

Monitoring Snow Cover Changes and the Volume of Snow Water Equivalent Using MODIS and AMSR-2/AMSR-E Sensor Data (Case Study: Karun, Karkheh and Dez Basins)

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sherafat M.¹ MA,
Yarahmadi D.*¹ PhD,
Fathnia A.² PhD,
Mirhashemi H.¹ PhD

How to cite this article

Sherafat M, Yarahmadi D, Fathnia A, Mirhashemi H. Monitoring Snow Cover Changes and the Volume of Snow Water Equivalent Using MODIS and AMSR-2/AMSR-E Sensor Data (Case Study: Karun, Karkheh and Dez Basins). Geographical Researches. 2022;37(2): 231-239.

ABSTRACT

Aim The aim of this study was to investigate the spatio-temporal changes of snow cover and snow water equivalent in Karun, Karkheh and Dez basins and the effect of changes in the discharge of these basins.

Methodology In order to extract snow cover and measure snow water equivalent and their correlation with the discharge of Karun, Karkheh and Daz basins, from the thresholding method on reflective and thermal bands, Man Kendal method, Spearman correlation and MODIS measurement data (2000-2020), available images of AMSR-2/AMSR-E sensor (2003-2020) and monthly discharge at the same time with the mentioned satellite images have been used.

Findings The results of time series analysis in all three studied basins show a decreasing trend of snow cover area and volume of the snow water equivalent in most months And The most decreasing changes in snow cover area were observed in Dez basins and March with a value of -3.26 and the most decreasing changes of snow water equivalent were observed in Karun basin and February with a value of -3.86. The highest correlation in all three basins was related to Dez basin in June with a value of 0.775 ($p < 0.01$) and the lowest was related to Karkheh basin in February with a value of 0.183. Examination of the relationship between discharge and snow water equivalent AMSR-E/AMSR-2 images also showed that the highest correlation was related to Karun Basin in January with a value of 0.721 ($p < 0.01$).

Conclusion Generally, in the observed years, the area of snow cover and snow water equivalent in all months has decreased and is more severe in Karun and Dez basins. In addition, in most months, there is no significant relationship between snow cover area and basin discharge.

Keywords Snow Levels; Snow Water Equivalent; Karun; MODIS; AMSR-E/AMSR-2

¹Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Lorestan University, Khorramabad, Iran

²Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

*Correspondence

Address: Department of Geography
Faculty of Literature and Humanities,
Lorestan University, 5 km of
Tehran road, Khorramabad, Iran.
Postal Code: 6719994638
Phone: +98 (916) 1654281
Fax: +98 (83) 8267291
d.yarahmadi@gmail.com

Article History

Received: December 29, 2021
Accepted: April 11, 2022
ePublished: June 21, 2022

CITATION LINKS

[Ansari H, S Marofi; 2017] Snow water equivalent estimation ...; [Banihabib MI, et al; 2013] Detection of the snow cover ...; [Bavera D, et al; 2014] A comparison between two ...; [Byun K, Choi M; 2014] Uncertainty of snow water ...; [Coll J, Li X; 2018] Comprehensive accuracy assessment ...; [Chang ATC, et al; 1997] Snow parameters derived ...; [Dietz A; 2013] Central Asian snow cover ...; [Hall DK, Riggs GA; 2016] MODIS/Terra Snow Cover ...; [Hüsler F, et al; 2011] AVHRR archive and processing ...; [Gao Y, et al; 2010] Toward advanced daily ...; [Guyennon N, et al; 2019] Estimating the snow water ...; [Jamali S; 2014] Hydropower vulnerability assessment ...; [Kawanishi T, et al; 2003] The advanced microwave scanning ...; [Hillier B, Vaughan L; 2007] The city as ...; [Kendall MG; 1970] Rank correlation ...; [Kelly R, et al; 2004] AMSR-E/Aqua Daily L3 Global ...; [Klein AG, e al; 1998] Improving snowcover mapping ...; [Langlois A, et al; 2008] Estimation of snow water ...; [Lobl ES, et al; 2003] Global climate monitoring ... [Mann HB; 1945] Nonparametric tests ... [Mhaweji M, et al; 2014] Towards an enhanced method ... [Mohammadi Ahmadmahmoudi P, Khoorani A; 2019] Snow cover changes of zagros ... [Shan LU, et al; 2005] Mapping snow cover using AVHRR ... [Soleimani K, et al; 2018] Spatial-temporal monitoring of ... [Yang J, et al; 2015] Evaluation of snow products over ... [Zhou H, et al; 2013] Deriving long term snow cover extent ...

پایش تغییرات سطوح برفی و برآورد حجم آب معادل برف با استفاده از داده‌های سنجنده AMSR-2/AMSR-E و MODIS (مطالعه موردی: حوضه‌های کارون، کرخه و دز)

مهدی شرافت MA

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

داریوش یاراحمدی* PhD

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

امان‌اله فتح‌نیا PhD

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

حمید میرهاشمی PhD

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده

اهداف: هدف از انجام این مطالعه، بررسی تغییرات فضایی-زمانی پوشش برف و آب معادل برف حوضه‌های کارون، کرخه و دز و تاثیر تغییرات در آب‌دهی حوضه‌های مذکور بود.

روش‌شناسی: به‌منظور استخراج پوشش برف و اندازه‌گیری آب معادل برف و همبستگی آن‌ها با آب‌دهی حوضه کارون، کرخه و دز از روش آستانه‌گذاری روی باندهای انعکاسی و حرارتی، روش من‌کنندال، همبستگی اسپیرمن و داده‌های سنجنده MODIS (۲۰۰۰-۲۰۲۰)، تصاویر موجود سنجنده AMSR-E/AMSR-2 (۲۰۰۳-۲۰۲۰) و آب‌دهی ماهانه همزمان با تصاویر ماهواره‌ای مذکور استفاده شد. **یافته‌ها:** نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی در هر سه حوضه مورد مطالعه، نشانگر روند کاهش مساحت پوشش برف و حجم آب معادل برف در اکثر ماه‌ها بود، بیشترین تغییرات کاهش مساحت پوشش برف، در حوضه دز و ماه مارس با مقدار ۳/۲۶- و بیشترین تغییرات کاهش آب معادل برف نیز در حوضه کارون و ماه فوریه با مقدار ۳/۸۶- مشاهده شد. بیشترین میزان همبستگی در هر سه حوضه مربوط به حوضه دز در ماه ژوئن با مقدار ۰/۷۷۵ (p<۰/۰۱) و کمترین آن مربوط به حوضه کرخه در ماه فوریه با مقدار ۰/۱۸۳ بود. بررسی ارتباط میان دبی و آب معادل برف تصاویر AMSR-2/AMSR-E هم نشان داد که بیشترین میزان همبستگی، مربوط به حوضه کارون در ماه ژانویه با مقدار ۰/۷۲۱ بود (p<۰/۰۱).

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی در سال‌های مورد مشاهده مساحت پوشش برف و آب معادل برف در تمامی ماه‌ها کاهش بوده و در حوضه‌های کارون و دز از شدت بیشتری برخوردار است. علاوه بر این در بیشتر ماه‌ها ارتباطی میان مساحت پوشش برف و دبی حوضه‌ها وجود ندارد.

