر ضریب همبستگی (r) بین پارامترهای SC، SWE، SDepth، Temp. و Prec. در فوریه

Table 5. The values of correlation coefficient (r) between SC, SWE, SDepth, Temp. and Prec. in February

Prec.	Temp.	SDensity	SDepth	SWE	SC	r	
-۰/۰۱۰	-۰/۶۴۰**	۰/۰۸۲	۰/۸۶۳**	۰/۸۷۵**	۱		SC
۰/۹۵۱	۰/۰۰۰	۰/۶۰۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰			معنی داری
۰/۰۷۱	-۰/۴۸۲**	۰/۰۳۶	۰/۹۹۳**	۱			SWE
۰/۶۵۷	۰/۰۰۱	۰/۸۲۰	۰/۰۰۰				معنی داری
۰/۰۹۱	-۰/۵۰۰**	-۰/۰۵۲	۱				SDepth
۰/۵۶۶	۰/۰۰۱	۰/۷۴۵					معنی داری
-۰/۰۹۷	-۰/۰۰۲	۱					SDensity
۰/۵۴۱	۰/۹۹۲						معنی داری
۰/۰۷۰	۱						Temp.
۰/۶۶۱							معنی داری
۱							Prec.
							معنی داری

** : معنی دار در سطح ۰/۰۱، * : معنی دار در سطح ۰/۰۵

جدول ۶- مقادیر ضریب همبستگی (r) بین پارامترهای SC, SWE, SDepth, Temp. و Prec. در مارس

Table 6. The values of correlation coefficient (r) between SC, SWE, SDepth, Temp. and Prec. in March

Prec.	Temp.	SDensity	SDepth	SWE	SC	r	
۰/۳۱۸*	-۰/۶۱۸**	۰/۳۵۴*	۰/۹۸۳**	۰/۹۳۵**	۱	r	SC
۰/۰۴۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰			معنی داری
۰/۲۶۱	-۰/۵۰۶**	۰/۵۰۱**	۰/۹۶۱**	۱		r	SWE
۰/۰۹۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰				معنی داری
۰/۲۴۵	-۰/۵۶۸**	۰/۳۷۸*	۱			r	SDepth
۰/۱۱۸	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴					معنی داری
۰/۱۷۴	-۰/۰۱۴	۱				r	SDensity
۰/۲۷۱	۰/۹۳۱						معنی داری
-۰/۵۸۱**	۱					r	Temp.
۰/۰۰۰							معنی داری
۱						r	Prec.
							معنی داری

** : معنی دار در سطح ۰/۰۱ ، * : معنی دار در سطح ۰/۰۵

جدول ۷- مقادیر ضریب همبستگی (r) بین پارامترهای SC, SWE, SDepth, Temp. و Prec. در دسامبر

Table 7. The values of correlation coefficient (r) between SC, SWE, SDepth, Temp. and Prec. in December

Prec.	Temp.	SDensity	SDepth	SWE	SC	r	
۰/۳۲۱*	-۰/۵۵۱**	۰/۲۱۲	۰/۹۷۵**	۰/۹۶۱**	۱	r	SC
۰/۰۳۸	۰/۰۰۰	۰/۱۷۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰			معنی داری
۰/۳۹۶**	-۰/۴۵۵**	۰/۲۳۱	۰/۹۹۳**	۱		r	SWE
۰/۰۰۹	۰/۰۰۲	۰/۱۴۱	۰/۰۰۰				معنی داری
۰/۳۷۸*	-۰/۴۸۹**	۰/۱۷۶	۱			r	SDepth
۰/۰۱۴	۰/۰۰۱	۰/۲۶۵					معنی داری
-۰/۰۳۵	۰/۰۷۱	۱				r	SDensity
۰/۸۲۸	۰/۶۵۴						معنی داری
-۰/۳۱۸*	۱					r	Temp.
۰/۰۴۰							معنی داری
۱						r	Prec.
							معنی داری

** : معنی دار در سطح ۰/۰۱ ، * : معنی دار در سطح ۰/۰۵

اثر افزایش دما بر روند تغییرات ماهانه سطح پوشش، عمق و آب معادل برف و تهدید منابع شرب و کشاورزی

