

تحلیل تغییرات فضایی- زمانی میانگین عمق برف در منطقه شمال غرب ایران

زهرا حیدری منفرد^۱، سید حسین میرموسوی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیای دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

عمق برف یکی از پارامترهای فیزیکی کلیدی برای درک تعادل انرژی سطح زمین، رژیم حرارتی خاک، چرخه آب و ارزیابی منابع آب اجتماع محلی تا تأمین آب صنعتی منطقه‌ای است. فعل و انفعالات / اثر متقابل فرآیندهای طبیعی پویای محیط‌های کوهستانی بر توزیع برف، الگوهای متغیر فضایی- زمانی از عمق برف را ایجاد می‌کند. هدف اصلی این مطالعه بررسی تغییرپذیری مکانی و زمانی در عمق برف در منطقه شمال غرب ایران است. داده‌های مورد استفاده شامل مشاهدات بلند مدت از پایگاه ECMWF/ERA5 برای دوره زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۲ با تفکیک مکانی ۰/۲۵ در ۰/۲۵ درجه دریافت و سپس به چهار دوره ده ساله تقسیم گردید. از شاخص‌های موران جهانی و تحلیل لکه‌های داغ (گتیس-آرد جی) در سطح معنی‌داری ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ درصد جهت تحلیل تغییرات خودهمبستگی فضایی استفاده گردید. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، با وجود کاهش میانگین ماهانه عمق برف در پاییز به مقدار ۰/۲۲٪ و افزایش آن در زمستان به مقدار ۰/۴۰۲ متر معادل آب (بخصوص در ماه فوریه برابر با ۰/۱۰۷ متر معادل آب)، دهه‌ی اول هر یک از شش ماه مورد بررسی بیش‌ترین مقدار عمق برف را به خود اختصاص داده ولی با گذر بازه‌های زمانی به لحاظ گستردگی (تعداد پیکسل) و نیز مقدار عمق برف کاهش روی داده است. همچنین بارش برف بویژه در ماه نوامبر تا مارس بیش‌تر از دما بر عمق برف اثر داشته است. در تغییرات درون دهه‌ای عمق برف نیز اثر ارتفاع شامل جهت شیب شمالی به خوبی نمایان شد که بالاترین مقادیر عمق برف در هر یک از دهه‌ها متمرکز بر مناطق پُر ارتفاع بوده است. با این وجود در حالت کلی میزان عمق برف در کل گستره شمال غرب در طی چهار دهه اخیر کاهش محسوس داشته است. همچنین مشخص گردید که عمق برف منطقه دارای خودهمبستگی فضایی و الگوی خوشه‌ای شدید می‌باشد. به عبارت دیگر در الگوی حاکم بر میانگین سالانه‌ی عمق برف منطقه، بیش‌تر به شکل‌گیری خوشه‌های سرد شامل مقادیر پایین‌گرایش وجود دارد

کلید واژه‌ها: عمق برف، آمار فضایی، خودهمبستگی فضایی، الگوی خوشه‌ای، شمال غرب.

۱- مقدمه

سه پارامتر مهمی که پوشش فصلی برف را توصیف می‌کنند عبارتند از عمق برف^۱، آب معادل برف^۲ و تراکم برف^۳ که ارزیابی منابع آب، تعادل انرژی سطحی، فرآیندهای مختلف هیدرولوژیکی و اکوسیستم‌های زمین همگی به طور قابل توجهی تحت تأثیر این متغیرها هستند. این پارامترها در پوشش برف توسط توپوگرافی منطقه نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند. پارامترهای توپوگرافی مانند ارتفاع^۴ و جهت شیب^۵ و پوشش گیاهی با وضوح مکانی پوشش برف ارتباط زیادی دارد (Pandey, 2022 & Zhong et al, 2021). توپوگرافی پیچیده، عامل محرک اصلی ناهمگونی فضایی بارش و شیب ارتفاعی برف است (Mott, 2014). در شرایط گرم شدن کره زمین که در دهه‌های اخیر میانگین دمای فصل زمستان افزایش پیدا کرده است (فلاحی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Akhtar et al, 2008؛ VanVuuren et al, 2011؛ Jain et al, 2010؛ Gan et al, 2015 & Marengo et al, 2014) و نیز افزایش رویدادهای شدید آب و هوایی^۶ به مانند افزایش بارش‌های فرین در سال‌های اخیر (حیدری منفرد، ۱۴۰۲؛ Hundecha & Bardossy, 2005; Costa et al, 2012 & Manca et al, 2016) فراوانی کولاک‌ها افزایش یافته است و پایش دقیق عمق برف می‌تواند به ارتقای سطح هشدار اولیه و پیشگیری از توفان‌های برفی کمک کند. درک توزیع مکانی و تکامل زمانی عمق برف فصلی، که به عنوان فاصله عمودی از سطح برف تا پایه برف تعریف می‌شود، برای مدیران منابع آب، محققان آب و هوا، دولت‌های محلی و پیش‌بینی‌کنندگان بهمن ضروری است. با این حال، کمی کردن عمق برف بویژه در مناطق کوهستانی، به دلیل ماهیت چند مقیاسی^۷ فرآیندهای فیزیکی حاکم بر توزیع عمق برف، چالش برانگیز است (Miller, 2022). مشاهدات ماهواره‌ای مایکروویو غیر فعال^۸ در ارزیابی عمق برف کاربرد فراوانی داشته است (Chang et al, 1987; Kelly, 2009; Foster et al, 2011 & Lignei et al, 2014). علاوه بر آن روش‌های آماری نیز در این زمینه پرکاربرد بوده است (Molotch et al, 2005; Tabari et al, 201; Hartl, 2018; Shen et al, 2018 & Li et al,

2019). در پژوهش‌های داخلی نیز، بررسی و شبیه‌سازی توزیع مکانی عمق برف حوزه آبخیز چلگرد ایران، به کمک روش آماری رگرسیون خطی^۹ (آصفی و فتح‌زاده، ۱۴۰۱؛ آصفی و همکاران، ۱۴۰۱ و آصفی و فتح‌زاده، ۱۴۰۲) و بررسی تغییرپذیری تعداد روزهای برفی و عمق برف با استفاده از روش آماری حداقل مربعات^{۱۰} و آزمون من-کندال^{۱۱} (طاهری و ارکیان، ۱۳۹۲) صورت پذیرفته شده است. پژوهش‌های برآورد دمای سطح برف و گستره پوشش برف حوزه‌های استان گلستان (۲۰۰۸-۲۰۰۰) (فتاحی و وظیفه‌دوست، ۱۳۹۰)؛ بررسی تغییرات پوشش برف شمال غرب ایران (میرموسوی و صبوری، ۱۳۹۳)؛ ارزیابی خصوصیات فیزیکی برف و تغییرات عمق برف اکتبر ۲۰۱۲ تا می ۲۰۱۳ در تهران (الحسینی المدرسی و همکاران، ۱۳۹۵) و نیز تحلیل همبندی و ماهواره‌ای وقوع برف سنگین روز ۱۳ ژانویه ۲۰۰۸ گیلان (شادپور و همکاران، ۱۳۹۷) به کمک داده‌های سنسجش از دور^{۱۲} شکل گرفته‌اند. بدین ترتیب اغلب مطالعات داخلی که در زمینه برف صورت گرفته، بیش‌تر در حوزه‌ی برآورد و پیش‌بینی سطح پوشش و عمق برف با استفاده از تصاویر سنسجش از دور ماهواره‌ای و نیز روش‌های آماری و همبندی می‌باشد و در کم‌تر پژوهشی از قابلیت‌های پایگاه‌های بازتحلیل شده استفاده شده است، از جمله پژوهش‌های جهان‌بخش‌اصل و همکاران (۱۳۹۹)، ساری صراف و همکاران (۱۳۹۸) و نقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸)، که به ترتیب تغییرات زمانی و مکانی فصل برف منطقه‌ی زاگرس (۲۰۱۰-۱۹۷۹)، خودهمبستگی فضایی و نیز روند عمق برف پهنه‌ی شمالی ایران (۲۰۱۶-۱۹۸۰) را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. از طرف دیگر در حال حاضر، عمق برف عمدتاً از طریق مشاهدات ایستگاه (به شکل دستی و خودکار)، سنسجش از دور ماهواره‌ای و شبیه‌سازی مدل تعیین می‌شود. مشاهدات ایستگاهی می‌تواند عمق برف مکان را بهتر نشان دهد، اما نمایش فضایی ضعیفی دارد. سنسجش از دور ماهواره‌ای می‌تواند توزیع برف را بهتر از مشاهدات ایستگاه عمق برف، ثبت کند. اما سنسجش از دور ماهواره‌ای نیز توانایی نفوذ ضعیفی برای عمق برف دارد و

⁸ Passive MicroWave (PMW)

⁹ Linear Regressions

¹⁰ Least Squares Error

¹¹ Mann-Kendall

¹² Remote sensing (RS)

¹ snow depth

² Snow water equivalent (SWE)

³ Snow density

⁴ Elevation

⁵ Aspect

⁶ Extreme Weather Events

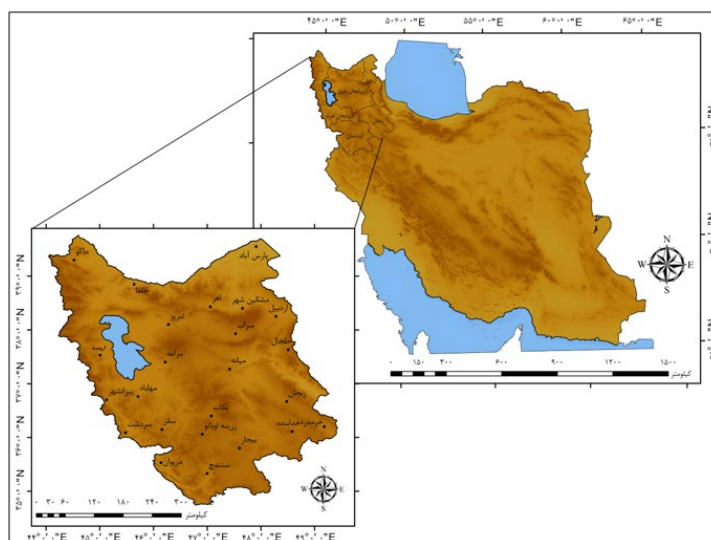
⁷ multi-scalar nature

تغییرات بسته‌های برفی دامنه‌های نسبتاً غیرقابل دسترس کوهستانی، پتانسیل بالایی در کاهش عدم قطعیت تجزیه و تحلیل مرتبط با برف و منابع آب برف دارد.

۲- داده‌ها و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل پنج استان آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان و کردستان؛ به مساحت حدوداً ۱۵۱۷۷۱/۹۱ کیلومتر مربع بین ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۳ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱- نقشه موقعیت و پراکنندگی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه‌ی منطقه‌ی شمال غرب ایران

با استفاده از <http://earthexplorer.usgs.gov> استخراج گردید و با استفاده از نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی^۵، نقشه‌های لایه توپوگرافی و جهت شیب برای محدوده‌ی مورد نظر به دست آمده است.

در پژوهش حاضر به منظور تحلیل فضای تغییرات مقادیر عمق برف شمال غرب، دوره‌ی مورد مطالعه به ۴ دهه‌ی متوالی شامل ((۱۹۹۱-۱۹۸۲)، (۲۰۰۱-۱۹۹۲)، (۲۰۱۱-۲۰۰۲)، (۲۰۲۲-۲۰۱۲)) تقسیم شده است. در مرحله نخست جهت بررسی تغییرات خودهمبستگی فضایی از شاخص‌های آمار فضایی موران عمومی^۶ (Moran's I) (رابطه‌ی ۱) و آماره

تحت تأثیر الگوریتم وارونگی^۱ مورد استفاده، پوشش گیاهی و ابرها قرار دارد (sun et al, 2023).

همچنین با در نظر داشتن اینکه، الگوهای فضایی- زمانی نوع عمق برف در زمین‌های شیب‌دار و پیچیده کوهستانی به طور کامل کاوش نشده است، بدین ترتیب تلاش گشته تا الگوهای آمار فضایی حاکم بر میانگین سالانه و نیز عملکرد نسل پنجم داده‌های بازتحلیل جوی ECMWF/ERA5 برای تخمین میانگین ماهانه عمق برف در پنج استان واقع در ناحیه شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲) طی دهه‌های مختلف همراه با برآورد مقادیر متأثر از ارتفاع، بارش برف، دما و جهت شیب مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج این تحقیق از طریق کمی‌سازی در وضوح‌های بالای مکانی و زمانی، برای تنوع عمق برف و

۲-۲- داده و روش

در این پژوهش برای ارزیابی و تحلیل تغییرات فضایی میانگین عمق برف در منطقه شمال غرب ایران از دو سری داده به شرح زیر استفاده شد:

- داده‌های روزانه‌ی بازتحلیل شده عمق برف ایران اخذ شده از پایگاه داده‌ی مرکز پیش‌بینی میان مدت جوی اروپایی ECMWF/ ERA5 طی سال‌های ۲۰۲۲-۱۹۸۲ استفاده گردید.

- جهت بررسی تغییرات ارتفاعی محدوده مورد مطالعه ابتدا 30*30 DEM^۳ منطقه از ماهواره SRTEM^۴ سایت

^۴ Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)

^۵ Geographic information system (GIS)

^۶ Global Moran Index

^۱ inversion algorithm

^۲ European center for medium-range weather forecasts (ECMWF)

^۳ Digital Elevational Model (DEM)

سپس در دهه‌های بعدی هر کدام از ماه‌ها مقدار عمق برف کاهش یافته است، با این تفاوت که در دهه‌های اخیر ماه فوریه افزایش نسبی عمق برف وجود داشته است. این مسئله می‌تواند ناشی از رویدادهای بارش‌های فرین در سال‌های اخیر باشد (حیدری منفرد، ۱۴۰۲).