کلیدواژگان: سطوح برفی، آب معادل برف، کارون، MODIS، AMSR-2/AMSR-E

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲

*نویسنده مسئول: d.yarahmadi@gmail.com

انرژی و غذا، به‌ویژه در حوضه‌های کارون، کرخه و دز اجرا شده است که همین امر، حساسیت منابع آب این حوضه‌ها را به تغییرات آب ورودی بالا می‌برد. علاوه بر این، بیشترین ظرفیت تولید انرژی برق-آبی کشور به سه حوضه مذکور محدود می‌شود [Jamali, 2014]. با توجه به اینکه امکان بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها قبل از ساخت امکان‌پذیر است، در این حوضه‌ها به دلیل وابستگی مستقیم واحدهای تولیدی و نیروگاه‌های برق-آبی به منابع آب، لازم است تا تغییرات سطوح برفی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تامین آب سدها و رودخانه‌ها مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در حوضه کوهستانی واقع شده است، در نتیجه ریسک وقوع سیل در آن بالاست و گاهی به دلیل همراهی نزولات جوی با فرآیند ذوب برف، سیل‌هایی به راه می‌افتند که خسارات جبران‌ناپذیری به بخش کشاورزی و زیرساختی این مناطق وارد می‌کند.

در ارتباط با پایش سطوح برفی و تغییرات آب معادل برف (آب حاصل از ذوب برف)، مطالعات مختلفی انجام شده است که به برخی از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. لانگلوویس و همکاران [Langlois et al., 2008] به اندازه‌گیری آب معادل برف منطقه فرانکلین کانادا، از ۷ دسامبر ۲۰۰۳ تا ۳۰ آوریل ۲۰۰۴، با استفاده از داده‌های سنجنده AMSR-E، پرداختند. آن‌ها در این مطالعه از روش محاسبه دمای درخشندگی آپیکسل همسایه سنجنده ذکر شده استفاده کردند. نتایج نشان داد که میزان همبستگی میان داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده، در هر دو پیکسل، در سطوح یخ صاف، به میزان ۰/۷۵ و ۰/۷۳ بوده است. ژوو و همکاران [Zhou et al., 2013] تغییرات سطح برف آسیای مرکزی را برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۸ مورد مطالعه قرار دادند، آن‌ها به این منظور از داده‌های سنجنده AVHRR و MODIS و روش آستانه‌گذاری استفاده کردند. بنی حبیب و همکاران [Banihabib et al., 2013] به منظور پایش سطح برف حوضه سد شاه‌چراغی، از تصاویر سنجنده AVHRR، طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۷ استفاده کردند، نتیجه بررسی روند تغییرات سطح برف به دو روش رگرسیون خطی و من‌کنندال نشان داد که سری زمانی سطح برف روندی ندارد. بیون و چویی [Byun & Choi, 2014] در چهار منطقه واقع در کره جنوبی آب معادل برف را با استفاده از داده‌های آب معادل برف AMSR-E تخمین زدند و با داده‌های زمینی در دوره زمانی دسامبر ۲۰۰۲ تا فوریه ۲۰۱۱ ارزیابی کردند. نتایج ارزیابی نشان داد که در سه منطقه تخمین بیش از مقدار واقعی بوده است.

باور و همکاران [Bavera et al., 2014] در مطالعه‌ای، برای محاسبه آب معادل برف کشور سوئیس، در سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶، از دو مدل آماری HS-SWE و SWE-SEM (بر مبنای توزیع داده‌های عمق، چگالی و نقشه مناطق پوشیده از برف در ۳۲ ایستگاه زمینی) و یک مدل فیزیکی به نام ALPINE3D استفاده کرده و به مقایسه این سه مدل با یکدیگر پرداختند که میانگین تفاوت میان دو مدل آماری تقریباً ۸٪ و تفاوت میان مدل فیزیکی با مدل‌های آماری

مقدمه

از نظر اقلیم‌شناسان و هواشناسانی که تغییرات اقلیمی و اتمسفری را مطالعه می‌کنند در دید جهانی، پایش برف و داشتن اطلاعات دقیق از توزیع فضایی سطوح برفی برای پیش‌بینی وضع هوا و مدل‌سازی هیدرولوژیکی و آب‌هواشناسی لازم است [Shan et al., 2005]. در کشور ایران نیز، طرح‌های وسیع سدسازی و شبکه‌های متعدد و عظیم آبیاری و زهکشی، به منظور تامین امنیت

استفاده از تصاویر سنجنده MODIS و AMSR-E/AMSR-2 به صورت رستری مورد بررسی قرار گیرد تا میزان حساسیت آب‌دهی حوضه‌های مورد مطالعه به تغییرات آب حاصل از ذوب پهنه‌های برفی مشخص شود.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر با توجه به ماهیت و هدف موضوع یک تحقیق کاربردی و روش تحقیق در آن نوع توصیفی-همبستگی است. در این مطالعه به منظور پایش سطوح برفی و ارتباط آب معادل برف با دبی حوضه‌های کارون، کرخه و دز (شکل ۱؛ جدول ۱)، از تصاویر روزانه و ۸ روزه MODIS (۴۰۰ تصویر با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰)، داده‌های در دسترس آب معادل برف ۵ روزه AMSR-E و AMSR-2 (۴۰۰ تصویر با قدرت تفکیک ۲۵ کیلومتر از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰) و داده‌های دبی ماهانه ایستگاه‌های پای پل، گتوند و اهواز، برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. دلیل اصلی استفاده از تصاویر MODIS برای استخراج پوشش برف، قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالای این تصاویر با توجه به وسعت بالای مناطق مورد مطالعه و پوشش طیفی مناسب جهت تفکیک برف از ابر بوده است که این امر با توجه به گذرابودن ابر، به خوبی در تصاویر ۸ روزه MODIS (قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر) قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در انتخاب تصاویر، موضوع همزمانی داده‌ها و متناظر بودن داده‌های ایستگاهی با تصاویر ماهواره‌ای به خوبی مورد توجه قرار گرفته است. برای این تحقیق بیشتر از داده‌های سطح بالا (سطح ۳) که تصحیحات و محاسبات لازم روی آن‌ها انجام شده بود، استفاده شد اما در تصاویر خام (سطح ۰ و ۱) و در جاهایی که لازم بود، تصحیحات هندسی و رادیومتریک روی داده‌ها اعمال شد. روش استخراج سطوح برف در تصاویر MODIS به این صورت بود که پس از انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریک و موزاییک کردن تصاویر با استفاده از نرم‌افزار ENVI 4.7 (منطقه مورد مطالعه داخل دو تصویر قرار می‌گرفت) شاخص برفی (Band 4-Band NDSI) (Band 4-Band 6) برای تمامی تصاویر محاسبه شد و زمانی یک پیکسل به عنوان برف به حساب می‌آمد که شرایط زیر را دارا باشد [Klein et al., 1998]:

1: NDSI > 0.4 2: Band 2 Reflectance > 11% 3: Band 4 Reflectance < 10%

تصاویر ۸ روزه MODIS نیز حداکثر پوشش برف را در یک دوره ۸ روزه نشان می‌دهد، در این تصاویر عدد ۲۵ نشان‌دهنده پیکسل‌های غیربرف، عدد ۵۰ و ۲۰۰ نیز به ترتیب نشان‌دهنده پیکسل‌های ابری و برفی است [Hall & Riggs, 2016]. برای به‌دست‌آوردن آب معادل برف از داده‌های AMSR-E و AMSR-2 نیز از رابطه زیر استفاده شده که در تصاویر ۵ روزه این محاسبات به‌صورت خودکار انجام شده است [Chang et al., 1997].