نتیجه‌گیری

داشته‌اند. دو پارامتر اقلیمی دما و بارش به ترتیب روند افزایشی و کاهش‌ی داشته‌اند. آزمون شیب تایل-سن نشان داد که در ژانویه و دسامبر به ترتیب تندترین و ملایم‌ترین شیب کاهش‌ی سطح پوشش برف رخ داده است. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بیانگر همبستگی معکوس و معنی‌دار سطح پوشش برف، آب معادل برف و عمق برف با دما به ویژه در ماه ژانویه و همبستگی مستقیم با بارش است. در کل، همبستگی پارامترهای بارش برف با پارامتر دما، به ویژه در ماه‌های گرم‌تر، بیشتر از همبستگی آنها پارامتر بارش بوده است.

در این مطالعه، با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای حاصل از محصول FLDAS، داده‌های سطح پوشش برف، حجم آب معادل برف و عمق برف در استان همدان برای دوره ۴۲ ساله ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۳ به دست آمد. نتایج نشانگر کاهش شدید سطح پوشش برف در این دوره است که با توجه به تغییر اقلیم و افزایش دما قابل انتظار بوده است. طبق آزمون من-کندال، سطح پوشش برف، آب معادل برف و عمق برف روند کاهش‌ی

فهرست منابع

- Barnett, T., Adam, J. and Lettenmaier, D. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438: 303-309.
- Chen, W., Ding, J., Wang, J., Zhang, J. and Zhang, Zh. 2020. Temporal and spatial variability in snow cover over the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China, from 2001 to 2015. *Peer J*, 8: e8861.
- Darlane, A.F., Khoramian, A. and Santi, E. 2017. Investigating spatiotemporal snow cover variability via cloud-free MODIS snow cover product in Central Alborz Region. *Remote Sensing of Environment*, 202: 152-165.
- Ghasemifar, E., Rezaeyi, M. and Eysvand Zibaie, F. 2015. Spatio-temporal analysis of snow cover in Iran based on topographic characteristics. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 15 (39): 117-137. (In Persian)
- Guo, R.Y., Ji, X., Liu, Ch.Y., Liu, Ch., Jiang, W. and Yang, L.Y. 2022. Spatiotemporal variation of snow cover and its relationship with temperature and precipitation in the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra River Basin. *Journal of Mountain Science*, 19 (7): 1901-1918.
- Kendall, M.G. 1975. *Rank Correlation Methods*, 4th edition. Charles Griffin, London.
- Khali, H., Pandey, P., Ali, Sh.N. and Champatiray, P.K. 2002. MODIS Observed Spatiotemporal Variation of Snow Cover in Zaskar Valley, North-Western Himalaya. *Frontiers in Water*, 4: 853146.
- Kuter, S., Akyurek, Z. and Weber, G.W. 2018. Retrieval of fractional snow covered area from MODIS data by multivariate adaptive regression splines. *Remote Sensing of Environment*, 205: 236-252.
- Lee, S., Klein, A.G. and Over, Th.M. 2005. A comparison of MODIS and NOHRSC snow-cover products for simulating streamflow using the Snowmelt Runoff Model. *Hydrological Processes*, 19 (15): 2951-2972.
- Lopez, P., Sirguey, P., Arnaud, Y., Pouyau, B. and Chevallier, P. 2008. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000-2006). *Global and Planetary Change*, 61 (3-4): 103-116.
- Mann, H.B. 1945. Non-parametric tests against trend, *Econometrica*, 13 (3): 245-259.
- Marchane, A., Jarlan, L., Hanich, L., Boudhar, A Gascoin, S., Tavernier, A., Filali, N., Page, M.L., Hagolle, O. and Berjamy, B. 2015. Assessment of daily MODIS snow cover products to monitor snow cover dynamics over the Moroccan Atlas mountain range. *Remote Sensing of Environment*, 160: 72-86.

