

## مدل سازی تغییرات مکانی آب معادل برف بر اساس عوامل توپوگرافی و اقلیمی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سهرورد استان زنجان)

حجت‌اله گنج‌خانلو<sup>۱</sup>، مهدی وفاخواه<sup>۲\*</sup>، علی فتح‌زاده<sup>۳</sup>، حسین زینی‌وند<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه اردکان

۴. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۳/۲۰)

### چکیده

داشتن اطلاعات در زمینه عمق، چگالی و آب معادل برف برای مدیریت منابع آب در مناطق کوهستانی اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی، به دلیل مسائل مالی، شرایط اقلیمی نامساعد و صعب‌العبور بودن مناطق کوهستانی، اندازه‌گیری‌ها نقطه‌ای است که تعمیم آن به سطوح بزرگ خطای زیادی دارد. یکی از روش‌ها برای پیش‌بینی آب معادل برف، بررسی ارتباط بین آب معادل برف با عوامل مؤثر است. بدین منظور حوضه آبخیز کوهستانی سهرورد استان زنجان انتخاب شد. داده‌های اولیه تهیه و نقشه‌های مورد نیاز شامل نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع، شیب، جهت شیب، شمالی بودن، شرقی بودن، انحنای افقی، انحنای عمودی، شاخص وضعیت توپوگرافی و تابش خورشیدی استخراج شد. سپس، هنگام پارش اوج برف، عمق برف به تعداد ۱۵۰ نمونه به روش هایپرکیوب لاتین و چگالی برف به تعداد ۱۸ نمونه به روش تصادفی اندازه‌گیری شد. محاسبات شاخص بادپناهی برای نقاط اندازه‌گیری شده عمق برف انجام شد. در مرحله بعد با انجام رگرسیون بین آب معادل برف با عوامل مؤثر، رابطه کمی بین آنها تعیین شد. کارایی مدل‌ها با شاخص‌های آماری میانگین خطا، میانگین خطای مطلق، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی تعیین شد. نتایج نشان داد در حوضه آبخیز یادشده با روش رگرسیون گام‌به‌گام می‌توان آب معادل برف را برآورد کرد. همچنین براساس نتایج، هرچند عامل اقلیمی شاخص بادپناهی حجم زیاد محاسبات را دارد؛ ولی دخالت دادن آن سبب افزایش کارایی مدل در برآورد آب معادل برف می‌شود. آب معادل برف بیشترین همبستگی معنادار را با ارتفاع برابر با ۰/۶۰۷ و کمترین همبستگی معنادار را با شمالی بودن برابر با ۰/۲۰۴ در محدوده مطالعاتی دارد. ضرایب همبستگی بین متغیر وابسته آب معادل برف با متغیر مستقل شاخص بادپناهی نشان می‌دهد فاصله ۳۰۰ متری، مؤثرترین فاصله برهم‌کنش باد و پستی و بلندی‌ها در ایجاد شرایط بادپناهی و بادروبی است. ضریب تغییرات عمق و چگالی برف اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با ۵۴/۱۴ و ۷/۸۹ درصد است.

**کلیدواژگان:** آب معادل برف، رگرسیون گام‌به‌گام، شاخص بادپناهی، نمونه‌برداری هایپرکیوب لاتین.

## مقدمه

در بسیاری از مناطق به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مانند ایران، برف انباشت‌شده، ذخیره شایان توجهی از منابع آب را با عنوان آب معادل برف در حوضه‌های آبخیز کوهستانی ایجاد می‌کند. این ذخایر برفی هر چند اندک، تأثیر شایان توجهی در تغذیه و تعادل هیدرولوژیکی مناطق یادشده نظیر تأمین دبی پایه رودخانه‌های دائمی و کنترل رژیم سیلابی رودخانه‌ها در پایین‌دست دارند [۱-۳]. با توجه به اینکه بارش برف به‌عنوان اولین ورودی در تحلیل هیدرولوژیکی در مناطق کوهستانی است، داده‌های صحیح توزیع مکانی برف برای تحلیل بیلان آبی و ارزیابی منابع آب با مدل‌های هیدرولوژیکی ضروری است و درک ما نسبت به برآورد رواناب ناشی از برف را افزایش می‌دهد [۴ و ۵]. همچنین بررسی توزیع برف در این مناطق به‌دلیل تأثیر آن روی فرایندهای متعدد از جمله میزان فرسایش [۶]، دما و رطوبت خاک [۷]، بقای گیاه [۸ و ۹] و واکنش هیدرولوژیکی رودخانه‌ها [۱۰ و ۱۱] اهمیت ویژه‌ای دارد.

بنا به دلایل متعددی نظیر مسائل ایمنی، محدودیت‌های اقتصادی و مالی، صعب‌العبور بودن مناطق کوهستانی، شرایط اقلیمی سخت حاکم بر مناطق کوهستانی و کافی نبودن ایستگاه‌های برف‌سنجی در مناطق مرتفع، آماربرداری و اندازه‌گیری مؤلفه‌های برف در سطح وسیع، دشوار و گاهی غیرممکن است و اندازه‌گیری‌ها به‌صورت نقطه‌ای و محدود انجام می‌شود. از طرف دیگر، تغییرپذیری مکانی برف در شرایط کوهستانی خیلی زیاد است و این تغییرپذیری با اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای در ایستگاه‌های اندازه‌گیری قابل تبیین نیست. به‌طوری که تعمیم اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای به سطوح بزرگ‌تر به‌ویژه در مناطق با توپوگرافی شدید با خطای زیادی همراه است [۱۲]. بنابراین، دستیابی به مؤلفه‌های برف در سطح وسیعی از حوضه آبخیز با استفاده از مشاهدات نقطه‌ای و محدود، یکی از چالش‌های اساسی در هیدرولوژی است. بنابراین، مدل‌سازی تغییرات مکانی برف و کمی‌کردن رابطه بین مؤلفه‌های برف با عوامل مؤثر توپوگرافی و اقلیمی برای برآورد مؤلفه‌های برف بر اساس این عوامل سهل‌الوصول اجتناب‌ناپذیر است.