با توجه به واریانس^۱ و انحراف معیار^۲ حاصل شده؛ در فصل زمستان طی تمامی دهه‌های ماه فوریه به نسبت سایر ماه‌های مورد مطالعه، بالاترین مقادیر انحرافات عمق برف از میانگین آن برآورد شده است. که بیشترین مقدار انحراف معیار به مقدار ۰/۱۵۴ در دهه‌ی اول ماه فوریه رخ داده است. در محاسبه‌ی متوسط چولگی^۳ و کشیدگی^۴ عمق برف ماه‌های فصول سرد در بازه‌های زمانی متفاوت، مقادیر مثبت حاصل شده که این مقدار انحرافات‌های بیش‌تر از صفر، بر چولگی قوی و مثبت (چوله به راست) و نیز بر تمرکز مشاهدات و توزیع نوک تیز دلالت دارد. بیشترین مقدار رخدادهای عمق برف در مقادیر قبل از مقدار میانگین بوده، از این رو می‌توان استنباط کرد که مقادیر کم عمق برف، با پراکندگی کم‌تر به شکل توزیع افراشته‌تر نسبت به توزیع قرینه، بیشترین احتمال وقوع را به خود اختصاص داده‌اند (عساکره، ۱۳۹۰). دهه‌ی اول (۱۹۹۱-۱۹۸۲) تمامی ماه‌های فصول سرد، نسبت به سایر دهه‌های مورد مطالعه دارای مقادیر بالای عمق برف بوده است؛ که بیشینه متوسط عمق برف به دست آمده در پهنه شمال‌غرب به مقدار ۱/۳۵ متر معادل آب، در دهه‌ی چهارم ماه فوریه می‌باشد. نکته قابل توجه این است که در ماه‌های فصل زمستان طی دهه‌ی اخیر افزایش نامحسوسی در متوسط بیشینه پوشش برف و متقابلاً عمق برف رخ داده است. وقوع این حالت از پدیده‌های مورد بررسی در دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲) می‌تواند ناشی از بارش‌های فرین متمرکز بر مناطق مرتفع شمال‌غرب در سال‌های اخیر باشد. در فصل پاییز، مخصوصاً ماه اکتبر، بجز دهه‌ی سوم (۲۰۱۱-۲۰۰۲)، تغییرات زمانی عمق برف بسیار زیاد است. به ویژه، دهه‌ی دوم ماه اکتبر (۲۰۰۱-۱۹۹۲) نسبت به سایر ماه‌های فصول سرد و بعد از آن، دهه‌های اول و چهارم این ماه با کاهش میانگین و افزایش ضریب تغییرات^۵ و چولگی بالاترین تغییرات را به خود

گنیس-آرد جی (Getis-Ord G_i^*) (رابطه‌های ۲ الی ۴) استفاده شده است:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1) -$$

$$G_i^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_{i,j} x_j - X \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2}{n-1}}} \quad (2) -$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (3) -$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (4) -$$

در رابطه‌ی ۱، n تعداد نمونه‌ها، x_i مقدار متغیر در ناحیه i ، x_j مقدار متغیر در ناحیه j ، \bar{x} میانگین متغیر در کلیه نواحی و w_{ij} وزن به کار رفته برای مقایسه دو ناحیه i و j است (سیف‌الدینی و منصوریان، ۱۳۹۰). همچنین در رابطه‌های ۲، ۳ و ۴؛ G_i^* ضریب همیشگی حادثه i از n حادثه می‌باشد. W فاصله مکانی بین نقطه i و j می‌باشد. X_i یک مقدار توصیفی برای نقطه یا عارضه i می‌باشد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۶). بر اساس این آمارها چگونگی توزیع مکانی شاخص عمق برف سالانه و تغییرات آن در بازه‌های زمانی مورد نظر بررسی شده است. همچنین به دلیل یکسان نبودن دامنه‌ی تغییرات مقدار عمق برف در هر بازه‌ی زمانی، اقدام به تعریف آستانه‌های عمق برف گردید. سپس بر اساس این آستانه‌ها، تعداد پیکسل‌ها و نیز متوسط مقدار عمق برف در هر یک از بازه‌های زمانی برآورد شد. بدین ترتیب با استفاده از فراوانی پیکسل‌ها بر اساس آستانه‌های تعیین شده، بررسی تغییرات زمانی و مکانی عمق برف پهنه‌ی شمال‌غرب ایران انجام گردید.

۳- بحث

بررسی آماری (جدول ۱) میانگین عمق برف شمال‌غرب ایران نشان داد که میزان عمق این پدیده بین تقریباً صفر تا ۰/۱۶۶ متر معادل آب، به ترتیب در فصل پاییز، تمامی دهه‌های ماه اکتبر و فصل زمستان، دهه‌ی اول ماه فوریه در نوسان است. در دهه‌ی اول (۱۹۹۱-۱۹۸۲) تمامی ماه‌های فصول سرد سال (بجز ماه اکتبر) عمق برف با مقادیر بیش‌تری رخ داده است، که بیشینه متوسط عمق برف به مقادیر ۰/۱۶۶ و ۰/۱۴۲ متر معادل آب در ماه‌های فوریه سپس ژانویه به وقوع پیوسته است.

⁴ Kurtosis
⁵ Coefficient Variation

¹ Variance
² Standard deviation
³ Skewness

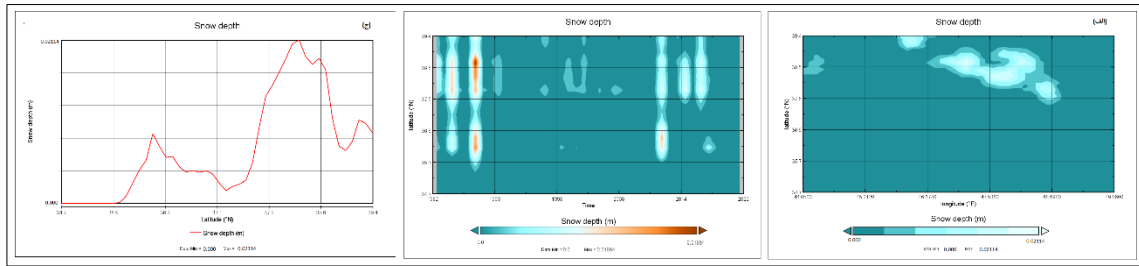
اختصاص داده‌اند، بدین ترتیب در این فصل پدیده عمق برف تصادفی و پراکنده روی می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات آماری عمق برف ماهانه در پهنه‌ی شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲) (متر معادل آب) مبتنی بر پایگاه داده

مشخصه‌های آماری	بازه زمانی	زمستان			پائیز		
		ژانویه	فوریه	مارس	اکتبر	نوامبر	دسامبر
میانگین	دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)	۰/۱۴۳۷۸	۰/۱۶۶۷۵	۰/۱۰۳۱۵	۰	۰/۱۰۵۹۱۸	۰/۰۷۹۸۲
	دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)	۰/۰۸۰۶۷	۰/۰۸۷۸۸	۰/۰۴۴۳۶۲	۰	۰/۰۱۲۲۰۱	۰/۰۴۳۳۸۲
	دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)	۰/۰۸۵۴۱	۰/۱۰۶۲۸	۰/۰۴۰۳۲۲	۰	۰/۰۱۱۷۲۹	۰/۰۴۰۸۱۴
میان	دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)	۰/۰۶۳۷۰	۰/۰۸۸۶۷	۰/۰۴۷۶۱	۰	۰/۰۰۹۲۴۱	۰/۰۴۹۹۰۱
	دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)	۰/۰۹۹۰۷	۰/۱۳۹۸۵	۰/۰۵۹۶۶	۰	۰/۰۰۹۲۴۱	۰/۰۴۸۷۳
	دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)	۰/۰۵۸۶۸	۰/۰۴۹۸۳	۰/۰۱۸۰۱۰	۰	۰/۰۰۴۹۲۳	۰/۰۲۶۳۳۴
واریانس	دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)	۰/۰۶۵۰۵	۰/۰۵۶۷۳	۰/۰۱۳۳۹۶	۰	۰/۰۰۴۶۴۸	۰/۰۲۴۳۲۸
	دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)	۰/۰۳۶۱۰	۰/۰۳۹۸۶	۰/۰۰۸۳۳	۰	۰/۰۰۳۸۶۶	۰/۰۲۸۳۱۳
	دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)	۰/۰۲۰۵۰	۰/۰۲۳۹۴	۰/۰۱۸۱۵	۰	۰/۰۰۱۰۷۴	۰/۰۱۰۷۴
انحراف معیار	دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)	۰/۰۰۶۴۲	۰/۰۰۸۰۳	۰/۰۰۵۶۱۷	۰	۰/۰۰۲۸۲۳	۰/۰۰۲۸۲۳
	دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)	۰/۰۰۶۳۸	۰/۰۱۹۱۵	۰/۰۰۵۲۲۲	۰	۰/۰۰۲۴۵۶	۰/۰۰۲۴۵۶
	دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)	۰/۰۰۵۶۵	۰/۰۱۸۶۸	۰/۰۱۴۵۵	۰	۰/۰۰۴۰۱۴	۰/۰۰۴۰۱۴
کشیدگی	دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)	۰/۱۴۳۱۶	۰/۱۵۴۷۲	۰/۱۳۴۷۲	۰/۰۰۳۶۶۰	۰/۰۲۴۱۹۹	۰/۱۰۳۶۲
	دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)	۰/۰۸۰۱۱	۰/۰۸۹۶۱	۰/۰۷۹۴۷	۰/۰۰۱۰۱۲	۰/۰۲۱۱۲۴	۰/۰۵۳۱۲۸
	دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)	۰/۰۷۹۸۸	۰/۱۳۸۳۹	۰/۰۷۲۲۶۱	۰/۰۰۱۲۳۱	۰/۰۲۰۱۷۳	۰/۰۴۹۵۵۷
چولگی	دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)	۰/۰۷۵۱۹	۰/۱۳۶۶۷	۰/۱۲۰۶۳	۰/۰۰۱۹۸۷	۰/۰۲۶۱۸۵	۰/۰۱۳۳۵۹
	دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)	۹/۷۷	۵/۵۹	۱۴/۴۲	۶۳/۸۹	۴۰/۶۳	۲۱/۷۲
	دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)	۱۰/۸۷	۹/۶۸	۲۲/۴۰	۹۴/۲۶	۳۳/۷۰	۱۶/۷۴
کمینه	دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)	۶/۲۴	۱۰/۶۱	۲۲/۵۵	۳۶/۵۶	۲۸/۸۸	۱۶/۰۵
	دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)	۱۰/۸۴	۱۶/۷۷	۳۵	۴۶/۳۵	۳۷/۵۱	۱۴/۹۶
	دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)	۳/۵۴	۱/۹۸	۳/۲۱	۷/۲۶	۵/۴۳	۳/۷۳
بیشینه	دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)	۲/۶۶	۲/۶۱	۴/۱۳	۹/۰۹	۴/۹۲	۳/۳۸
	دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)	۲/۱۱	۲/۸۱	۴/۱۱	۴/۳۴	۴/۵۲	۳/۲۶
	دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)	۲/۸۲	۳/۵۶	۵/۲۷	۶/۱۲	۵/۱۷	۳/۱۹
کمیته	دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)	۱/۲۲۲۴۵	۱/۱۰۷۷۲	۱/۲۳۱۴۸	۰/۴۴۵۳۶	۰/۲۶۳۱۸	۱/۱۱۴۷۴
	دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)	۰/۶۸۸۱۰	۰/۶۹۵۴۹	۰/۶۹۳۹۲	۰/۱۷۱۴۷	۰/۲۳۲۰۷۲	۰/۵۱۲۶۸۶
	دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)	۰/۵۹۵۸۶	۱/۲۳۲۱۵	۰/۷۱۱۶۴۳	۰/۱۲۳۴۷	۰/۲۱۳۶۴۷	۰/۵۰۰۹۰۱
ضریب تغییرات	دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)	۰/۶۲۶۹۵	۱/۳۴۹۸۲	۱/۴۱۱۱۶	۰/۲۱۷۳۲	۰/۱۸۳۰۰۵	۰/۵۹۸۸۵۳
	دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)	۰/۰۰۵۰۳	۰/۰۰۱۳۲	۰/۰۰۱۳۸	۰	۰	۰
	دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)	۰/۰۰۱۲۸	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۱۱۲۰
مطلعه عمق برف با پیوستگی و مقدار بیش‌تری رخ داده است.	دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)	۰/۰۰۲۱۳	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۱۳۸۴
	دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)	۰/۰۰۱۴۱	۰	۰	۰	۰	۰
	دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)	۱/۰۰۲۷	۰/۹۲۷۹	۱/۳۰۶۱	۲/۸۷۹۶	۱/۵۲۰۲	۱/۲۹۸۲
مطلعه عمق برف با پیوستگی و مقدار بیش‌تری رخ داده است.	دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)	۰/۹۹۳۱	۱/۱۳۷۵	۱/۶۸۹۴	۴/۶۲۱۰	۱/۷۳۱۳	۱/۲۲۴۷
	دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)	۰/۹۳۵۳	۱/۳۰۲۱	۱/۷۹۲۱	۱/۶۵۹۰	۱/۷۱۹۹	۱/۲۱۴۲
	دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)	۱/۱۹۹۲	۱/۵۴۱۳	۲/۵۳۳۷	۲/۵۵۰۷	۱/۷۵۶۴	۱/۲۶۹۷

همچنین با افزودن عرض جغرافیایی در پهنه‌ی شمال غرب ایران عمق برف نیز هر چند به مقدار ناچیز افزایش می‌یابد. افزایش عمق برف در عرض‌های بالاتر (مخصوصاً عرض جغرافیایی ۳۸ درجه شمالی) نشان از فعال بودن سامانه‌های بارش برف در این مناطق از ماه اکتبر می‌باشد (شکل ۲، ج).