- Maryanaji, Z. and Abbasi, H. 2016. Study of changes in snowfall for winter tourism planning in the Alvand mountains in Hamedan. *Journal of Heritage and Tourism*, 1 (3): 37-52. (In Persian)
- McNally, A.L. NASA/GSFC/HSL. 2018. FLDAS Noah Land Surface Model L4 Global Monthly 0.1 x 0.1 degree (MERRA-2 and CHIRPS), Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [3/24/2024].
- Salahi, B. and Nakhostinrouhi, M. 2019. Spatial and temporal monitoring of snow cover using NOAA-AVHRR Images (Case study: Balighlu Chay Watershed). *Iranian Water Research Journal*, 12 (3): 89-97. (In Persian)
- Selkowitz, D.J. and Forster, R.R. 2016. An automated approach for mapping persistent ice and snow cover over high latitude regions. *Remote Sensing*, 8 (1): 16.
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63 (324): 1379-1389.
- She, J., Zhang, Y., Li, X. and Feng, X. 2015. Spatial and temporal characteristics of snow cover in the Tizinafu watershed of the western Kunlun Mountains. *Remote Sensing*, 7 (4): 3426-3445.
- Shrestha, M., Wang, L., Koike, T., Tsutsui, H., Xue, Y. Hirabayashi, Y. 2014. Correcting basin-scale snowfall in a mountainous basin using a distributed snowmelt model and remote-sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (2): 747-761.
- Smith, T. and Bookhagen, B. 2018. Changes in seasonal snow water equivalent distribution in High Mountain Asia (1987 to 2009). *Science Advances*, 4 (1): e1701550.
- Solaimani, K., Darvishi, Sh., Shokrian, F. and Rashidpour, M. 2018. Monitoring temporal-spatial variations of snow cover using MODIS images (Case Study: Kurdistan Province). *Iranian Remote Sensing & GIS*, 10 (3): 77-104. (In Persian)
- Tekeli, A.E., Akyurek, Z., Sorman, A.A., Sensoy, A. and Sorman, A.U. 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.
- Theil, H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis." I, II, III. *Nederlands Akad. Wetensch. Proc. Ser. A*, 53, 386-392, 521-525, 1397-1412.
- Wang, L., Sharp, M., Brown, R., Derksen, Ch. and Rivard, B. 2005. Evaluation of spring snow covered area depletion in the Canadian Arctic from NOAA snow charts. *Remote Sensing of Environment*, 95 (4): 453-463.
- Xin, J., Ke, C., Xu, Y. and Li, X. 2015. Spatial and temporal variations of snow cover in the Loess Plateau, China. *International Journal of Climatology*, 35 (8): 1721-1731.
- Yang, J., Jiang, L., Shi, J., Wu, Sh., Sun, R. and Yang, H. 2014. Monitoring snow cover using Chinese meteorological satellite data over China. *Remote Sensing of Environment*, 143: 192-203.
- Ye, L. and Grimm, N.B. 2013. Modelling potential impacts of climate change on water and nitrate export from a mid-sized, semiarid watershed in the US Southwest. *Climatic Change*, 120 (1-2): 419-431.
- Zhang, T., 2005. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview. *Reviews of Geophysics*, 43 (4): 1-23.



Original Research

The Impact of Temperature Increase on Monthly Trends in Snow Cover, Depth, and Water Equivalent, and the Threats to Drinking and Agricultural Resources; A Case Study of Hamadan Province

Ali Afruzi, *Farshid Taran

*** Corresponding Author:** Assistant Professor; Agricultural Engineering Research Institute (AERI); Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Karaj; Iran

Received: 3 may 2024, **Accepted:** 13 July 2024

<https://doi.org/10.22092/IDSER.2024.365660.1580>

Introduction

Snow is an important source for water supply in the agricultural sector, electricity production, groundwater reserves, and rivers. This natural resource is important since it stores water in winter with low demand and releases it in hot seasons with high demand. Melted snow flow can be very useful in low-water seasons. In arid and semi-arid regions, snow is considered a basic source of fresh water. Significant spatiotemporal changes in distribution of snow on the scale of a basin can be important in determining the time and amount of snow melting in spring. These changes can increase the probability of drought and runoff. Therefore, snow cover plays an important role in the study of hydrological processes and climate changes. Snow cover is sensitive to temperature and environmental changes and can be a good indicator for local and global climate changes. The lack of sufficient and correct information about snow reserves can lead to inappropriate use of water resulting from snow melting and, as a result, irreparable damages. Therefore, measuring the surface covered by snow and its water equivalent, along with other information such as snow density, especially in areas where snow accounts for a large share of precipitation, is essential for resource planning and management. However, it is not possible to measure it in many areas due to harsh environmental conditions. Also, the data measured at one point cannot be generalized to a wide area of a basin. Thus, the use of satellite images can be considered as one of the methods of investigating spatial and temporal changes in distribution of snow in a region. The use of these images is much more economical and efficient, compared to the point data of ground stations, due to the high coverage and the ability to take pictures of an area at different times with high accuracy.