برقراری روابط همبستگی چندگانه آب معادل برف با ترکیب خطی [۱۳]، یا غیرخطی عوامل مؤثر [۱۴ و ۱۵] به‌ویژه عوارض زمینی با همبستگی مناسب با آب معادل برف به‌عنوان راه‌حلی برای مدل‌سازی آب معادل برف به‌کار می‌رود. برخی از این عوامل زمینی شامل شمالی‌بودن<sup>۱</sup> و شرقی‌بودن<sup>۲</sup> به‌منظور نرمال‌سازی متغیر برای شیب محاسبه می‌شوند. شمالی‌بودن از حاصل ضرب سینوس شیب در کسینوس جهت به‌دست می‌آید [۱۶]. در حالی که شرقی‌بودن از حاصل ضرب سینوس شیب در سینوس جهت به‌دست می‌آید. شمالی‌بودن نشان‌دهنده میزان درجه‌ای است که عوارض حوضه آبخیز رو به شمال هستند به همین ترتیب شرقی‌بودن نشان‌دهنده میزان درجه‌ای است که عوارض حوضه آبخیز رو به شرق هستند [۱۷]. دامنه تغییرپذیری این دو عامل بین -۱ تا +۱ است. انحنا<sup>۳</sup> عبارت از مشتق دوم سطح و یا مشتق شیب است. دو نوع انحنا برای یک سطح امکان‌پذیر است؛ انحنای قائم که عمود بر جهت حداکثر شیب است و انحنای افقی که در جهت حداکثر شیب است. انحنای مثبت و منفی به‌ترتیب نشان‌دهنده تحدب و تقعر سطح در آن پیکسل است. مقدار صفر نیز نشان‌دهنده سطح مسطح است و معمولاً با واحد رادیان بر متر به درصد بیان می‌شود. این متغیر رلیف‌های کوچک سطح را بیان می‌کند که با برداشت و انباشت برف (بادبردگی برف از سطوح در معرض باد با شیب‌های تند به سمت دره‌ها و گالی‌ها) ارتباط دارد [۱۷]. شاخص وضعیت توپوگرافی<sup>۴</sup> اطلاعاتی را درباره وضعیت نسبی هر پیکسل نسبت به پیکسل‌های اطراف در مقیاس مکانی معین ارائه می‌کند و برای فواصل شعاعی و مقیاس‌های مختلف محاسبه می‌شود. مقادیر مثبت و منفی به‌ترتیب بدین‌معناست که آن پیکسل نسبت به پیکسل‌های اطراف بالاتر و پایین‌تر است و مقادیر نزدیک به صفر بیان‌کننده سطوح مسطح و یا قسمت‌هایی شیب است. شاخص وضعیت توپوگرافی به مفهوم انحراف از استاندارد ارتفاع است. به‌بیانی، بیان‌کننده تغییرپذیری ارتفاع در شعاع معین است [۱۸].

1. Northernn  
2. Eastern  
3. Curvature  
4. Topographic Position Index

است. در این تحقیق برای دوره‌های انباشت برف، رگرسیون خطی بهترین روش مدل‌سازی آب معادل برف با متغیرهای شیب، ارتفاع، جهت و پوشش گیاهی معرفی شد؛ ولی در دوره‌های ذوب برف، ارتباط بین عمق برف با عوامل بررسی شده به‌درستی تبیین نشده است. میشل و همکارانش [۲۵] با استفاده از عکس‌برداری هوایی توسط هواپیمای بدون سرنشین، تغییرپذیری عمق برف را در سطح کوچک در درهٔ وال گروسی شرقی در شمال ایتالیا نزدیک دریاچهٔ مالجیر بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این روش قادر به برآورد دقیقی از عمق برف بوده و اختلاف آن با میانگین نقاط اندازه‌گیری‌شدهٔ عمق برف حدود ۷/۳ سانتی‌متر است.

میزوکامی و همکارانش [۲۶] یک روش رگرسیونی براساس آنالیز خوشه‌ای را برای تهیهٔ نقشهٔ توزیع آب معادل برف در غرب آمریکا معرفی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد معادلات معرفی‌شده برای ماه‌های سرد سال توانسته است آب معادل برف را پیش‌بینی کند، ولی برای ماه‌های گرم به رزولوشن زمانی و مکانی بهتری نیاز است. در ایران نیز شریفی و همکارانش [۲۷] برآورد توزیع مکانی عمق برف در حوضهٔ آبخیز صمصامی را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با استفاده از معادلهٔ همبستگی خطی ۶۷ درصد تغییرات عمق برف، تحت تأثیر عوامل ارتفاع، جهت، شیب و شاخص بادپناهی است. شریفی و همکارانش [۲۸] همبستگی بین عمق برف با ارتفاع، زاویهٔ شیب و جهت شیب در حوضهٔ آبخیز صمصامی را ارزیابی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که همبستگی بین عمق برف با ارتفاع تا حد معینی از ارتفاع، مستقیم و در ارتفاعات بالاتر از آن معکوس و بی‌معناست. همچنین همبستگی بین عمق برف با زاویهٔ شیب در شیب‌های کم، معکوس و در شیب‌های زیاد، مستقیم و بی‌معناست. همبستگی بین عمق برف با جهت شیب (آزیموت) از صفر تا ۱۶۶ درجه معنادار و از ۱۶۶ تا ۳۵۹ درجه بی‌معنا بوده است. معروفی و همکارانش [۲۹] با تحقیق در حوضهٔ آبخیز صمصامی، نتیجه گرفته‌اند که مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک- شبکهٔ عصبی مصنوعی با ورودی‌های ارتفاع، شاخص بادپناهی، جهت شیب، شیب و طول جغرافیایی، مناسب‌ترین روش برای برآورد آب معادل برف است. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد ارتفاع و شاخص بادپناهی مهم‌ترین