با توجه به نیمرخ تغییرات مکانی عمق برف ماه اکتبر (شکل ۲، الف)، در محدوده‌ی طول و عرض جغرافیایی پهنه‌ی شمال غرب ایران پدیده عمق برف به شکل ناچیزی در بخش‌های شمالی روی داده است. در نیمرخ تغییرات زمانی عمق برف در امتداد عرض جغرافیایی (شکل ۲، ب)، در محدوده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه، دهه‌ی اول نسبت به سایر دهه‌های مورد مطالعه عمق برف با پیوستگی و مقدار بیش‌تری رخ داده است.



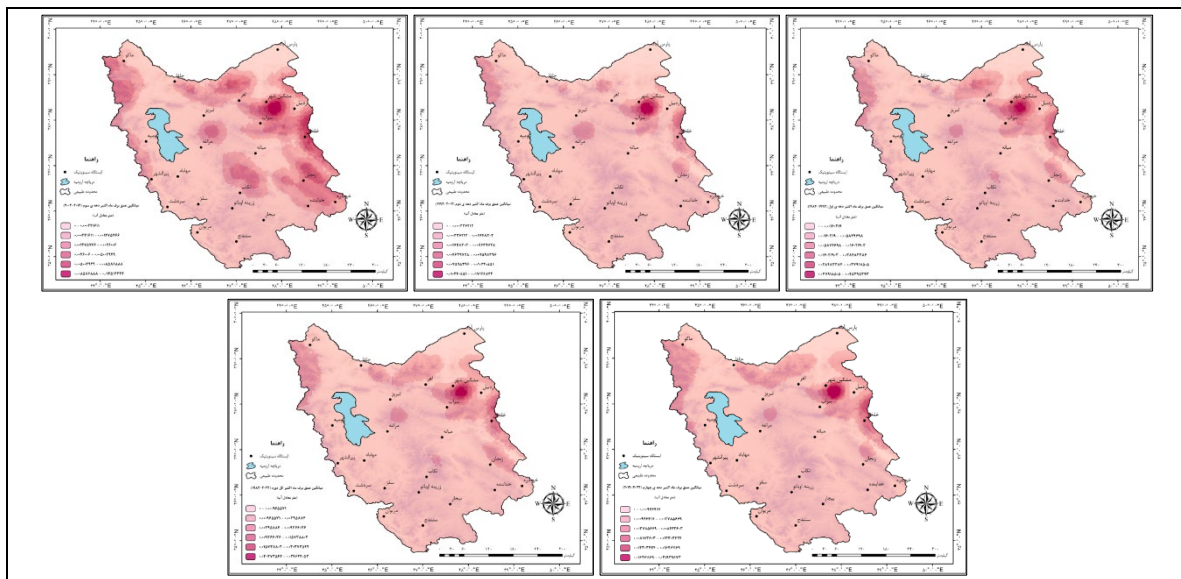
شکل ۲- نیمرخ تغییرات مکانی (الف)، نیمرخ تغییرات زمانی (ب) و نیمرخ تغییرات مقدار (ج) میانگین عمق برف ماه اکتبر (متر معادل آب) در امتداد عرض‌های مختلف جغرافیایی واقع در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

زمانی نیز کاهش عمق برف اتفاق افتاده است. با این وجود در دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲) مجدداً با افزایش میزان آن مواجه گشته، هر چند به شدت و گستردگی عمق برف دهه‌ی اول نمی‌باشد. نکته قابل تامل ناچیز بودن عمق برف در پاییز به ویژه ماه اکتبر می‌باشد. این مسئله نیز می‌تواند تحت تأثیر روند افزایشی میانگین حداقل دما (۰/۰۸ درجه سانتی‌گراد) و نیز فقدان بارش برف ماه اکتبر شمال غرب باشد.

آستانه عمق برف بالاتر از ۰/۰۳، تقریباً در کل منطقه و بازه‌های زمانی مورد بررسی به مقدار ناچیزی بوده (جدول ۲ و شکل ۳)، در حالی که با افزایش میزان آستانه‌های عمق برف در تمامی بازه‌ها، مخصوصاً دهه سوم (۲۰۱۱-۲۰۰۲)، محدوده‌ی (تعداد پیکسل) رخداد عمق برف کاهش یافته است. در حالی که بیشینه میزان عمق برف در اکتبر در دهه اول نسبت به سایر دهه‌ها با آستانه بالاتر از ۰/۰۲، برابر با میزان ناچیز عمق برف ۰/۰۳۱ متر معادل آب است. در گذر بازه

جدول ۲- فراوانی پیکسل و متوسط مقدار پهنه‌های میانگین عمق برف ماه اکتبر (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف بر اساس آستانه‌های تعریف شده در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

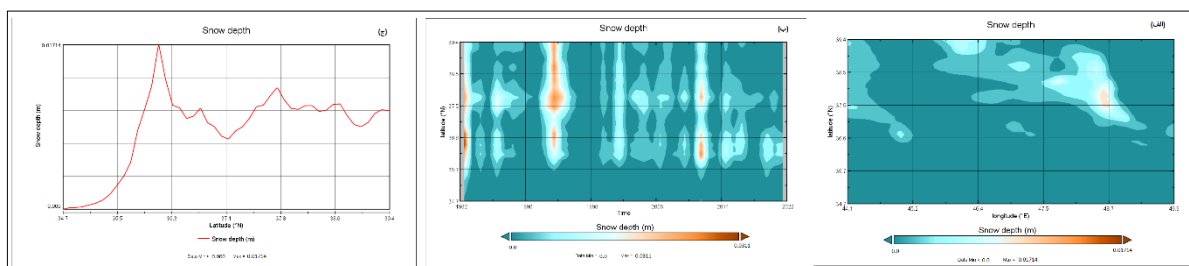
فراوانی پیکسل و متوسط مقدار عمق برف (متر معادل آب) ماه اکتبر در هر دهه										آستانه عمق برف (متر معادل آب)
کل دوره (۱۹۸۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)		دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)		دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)		
۰/۰۰۰۴	۵۳۶۱	۰/۰۰۰۴	۴۶۲۷	۰/۰۰۰۶	۵۲۱۴	۰/۰۰۰۱	۵۱۸۳	۰/۰۰۰۵	۴۸۵۸	≤ ۰/۰۰۳
۰/۰۱۰	۱۴۸	۰/۰۱۰	۱۳۹	۰/۰۰۶	۱۲۱	۰/۰۰۸	۵۶	۰/۰۱۰	۳۵۷	> ۰/۰۰۳
۰/۰۱۶	۵۹	۰/۰۱۴	۶۷	۰/۰۱۰	۲۵	۰/۰۱۱	۲۵	۰/۰۲۱	۱۰۷	> ۰/۰۰۹
۰/۰۲۰	۲۹	۰/۰۱۸	۲۶	۰	۰	۰/۰۱۷	۱	۰/۰۳۰	۵۷	> ۰/۰۱۵
۰/۰۲۱	۱۷	۰/۰۲۱	۳	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳۱	۵۴	> ۰/۰۲۰



شکل ۳- پهنه‌بندی میانگین عمق برف (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

ماه پاییز نسبت به ماه اکتبر افزایش نامحسوس عمق برف در منطقه قابل مشاهده می‌باشد. هر چند در عرض‌های بالاتر (۳۶) درجه شمالی به بالاتر) مقدار روند افزایشی عمق نیز افزوده‌تر می‌شود (شکل ۴، ج). بدین ترتیب در ماه نوامبر فراوانی پیکسل‌های عمق برف با آستانه‌ی عمق برف کم‌تر از $0/026$ متر معادل آب، در هر چهار دهه و کل دوره، به طور متوسط 4974 پیکسل بوده که تقریباً کل منطقه را با مقادیر ناچیز عمق برف فراگرفته است (جدول ۳ و شکل ۵).

در ادامه بررسی متوسط عمق برف در ماه نوامبر، همانطور که در نیمرخ مکانی عمق برف (شکل ۴، الف) مشاهده می‌شود، رخداد این پدیده در عرض‌های جغرافیایی بالای پهنه‌ی شمال‌غرب با هسته‌ی قوی‌تری اتفاق افتاده است. در دهه‌ی اول (۱۹۹۱-۱۹۸۲) هسته‌هایی از عمق برف در شمال‌غرب هر چند ضعیف شکل گرفته است که در عرض‌های فوقانی منطقه (۳۵) درجه‌ی شمالی به بالاتر) از پیوستگی و شدت بالاتری برخوردار می‌باشد. با گذر زمان نیز از این شدت و پیوستگی عمق برف منطقه کاسته شده است (شکل ۴، ب). در دومین



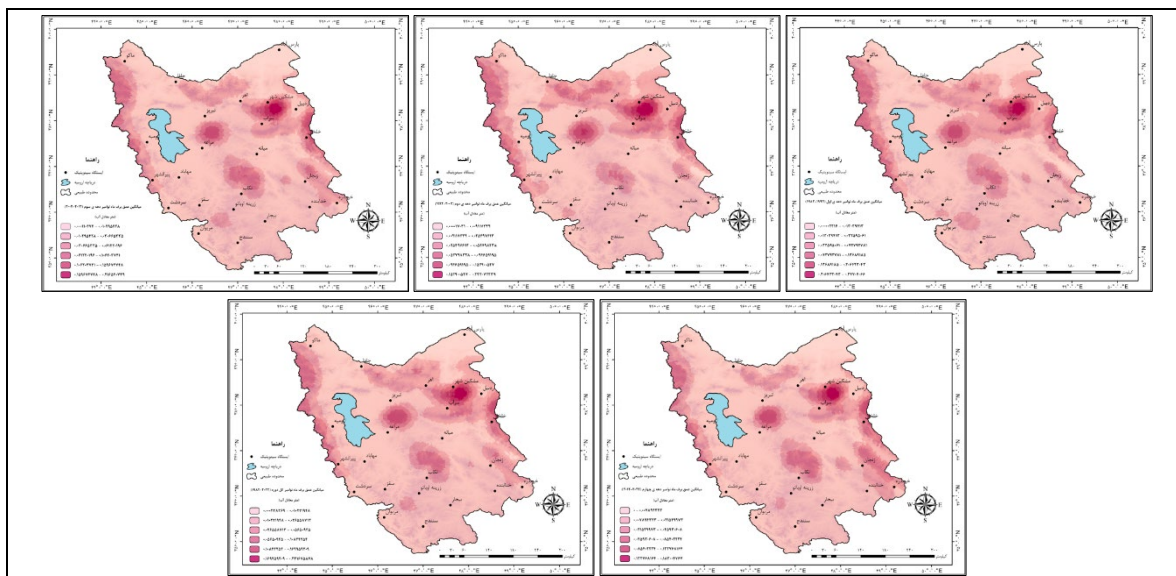
شکل ۴- نیمرخ تغییرات مکانی (الف)، نیمرخ تغییرات زمانی (ب) و نیمرخ تغییرات مقدار (ج) میانگین عمق برف ماه نوامبر (متر معادل آب) در امتداد عرض‌های مختلف جغرافیایی واقع در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

هوای صعود کرده می‌شود. پس از رسیدن به سطح اشیاع، تراکم رطوبت منجر به تشکیل ابرها و نهایتاً در ارتفاعات شروع بارندگی می‌شود (Grünwald et al, 2014). همچنین بالاترین گستره و مقدار عمق برف در دهه‌ی اول اتفاق افتاده است که به لحاظ گستردگی و مقدار رفتاری مشابه با کل دوره آماری داشته و در سال‌های اخیر در هر دو مورد گستردگی و مقدار عمق برف کاهش صورت گرفته است. کاهش عمق برف ماه نوامبر با وجود کم بودن روند افزایشی متوسط حداقل دما به میزان $0/03$ درجه سانتی‌گراد نسبت به دو ماه دیگر پاییز، می‌توان بیش‌تر ناشی از اثر روند کاهشی بارش برف این ماه به مقدار $0/21$ سانتی‌متری مرتبط دانست.

با افزایش آستانه‌های عمق برف، $0/026$ متر معادل آب به بالاتر، از گستردگی پهنه‌های (تعداد پیکسل‌های) عمق برف کاسته ولی بر مقدار آن افزوده شده، که نوع رفتار غالباً منطبق بر مناطق مرتفع منطقه بوده است. این افزایش مقدار عمق برف در محدوده‌های کوچک‌تر در تمامی دهه‌ی مورد مطالعه رخ داده است. با این تفاوت که در گذر بازه‌های زمانی مقدار هر یک از آستانه‌های عمق برف کاهش یافته است. در واقع میانگین عمق برف با افزایش ارتفاع تا سطح معینی افزایش می‌یابد و به دنبال آن در بالاترین ارتفاعات کاهش می‌یابد. بدین‌صورت که توده‌های هوای مرطوب توسط کوه‌ها مسدود می‌شوند، مجبور به صعود در دامنه‌های کوه می‌شوند. کاهش دمای هوا منجر به خنک شدن و کاهش فشار اشیاع بسته‌های

جدول ۳- فراوانی پیکسل و متوسط مقدار پهنه‌های میانگین عمق برف ماه نوامبر (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف بر اساس آستانه‌های تعریف شده در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