$SWE = 4.8 (T_{18H} - T_{37H})$

$SWE = \text{آب معادل برف}$

حدود ۳- تا ۱۰٪ بود. مایوچ و همکاران [Mhawej et al., 2014] در مطالعه‌ای به منظور پایش سطح برف و آب معادل برف در لبنان، از ترکیب تصاویر Terra-Aqua و AMSR-E، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲، استفاده کردند. آن‌ها در این مطالعه مدلی مناسب را برای به‌دست‌آوردن آب معادل برف در منطقه مورد مطالعه طراحی کردند. یانگ و همکاران [Yang et al., 2015]، آب معادل برف را با استفاده از داده‌های مایکروویو غیرفعال سنجنده AMSR-E در چین برآورد کردند و توپوگرافی و پوشش گیاهی را از عوامل موثر در الگوریتم بازیابی آب معادل برف دانستند و نشان دادند که خطای برآورد در مناطق با پوشش گیاهی متراکم بیشتر از مناطق با پوشش گیاهی ضعیف و بدون پوشش است. انصاری و معروفی [Ansari & Marofi, 2017] در مطالعه‌ای از داده‌های روزانه سنجنده AMSR-E ماهواره آکووا و مدل جهانی سطح زمین (GLDAS) برای تخمین آب معادل برف روزانه در ایستگاه‌های برف‌سنجی حوضه‌های شمال غرب ایران) حوضه دریاچه ارومیه و غرب حوضه آبریز مازندران) از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ استفاده کردند، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های محاسباتی، آب معادل برف همبستگی معنی داری را در سطح ۱٪ با داده‌های مشاهداتی داشت. همچنین استفاده از چگالی برف اندازه‌گیری‌شده در داده‌های AMSR-E، باعث افزایش ضریب همبستگی از میزان ۰/۲۷ به میزان ۰/۵۵ شد.

کول و لی [Coll & Li, 2018] برای بررسی صحت محصولات پوشش برف مادیس و روش‌های پرکردن شکاف داده، از ۱۲ سال مشاهدات (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۲) ۸۰۰ ایستگاه اندازه‌گیری برف در غرب آمریکا استفاده کردند. به نظر آن‌ها، نوع پوشش، بیشترین اثر را بر دقت پایش سطح برف می‌گذارد. سلیمانی و همکاران [Soleimani et al., 2018] تغییرات پوشش برف استان کردستان را به کمک تصاویر ماهواره‌ای MODIS و روش NDSI، از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ مورد مطالعه قرار دادند، نتایج نشان داد که از لحاظ زمانی کمترین مساحت نواحی پوشیده از برف در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ و بیشترین آن در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ وجود داشته است. محمدی و خورانی [Mohammadi & Khorani, 2019] به بررسی تغییرات سطح پوشش برف کوه‌های زاگرس با استفاده از تصاویر روزانه MODIS از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۶ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که از سال ۲۰۰۹ به بعد، تا سال ۲۰۱۶ برای تمامی ماه‌ها، به‌جز ماه نوامبر تغییرات پوشش برف کاهشی است. ژینون و همکاران [Guyennon et al., 2019] در تحقیقی به اندازه‌گیری آب معادل برف، چگالی و عمق برف در آلپ‌های ایتالیا، از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ پرداختند آن‌ها در این مطالعه برای تکمیل مدل محاسبه آب معادل برف، از داده‌های هواشناسی استفاده کردند.

در مطالعات اخیر، تغییرات سطح برف و آب معادل برف مورد بررسی قرار گرفته است اما ارتباط میان این پارامترها با دبی حوضه‌های مورد مطالعه بررسی نشده است. بنابراین در این مطالعه سعی می‌شود تغییرات سطح برف و حجم آب معادل برف حوضه‌های کارون، کرخه و دز در ارتباط با دبی این حوضه‌ها، با

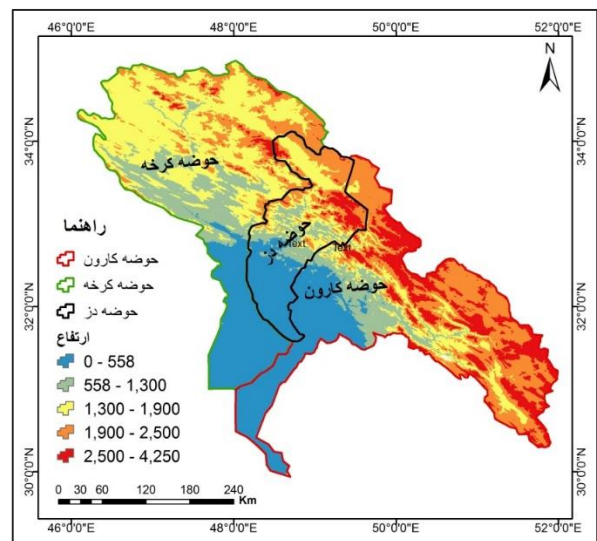
یافته‌ها

با توجه به نتایج حاصل از بررسی روند با استفاده از روش من‌کنندال، در حوضه کرخه هر چند در سال‌های اخیر پوشش برف کاهش یافته است، اما به دلیل اقلیم و قرارگیری این منطقه تغییرات مذکور معنی‌دار نبود ($p > 0/05$). بیشترین تغییر کاهشی مساحت پوشش برف در حوضه کرخه مربوط به ماه بهمن با مقدار $1/479$ بود. در این حوضه با استناد به میزان دبی وارد شده به ایستگاه پای پل، حجم میانگین ماهانه در فصولی که پوشش برف وجود داشت دارای تغییرات کاهشی بوده ولی طبق نتایج آنالیز من‌کنندال این تغییرات در 50% ماه‌های مورد مطالعه معنی‌دار نبود ($p > 0/05$)، بیشترین تغییر کاهشی دبی در حوضه کرخه مربوط به ماه ژانویه با مقدار $3/35$ بود که در سطح $0/05$ معنی‌دار است ($p < 0/05$; جدول ۲). همچنین حوضه دز نیز از نظر مساحت پوشش برف در تمامی ماه‌ها کاهش چشم‌گیری داشته است اما این تغییرات کاهشی تنها در ماه ژوئن با مقدار $2/204$ معنی‌دار بوده است. لذا در این منطقه به سبب کوهستانی بودن، در برخی از ماه‌ها تغییرات معنی‌داری در مساحت برف دیده می‌شود. میزان دبی وارد شده به ایستگاه گتوند نیز نشانگر کاهشی بودن تغییرات دبی ماهانه در سال‌های مورد مطالعه است که بیشترین میزان تغییر کاهشی دبی در این حوضه در ماه می با مقدار $3/26$ رخ داده است که بیشترین میزان تغییر دبی در تمامی ماه‌های مورد مطالعه است (جدول ۲). به‌طور کلی این حوضه به علت مساحت محدود و کوهستان‌های بلند خود بیشتر از دو حوضه دیگر تغییرات را نشان می‌دهد. در حوضه کارون نیز مساحت پوشش برف در تمامی ماه‌ها کاهشی است اما این تغییرات تنها در ماه فوریه و ژوئن به ترتیب با مقدار $2/083$ و $2/144$ معنی‌دار است. دبی وارد شده به ایستگاه اهواز نیز کاهشی بودن تغییرات را نشان می‌دهد، این تغییرات تنها در ماه‌های فوریه و مارس به ترتیب با مقدار $2/35$ و $2/12$ بود ($p < 0/05$; جدول ۲).