به‌طور کلی، هدف از پژوهش یادشده، بررسی ارتباط کمی عوامل توپوگرافی و عوامل اقلیمی با آب معادل برف و تعیین رابطهٔ کمی بین آنها در محدودهٔ مطالعاتی است.

### پیشینهٔ پژوهش

الدر و همکارانش [۱۹] در حوضهٔ آبخیزی واقع در کلرادو، از بین عوامل ارتفاع، شیب، تابش خورشیدی و شاخص‌های بادپناهی، شاخص بادپناهی را به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر عمق برف معرفی کردند. اریکسون و همکارانش [۱۵] به‌منظور مدل‌کردن تأثیر عوامل توپوگرافی روی عمق برف از روش معادلهٔ همبستگی خطی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد اگر علاوه بر استفاده از ترکیب خطی عوامل توپوگرافی، از آثار متقابل آنها نیز به‌صورت غیرخطی استفاده شود، توانایی بیشتری در مدل‌کردن روند موجود در مشاهدات ایجاد می‌شود. میناسنی و مک برانتی [۲۰] با مقایسهٔ روش‌های مختلف پهنه‌بندی خاک، کارایی زیاد روش نمونه‌برداری هایپرکیوب لاتین مکانی را نتیجه گرفتند. سکستون [۲۱] با تحقیق در حوضهٔ کاج ایا پوند در کلرادوی شمالی نتیجه گرفته است که عوامل ارتفاع، شمالی بودن و شرقی بودن بیشترین همبستگی را با عمق برف دارد و رابطهٔ خطی‌ای بین آنها وجود دارد. کارل [۲۲] در حوضهٔ آبخیز فورک رودخانهٔ گالاتین در جنوب غربی مونتانا نتیجه گرفته است که برآورد کل آب معادل برف حوضهٔ آبخیز، با استفاده از روش‌های درخت رگرسیون و رگرسیون چندگانه نتایج مشابهی داشته، اما الگوهای مختلفی از توزیع عمق برف را ارائه می‌دهد. همچنین ارتفاع و تابش خورشیدی بیشترین تأثیر را بر توزیع عمق برف داشته است. اندرسون و همکارانش [۲۳] اثر عوامل ارتفاع، جهت و پوشش گیاهی را بر آب معادل برف در حوضهٔ آبخیزی در منطقهٔ نیمه‌خشک جنوب غربی ایداهو بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که مناطق جنگلی به‌دلیل تفاوت در فرایند ذوب در مقیاس حوضهٔ آبخیز، برف را بیشتر نگه داشته است. در ضمن، فضاها با در داخل جنگل به‌دلیل ربایش، برف را بیشتر از فضاها پوشیده نگه داشته‌اند. کوسیرو و جنیک [۲۴] با اندازه‌گیری آب معادل برف در دو فصل زمستان و پهنه‌بندی آن با استفاده از ده روش نتیجه گرفته‌اند که مناسب‌ترین روش‌ها به‌ترتیب رگرسیون خطی، ساده، کریجینگ و کوکریجینگ

است. احتمال وقوع برف از آبان‌ماه وجود دارد و تا اواخر فروردین تداوم دارد. بارش برف، منبع اصلی تأمین‌کننده آب رودخانه سهرورد است که به مصارف کشاورزی، آبی‌پروری، مقاصد تفریحی و شرب در مناطق مسکونی به‌ویژه شهر سهرورد می‌رسد. براساس سیستم طبقه‌بندی اقلیمی تورنت‌وایت، این حوضه در منطقه نیمه‌خشک است. پوشش گیاهی آن بیشتر به‌صورت مراتع ضعیف است. وضعیت مرتع بر اساس روش سازمان جنگل‌بانی آمریکا جزء مراتع درجه ۴ است. گونه‌های غالب آن شامل درمنه، گون و گندمیان است. دارای چهار جامعه گیاهی است: ۱. درمنه+آویشن+گون؛ ۲. درمنه+آویشن+گندمیان؛ ۳. گندمیان+گون و ۴. بوته‌های تیغ‌دار پهن. از نظر زمین‌شناسی حوضه سهرورد در جنوب رشته‌کوه سلطانیه واقع شده است. بخش زیادی از آن را تشکیلات مربوط به دوران سوم و بخشی دیگر را سنگ‌های دوران مزوزوئیک تشکیل می‌دهند. قدیمی‌ترین واحد سنگی در منطقه سهرورد، سنگ‌های دگرگونی با درجه ضعیف است. جوان‌ترین نهشته‌های رسوبی در این منطقه رسوبات آبرفتی کواترنر حاوی طبقاتی از شن و ماسه و خرده‌سنگ است. از نظر وضعیت فرسایشی، فرسایش موجود در حوضه سهرورد شامل شیبی، ورقه‌ای، رودخانه‌ای و خندقی و لغزش است. میزان فرسایش در کل حوضه که با روش پسیاک برآورد شده به‌طور متوسط حدود ۱۴/۲۹ تن در هکتار در سال است. نکته شایان توجه در وضعیت فرسایشی حوضه سهرورد، فرسایش شیمیایی یا انحلال سنگ آهک یا پدیده کارستی است که به‌دلیل پوشش نیمی از حوضه توسط سنگ آهک در منطقه، مراکز سکونت آن شامل مادآباد، سهرورد و شیخ‌ر می‌شود [۳۳]. دسترسی آسان، وضعیت توپوگرافی و اقلیمی حوضه آبخیز و نزدیکی آن به مرکز شهرستان (خدابنده) و ایستگاه سینوپتیک واقع در مرکز شهرستان با ارتفاع ۲ هزار متر از سطح دریا برای تهیه اطلاعات هواشناسی مورد نیاز از دلایل انتخاب این حوضه آبخیز است. در شکل ۱ نقشه محدوده مطالعاتی آورده شده است.