Hamadan is one of the provinces with a lot of snowfall in Iran, whose economy is largely dependent on agriculture, and snowfall plays a significant role in supplying the water needed for agriculture and drinking. However, there is no research on the temporal changes of snow cover in this province and its relation with changes in important climatic parameters such as temperature and precipitation. Considering the effect of climate change on changes in snowfall over time, the aim of this study was to investigate the temporal distribution of snow cover in the province of Hamedan during 1982-2023. For this purpose, the data of snow cover, snow depth and snow water equivalent in different months of the year were estimated using satellite images obtained from the FLDAS product. Then, the increasing or decreasing trend of these data was determined. Finally, their correlation with meteorological parameters of temperature and precipitation was obtained.

Materials and methods

To obtain the monthly values of snow cover (SC), snow water equivalent (SWE) and snow depth (SDepth) from January 1982 to December 2023, the FLDAS (Famine Early Warning Systems Network—FEWS NET—Land Data Assimilation System) product from the Noah 3.6.1 Land Surface model was used. This product is at latitude 90° to -60° and longitude 180° to -180° with a spatial resolution of 0.1°×0.1° in netCDF format and its images are available monthly from January 1982 until now.

The non-parametric Mann-Kendall test was used to investigate the increasing, decreasing or constant trend of the data during specific time intervals in the period. The Theil-Sen slope was used to calculate the slope of the trends. The correlation of the temporal distribution of snow cover with the two meteorological parameters of temperature and precipitation was determined using the Pearson's method.

Results and discussion

The results showed that the year 1982 with a total of 41043.04 km² had the highest and the year 2021 with a total of 4048.12 km² had the lowest SC. These data indicated a 90.13 percent decrease in SC in 42 years, which is understandable considering the 35.08 percent increase in the mean temperature (from 9.49 to 12.82 °C) in this period. The monthly average of SC in this period showed that there was no snow cover from May to October, and in April and November it was very insignificant and negligible compared to in January, February, March and December. Among these four months, January had the highest average SC.

According to the Mann-Kendall test, the trends of SC, SWE and SDepth was decreasing in all the four months of January, February, March and December. Temperature and precipitation values had increasing and decreasing trends, respectively.

According to the Theil-Sen slope test, SC had the steepest and gentlest decreasing slope in January and December, respectively. In the case of SWE and SDepth, the steepest decreasing slope was related to February, and the gentlest decreasing slope occurred in December. The increase in temperature had the gentlest slope in the two consecutive months of December and January, and the steepest slope in the two consecutive months of February and March. The steepest and gentlest slope of decrease in precipitation occurred in March and February, respectively.

The Pearson's correlation coefficient values indicated that SC, SWE and SDepth had inverse correlation with temperature and direct correlation with precipitation. Overall, SC, SWE, and SDepth were more correlated with temperature than with precipitation, especially in February and March when temperature was higher than in December and January.

Conclusion

In this study, using the satellite images obtained from the FLDAS product, the data of snow cover, snow water equivalent and snow depth were obtained in the province of Hamedan for the 42-year period of 1982-2023. The results showed a significant decrease in the snow cover during this period, which was expected due to the climate change and temperature increase. The snow cover, snow water equivalent and snow depth had decreasing trends. The trends of the two climatic parameters, temperature and precipitation, were increasing and decreasing, respectively. The steepest and gentlest slope of the decrease in snow cover occurred in January and December, respectively. There was an inverse correlation of snow cover, snow water equivalent and snow depth with temperature, and a direct correlation with precipitation. In general, the correlation of snowfall parameters with temperature, especially in warmer months, was more than their correlation with precipitation.

Keywords: Mann-Kendall, Pearson correlation, Satellite images, Snow density, Theil-Sen slope