در این مطالعه تغییرات آب معادل برف برای داده‌های در دسترس آب معادل برف سنجنده AMSR-E و AMSR-2 (سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱) نیز مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشانگر این بودند که تغییرات آب معادل برف نیز در تمامی ماه‌ها کاهشی بوده است، البته این تغییرات در برخی از ماه‌ها معنادار نبود ($p > 0/05$). با توجه به جدول ۲، بیشترین تغییر کاهشی آب معادل برف در حوضه کرخه در ماه ژانویه با مقدار $3/18$ ، حوضه دز در ماه مارس با مقدار $3/33$ و حوضه کارون در ماه فوریه با مقدار $3/86$ رخ داده است (جدول ۲). همان‌طور که می‌بینیم بیشترین تغییرات کاهشی آب معادل برف در بیشتر ماه‌ها مربوط به حوضه کارون است.

با توجه به اینکه بیشتر داده‌های هیدرولوژی و آب‌وهواشناسی از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند بنابراین در این مطالعه برای بررسی ارتباط میان مساحت پوشش برف، دبی و آب معادل برف از روش ناپارامتریک اسپیرمن استفاده شد. بیشترین میزان همبستگی میان مساحت پوشش برف و دبی در هر سه حوضه مربوط به حوضه دز در ماه ژوئن با مقدار $0/770$ ($p < 0/05$) و کمترین آن مربوط به حوضه

در این الگوریتم از گرادیان دمای روشنایی ۱۸ (T18H) و ۳۷ گیگاهرتز (T37H) برای محاسبه آب معادل برف استفاده و آب معادل برف از طریق رگرسیون گرادیان دمای روشنایی و داده‌های مشاهداتی آب معادل برف استخراج شده است [Kelly et al., 2004]. پس از بازیابی آب معادل برف با استفاده از الگوریتم ذکر شده، داده‌ها به صورت رقومی با اندازه شبکه سلولی ۲۵ کیلومتر و با فرمت HDF-EOS ذخیره شده است، مقادیر ۰ تا ۲۴۰ ارزش پیکسل برای آب معادل برف بر حسب میلی‌متر است [Ansari & Marofi, 2017]. همان‌طور که در فایل راهنمای تصاویر AMSR-E آمده است، مقادیر واقعی آب معادل برف برای ذخیره سازی بر عامل ۲ تقسیم شده [Kelly et al., 2004]. در نتیجه برای استفاده، آن‌ها باید در عدد ۲ ضرب شوند [Gao et al., 2010]. پس از استخراج سطوح برفی و آب معادل برف و دریافت داده‌های دبی ماهیانه از سه ایستگاه منتخب، ابتدا ماه‌های خشک یا با برف ناچیز از سری داده‌ها حذف شدند و پس از نرمال سازی داده‌ها، به منظور بررسی روند تغییرات مساحت پوشش برف و آب معادل و همبستگی این دو پارامتر با دبی حوضه‌های مذکور، از روابط اسپیرمن و رویه من‌کنندال زمینه‌ای به صورت رستری استفاده شد. روش من‌کنندال ابتدا توسط [Man, 1945] ارایه و سپس توسط [Kendal, 1970] بسط و توسعه یافت. فرض صفر آزمون من‌کنندال بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها است.



شکل ۱) نقشه موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱) ویژگی‌های هیدرولوژی حوضه‌های مورد مطالعه

نام حوضه	کارون	کرخه	دز
مساحت (هکتار)	۴۷۸۴۳۱/۳۰	۵۰۱۰۷۰۳۳۲/۱	۱۷۴۷۱۸۸/۰۳
محیط (کیلومتر)	۲۳۱۰/۵۴	۱۹۰۲/۷	۱۰۴۶/۱۲
طول بلندترین آبراهه (کیلومتر)	۵۱۲/۵۷	۵۱۴/۷۸	۳۸۱/۲۴
طول آبراهه (کیلومتر)	۱۳۲۴۵/۷۲	۱۶۲۳۱/۳۹	۷۱۸۱/۲۵
تراکم زهکشی (یک بر کیلومتر)	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۴۱
زمان تمرکز (ساعت)	۵۵/۵۷	۵۳/۰۵	۳۷/۲۹

کاهش در جنوب حوضه نبود اما ۳۸٪ مناطق به سمت شمال و افزایش ارتفاعات دارای روند کاهش در طی زمان بود (شکل ۲). موضوع اخیر نشان می‌دهد در نزدیکی شهرهای فیروز آباد و نور آباد که در ارتفاع ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متری قرار دارد بیشترین کاهش برف در پوشش برف وجود دارد و درصد کاهش مساحت پوشش برف بسته به موقعیت جغرافیایی در محل شهرها از ۲۶ تا ۵۴٪ کاهش را تجربه می‌کند، به‌طور کلی شدت کاهش سطوح برفی در کرخه با توجه به سابقه برفی بودن نسبت به سایر حوضه‌ها بیشتر دیده شد (شکل ۳).

در ادامه بررسی نتایج، حوضه دز دارای روند کاهش در ۱۳ سال گذشته در مساحت پوشش برف بوده است، در این حوضه طبق نتایج نمودار ۶ در بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ هر سال پهنه‌های وسیعی از منطقه در ماه‌های دی تا اسفند سفید پوش بوده، اما از سال ۲۰۰۷ به بعد روند کاهش در بارش برف دیده شد. در این حوضه نیز بر اساس روند تغییرات ماهانه، کاهش پوشش برفی دیده می‌شود (نمودار ۴).

کاهش معنی‌دار برف در حوضه آبخیز دز مشاهده می‌شود که در قسمت جنوبی این حوضه از ایستگاه هیدرولوژی گتوند به بعد روند معنی‌داری در کاهش مناطق برفی دیده نمی‌شود. به صورت کلی ۷۳٪ منطقه دارای روند معنی‌دار کاهش در جنوب حوضه نبود. در مقابل، بیشتر این حوضه تغییرات چشم‌گیری در پوشش برف خود از لحاظ مساحتی را داشت (شکل ۲). اما بررسی‌ها نشان دادند که ۴۷٪ مناطق به سمت شمال و افزایش ارتفاعات دارای روند کاهش در طی زمان است. لیکن آنالیز روند نشان داد در ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متری نرخ کاهش بین ۴۰ تا ۴۷٪ در ماه است که به نسبت سایر نقاط حوضه از سرعت بالاتری برخوردار است ولی نسبت به حوضه کرخه شدت کمتری دارد (شکل ۳).