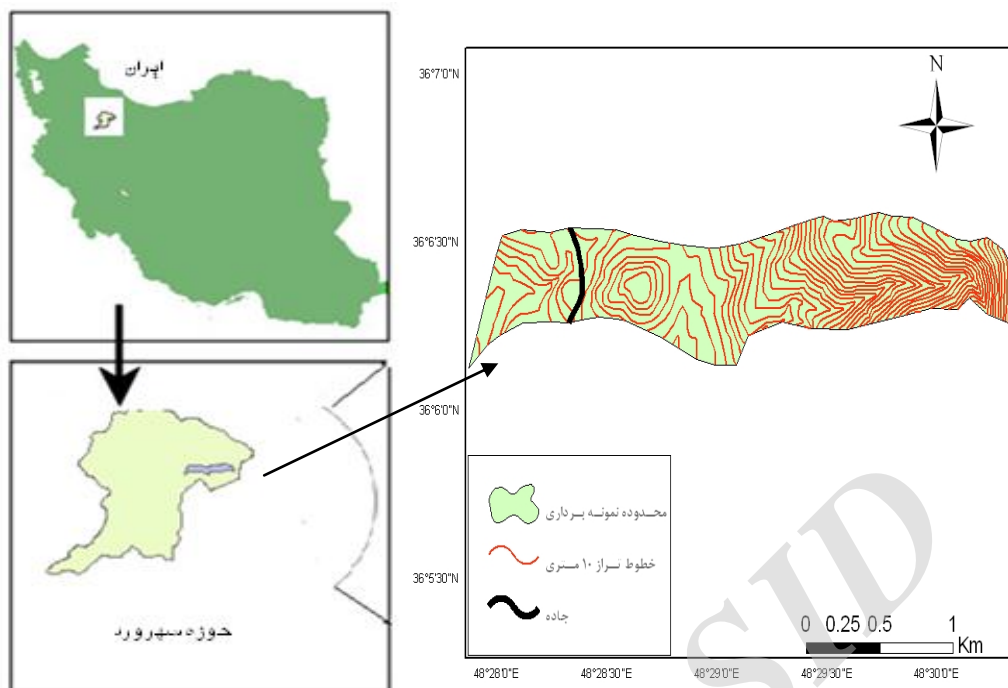
عوامل مؤثر در آب معادل برف هستند. تقی‌زاده و همکارانش [۳۰] با تحقیقات خود در حوضه سخوید یزد، کارایی زیاد روش رگرسیون کریجینگ را در برآورد توزیع مکانی عمق برف نتیجه گرفتند. قرایی‌منش و همکارانش [۳۱] با تحقیقات خود در حوضه سخوید یزد، با مقایسه مدل درخت تصمیم نسبت به شبکه عصبی مصنوعی نتیجه گرفتند که مدل درخت تصمیم کارایی بیشتری برای تخمین توزیع مکانی عمق برف دارد. تقی‌زاده و همکارانش [۳۲] با مقایسه روش‌های مختلف نمونه‌برداری برای پهنه بندی خاک در منطقه اردکان، نتیجه گرفتند که روش هایپرکیوب لاتین مکانی بهترین روش نمونه‌برداری در منطقه یادشده است.

جمع‌بندی سوابق پژوهشی بیان می‌کند که با توجه به اهمیت موضوع پژوهش‌های متعددی در خارج و داخل کشور در مناطق برف‌گیر و کوهستانی انجام شده است که نتایج آنها نسبتاً با هم متفاوت بوده است؛ ولی روش نمونه‌برداری هایپرکیوب لاتین مکانی که در این پژوهش انجام شده است، به‌عنوان یک روش نمونه‌برداری مدرن تا به حال فقط برای پهنه‌بندی رقومی خاک به‌کار گرفته شده است. از طرفی، بررسی ارتباط آب معادل برف با عوامل توپوگرافی شرقی‌بودن، شمالی‌بودن، انحنای عمودی، شاخص وضعیت توپوگرافی و عامل اقلیمی تابش خورشیدی تا به حال در داخل کشور به‌کار گرفته نشده است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه شده

تحقیق حاضر در حوضه آبخیز سهرورد واقع در شهرستان خدابنده استان زنجان انجام شد. حوضه آبخیز یادشده یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز سفیدرود و معرف مناطق نیمه‌خشک سرد و کوهستانی است. مساحت این حوضه آبخیز حدود ۱۰۴/۵۵ کیلومتر مربع و دامنه ارتفاعی آن از حداقل ۱۶۵۰ تا حداکثر ۲۸۰۹ متر از سطح دریا، میزان بارندگی سالانه آن ۴۱۸ میلی‌متر و دمای متوسط آن ۸/۴۸ درجه سانتی‌گراد و ضریب برف‌گیری آن حدود ۴۳/۷ درصد



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

در این روایط **Northern** - شمالی بودن، **Eastern** - شرقی بودن، **Slope** - شیب، **Aspect** - جهت هستند.