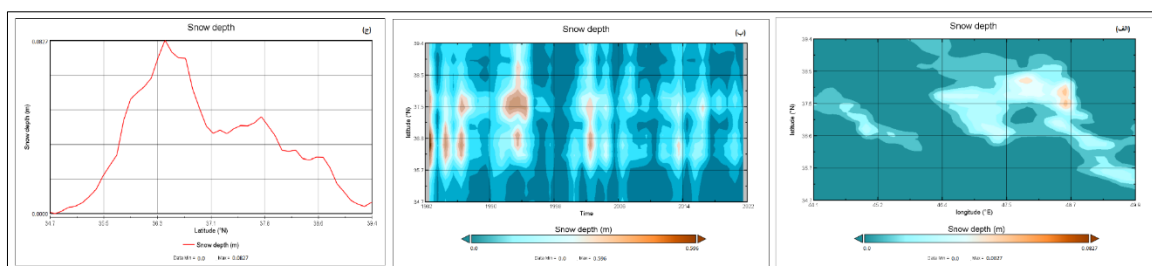
فراوانی پیکسل و متوسط مقدار عمق برف (متر معادل آب) ماه نوامبر در هر دهه										آستانه عمق برف (متر معادل آب)
کل دوره (۱۹۸۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)		دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)		دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)		
۰/۰۰۷	۵۰۱۲	۰/۰۰۵	۵۱۶۹	۰/۰۰۶	۴۹۸۰	۰/۰۰۶	۴۹۴۲	۰/۰۰۸	۴۷۶۹	$\leq 0/026$
۰/۰۵۳	۶۳۲	۰/۰۵۰	۴۳۷	۰/۰۵۳	۶۶۴	۰/۰۵۲	۷۰۲	۰/۰۵۳	۸۷۵	$> 0/026$
۰/۱۰۶	۱۵۵	۰/۰۹۹	۱۰۱	۰/۰۹۵	۱۸۱	۰/۱۰۷	۱۵۹	۰/۱۱۷	۱۷۹	$> 0/056$
۰/۱۶۶	۵۱	۰/۱۴۲	۳۸	۰/۱۵۷	۴۶	۰/۱۵۷	۶۰	۰/۱۷۴	۷۵	$> 0/108$
۰/۲۰۱	۲۲	۰/۱۷۷	۴	۰/۱۹۰	۱۸	۰/۱۹۵	۲۵	۰/۲۲۴	۳۵	$> 0/169$



شکل ۵- پهنه‌بندی میانگین عمق برف (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف ماه نوامبر در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

سازکارهای ناپایداری و تولید بارش فراهم می‌گردد (حلبیان، ۱۳۹۰). در شکل ۶، ب؛ نیز مشخص می‌باشد که در عرض‌های فوقانی شمال غرب، مخصوصاً در امتداد عرض ۳۵/۷ درجه‌ی شمالی، مقدار و تداوم پیوستگی پدیده عمق برف شدیدتر است، هر چند در سال‌های اخیر از شدت آن به نسبت سال‌های اولیه مورد مطالعه کاهش یافته است. آنچه که در شکل ۶، ج؛ قابل توجه می‌باشد، افزایش عمق برف ماه دسامبر نسبت به ماه‌های قبل مخصوصاً در عرض‌های جغرافیایی بالا می‌باشد.

تأثیر ناپایداری‌های بادهای غربی بر افزایش بارش ماه دسامبر شمال غرب ایران با گستردگی پهنه‌های عمق برف به عرض‌های داخل منطقه در شکل ۶، الف؛ به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. گمان می‌رود بارش ایران در دوره گذار پایانی پاییزی با رخداد الگوی گردشی منطبق بر دوره سرد سال ارتباط نزدیکی داشته باشد، که رخداد زمان آرایش گذار پایانی پاییزی، پسروری بیش‌تر و تشدید پرفشار جنب حاره به همراه تقویت و گسترش قلمرو حلقه بادهای غربی به طرف عرض‌های پایین‌تر ایران را نشان می‌دهد. بدین صورت



شکل ۶- نیمرخ تغییرات مکانی (الف)، نیمرخ تغییرات زمانی (ب) و نیمرخ تغییرات مقدار (ج) میانگین عمق برف ماه دسامبر (متر معادل آب) در امتداد عرض‌های مختلف جغرافیایی واقع در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

روزهای برفی منطقه می‌باشد. در واقع بیشینه روزهای برفی شمال غرب در ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر رخ می‌دهد (علیچانی، ۱۳۸۹ و حیدری منفرد، ۱۴۰۲). علاوه بر این در تغییرات درون دهه‌ای هر دوره با افزایش میزان آستانه‌های عمق برف کاهش گستردگی عمق برف به همراه افزایش مقدار آن روی داده است. به عبارت دیگر در محدوده‌های (تعداد پیکسل‌های) کم‌تری، مطابق با مناطق پُر ارتفاع منطقه، مقادیر

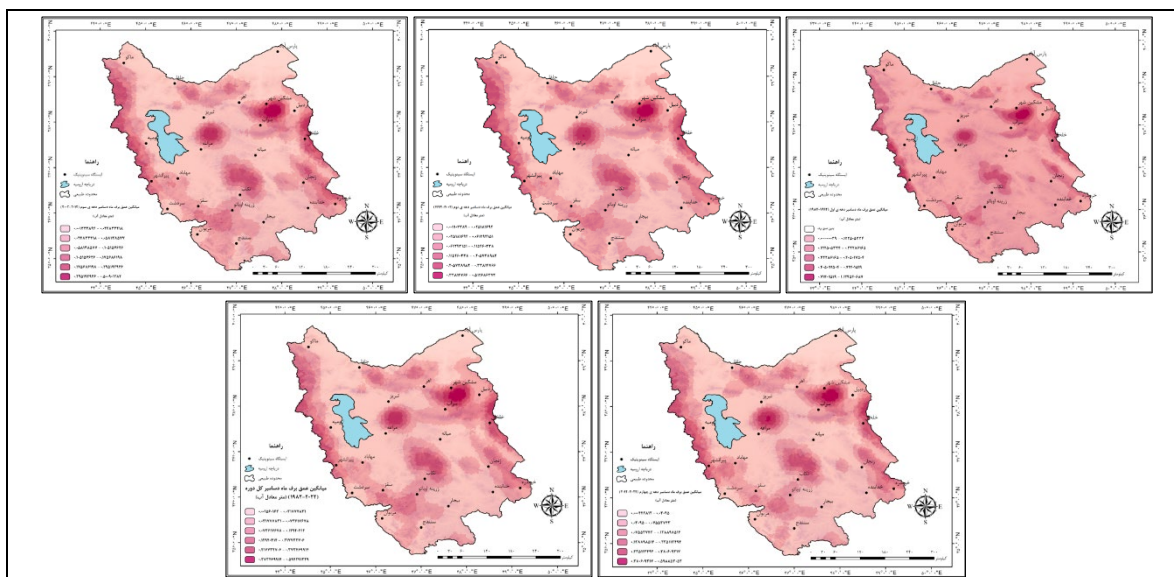
در ماه دسامبر نسبت به دو ماه اول فصل پاییز در پوشش برف متقابلاً عمق برف شمال غرب افزایش قابل توجهی حاصل گشته است. در تمامی بازه‌های زمانی مورد مطالعه هم به لحاظ گستردگی (تعداد پیکسل) و هم به لحاظ مقدار عمق برف با مقدار قابل توجه از عمق برف (۰/۱ تا ۰/۶ متر معادل آب) تقریباً رفتار مشابه و نزدیک به هم را تجربه داشتند (شکل ۷ و جدول ۴). افزایش مقدار عمق برف ماه دسامبر ناشی از افزایش

دهه اول روی داده است. این رخداد طی دهه‌ی چهارم می‌تواند متأثر از بارش‌های فرین باشد. در واقع طی سال‌های اخیر روزهای همراه بارش در حال کاهش است، ولی بارش‌ها به تمرکز زمانی بیش‌تری تمایل داشته‌اند، به طوری که در شدت بارش‌های روزانه روند معنادار افزایشی دیده می‌شود (حلبیان و کیخسروی کیانی، ۱۳۹۹).

بالای عمق برف متمرکز یافته است. مخصوصاً در دهه‌های اول (۱۹۹۱-۱۹۸۲) و سپس چهارم (۲۰۲۲-۲۰۱۲) به نسبت سایر بازه‌های زمانی مقادیر بالای آستانه‌ی عمق برف ۰/۰۷۳ تا ۰/۳۷۳ متر معادل آب به وقوع پیوسته است. با این تفاوت که طی دهه‌ی چهارم در محدوده‌های (تعداد پیکسل‌های) کم‌تری نسبت به دهه‌ی اول، افزایش عمق برف به همان مقدار مشابه

جدول ۴- فراوانی پیکسل و متوسط مقدار پهنه‌های میانگین عمق برف ماه دسامبر (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف بر اساس آستانه‌های تعریف شده در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

فراوانی پیکسل و متوسط مقدار عمق برف (متر معادل آب) ماه دسامبر در هر دهه										آستانه عمق برف (متر معادل آب)
کل دوره (۱۹۸۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)		دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)		دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)		
۰/۰۲۸	۴۴۱۶	۰/۰۲۵	۴۴۶۶	۰/۰۲۴	۴۷۶۰	۰/۰۲۵	۴۷۲۷	۰/۰۲۹	۳۶۶۱	≤۰/۰۷۳
۰/۱۳۷	۱۲۲۸	۰/۱۴۴	۱۱۷۸	۰/۱۳۱	۸۸۴	۰/۱۳۶	۹۱۷	۰/۱۷۲	۱۹۸۳	>۰/۰۷۳
۰/۲۱۰	۴۲۹	۰/۲۰۶	۵۰۷	۰/۱۹۳	۳۱۰	۰/۱۹۵	۳۷۸	۰/۲۴۳	۱۰۲۰	>۰/۱۲۹
۰/۳۳۰	۱۲۴	۰/۳۲۴	۱۳۸	۰/۳۰۱	۷۹	۰/۳۲۱	۸۹	۰/۳۶۷	۳۹۴	>۰/۲۱۷
۰/۴۷۴	۳۳	۰/۴۶۰	۳۸	۰/۴۲۷	۱۵	۰/۴۲۳	۲۶	۰/۵۵۳	۱۳۱	>۰/۳۷۳

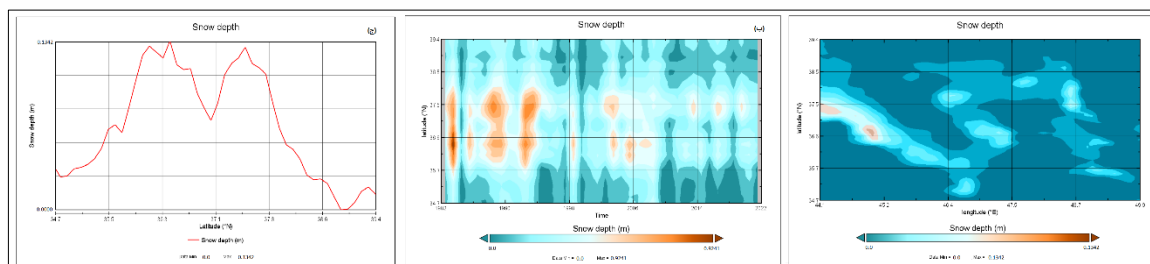


شکل ۷- پهنه‌بندی میانگین عمق برف (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف ماه دسامبر در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

متقابلاً عمق برف شدیدتری در محدوده عرض‌های جغرافیایی شمال غرب نیز نمایان‌تر می‌گردد. هسته‌ی نسبتاً قوی عمق برف در محدوده‌ی منطقه به خصوص بخش‌های جنوب غرب آن تا عرض‌های پایین‌تر مستقر شده است (شکل ۸، الف). به مانند فصل پاییز عرض‌های شمالی‌تر خارج از محدوده مورد مطالعه از شدت و تداوم عمق برف بالاتری برخوردار بوده با این تفاوت که قدرت و پیوستگی عمق برف در زمستان به مراتب بیش‌تر از فصل پاییز می‌باشد. گستردگی و نفوذ پهنه‌های عمق برف در دو دهه‌ی اول مورد مطالعه به ویژه دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱) تقریباً تمامی منطقه را فراگرفته است که با گذر زمان در سال‌های اخیر از شدت و پیوستگی

ماه‌های می تا اکتبر، گستره‌ی پوشش برف روزهای برف پوشان کشور بسیار ناچیز و بیش‌ترین گستره‌ی برف در ماه‌های ژانویه و فوریه دیده شده است (کیخسروی کیانی و مسعودیان، ۱۳۹۵). بدین ترتیب انتظار می‌رود در دو ماه اول زمستان افزایش عمق برف و کاهش تغییرات آن رخ بدهد. بدین صورت که با افزایش میانگین و کاهش ضریب تغییرات و چولگی عمق برف در ماه ژانویه و فوریه، نسبت به سایر ماه‌های فصول سرد سال کم‌ترین تغییرات عمق برف حاصل شده است (جدول ۱). بادهای غربی همراه با موج‌های کوتاه ناپایدار در زمستان بر آب و هوای ایران به ویژه منطقه حاکم بوده (علیچانی، ۱۳۸۹). بدین ترتیب نفوذ پهنه‌های پوشش و

آن کاسته شده است (شکل ۸ ب). افزایش عمق برف ماه ژانویه حدوداً در عرض جغرافیایی ۳۵/۵ درجه شمالی شروع شده و تا ۳۷/۵ درجه ادامه پیدا کرده است (شکل ۸ ج).