نهایتاً بررسی الگوهای زمانی-مکانی تغییرات سطوح برفی در مهم‌ترین حوضه مطالعاتی یعنی حوضه کارون نشان‌دهنده روند کاهش در ۱۰ سال گذشته در مساحت برف بود. حوضه کارون طبق نتایج نمودار ۱ در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ در بسیاری از ماه‌های سال سفیدپوش بود اما از سال ۲۰۱۱ به بعد روند کاهش در پوشش برف خود داشت. برای آنالیز دقیق‌تر به مطالعه روند کاهش معنی‌دار برف در حوضه آبخیز کارون ارجاع می‌شود؛ در قسمت جنوبی این حوضه از ایستگاه هیدرولوژی گتوند به بعد، روند معنی‌داری در کاهش مناطق برفی دیده نشد. به صورت کلی ۶۳٪ منطقه دارای روند معنی‌دار کاهش در جنوب حوضه نبود. در مقابل بیشتر این حوضه تغییرات چشم‌گیری در پوشش برفی خود از لحاظ مساحتی داشت (شکل ۲)؛ اما ۲۷٪ مناطق به سمت شمال و افزایش ارتفاعات دارای روند کاهش در طی زمان است. در این حوضه بالاترین تغییرات مربوط به ارتفاع ۳۵۰۰ تا ۴۰۰۰ متری است که در کل ۲٪ حوضه را تشکیل می‌دهد. در این حوضه نیز همانند دو حوضه قبل در ارتفاعات پایین به علت عدم وجود برف تغییراتی نیز دیده نشد (شکل ۳).

کرخه در ماه فوریه با مقدار ۱۸۳٪ بود، اما به‌طور کلی در اکثر ماه‌ها میزان همبستگی مساحت پوشش برف و دبی در حوضه کارون بیشتر از دو حوضه دیگر بود. بررسی ارتباط میان دبی و آب معادل برف تصاویر ۲-AMSR-E/AMSR هم نشان داد که بیشترین میزان همبستگی، مربوط به حوضه کارون در ماه ژانویه با مقدار ۷۲٪ بود ($p < 0/0$; جدول ۳).

جدول ۲) روند تغییرات مساحت برف، دبی (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰) و آب معادل حوضه کارون، کرخه و دز (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰) با استفاده از روش من‌کندال

ماه	روند مساحت برف	روند دبی	روند آب معادل برف
ژانویه	-۱/۲۹۸	-۰/۲۷۲	-۰/۸۷۲
فوریه	-۲/۵۸۳	-۱/۴۷۹	-۱/۲۹۸
مارس	-۱/۲۳۸	-۰/۳۰۲	-۱/۴۱۹
آوریل	-۱/۴۸	-۰/۹۹۷	-۱/۲۹۸
می	-۱/۴۷۹	-۰/۹۹۶	-۱/۴۸
ژوئن	-۲/۱۴۴	-۰/۳۹۳	-۲/۲۰۴

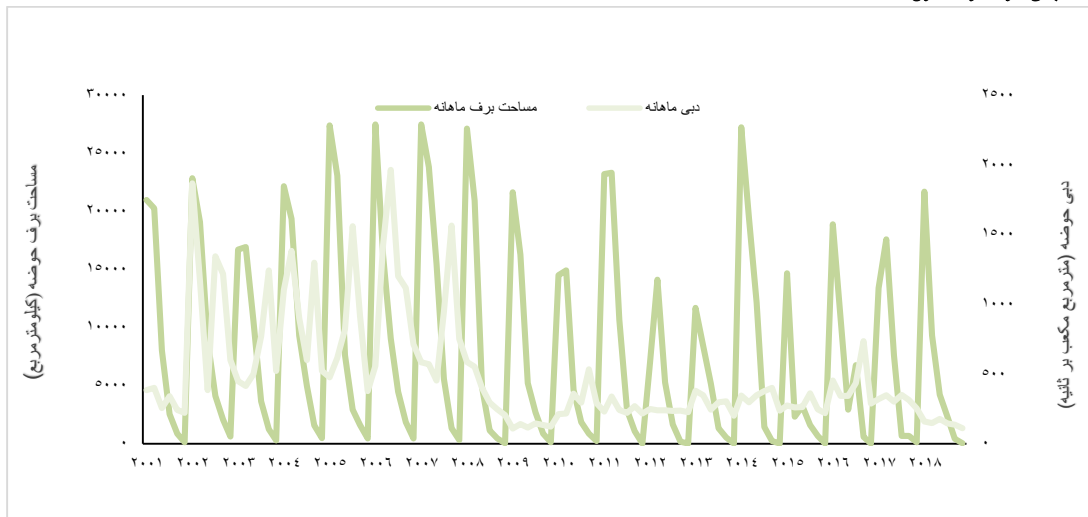
$p < 0/05^*$

جدول ۳) همبستگی اسپیرمن ماهانه و دوره‌ای مساحت برف و آب معادل و دبی حوضه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸

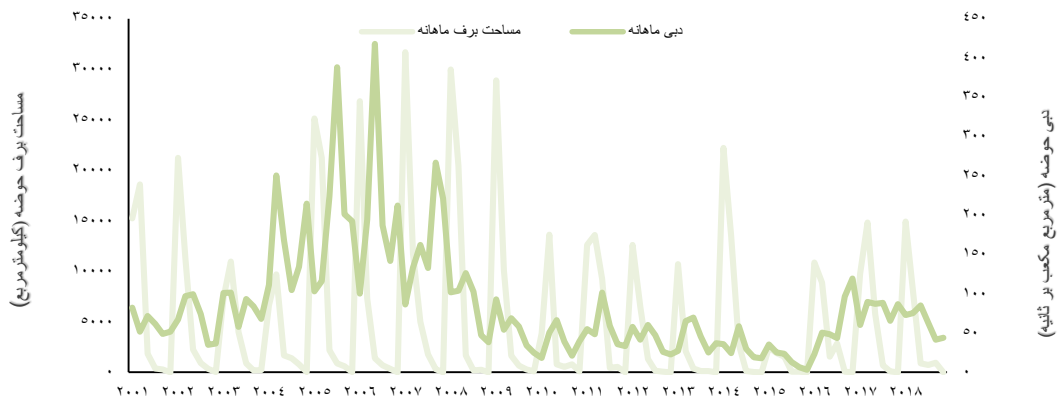
حوضه سالانه	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه
همبستگی مساحت برف و دبی						
کارون	*۰/۲۵۹	*۰/۶۶۴	*۰/۶۷۲	*۰/۵۳۴	*۰/۴۱۲	*۰/۴۸۶
کرخه	*۰/۲۲۹	*۰/۳۴۴	*۰/۲۹۸	*۰/۵۵۸	*۰/۲۴۰	*۰/۴۶۷
دز	*۰/۲۴۴	*۰/۷۷۵	*۰/۳۹۷	*۰/۲۸۴	*۰/۳۲	*۰/۲۶۵
همبستگی آب معادل برف و دبی						
کارون	*۰/۲۴۴	*۰/۱۸۶	*۰/۶۱۷	*۰/۵۶۸	*۰/۷۰	*۰/۷۲۱
کرخه	*۰/۲۳۳	*	*۰/۱۰۷	*۰/۲۲۴	*۰/۴۵۵	*۰/۵۳۲
دز	*۰/۱۸۱	*	*۰/۴۸۷	*۰/۱۸۹	**۰/۵۴۱	*۰/۴۷۴