سپس بر اساس لایه‌های رستری استخراج‌شده شامل نقشه مدل رقومی ارتفاع، شیب حوزه، جهت شیب حوزه، شمالی بودن، شرقی بودن، انحنای افقی، انحنای عمودی و شاخص وضعیت توپوگرافی و با نوشتن برنامه مربوط به آن در نرم‌افزار Matlab، مختصات نقاط نمونه‌برداری از عمق برف به تعداد ۱۵۰ نمونه، به روش نمونه‌برداری هایپرکیوب لاتین<sup>۲</sup> تعیین و به GPS منتقل شد [۲۰].

روش هایپرکیوب لاتین یک روش نمونه‌برداری مدرن است که تا به حال فقط برای پهنه‌بندی رقومی خاک به کار گرفته شده است. در روش هایپرکیوب کاربر تصمیم می‌گیرد تا تعداد نمونه مشخصی را استفاده کند. این روش داده‌های محیطی را به همان تعداد داده‌های نمونه‌های خواسته‌شده به صورت خوشه تقسیم می‌کند و یک نمونه تصادفی از داده‌های ورودی متغیرهای محیطی هر خوشه را طوری انتخاب می‌کند تا شرط مربع لاتین را تأمین کند (براساس این شرط در هر سطر و ستون فقط یک نمونه وجود داشته باشد) [۳۴]. روش هایپرکیوب لاتین یک روش

### روش پژوهش

**جمع‌آوری اطلاعات پایه‌ای و تهیه نقشه‌های مورد نیاز**  
در این مرحله ابتدا مطالعات اولیه انجام و اطلاعات لازم جمع‌آوری شد و بعد از بازدیدهای میدانی و بررسی‌های دقیق حوزه آبخیز، محدوده نمونه‌برداری انتخاب شد. در انتخاب محدوده نمونه‌برداری، راه‌های دسترسی و همچنین محدودیت ناشی از مسائل ایمنی و خطرات احتمالی مورد توجه قرار گرفت. از طرف دیگر، محدوده نمونه‌برداری به‌گونه‌ای انتخاب شد که گویای تغییرات عوامل بررسی‌شده مؤثر بر عمق برف به‌ویژه عوامل توپوگرافی باشد. در مرحله بعد بر اساس نقشه پایه (نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰)، نقشه مدل رقومی ارتفاع<sup>۱</sup> با اندازه پیکسل ۱۰ متر تهیه شد. در ادامه سایر نقشه‌های مورد نیاز شامل نقشه‌های شیب، جهت جغرافیایی، شمالی بودن [۱۶]، شرقی بودن، انحنای افقی، انحنای عمودی، شاخص وضعیت توپوگرافی [۱۸] و نقشه تابش خورشیدی [۱۶] در محیط ArcGIS و Saga استخراج شد.

$$Northern = SinSlope * CosAspect \quad (1)$$

$$Eastern = SinSlope * SinAspect \quad (2)$$

2. Latin Hypercube Sampling

1. Digital Elevation Model

در مقایسه با عمق برف بسیار کم است (ضریب تغییرات چگالی برف نزدیک به ۸ درصد و ضریب تغییرات عمق برف حدود ۶۰ درصد)، برای به دست آوردن چگالی متوسط برف، از داده‌های چگالی میانگین گرفته شده؛ سپس عدد به دست آمده در داده‌های عمق برف ضرب شد تا مقادیر آب معادل برف به دست آید [۳۶].

#### محاسبه شاخص بادپناهی

شاخص بادپناهی معیاری است که بر اساس برهم‌کنش باد و پستی و بلندی محدوده که بادپناهی هر نقطه از زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تعریف و بر حسب درجه بیان می‌شود. در این مرحله شاخص بادپناهی طی گام‌های زیر محاسبه شد:

۱. جمع‌آوری آمار و اطلاعات مربوط به جهت و سرعت باد ثبت شده در نزدیک‌ترین ایستگاه (ایستگاه سینوپتیک خدابنده) برای بازه زمانی مربوط به رخداد بارش برف اندازه‌گیری شده توسط اکیپ کارشناسان و کوهنوردان.

- تعیین مختصات نقاط انتهایی امتدادهای معین (۱۲) امتداد به فاصله ۵ درجه) بر اساس روابط مثلثاتی و با نوشتن روابط لازم در محیط Excel در شیت‌های جداگانه (در ۱۵۰ شیت برای ۱۵۰ نقطه) برای نقاطی که در آنها عمق برف اندازه‌گیری شده بود.

- تعیین ارتفاع نقاط انتهایی همه امتدادها با کمک نرم‌افزار ArcGIS و Saga.