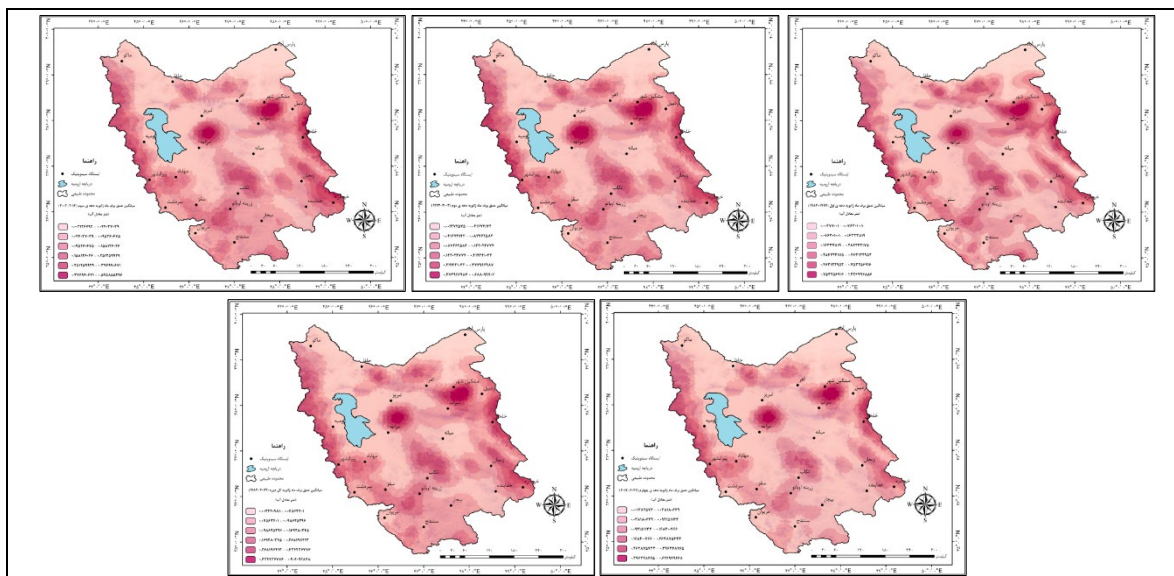
شکل ۸- نیمرخ تغییرات مکانی (الف)، نیمرخ تغییرات زمانی (ب) و نیمرخ تغییرات مقدار (ج) میانگین عمق برف ماه ژانویه (متر معادل آب) در امتداد عرض‌های مختلف جغرافیایی واقع در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

منطبق بر کوهستان‌ها، افزایش داشته است. در واقع با افزایش ارتفاع به میزان ۲۵۰ متر مدت ماندگاری برف بر روی زمین ۲۰ تا ۲۵ روز افزایش می‌یابد (رئیسیان و پرهمت، ۱۳۹۲). بالاترین متوسط مقدار عمق برف در دهه‌ی اول (۱۹۹۱-۱۹۸۲) رخ داده که در گذر زمان کاهش نامحسوسی در آن رخ داده است. کاهش مقدار عمق برف شمال غرب کشور می‌تواند ناشی از روند کاهشی (به مقدار ۴/۵۶ سانتی‌متر) بارش برف، همراه با روند افزایشی متوسط حداقل دمای ایستگاه‌های سینوپتیکی منطقه (به مقدار ۰/۰۹ درجه سانتی‌گراد) باشد. در عین حال در دهه‌ی چهارم با وجود کاهش گستردگی تعداد پیکسل) عمق برف، افزایش مقدار آن نسبت به دهه‌ی قبل فرضیه‌ی رویداد بارش‌های فرین را بار دیگر قوت می‌بخشد.

با اوج فعالیت‌های بادهای غربی و ناپایداری حاصل از آن، ماه ژانویه محل رخداد بیشینه مقدار بارش برف و حداکثر روزهای برفی شمال غرب ایران بوده است. در مقایسه مقدار آستانه‌های عمق برف شمال غرب این ماه از زمستان، نسبت به سایر ماه‌های فصل پاییز افزایش عمق برف منطقه محسوس می‌باشد (جدول ۵ و شکل ۹). با آستانه ۰/۰۹۸ متر معادل آب و کم‌تر، در گذر بازه‌های زمانی و کل دوره آماری مورد مطالعه بر وسعت پهنه‌های عمق برف (تعداد پیکسل‌ها) افزوده شده است. در حالی که مقدار عمق برف در تمامی بازه‌ها تقریباً مشابه هم بوده، بجز دهه چهارم که مقدار عمق برف کاهش یافته است. با افزایش آستانه‌ی ۰/۰۹۸ متر معادل آب به بالاتر، در تمامی دهه‌های مورد مطالعه گستردگی عمق برف کاهش یافته، با این نکته که مقدار آن مخصوصاً در مناطق محدود،

جدول ۵- فراوانی پیکسل و متوسط مقدار پهنه‌های میانگین عمق برف ماه ژانویه (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف بر اساس آستانه‌های تعریف شده در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

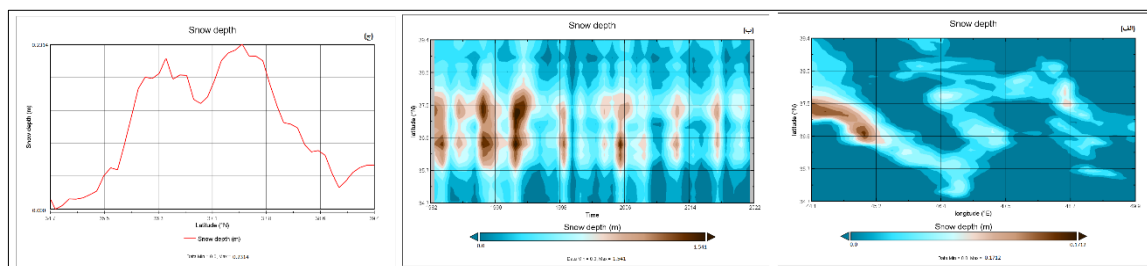
فراوانی پیکسل و متوسط مقدار عمق برف (متر معادل آب) ماه ژانویه در هر دهه										
کل دوره (۱۹۸۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)		دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)		دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)		آستانه عمق برف (متر معادل آب)
۰/۰۴۶	۳۷۲۹	۰/۰۳۳	۴۵۷۳	۰/۰۴۵	۳۹۲۸	۰/۰۴۳	۴۰۷۰	۰/۰۴۹	۲۸۱۲	≤۰/۰۹۸
۰/۱۸۴	۱۹۱۵	۰/۱۸۵	۱۰۷۱	۰/۱۷۷	۱۷۱۶	۰/۱۷۷	۱۵۷۴	۰/۲۳۵	۲۸۳۲	>۰/۰۹۸
۰/۲۶۱	۸۰۵	۰/۲۶۱	۴۵۹	۰/۲۵۵	۵۵۳	۰/۲۵۵	۶۱۲	۰/۳۱۰	۱۶۵۳	>۰/۱۶۹
۰/۳۹۲	۲۳۵	۰/۳۸۲	۱۳۷	۰/۳۶۰	۲۱۲	۰/۳۹۵	۱۵۸	۰/۴۲۴	۷۶۱	>۰/۲۶۸
۰/۵۶۷	۶۲	۰/۵۰۳	۴۲	۰/۴۹۳	۴۱	۰/۵۳۴	۵۴	۰/۶۲۷	۲۳۷	>۰/۴۳۴



شکل ۹- پهنه‌بندی میانگین عمق برف (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف ماه ژانویه در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

فوریه به مراتب بیش‌تر از ماه ژانویه می‌باشد. این پیشروی و نفوذ هسته‌های نسبتاً قوی عمق برف در امتداد عرض‌های شمالی منطقه، طی دهه‌ی اول (۱۹۹۱-۱۹۸۲) بیش‌تر و مداوم‌تر رخ داده است. با گذر بازه‌های زمانی از شدت و گستردگی عمق برف کاسته شده است؛ در عین حال نسبت به پهنه‌های عمق برف ماه ژانویه از قدرت و پیوستگی بیش‌تری برخوردار است (شکل ۱۰، ب). روند افزایشی عمق برف پهنه‌ی شمال‌غرب مخصوصاً در عرض‌های فوقانی منطقه و مقدار آن در نمودار شکل ۱۰، ج؛ به وضوح قابل مشاهده و بررسی می‌باشد.

مولد بارش‌های فصل سرد ایران، بادهای غربی همراه با ناپایداری و رطوبت در ماه فوریه به مانند ماه ژانویه از قسمت شمال‌غرب به سمت ایران پیشروی داشته و تقریباً نیمه منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. نتیجه فعالیت این سامانه‌های همدیدی کشیدگی هسته‌های قوی و گسترده عمق برف به سمت عرض‌های پایین منطقه بوده است. نفوذ هسته‌های قوی عمق برف به عرض‌های پایین‌تر حاکی از پیشروی بادهای غربی، عامل شکل‌گیری بارش، به عرض‌های پایین‌تر است (شکل ۱۰، الف). پیشروی گسترده‌ی عمق برف با متوسط مقدار ۰/۳ متر معادل آب به عرض‌های پایین‌تر شمال‌غرب در ماه



شکل ۱۰- نیمرخ تغییرات مکانی (الف)، نیمرخ تغییرات زمانی (ب) و نیمرخ تغییرات مقدار (ج) میانگین عمق برف ماه فوریه (متر معادل آب) در امتداد عرض‌های مختلف جغرافیایی واقع در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

با در نظر گرفتن آستانه‌های عمق برف شمال‌غرب در ماه فوریه آشکار می‌گردد که نسبت به ماه‌های قبل مقدار آن افزایش یافته است. میانگین عمق برف ماه فوریه طی دوره‌ی آماری مورد مطالعه برابر با ۰/۱۰۷ متر معادل آب بوده است (جدول ۶). در آستانه‌ی ۰/۱۱۳ متر معادل آب و کم‌تر، طی گذر بازه‌های زمانی در محدوده‌های (تعداد پیکسل‌های) وسیع‌تری مقدار

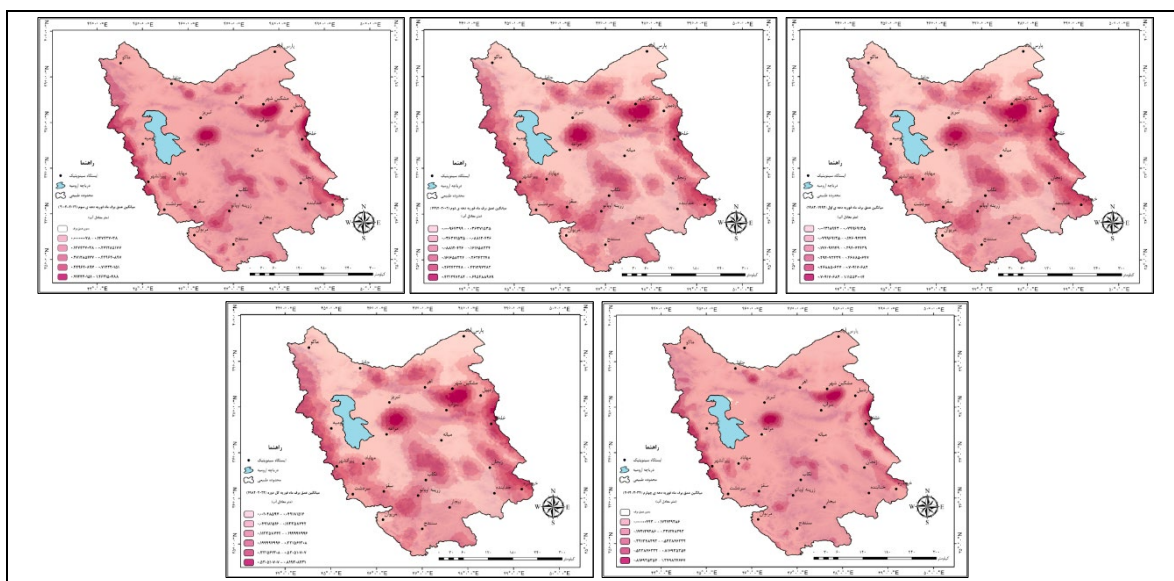
عمق برف کاهش یافته است. با افزایش آستانه‌ی عمق برف ۰/۱۱۳ متر معادل به بالاتر، در دهه‌ی دوم (۲۰۰۱-۱۹۹۲) هم به لحاظ گستردگی (تعداد پیکسل) و هم به لحاظ مقدار عمق برف کاهش محسوسی مشاهده می‌گردد. سپس در دو دهه‌ی اخیر مخصوصاً دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲) با وجود کاهش گستردگی عمق برف افزایش نامحسوسی در مقدار آن اتفاق

برفپوشان هماهنگی بسیار زیادی با آهنگ تغییرات ارتفاع دارد، ولی همیشه با افزایش ارتفاع شمار روزهای برفپوشان افزایش نمی‌یابد و در این زمینه عوامل فیزیوگرافی همچون شیب و جهت شیب هم نقش بسیار برجسته‌ای دارد. گاهی با افزایش ارتفاع بر شمار روزهای برفپوشان افزوده نمی‌شود و به نظر می‌رسد دلیل اصلی آن هم کاهش بارش از غرب به سوی شرق است. جهت شیب کانون و مرکز هر یک از برفخوان‌ها نشان داد که این پهنه‌ها بیش‌تر رو به سوی شمال است و به سبب دریافت انرژی تابشی کم‌تر برای ماندگاری پوشش برف مناسب‌اند (Grünwald, 2014) و کیخسروی کیانی و مسعودیان، ۱۳۹۶).