$p < 0/05^*$

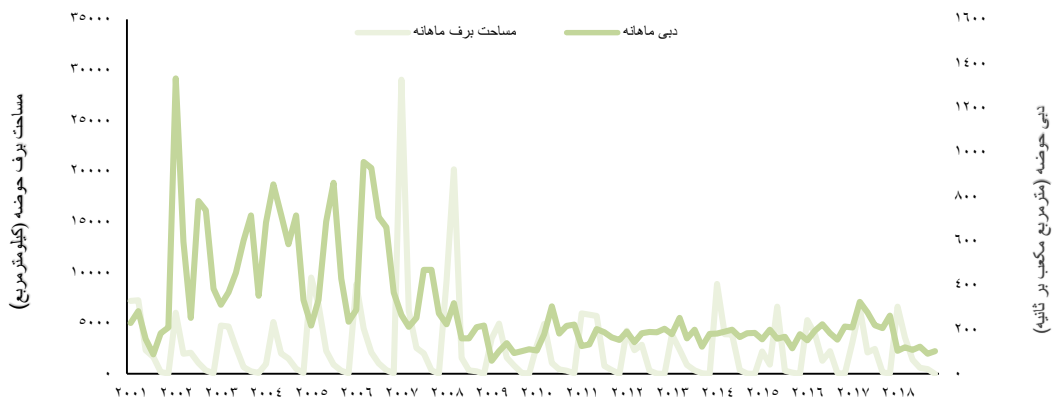
بررسی نمودار تغییرات مساحت پوشش برف و دبی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که در هر سه حوضه بالاترین مساحت پوشش برف در ژانویه سال ۲۰۰۷ رخ داده است که در حوضه کارون ۲۷۴۷۲ کیلومتر مربع (نمودار ۱)، حوضه کرخه ۳۱۶۸۱ کیلومتر مربع (نمودار ۲) و نهایتاً در حوضه دز ۲۹۰۳۱ کیلومتر مربع بود (نمودار ۳). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تغییرات پوشش برف سالیانه، حوضه کرخه دارای روند کاهش در ۱۰ سال گذشته در مساحت پهنه‌های برف‌گیر بود (نمودار ۵)؛ در این حوضه طبق نتایج نمودار ۳ در بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ هر سال پهنه‌های وسیعی از منطقه به واسطه بارش سنگین در ماه‌های دی تا اسفند سفیدپوش بوده است، اما از سال ۲۰۱۰ به بعد تنها یک بارش سنگین به خود دیده. با این حال هر چند طبق آنالیز آماری، کاهش معنی‌دار برف در حوضه آبخیز کرخه مشاهده می‌شود، اما در قسمت جنوبی این حوضه از ایستگاه هیدرولوژی چم زاب به بعد روند معنی‌داری در کاهش مناطق برفی دیده نمی‌شود. به صورت کلی ۳۴٪ منطقه دارای روند معنی‌دار



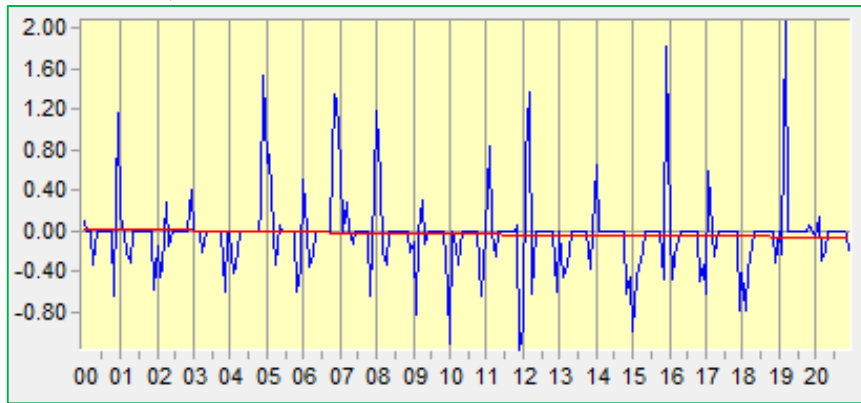
نمودار (۱) نمودار تغییرات دبی و مساحت پوشش برف حوضه کارون از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ (ماه‌های ژانویه تا ژوئن)



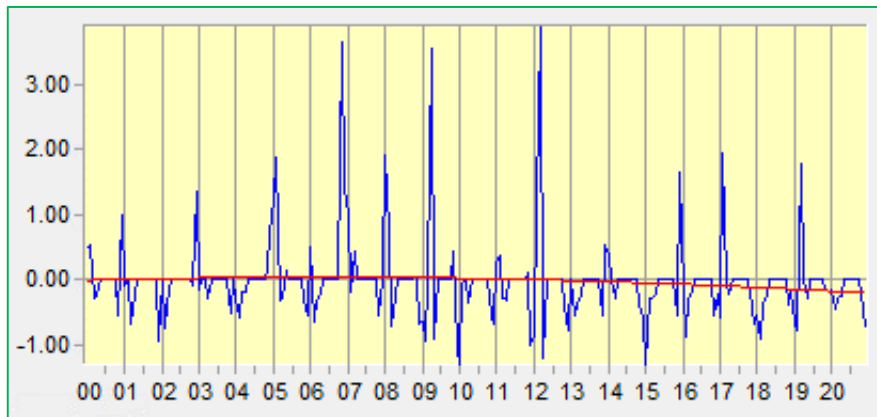
نمودار (۲) نمودار تغییرات دبی و مساحت پوشش برف حوضه کرخه از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ (ماه‌های ژانویه تا ژوئن)