- تعیین مقادیر عددی شاخص بادپناهی در امتدادهای معین برای کلیه نقاطی که عمق برف در آنها اندازه‌گیری شده بود که با استفاده از رابطه ۳ به دست آمد [۳۷].

$$SX_{A, dmax}(xi, yi) = \max \left[ \tan^{-1} \left( \frac{EL(XY, YY) - EL(XI, YI)}{\left[ (XY - XI)^2 + (YY - YI)^2 \right]^{1/2}} \right) \right] \quad (3)$$

نقاط قرار گرفته در امتداد A و تا بیشترین فاصله dmax از نقطه مد نظر به UTM.

برای محاسبه مقدار شاخص بادپناهی که نماینده شاخص بادپناهی در امتدادهای مختلف باشد، از مقادیر عددی شاخص بادپناهی در امتدادهای مختلف طبق رابطه ۴ میانگین گرفته شد [۳۷].

$$SX_{A, dmax}(xi, yi) \Big|_{A_2}^{A_1} = \frac{1}{nv} \sum_{A=A_1}^{A_2} SX_{A, dmax} \quad (4)$$

نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده است که سبب نمونه‌برداری مؤثر به کمک توزیع چند متغیر می‌شود [۳۵].

#### استخراج مقادیر عددی متغیرهای مد نظر در نقاط اندازه‌گیری عمق برف

در این مرحله براساس لایه‌های رستری شامل لایه‌های مدل رقومی ارتفاعی، شیب، جهت شیب، شمالی بودن، شرقی بودن، انحنای افقی، انحنای عمودی، شاخص وضعیت توپوگرافی و نقشه تابش خورشیدی، مقادیر عددی متغیرهای بررسی شده در نقاطی که عمق برف اندازه‌گیری شده است با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و Saga استخراج شد.

#### عملیات میدانی و پیمایش برف

در این مرحله براساس هماهنگی‌ها و برنامه‌ریزی‌های قبلی انجام گرفته، توسط اکیپ‌های دوفرد متشکل از کارشناسان و کوهنوردان، نمونه‌برداری از عمق برف به تعداد ۱۵۰ نمونه با خط‌کش‌های مدرج انجام شد. با در نظر گرفتن خطای حدود پنج متری GPS و با توجه به تغییرات عمق برف حتی در فاصله پنج متری، برای به دست آوردن عمق برف در هر نقطه، علاوه بر اندازه‌گیری عمق برف در آن نقطه، در چهار نقطه اطراف در شعاع پنج متری نیز عمق برف اندازه‌گیری و از پنج عدد به دست آمده میانگین گرفته شد. همچنین نمونه‌برداری از چگالی برف به صورت تصادفی به تعداد ۱۸ نمونه انجام شد. بدین صورت که ظرفی که قبلاً وزن پر از آب آن معلوم بود، در هر نقطه به‌طور یکنواخت و بدون فشردگی به‌طور کامل در برف فرو برده شد و با نیروسنج وزن شد و از نسبت بین وزن ظرف پر از برف به وزن ظرف پر از آب، چگالی برف به دست آمد. با توجه به اینکه تغییرات چگالی

که در آن:

SX شاخص بادپناهی به درجه A - آزمون امتدادی است که SX به منظور آن محاسبه می‌شود dmax - طول تأثیر در امتداد A به متر E.L - ارتفاع از سطح دریا به متر XI, YI - مختصات نقطه مد نظر و XY, YY مختصات

نداشته‌اند) محاسبه شد و براساس شاخص‌های آماری میانگین خطا (MBE) [۲۹]، میانگین خطای مطلق (MAE) [۲۹]، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) [۲۹] و ضریب همبستگی (R) [۲۹] با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شد.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

در روابط یادشده  $X_i$  - مقادیر مشاهده‌ای،  $Y_i$  - مقادیر محاسبه‌ای،  $\bar{X}$  - میانگین مقادیر مشاهده‌ای،  $\bar{Y}$  - میانگین مقادیر محاسبه‌ای و  $n$  - تعداد کل داده‌هاست.

#### نتایج و بحث

بر اساس آنچه در روش پژوهش بیان شد، ابتدا نقشه مدل رقومی ارتفاع حوضه آبخیز سهرورد و در ادامه سایر نقشه‌ها شامل نقشه‌های شیب حوضه، جهت شیب حوضه، شمالی‌بودن، شرقی‌بودن، انحنای افقی، انحنای عمودی و شاخص وضعیت توپوگرافی و تابش خورشیدی تهیه شد. سپس مختصات نقاط نمونه‌برداری از عمق برف به روش هایپرکیوب لاتین با نوشتن کدهای مربوط به آن در محیط Matlab تعیین و خروجی آن در قالب جدولی در محیط Excel آماده شد و بعد موقعیت نقاط یادشده روی نقشه محدود نمونه‌برداری مشخص شد که در شکل ۲ ارائه شده است. همچنین موقعیت نقاط نمونه‌برداری از چگالی برف به روش تصادفی در شکل ۳ ارائه شده است.

#### نتایج مربوط به اندازه‌گیری عمق و چگالی برف

خلاصه نتایج اندازه‌گیری عمق و چگالی برف در نقاط از قبل مشخص‌شده و محاسبات آب معادل برف، در جدول‌های ۱ تا ۳ ارائه شده است.

در این رابطه  $nv$  - تعداد امتدادهای تعریف‌شده در محدوده تأثیر واقع بین آزمون‌های A1 تا A2 درجه و به شعاع  $d_{max}$  است. کلیه این محاسبات برای فواصل ۱۰۰-۷۰۰ متری انجام شد.