افتاده است. طی بررسی درون دهه‌ای تمامی دوره‌های مورد مطالعه، با افزایش آستانه‌های عمق برف از گستردگی (تعداد پیکسل‌های) عمق برف کاسته شده، در حالی که بر مقدار عمق برف افزوده گردیده است. افزایش مقدار عمق برف در فضای محدودتر هر دهه طی ماه‌های فصول سرد سال حاکی از رخداد این پدیده در مناطق مرتفع شمال‌غرب می‌باشد (شکل ۱۱). در واقع ارتفاع به شدت بر کمیت و توزیع بارش و برف تأثیر می‌گذارد. در شیب ارتفاعی برف، میانگین عمق برف با افزایش ارتفاع تا سطح معینی افزایش می‌یابد که در آن اوج مشخص دارند و به دنبال آن در بالاترین ارتفاع کاهش می‌یابد. باید به این نکته نیز توجه داشت که، آهنگ تغییرات شمار روزهای

جدول ۶- فراوانی پیکسل و متوسط مقدار پهنه‌های میانگین عمق برف ماه فوریه (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف بر اساس آستانه‌های تعریف شده در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

فراوانی پیکسل و متوسط مقدار عمق برف (متر معادل آب) ماه فوریه در هر دهه										آستانه عمق برف (متر معادل آب)
کل دوره (۱۹۸۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)		دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)		دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)		
۰/۰۴۸	۳۷۰۳	۰/۳۴۵	۴۳۲۹	۰/۰۳۹	۳۹۵۶	۰/۰۴۱	۴۳۶۸	۰/۰۵۰	۲۴۵۵	≤۰/۱۱۳
۰/۲۲۱	۱۹۴۱	۰/۲۶۷	۱۳۰۶	۰/۲۶۱	۱۶۸۷	۰/۲۰۷	۱۲۷۶	۰/۲۵۶	۳۱۸۹	>۰/۱۱۳
۰/۳۱۵	۸۳۱	۰/۳۹۴	۶۳۲	۰/۳۶۱	۸۸۴	۰/۳۰۴	۴۷۹	۰/۳۴۶	۱۷۰۳	>۰/۱۹۹
۰/۴۸۲	۲۳۷	۰/۵۵۰	۲۹۸	۰/۵۱۹	۳۶۲	۰/۴۶۰	۱۳۱	۰/۵۰۰	۶۲۸	>۰/۳۳۱
۰/۶۵۴	۶۵	۰/۷۵۱	۱۲۱	۰/۷۰۹	۱۲۹	۰/۶۰۰	۳۸	۰/۷۰۴	۲۰۳	>۰/۵۳۰

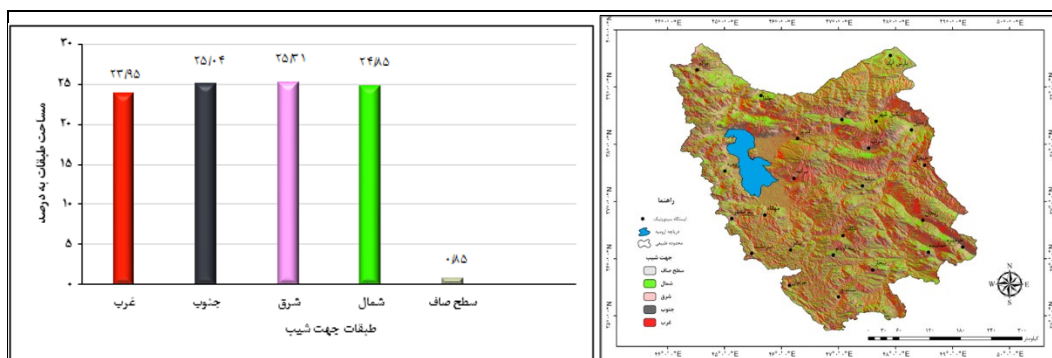


شکل ۱۱- پهنه‌بندی میانگین عمق برف (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف ماه فوریه در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

برف ماه فوریه با آستانه‌ی ۰/۱۹۹ به بالاتر، در دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲) افزایش یافته است؛ بنابراین فرضیه افزایش بارش‌های فرین طی سال‌های اخیر در مناطق کوهستانی دوباره شکل می‌گیرد. مناطق کوهستانی به جهت کاهش دما مرکز فرابار می‌شوند و بادهای کوهستانی را به وجود می‌آورند. با متوقف نمودن توده‌های مرطوب در دامنه‌ی بادگیر بخار آب

در شمال‌غرب ایران به دلیل ویژگی کوهستانی آن، درصد سطح صاف منطقه بسیار ناچیز بوده در حالی که جهت شیب شمالی درصد قابل توجهی به مقدار ۲۵ درصد از منطقه را در برگرفته است (شکل ۱۲)، بدین ترتیب به دلیل کاهش زاویه تابش خورشیدی ماندگاری پوشش برف و نهایتاً عمق برف در ماه فوریه با شرایط ویژه شمال‌غرب افزایش می‌یابد. مقدار عمق

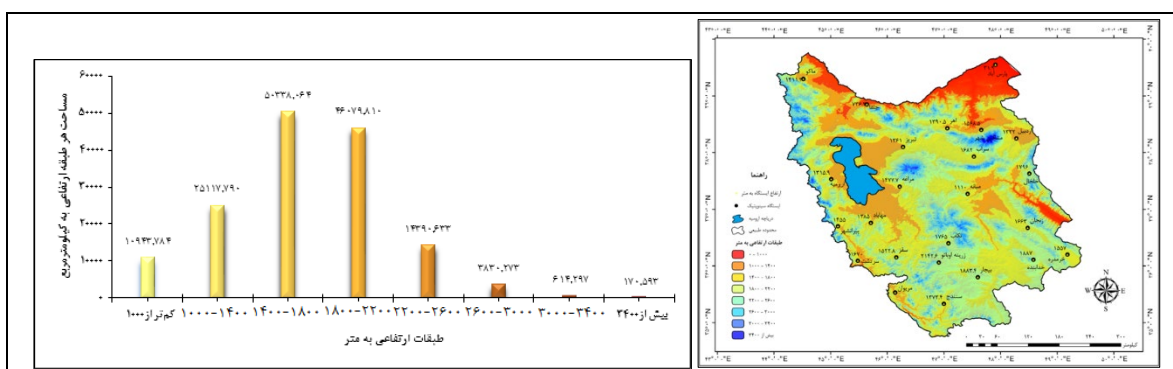
آن‌ها را بیش‌تر دریافت نموده‌اند. همچنین بر نوع ریزش‌های جوی نیز تأثیر داشته و در بیش‌تر موارد محل ریزش برف هستند (علیچانی، ۱۳۸۹).



شکل ۱۲- نقشه پهنه‌بندی جهت شیب و نمودار مساحت طیقات جهت شیب (به درصد) در شمال‌غرب ایران

ارتفاع نظم نخستین خود را از دست می‌دهد و الگوی پراکنده‌ای را از خود نشان می‌دهد (کیخسروی کیانی و مسعودیان، ۱۳۹۵). همان گونه که در نقشه‌ی پهنه‌بندی توپوگرافی و نمودار مساحت طیقات ارتفاعی (شکل ۱۳) مشاهده می‌شود، در منطقه‌ی مورد مطالعه طبقه ارتفاعی ۱۸۰۰-۱۴۰۰ متر، با مساحت حدود ۵۰۳۳۸/۰۶۴ کیلومتر مربع، بیش‌ترین فراوانی را در بر گرفته است. بدین ترتیب حدود ۳۳ درصد از منطقه دارای روند افزایشی کند روزهای برفی و نهایتاً افزایش عمق برف بوده است، همچنین تقریباً ۴۲ درصد از منطقه مورد مطالعه نیز دارای روند افزایشی روزهای برفی با افزایش ارتفاع ۱۷۰۰ تا ارتفاع تقریبی ۳۲۰۰ متر می‌باشد.

این نکته نیز باید توجه شود که، ارتباط بین روزهای برف‌پوشان با ارتفاع لزوماً رابطه‌ی خطی نیست و در گروه‌های ارتفاعی رفتاری متفاوت را از خود نشان می‌دهد. در ایران تا ارتفاع ۷۰۰ متر شرایط دمایی مناسب برای نشست و تجمع برف وجود ندارد. بنابراین می‌توان گفت تا این ارتفاع نباید چندان انتظار پوشش برف داشته باشیم. از ارتفاع نزدیک به ۷۰۰ تا ۱۷۰۰ متر، به دلیل بهتر شدن شرایط دمایی برای برف‌گیری، روند کند افزایش روزهای برف‌پوشان با افزایش ارتفاع به چشم می‌خورد. از ارتفاع تقریبی ۱۷۰۰ تا ارتفاع تقریبی ۳۲۰۰ متر روند افزایش روزهای برف‌پوشان با افزایش ارتفاع به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. از ارتفاع تقریبی ۳۲۰۰ متر به بالا افزایش شمار روزهای برف‌پوشان با افزایش



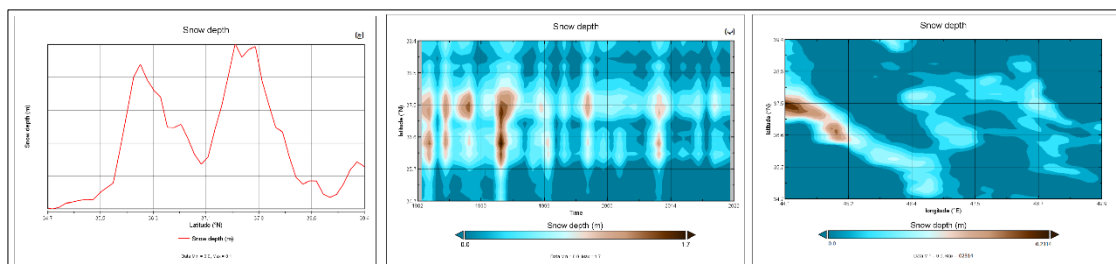
شکل ۱۳- نقشه پهنه‌بندی توپوگرافی و نمودار مساحت طیقات ارتفاعی (کیلومتر مربع) شمال‌غرب ایران

مخصوصاً در امتداد عرض‌های شمال منطقه با شدت بیش‌تری همانند ماه‌های دیگر فصل زمستان است، ولی با گذر زمان تداوم و پیوستگی در مقادیر بالای پهنه‌های عمق برف را نداشته است. این مسئله در دو دهه‌ی اخیر مخصوصاً دهه‌ی

در ماه مارس نیز به مانند ماه‌های قبل، جنوب غرب و غرب پهنه‌ی شمال‌غرب ایران مسیر ورود عامل بارش یعنی بادهای غربی به همراه اغتشاشات جوی است (شکل ۱۴، الف). هر چند مسیر و جهت نفوذ پهنه‌های عمق برف ماه مارس

انطباق دارد. در عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه شمالی به بالاتر، عمق برف مقادیر بیش‌تری را کسب نموده‌اند. این نکته نیز نشان می‌دهد افزایش بارش برف و متقابلاً افزایش عمق برف عموماً منطبق بر ارتفاعات مستقر در عرض‌های شمالی‌تر می‌باشد.

چهارم (شکل ۱۴، ب) به وضوح قابل مشاهده است. همانطور که در نمودار ج شکل ۱۴، نمایش داده شده است در محدوده‌ی شمال‌غرب نیز افزایش عمق برف رخ داده است و وجود نوسان‌های کاهشی عمق برف منطقه نمودار ج، بر گسستگی‌های مقادیر بالای عمق برف نیمرخ ب شکل ۱۴



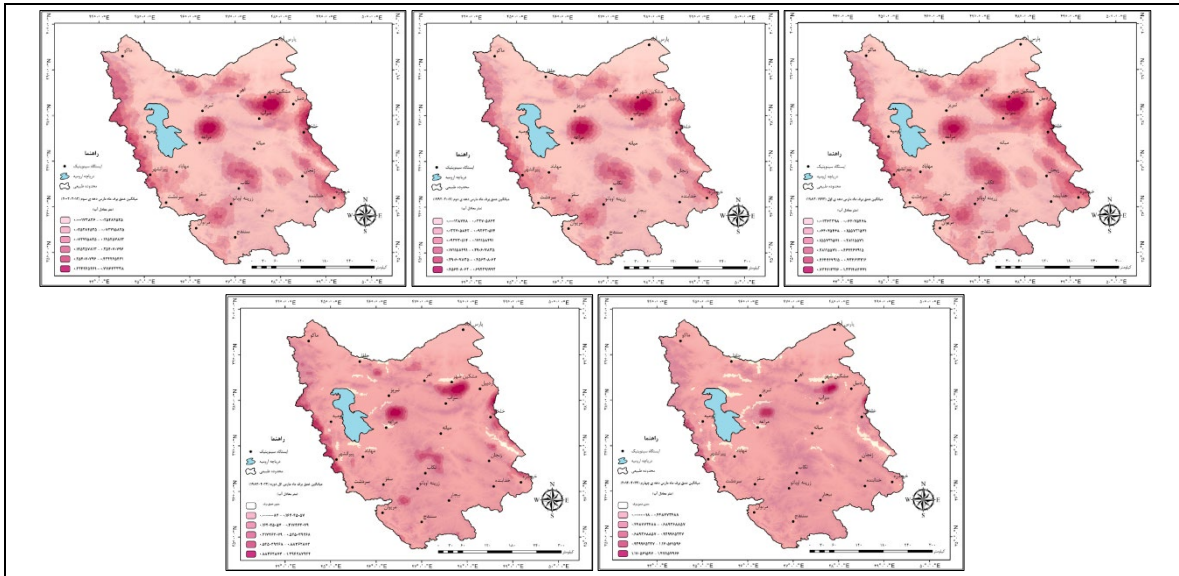
شکل ۱۴- نیمرخ تغییرات مکانی (الف)، نیمرخ تغییرات زمانی (ب) و نیمرخ تغییرات مقدار (ج) میانگین عمق برف ماه مارس (متر معادل آب) در امتداد عرض‌های مختلف جغرافیایی واقع در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

می‌توان به روند کاهشی برابر با مقدار ۰/۴۲ سانتی‌متر بارش برف ایستگاهی منطقه مرتبط دانست. در ماه مارس نسبت به سایر ماه‌های پربارش فصول سرد (ژانویه، نوامبر و دسامبر) کم‌ترین میزان روند کاهشی بارش برف (۰/۴۲ سانتی‌متر) رخ داده است در حالی که روند افزایشی متوسط مقدار حداقل دمای ایستگاه‌های منطقه بالاترین مقدار برابر با ۰/۱۹ درجه سانتی‌گراد را به خود اختصاص داده است. ولی برخلاف انتظار کاهش عمق برف ماه مارس آستانه‌های عمق برف این ماه دارای مقادیر قابل توجه بالایی می‌باشد (جدول ۷). بنابراین می‌توان اذعان داشت که در مقایسه با دمای هوا، بارش برف تأثیر بیش‌تری بر عمق برف در طول ماه نوامبر تا مارس را داشته است (Zhong et al, 2018).

بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی میانگین عمق برف طی دهه‌های مورد مطالعه ماه مارس در شمال‌غرب ایران (شکل ۱۵) و نتایج عددی آن در جدول ۷، گستردگی (تعداد پیکسل) عمق برف با آستانه‌ی ۰/۱۶۲ متر معادل آب و کم‌تر، در گذر بازه‌های زمانی افزایش و مقدار آن کاهش یافته است. در بررسی‌های درون دهه‌ی هر یک از بازه‌های زمانی نیز مجدداً با افزایش آستانه‌ها، مقدار عمق برف در محدوده‌های کوچک‌تر (منطبق بر مناطق کوهستانی) افزایش یافته است. این تغییرات درون دهه‌ایی در امتداد زمانی مورد بررسی، در دهه‌های دوم و سوم کاهش یافته و مجدداً در دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲) افزایش یافته است. کاهش گستردگی (تعداد پیکسل) و مقدار عمق برف در دهه‌های میانی به ویژه دهه‌ی سوم (۲۰۱۱-۲۰۰۲) را

جدول ۷- فراوانی پیکسل و متوسط مقدار پهنه‌های میانگین عمق برف ماه مارس (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف بر اساس آستانه‌های تعریف شده در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

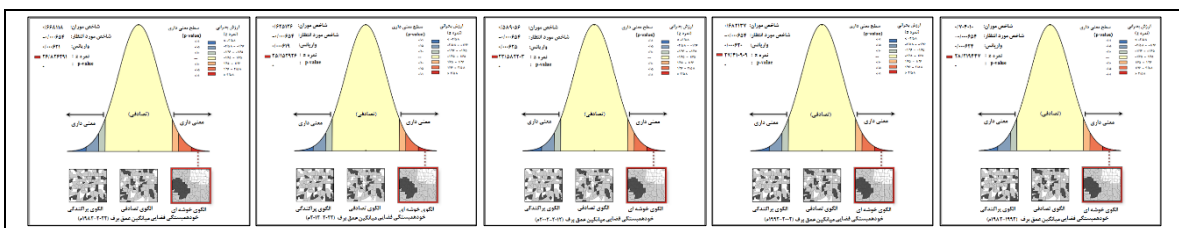
فراوانی پیکسل و متوسط مقدار عمق برف (متر معادل آب) ماه مارس در هر دهه										آستانه عمق برف (متر معادل آب)
کل دوره (۱۹۸۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)		دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)		دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)		دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)		
۰/۰۲۸	۵۰۷۵	۰/۰۲۱	۵۱۱۷	۰/۰۲۶	۵۳۳۸	۰/۰۳۷	۵۵۵۴	۰/۰۵۳	۴۵۸۷	≤۰/۱۶۲
۰/۳۸۹	۴۸۹	۰/۳۹۹	۳۸۶	۰/۲۷۹	۳۰۶	۰/۲۸۶	۳۰۸	۰/۳۱۷	۱۰۵۷	>۰/۱۶۲
۰/۵۶۳	۲۳۸	۰/۵۷۶	۱۸۹	۰/۴۶۲	۸۱	۰/۴۷۷	۹۰	۰/۵۰۵	۳۵۳	>۰/۳۱۷
۰/۸۰۰	۹۷	۰/۷۹۵	۸۴	۰/۶۱۶	۱۸	۰/۶۰۲	۲۷	۰/۷۶۸	۱۰۳	>۰/۵۴۵
۱/۰۸۲	۲۸	۱/۰۸۴	۲۵	۰	۰	۰	۰	۱/۰۰۶	۲۷	>۰/۸۸۳



شکل ۱۵- پهنه‌بندی میانگین عمق برف (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف ماه مارس در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

عمق برف دارای خودهمبستگی فضایی بوده و دارای الگوی خوشه‌ای می‌باشند. با توجه به بالا بودن مقدار آماره Z و سطح اطمینان ۹۹ درصد برای هر پنج بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، فرضیه عدم وجود خودهمبستگی فضایی بین داده‌های عمق برف شمال غرب رد می‌گردد. در واقع عمق برف منطقه در تمامی بازه‌های زمانی طی دوره‌ی آماری ۴۱ ساله (۱۹۸۲-۲۰۲۲) دارای خودهمبستگی فضایی معنی‌دار مثبت است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های عمق برف سالانه‌ی شمال غرب ایران دارای ساختار فضایی بوده و یا به عبارت دیگر عمق برف در طی سال‌های مطالعاتی به صورت خوشه‌ای توزیع شده است، یعنی پیکسل‌های عمق برف بالا و پایین به متمرکز شدن یا خوشه‌ای شدن در فضا تمایل دارند. حال اگر قرار بود پراکندگی داده‌ها با فرض نرمال (تصادفی) صورت می‌گرفت، شاخص موران مورد انتظار در دهه‌های مدنظر باید مقداری برابر $0/00654$ - را اختیار می‌نمود.

در پژوهش حاضر به ارزیابی الگوهای خودهمبستگی فضایی میانگین سالانه‌ی عمق برف پهنه‌ی شمال غرب ایران با استفاده از روش نوین آماره فضایی پرداخته شده است. برای این منظور از روش‌های موران جهانی و تحلیل لکه‌های داغ بهره گرفته شد. خودهمبستگی فضایی موران دو خروجی به صورت گرافیکی (شکل ۱۶) و عددی (جدول ۸) ارائه می‌نماید. به طور کلی اگر شاخص موران نزدیک به +۱ باشد، داده‌های عمق برف دارای خودهمبستگی فضایی و دارای الگوی خوشه‌ای بوده و اگر مقدار شاخص موران نزدیک به عدد -۱ باشد، آنگاه داده‌ها از هم گسسته و پراکنده خواهد بود. خروجی گرافیکی نشان می‌دهد که آیا داده‌ها به صورت خوشه‌ای و یا پراکنده توزیع شده‌اند. در نهایت نتایج شکل و جدول مذکور خروجی‌های تحلیل خودهمبستگی فضایی موران جهانی را نشان می‌دهند. با توجه به متوسط مقدار شاخص موران برای هر پنج بازه‌ی زمانی مورد مطالعه که برابر با $0/654$ بوده است، بیانگر این است که داده میانگین سالانه‌ی



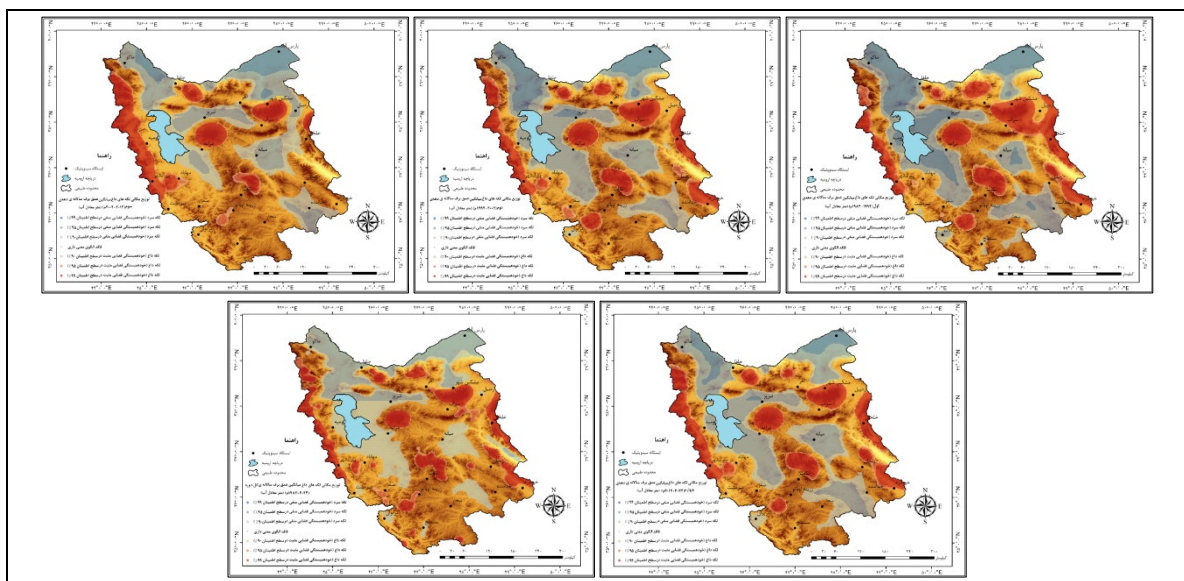
شکل ۱۶- نمودار خودهمبستگی میانگین سالانه‌ی عمق برف (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲).

جدول ۸- آماره موران کلی برای میانگین سالانه‌ی عمق برف (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف مورد بررسی در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

P-value	آماره		نمایه موران مورد انتظار	نمایه موران	خودهمبستگی فضایی
	Z	واریانس			
۰	۲۸/۲۱۹۴۴۷	۰/۰۰۰۶۲۴	-۰/۰۰۰۶۵۴	۰/۷۰۴۰۱۰	میانگین سالانه عمق برف دهه‌ی اول (۱۹۸۲-۱۹۹۱)
۰	۲۷/۴۱۰۹۰۹	۰/۰۰۰۶۲۰	-۰/۰۰۰۶۵۴	۰/۷۸۲۱۳۷	میانگین سالانه عمق برف دهه‌ی دوم (۱۹۹۲-۲۰۰۱)
۰	۳۳/۵۸۲۲۰۳	۰/۰۰۰۶۲۵	-۰/۰۰۰۶۵۴	۰/۵۸۹۰۵۶	میانگین سالانه عمق برف دهه‌ی سوم (۲۰۰۲-۲۰۱۱)
۰	۲۵/۱۵۲۹۲۶	۰/۰۰۰۶۱۹	-۰/۰۰۰۶۵۴	۰/۶۲۵۱۲۶	میانگین سالانه عمق برف دهه‌ی چهارم (۲۰۱۲-۲۰۲۲)
۰	۲۶/۸۲۶۲۹۱	۰/۰۰۰۶۲۱	-۰/۰۰۰۶۵۴	۰/۶۶۸۱۱۸	میانگین سالانه عمق برف کل دوره (۱۹۸۲-۲۰۲۲)

همان طور که مشاهده شد خودهمبستگی فضایی موران جهانی فقط نوع الگو را مشخص می‌کند بنابراین به منظور بررسی تغییرات خودهمبستگی فضایی و نشان دادن الگوی فضایی حاکم بر عمق برف سالانه‌ی شمال غرب ایران از تحلیل لکه‌های داغ آماره گتیس- ارد جی استفاده داغ آماره گتیس- ارد جی استفاده گردید. بر اساس هر دو این شاخص‌ها مناطق مرتفع شمال غرب نقش قابل توجهی در الگوهای عمق برف با الگوی خوشه‌ای بالا داشته‌اند. مناطق با مقادیر کم میانگین سالانه عمق برف به رنگ آبی و مناطق با مقادیر بالای میانگین سالانه عمق برف با رنگ قرمز در هر سه سطح احتمال ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد نمایش داده شده است (شکل ۱۷). نتایج بدست آمده از نقشه پهنه‌بندی لکه‌های داغ تهیه شده به کمک شاخص G_i^* ، برای داده‌های میانگین سالانه‌ی عمق برف شمال غرب نشان می‌دهد که در هر پنج بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، لکه‌های داغ میانگین سالانه‌ی عمق برف با احتمال ۹۹

درصد تقریباً بر مناطق کوهستانی غالباً سبلان، سهند و نوار غربی منطقه مرز بین ایران و ترکیه متمرکز شده‌اند. خوشه‌های سرد (شامل مقادیر پایین عمق برف) نیز بیش‌تر در مناطق کم ارتفاع بخش شمالی منطقه و نواحی اطراف دریاچه ارومیه مشاهده می‌شود. در مجموع مساحت بالایی از شمال غرب ایران فاقد الگوی معناداری یا به عبارتی فاقد خودهمبستگی فضایی عمق برف معنادار به لحاظ آماری بوده است. اما گستردگی و احتمال وقوع مقادیر کم میانگین سالانه‌ی عمق برف (خوشه‌های سرد) بیش‌تر بوده است. به عبارت دیگر در توزیع فضایی الگوی حاکم بر میانگین سالانه‌ی عمق برف شمال غرب، به تجمع مقادیر پایین عمق برف و شکل‌گیری خوشه‌های سرد بیش‌تر گرایش وجود دارد. در واقع خودهمبستگی فضایی منفی با سطح اطمینان ۹۵ درصد به صورت خوشه‌های سرد در پهنه‌های گسترده‌تری نسبت به خوشه‌های داغ شکل گرفته‌اند.



شکل ۱۷- پهنه‌بندی نقاط داغ میانگین سالانه‌ی عمق برف (متر معادل آب) طی دهه‌های مختلف مورد مطالعه در شمال غرب ایران (۲۰۲۲-۱۹۸۲).