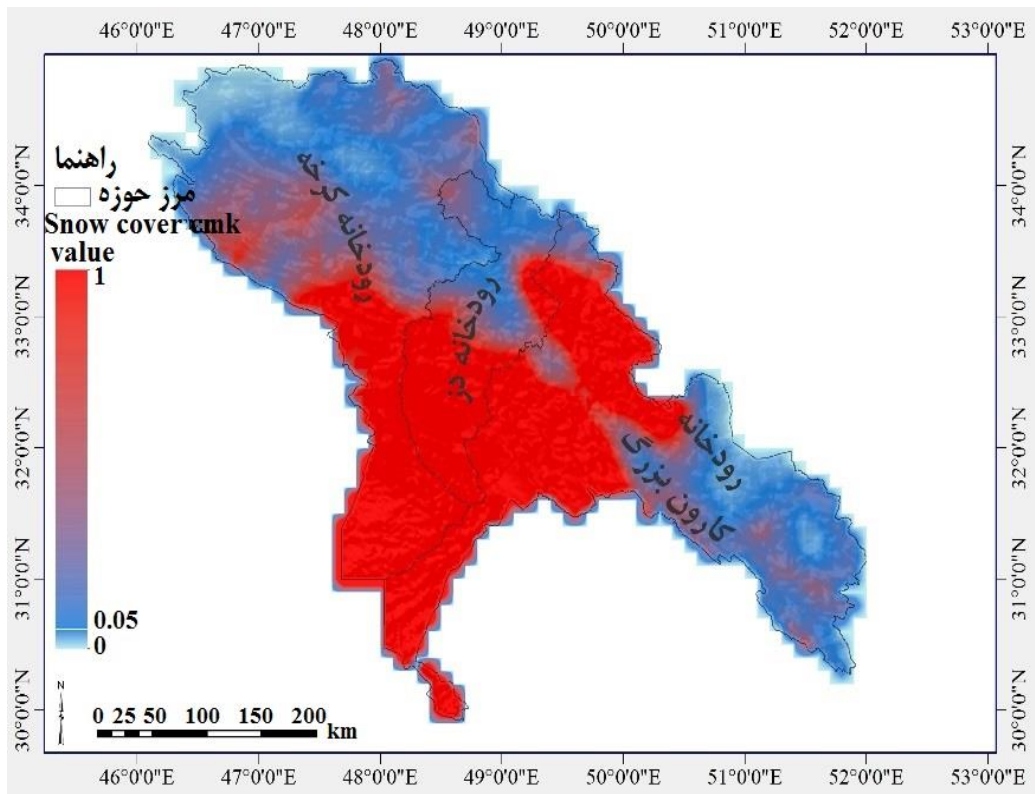
نمودار (۳) نمودار تغییرات دبی و مساحت پوشش برف حوضه دز از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ (ماه‌های ژانویه تا ژوئن)



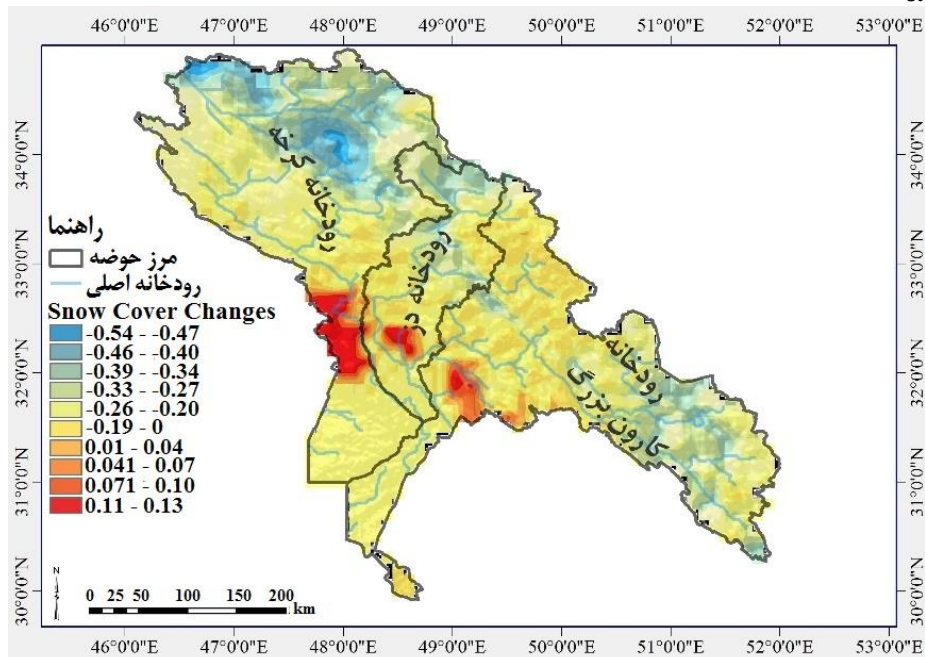
نمودار ۴) روند پیش سفید شده از مساحت پوشش برفی در حوضه دز



نمودار ۵) روند پیش سفید شده از مساحت پوشش برفی در حوضه کرخه



شکل ۲) روند تغییرات الگو پوشش برفی رویه منکندال زمینی‌ای



شکل ۳) نرخ تغییرات ماهانه پوشش برفی در طی دوره مطالعه

بحث

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر رخدادهای حدی اقلیمی مانند سیل و خشکسالی افزایش یافته در نتیجه مدیریت منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. بنابراین هدف اصلی این مطالعه نیز بررسی تغییرات پوشش برف (به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین) و ارتباط آن با دبی حوضه‌های مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بوده است. برای استخراج پیکسل‌های برفی از تصاویر ماهواره‌ای از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود اما یکی از بهترین این روش‌ها، شاخص تفاضلی نرمال شده برف (NDSI) است. این شاخص برای اولین بار توسط دیتز در سال ۱۹۸۴ معرفی شد [Dietz, 2013]. شاخص NDSI بر این اصل استوار است که برف دارای انعکاس بالا در بخش مرئی و انعکاس پایین در بخش مادون قرمز میانی است [Hüsler et al., 2011]. آنچه که در مطالعات برف‌سنجی باید به آن اهمیت داده شود این است که پیکسل‌های برفی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای بیشتر نمایانگر مساحت پهنه‌های برفی بوده و اطلاعات کافی را در ارتباط با مقدار آب ذخیره‌شده در این پهنه‌ها در اختیار ما قرار نمی‌دهد. در این رابطه یکی از بهترین روش‌ها برای به‌دست‌آوردن آب معادل برف استفاده از تصاویر سنجنده AMSR-E/AMSR-2 است. این سنجنده ابزاری با ۱۲ کانال، ۶ فرکانس، کنسولی [Lobl et al., 2003] و سیستم رادیومتر مایکروویو غیرفعال است که روی ماهواره Aqua نصب شده است [Kawanishi et al., 2003]. مشاهده یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در تمامی ماه‌ها مساحت پوشش برف دارای تغییرات کاهشی بوده اما در برخی از ماه‌ها این تغییرات معنی‌دار نیست که [Banibabib et al., 2013] نیز به نتیجه مشابهی برای حوضه سد شاه‌چراغی دست یافته بودند. از نظر تغییرات زمانی، مساحت پوشش برف از سال

۲۰۰۹ به بعد در هر سه حوضه به شکل چشمگیری کاهش یافته است که با نتایج کار [Mohammadi & Khorani, 2019] همخوانی دارد. در نهایت میزان تغییرات کاهشی پوشش برف در حوضه‌های کارون و دز بیشتر از حوضه کرخه است، از نظر زمانی نیز ماه ژوئن بیشترین تغییرات کاهشی را تجربه کرده است اما بررسی یافته‌های تغییرات حجم آب معادل برف نتایج متفاوت‌تری را نسبت به مساحت پوشش برف نشان می‌دهد، بیشترین کاهش حجم آب معادل برف در هر سه حوضه در ماه فوریه رخ داده است در صورتی که بررسی مساحت برف این میزان تغییر را نمایش نمی‌دهد. این امر حاکی از آن است که در سال‌های اخیر میزان عمق برف و حجم آب حاصل از ذوب برف بسیار بیشتر از مساحت پوشش برف کاهش یافته است. مطالعه همبستگی میان مساحت برف، آب معادل برف و آب‌دهی حوضه نشان داد که ارتباط میان مساحت پوشش برف و دبی حوضه‌ها در فصول گرم‌تر بیشتر است. مثلاً همبستگی میان مساحت برف و دبی حوضه دز در ماه ژانویه ۲۶۵٪/ ولی در ماه ژوئن ۷۷۵٪/ بود. این امر نشان می‌دهد که به ویژه در حوضه دز با افزایش دما، حساسیت آب‌دهی حوضه به میزان ذخایر برفی بیشتر می‌شود ولی در فصول سردتر به دلیل کاهش میزان ذوب برف این وابستگی کمتر است. البته بیشترین همبستگی میان مساحت پوشش برف و دبی در حوضه کارون دیده شد که این امر به دلیل وجود ارتفاعات بلند و برفگیر در این حوضه است. در این تحقیق به منظور افزایش صحت کار همبستگی داده‌های آب معادل برف سنجنده AMSR-E/AMSR-2 و دبی حوضه نیز محاسبه شد اما به دلیل قدرت تفکیک مکانی پایین این تصاویر میزان آب معادل برف استخراج شده در ماه ژوئن برای هر سه حوضه نزدیک به صفر بود که در مطالعه [Soleimani et al., 2018] نیز این تفاوت میان داده‌های محاسباتی و واقعی به خوبی قابل مشاهده است؛ پس پیشنهاد