با توجه به اینکه برای استفاده از رگرسیون، داده‌ها باید نرمال باشند. برای نرمال کردن داده‌ها دو داده پرت (مربوط به آب معادل برف) از کل داده‌ها کنار گذاشته شد. سپس داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف کنترل، و مشخص شد که داده‌ها نرمال‌اند. سپس بین مقادیر شاخص بادپناهی محاسبه‌شده برای نقاط مختلف و آب معادل برف متناظر آن برای فواصل ۱۰۰-۷۰۰ متری همبستگی پیرسون برقرار شد.

در ادامه، بین متغیرهای مستقل با آب معادل برف به‌عنوان متغیر وابسته همبستگی پیرسون برقرار شد و متغیرهای دارای رابطه معنادار با آب معادل برف تعیین شد. همچنین آزمون هم‌خطی بین متغیرهای مستقل انجام و معلوم شد که با کنار گذاشتن متغیر تابش خورشیدی، سایر متغیرها با هم هم‌خطی ندارند.

#### تفکیک داده‌ها به سه دسته مدل‌سازی، اعتبارسنجی و آزمون

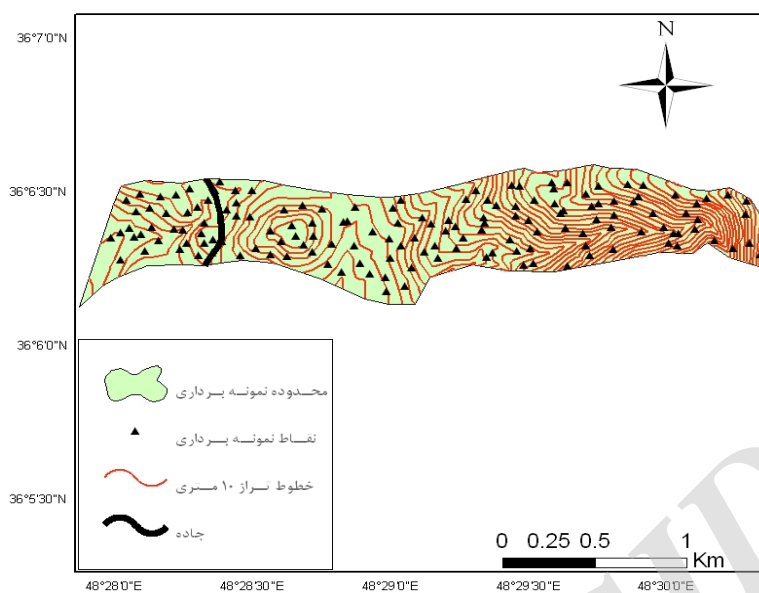
در این مرحله برای تعیین رابطه کمی بین آب معادل برف به‌عنوان متغیر وابسته و متغیرهای مستقل دارای رابطه معنادار با آن، داده‌ها به سه دسته مدل‌سازی، اعتبارسنجی و آزمون به‌صورت تصادفی به نسبت‌های به ترتیب ۱۵، ۷۵، ۱۵ درصد تفکیک شد.

#### تعیین مدل مناسب بین آب معادل برف با متغیرهای مستقل

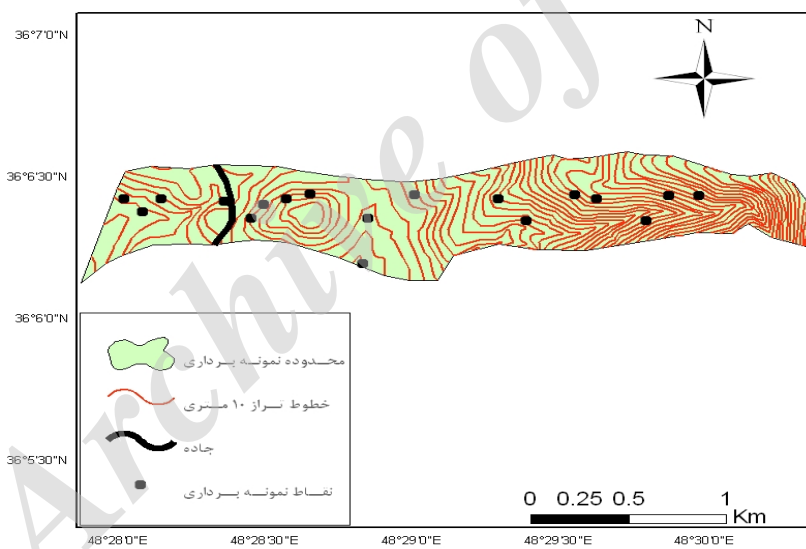
در این مرحله در گام اول، از طریق رگرسیون گام‌به‌گام، با داده‌های تفکیک‌شده برای مدل‌سازی، مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی آب معادل برف تعیین شد. در گام بعدی این مرحله، عامل شاخص بادپناهی نیز به متغیرهای مستقل اضافه شد و عملیات رگرسیون گام‌به‌گام تکرار شد.