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های شبکه‌ای عمق برف شمال‌غرب ایران، حاصل از پایگاه داده ECMWF/ERA5 در بازه‌های زمانی مختلف شامل دهه‌ی اول (۱۹۹۱-۱۹۸۲)، دهه‌ی دوم (۲۰۰۱-۱۹۹۲)، دهه‌ی سوم (۲۰۱۱-۲۰۰۲)، دهه‌ی چهارم (۲۰۲۲-۲۰۱۲) و کل دوره‌ی آماری ۴۱ ساله (۲۰۲۲-۱۹۸۲)، به بررسی و تحلیل مکانی-زمانی عمق برف پرداخته شد. ابتدا در دوره‌های زمانی مورد مطالعه نقشه‌های پهنه‌بندی تراکم برف ماه‌های فصول سرد ترسیم گردید و بر اساس این نقشه‌ها تغییرات میزان عمق برف در دهه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات درون دهه‌ای در آستانه‌های بالاتر عمق برف، نشان داد که دهه‌ی اول هر یک از ماه‌های مورد مطالعه با مقادیر چشمگیر عمق برف رتبه‌ی نخست را به خود اختصاص داده است. علاوه بر این در بررسی تغییرات مکانی عمق برف منطقه، نیز می‌توان به تمرکز برف در دامنه‌های شمالی مناطق پُر ارتفاع به سبب کاهش زاویه تابش خورشیدی و دما اشاره داشت که تقریباً در تمامی ماه‌های فصول سرد دهه‌های مختلف هسته‌های دائمی عمق برف را دارا می‌باشند. در ادامه به منظور تحلیل فضایی تغییرات عمق برف منطقه از آماره موران استفاده شد. بر اساس شاخص موران در تبیین الگوی حاکم بر میانگین سالانه‌ی عمق برف شمال‌غرب ایران، مقادیر مربوط به بازه‌های زمانی مختلف دارای ضریب مثبت و نزدیک به یک می‌باشند که نشان از اثبات فرضیه ارتباط فضایی میانگین سالانه‌ی عمق برف شمال‌غرب بوده است. این مسئله نیز حاکی از آن است که داده‌های عمق برف دارای خودهمبستگی فضایی و دارای الگوی خوشه‌ای می‌باشند. همچنین نتایج حاصل از مقادیر نمره استاندارد Z و مقدار P -Value، معنی‌داری خوشه‌ای بودن توزیع فضایی عمق برف شمال‌غرب را مورد تأیید قرار داد. در نهایت تحلیل لکه‌های داغ تأییدی آشکار بر تداوم متمرکز شدن و خوشه‌ای شدن عمق برف شمال‌غرب در فضا با افزایش دوره زمانی بوده است، که خوشه‌های داغ با احتمال ۹۹ درصد اغلب شامل مناطق کوهستانی و خوشه‌های سرد با مقادیر کم نیز عمدتاً شامل مناطق کم ارتفاع شمال‌شرق، شمال، بخش‌های جنوبی منطقه و سواحل شرقی دریاچه ارومیه می‌باشند. نتایج بدست

آمده از پهنه‌بندی لکه‌های داغ میانگین سالانه‌ی عمق برف شمال‌غرب تهیه شده به کمک شاخص G_i^* نشان می‌دهد، که در تمامی بازه‌های مورد مطالعه، لکه‌های داغ میانگین سالانه‌ی عمق برف تقریباً بر مناطق مرتفع کوهستانی متمرکز شده‌اند. خوشه‌های سرد (شامل مقادیر پایین عمق برف) نیز بیش‌تر در مناطق کم ارتفاع بخش شمالی منطقه و به ویژه نواحی اطراف دریاچه ارومیه مشاهده می‌شود و اینکه غالباً گسترده‌ی خودهمبستگی فضایی منفی در سطح اطمینان ۹۵ درصد بیش‌تر از خودهمبستگی فضایی مثبت می‌باشد، به عبارت دیگر احتمال وقوع مقادیر کم عمق برف (خوشه‌های سرد) بالاتر بوده است. نتایج پژوهش حاضر با در نظر گرفتن الگوهای فضایی حاکم بر میانگین سالانه‌ی عمق برف منطقه شمال‌غرب می‌تواند به بسیاری از مسائل مرتبط با برنامه‌ریزی در سطوح مختلف آینده منابع آبی پاسخ‌های بهنجار را ارائه نماید.

منابع

1. Akhtar, M., Ahmad, N., & Booij, M.J. (2008). The impact of climate change on the water resources of Hindu Kush Karakorum Himalaya region under different glacier coverage scenarios. *J. Hydrol*, 355 (1-4), pp. 148- 163.
2. Al-Hosseini al-Madrissi, S. A., Hatami, J., Sargargar, A. (2016). Calculation of snow physical properties using differential radar interferometric technique and TerraSAR-X and MODIS sensor images, *remote sensing and geographic information system in natural resources*, II, pp. 59-75. (inPersian)
3. Alijani, B. (2010). *Climate of Iran, 10th edition*, Payam Noor Publishing House, Tehran, pp. 221-1. (inPersian)
4. Asakere, H. (2011). *Fundamentals of Statistical Climatology, first edition*, Zanjan, Zanjan University, pp. 1-545. (inPersian)
5. Asefi, M., & Fathzadeh, A. (2022). Improving the accuracy of snow depth modeling based on the effectiveness of selecting index fFeatures in parametric and non-parametric regressions, *iran water research*, 4th, pp. 57-67. (inPersian)
6. Asefi, M., & Fathzadeh, A. (2023). Simulating the spatial distribution of

- change on the glacier and runoff generation in the Naryn River Basin, Central Asia, *Journal of Hydrology*, 2015, 523, pp. 240-251.
15. Grünewald, T., Bühler, Y., & Lehning, M. (2014). Elevation dependency of mountain snow depth. *The Cryosphere*, 8(6), pp.2381-2394.
 16. Halabian, A H. (2011). Identifying the diversity of the atmospheric composition in the Middle Hemisphere and the interaction of synoptic patterns affecting Iran, *Applied Research in Geographical Sciences*, No. 21, pp. 156-131. **(inPersian)**
 17. Halabian, A. H., & KiKhosravi Kayani, M. S. (2020). Evaluation of the changes of precipitation profiles in Iran, *Spatial Planning (Geography)*, No. 4, pp. 24-45. **(inPersian)**
 18. Hartl, L., Fischer, A., & Olefs, M. (2018). Analysis of past changes in wet bulb temperature in relation to snow making conditions based on long term observations Austria and Germany, *Global and Planetary Change*, 167, pp. 123-136. Shen-J, Y.,
 19. Heidari Monfared, Z. (2023). Spatial analysis of snow characteristics in the northwestern region of Iran, *PhD thesis*, supervisor Seyed Hossein Mirmosavi, Department of Natural Geography, Synoptic Climatology, Zanjan University, Faculty of Literature and Human Sciences, pp. 1-282. **(inPersian)**
 20. Hundecha, Y., & Bardossy, A. (2005). Trends in Daily Precipitation and Temperature Extremes across Western Germany in the Second Half of the 20th Century. *International Journal of Climatology*, 25, 1189-1202. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1182/pdf>
 21. Jahanbakhsh Asl, S., Sari Saraf, B.; Raziei, T., & Parandeh Khozani, A. (2020). Investigation of temporal and spatial changes of the snow season and its start and end dates in the mountainous region of Zagros, *Watershed Engineering and Management*, 1st, pp. 106-86. **(inPersian)**
 22. Jain, S, K., Goswami, A., Saraf, A. (2010). Assessment of Snowmelt Runoff Using Remote Sensing and Effect of Climate Change on Runoff, *Water Resources Management*, 24(9), pp. 1763-1777.
 23. Keikhosravi Kayani, M. S., & Masoudian, S. A. (2016). Analysis of the snow depth using artificial intelligence and linear regression based on feature reduction (case study: Chalgerd watershed), *Soil and Water Modeling and Management*, 4th, pp. 43- 29. **(inPersian)**
 7. Asefi, M., Fathzadeh, A., Taghizadeh Mehrjardi, R., & Zare Chahoki, M. A. (2022). Estimation of snow depth as one of the consequences of climate change using the combined least squares model approach of support vector machine and genetic algorithm, *climate change researches*, 12th, pp. 21-36. **(inPersian)**
 8. Azizi, A., Katiraei, F., & Rehmat Panah, A. (2017). Analysis of incidents of urban water network with Getis-Ord Gi* index in spatial information system, case study: Isfahan city, *first international conference on geographic information system of Silk Road*. COI: SILK01_051, <https://civilica.com/doc/717362/>. **(inPersian)**
 9. Chang, A.T., Foster, J.L., & Hall, D.K. (1987). Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters. *Annals of glaciology*, 9, pp.39-44.
 10. Costa, A.C., Santos, J.A., & Pinto, J.G. (2012). Climate change scenarios for precipitation extremes in Portugal, *Theoretical and Applied Climatology*, 108, 217-234.
 11. Falahati, F., Alijani, B., & Saligheh, M. (2017). Investigating the effect of climate change on the level of snow cover in the coming decades with the approach of water resources management (case study: watershed leading to Amirkabir Dam, *Imdad and Nejat*, 3rd, pp. 68-79. **(inPersian)**
 12. Fatahi, E., & Tazefidoost, M. (2011). Estimation of snow surface temperature and snow cover extent using MODIS sensor images (case study of basins of Golestan province), *Geographical Research*, third, pp. 17403-17423. **(inPersian)**
 13. Foster, J.L., Hall, D.K., Eylander, J.B., Riggs, G.A., Nghiem, S.V., Tedesco, M., Kim, E., Montesano, P.M., Kelly, R.E., Casey, K.A., & Choudhury, B. (2011). A blended global snow product using visible, passive microwave and scatterometer satellite data. *International journal of remote sensing*, 32(5), pp.1371-1395.
 14. Gan, R., Luo, Y., Zuo, Q., Sun, L. (2015). Effects of projected climate

33. Naghizadeh, H., Rasouli, A. A., Sari Saraf, B., Jahanbakhsh, S., & Babaian, I. (2019). Variability of the snow depth trend in the northern zone of Iran based on the ECMWF database, ERA Interim version, *Geography and Environmental Hazards*, No. 30, pp. 229-211. **(inPersian)**
34. Pandey, Sh. (2022). Snow Depth and Swe Estimation Using Multi-Sensor Microwave and Optical Remote Sensing Time Series Data for Indian Himalayas, Thesis submitted to the Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation. *Specialization: Geoinformatics*, Netherlands, pp. 1- 88.
35. Raisian, R. B., & Parhamt, J. (2013). Increasing the duration of snow in snow catchment areas is a suitable solution for the stability of the irrigation regime of water resources, the first national conference on rain catchment surface systems, *conference document number 3366413*, <https://search.ricest.ac.ir/dl/search/defaultta.aspx?DTC=36&DC=8066> Q. **(inPersian)**
36. Sari Saraf, B., Rasouli, A. A., Jahanbakhsh, S. (2019). Spatial modeling and analysis of snow depth in the northern part of Iran, *Natural Geography*, 4th, pp. 671-651. **(inPersian)**
37. Seifaldini, F., & Mansourian, H. (2011). Analysis of the concentration pattern of urban services and its environmental effects in the city of Tehran, *Environment*, No. 60, pp. 53-64. **(inPersian)**
38. Shadpour, A., Lashkar, H., & Borna, R. (2018). Synopsis-statistical analysis of heavy snows in Gilan province, *Natural Geography*, 42, pp. 1-14. **(inPersian)**
39. Shen, Y., Fink, M., Kralisch, S., Chen, Y., & Brenning, A. (2018). Trends and variability in streamflow and snowmelt runoff timing in the southern Tianshan Mountains, *Journal of Hydrology* 557, pp. 173-181.
40. Sun, S., Shi, C., Liang, X., Zhang, S., Gu, J., Han, S., Jiang, H., Xu, B., Yu, Q., Liang, Y., & Deng, S. (2023). The evaluation of snow depth simulated by different land surface models in China based on station observations. relationship between snow-covered days with height, slope and aspect of slope in Iran, *Natural Geography Research*, 1, pp. 1-14. **(inPersian)**
24. KeikhosraviKayani, M. S., & Masoudian, S. A. (2017). Identification of Iran's snow crawlers, *Natural Geographical Researches*, 3, pp. 395-408. **(inPersian)**
25. Kelly, R. (2009). The AMSR-E Snow Depth Algorithm: Description and Initial Results, *J. Remote Sens. Soc. Japan*, 29, pp. 307-317. <https://doi.org/10.11440/rssj.29.307>.
26. Li, Q., Yang, T., Zhou, H., & Li, L. (2019). Patterns in snow depth maximum and snow cover days during 1961-2015 period in the Tianshan Mountains, Central Asia, *Atmospheric Research*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.004>.
27. Manea, A., Birsan, M., Tudorache, G., Cărbunaru, F., & Changes, A. (2016). Changes in the type of precipitation and associated cloud types in Eastern Romania (1961-2008), *Atmospheric Research*, 169: 357-365.
28. Marengo, JA., Chou, SC., Torres, R., Giarolla, A., Alves, L.M., Lyra, A. (2014). Climate change in central and South America: Recent trends, future projections, and impacts on regional agriculture, Working Paper No.73
29. Miller, Z.S., Peitzsch, E.H., Sproles, E.A., Birkeland, K.W., & Palomaki, R.T. (2022). Assessing the seasonal evolution of snow depth spatial variability and scaling in complex mountain terrain. *The Cryosphere*, 16(12), pp.4907-4930.
30. Mirmusavi, S. H., & Sabouri, L. (2014). Monitoring snow cover changes using MODIS sensor images in the northwestern region of Iran, *Geography and Development*, No. 35, Summer 2013, pp. 181-200. **(inPersian)**
31. Molotch, N.P., Colee, M.T., Bales, R.C. and Dozier, J. (2005). Estimating the spatial distribution of snow water equivalent in an alpine basin using binary regression tree models: the impact of digital elevation data and independent variable selection. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(7), pp.1459-1479.
32. Mott, R., Scipi n, D., Schneebeli, M., Dawes, N., Berne, A., & Lehning, M. (2014). Orographic effects on snow deposition patterns in mountainous terrain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(3), pp.1419-1439.

- Sustainability*, 15(14), p.11284.
41. Tabari, H., Marofi, S., Abyaneh, H.Z., & Sharifi, M.R. (2010). Comparison of artificial neural network and combined models in estimating spatial distribution of snow depth and snow water equivalent in Samsami basin of Iran. *Neural Computing and Applications*, 19, pp.625-635.
 42. Taheri, H. R., & Erkian, F. (2013). Investigation of the variability of the number of snowy days and snow depth in Iran, during the statistical period of 1981-2010, *Scientific and Technical Newar*, 82 and 83, Fall and Summer 2012, pp. 58-47. **(inPersian)**
 43. VanVuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., & Hibbard, K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic change*, 109, pp. 5- 31.
 44. Zhong, X., Zhang, T., Kang, S., Wang, K., Zheng, L., Hu, Y., & Wang, H. (2018). Spatiotemporal variability of snow depth across the Eurasian continent from 1966 to 2012. *The Cryosphere*, 12(1), pp.227-245.
 45. Zhong, X.Y., Zhang, T., Su, H., Xiao, X.X., Wang, S.F., Hu, Y.T., Wang, H.J., Zheng, L., Zhang, W., Xu, M., & Wang, J. (2021). Impacts of landscape and climatic factors on snow cover in the Altai Mountains, China. *Advances in Climate Change Research*, 12(1), pp.95-107.