University of Bern: a comprehensive 1 Km satellite data set for climate change studies. EARSel eProceedings. 10(2):83-101.

-Gao Y, Xie H, Lu N, Yao T, Liang T (2010). Toward advanced daily cloud-free snow cover and snow water equivalent products from Terra-Aqua MODIS and Aqua AMSR-E measurements. *Journal of Hydrology*. 385(1-4):23-35.

-Guyennon N, Valt M, Salerno F, Bruna A, Romano E (2019). Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Italian Alps. *Cold Regions Science and Technology*. 167:102859.

-Jamali S (2014). Hydropower vulnerability assessment in the face of climate change impacts case study: Karkheh river basin. *Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*. 1(2):25-37. [Persian]

-Kawanishi T, Sezai T, Ito Y, Imaoka K, Takeshima T, Ishidoet Y, et al (2003). The advanced microwave scanning radiometer for the earth observing system (AMSR-E), NASDA'S contribution to the eos for global energy and water cycle studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41(2):184-194.

-Kendall MG (1970). Rank correlation methods. 2nd Edition. New York: Hafner.

-Kelly R, Foster J, Tedesco M (2004). AMSR-E/Aqua Daily L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2 [Internet]. Boulder: NASA National Snow and Ice Data Center; [Unknown Cited]. Available from: https://nsidc.org/data/ae_dysno/versions/2

-Klein AG, Hall DK, Riggs GA (1998). Improving snowcover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model. *Hydrological Processes*. 12(10-11):1723-1744.

-Langlois A, Scharien R, Geldsetzer T, Iacozza J, Barber DG, Yackel J (2008). Estimation of snow water equivalent over first-year sea ice using AMSR-E and surface observations. *Remote Sensing of Environment*. 112(9):3656-3667.

-Lobl ES, Spencer RW, Shibata A, Imaoka K, Sasaki M, Kachi M (2003). Global climate monitoring with the Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR and AMSR-E). *Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment III*. 4894.

-Mann HB (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 13:245-259.

-Mhaweji M, Faour G, Fayad A, Shaban A (2014). Towards an enhanced method to map snow cover areas and derive snow-water equivalent in Lebanon. *Journal of Hydrology*. 513:274-282.

-Mohammadi Ahmadm Mahmoudi P, Khorani A (2019). Snow cover changes of zagros range in 2001-2016 using daily data of MODIS. *Journal of Earth and Space Physics*. 45(2):355-371. [Persian]

-Shan LU, Kazuo OKI, Kenji OMASA (2005). Mapping snow cover using AVHRR NDVI 10-day composite data. *Journal of Agricultural Meteorology*. 60(6):1215-1218.

-Soleimani K, Darvishi S, Shokrian F, Rashidpour M (2018). Spatial-temporal monitoring of snow cover in Kurdistan province using MODIS images. *Iranian Remote Sensing & GIS Society*. 10(3):104-77. [Persian]

-Yang J, Jiang L, Ménard CB, Luoju K, Lemmetyinen J, Pulliainen J (2015). Evaluation of snow products over the Tibetan Plateau. *Hydrological Processes*. 29(15):3247-3260.

-Zhou H, Aizen E, Aizen V (2013). Deriving long term snow cover extent dataset from AVHRR and MODIS data: Central Asia case study. *Remote Sensing of Environment*. 136:146-162.

می‌شود که برای مطالعه آب معادل برف در فصول گرم سال، که مساحت برف کمتر است از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر استفاده شود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی در سال‌های مورد مشاهده مساحت پوشش برف و آب معادل برف در تمامی ماه‌ها کاهش یافته و در حوضه‌های کارون و دز از شدت بیشتری برخوردار است. علاوه بر این در بیشتر ماه‌ها ارتباطی میان مساحت پوشش برف و دبی حوضه‌ها وجود ندارد.

تشکر و قدردانی: -

تأییدیه اخلاقی: -

تعارض منافع: -

سهم نویسندگان: مهدی شرافت (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ داریوش یاراحمدی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه (۳۰٪)؛ امان‌اله فتح‌نیا (نویسنده سوم)، روش‌شناس (۱۰٪)؛ حمید میرهاشمی (نویسنده چهارم)، تحلیلگر آماری (۱۰٪)

منابع مالی: -

منابع

-Ansari H, S Marofi (2017). Snow water equivalent estimation using AMSR-E and GLDAS model (case study: basins of northwestern Iran). *Journal of Water and Soil*. 31(5):1497-1510. [Persian]

-Banihabib MI, Jamali FS, Saghafian B (2013). Detection of the snow cover area using NOAA-AVHRR in Shahcheraghi Dam basin. *Physical Geography Research Quarterly*. 45(3):13-29. [Persian]

-Bavera D, Bavay M, Jonas T, Lehning M, De Michele C (2014). A comparison between two statistical and a physically-based model in snow water equivalent mapping. *Advances in Water Resources*. 63:167-178.

-Byun K, Choi M (2014). Uncertainty of snow water equivalent retrieved from AMSR-E brightness temperature in northeast Asia. *Hydrological Processes*. 28(7):3173-3184.

-Coll J, Li X (2018). Comprehensive accuracy assessment of MODIS daily snow cover products and gap filling methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 144:435-452.

-Chang ATC, Foster JL, Hall DK, Goodison BE, Walker AE, Metcalfe JR, et al (1997). Snow parameters derived from microwave measurements during the BOREAS winter field campaign. *Journal of Geophysical Research*. 102(D24):29663-29671.

-Dietz A (2013). Central Asian snow cover characteristics between 1986 and 2012 derived from time series of medium resolution remote sensing data [dissertation]. Universität Würzburg.

-Hall DK, Riggs GA (2016). MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m SIN Grid, Version 6 [Internet]. Boulder: National Snow and Ice Data Center; [Unknown Cited]. Available from: <https://nsidc.org/data/MOD10A2/versions/6>

-Hüsler F, Fontana F, Neuhaus C, Jan Musial M, Wunderle S (2011). AVHRR archive and processing facility at the