#### ارزیابی کارایی روابط پیشنهادی در برآورد آب معادل برف

در مرحله آخر با معادلات به‌دست‌آمده از روی داده‌های مدل‌سازی، مقادیر آب معادل برف، با داده‌های تفکیک‌شده برای آزمون (داده‌هایی که در ایجاد مدل دخالتی



شکل ۲. نقاط نمونه برداری از عمق برف به روش هایپر کیوب لاتین



شکل ۳. پراکنش نقاط نمونه برداری از چگالی برف به روش تصادفی

جدول ۱. مقادیر برخی از خصوصیات آماری عمق برف اندازه گیری شده

عامل	تعداد نمونه	میانگین به سانتی متر	واریانس	حداقل به سانتی متر	حداکثر به سانتی متر	دامنه به سانتی متر	ضریب تغییرات به درصد
عمق برف	۱۴۸	۲۹/۳۶	۲۵۲/۶۶	۳	۸۰/۵۷	۷۷/۵۷	۵۴/۱۴



جدول ۲. مقادیر برخی از خصوصیات آماری چگالی برف اندازه‌گیری شده

عامل	تعداد نمونه	میانگین به گرم بر سانتی‌متر مکعب	واریانس	حداقل به گرم بر سانتی‌متر مکعب	حداکثر به گرم بر سانتی‌متر مکعب	دامنه به گرم بر سانتی‌متر مکعب	ضریب تغییرات به درصد
چگالی برف	۱۸	۰/۴۳	۰/۰۰۰۹	۰/۳۹	۰/۴۹	۰/۱۰	۷/۸۹

جدول ۳. مقادیر برخی از خصوصیات آماری آب معادل برف

عامل	تعداد نمونه	میانگین به سانتی‌متر	واریانس	حداقل به سانتی‌متر	حداکثر به سانتی‌متر	دامنه به سانتی‌متر	ضریب تغییرات به درصد
آب معادل برف	۱۴۸	۱۲/۷۸	۴۷/۸۷	۱/۳۱	۳۵/۰۷	۳۳/۷۶	۵۴/۱۴

بررسی شده، همبستگی معنادار است که در جدول ۴ ارائه شده است.

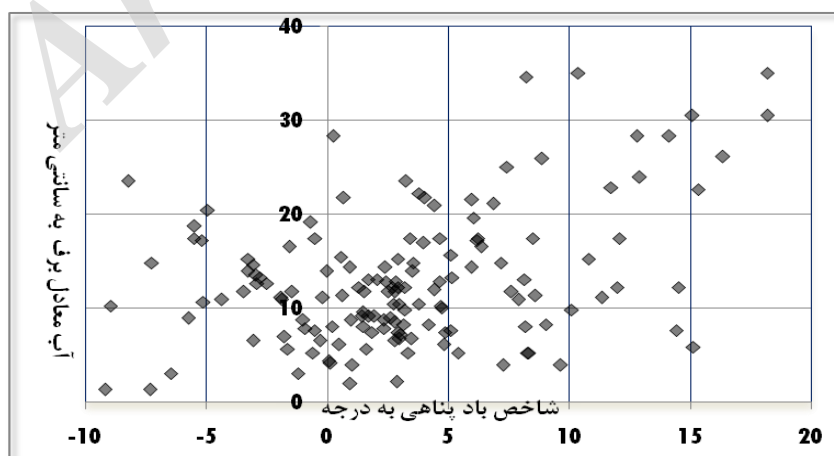
بر اساس جدول ۴ مشخص می‌شود که بیشترین همبستگی بین آب معادل برف و شاخص بادپناهی برای فاصله ۳۰۰ متری است. در شکل ۴ پراکنش مقادیر آب معادل برف در مقابل شاخص بادپناهی برای فاصله ۳۰۰ متر ترسیم شده است.

#### خلاصه نتایج محاسبات شاخص بادپناهی

مطابق آنچه در روش پژوهش بیان شد، محاسبات مربوط به شاخص بادپناهی انجام شد. در ادامه بین مقادیر شاخص بادپناهی و آب معادل برف متناظر آنها برای فواصل مختلف، همبستگی برقرار شد. نتایج نشان داد برای فواصل ۱۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ متری همبستگی بین آب معادل برف و شاخص بادپناهی معنادار نیست؛ ولی برای بقیه فواصل

جدول ۴. نتایج مربوط به همبستگی بین آب معادل برف با شاخص بادپناهی برای فواصل مختلف

فاصله به متر	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
ضریب همبستگی	۰/۲۷۴	۰/۳۳۲	۰/۲۴۷	۰/۱۸۳
سطح معناداری	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵



شکل ۴. مقادیر آب معادل برف در مقابل شاخص بادپناهی برای فاصله ۳۰۰ متر

در این رابطه  $SWE$  - آب معادل برف به سانتی‌متر،  $Height$  - ارتفاع از سطح دریا به متر،  $Slope$  - شیب به درجه و  $Northern$  - شمالی بودن و  $PlanCurve$  - انحنای عمودی است.

در گام دوم با اضافه کردن شاخص بادپناهی به متغیرهای ورودی، رابطه مناسب بین آب معادل برف و متغیرهای مستقل تعیین شد که به صورت رابطه ۱۰ است.

$$SWE = 0.039Height + 0.232SX + \quad (10)$$

در این رابطه  $SX$  - شاخص بادپناهی و بقیه عوامل مثل رابطه ۱۰ هستند.

نتایج مربوط به کارایی روابط پیشنهادی در برآورد آب معادل برف

بر اساس روابط ۱۰ و ۱۱، از روی داده‌های تفکیک شده برای آزمون مدل، آب معادل برف برای نقاط اندازه‌گیری شده محاسبه و به کمک شاخص‌های آماری با مقادیر واقعی مقایسه شد که نتایج در جدول ۶ ارائه شده است.

ارتباط بین آب معادل برف با متغیرهای بررسی شده نتایج برقراری همبستگی بین آب معادل برف با مقادیر متغیرهای بررسی شده در نقاط متناظرشان در جدول ۵ ارائه شده است.

بر اساس جدول ۵ مشخص می‌شود که بیشترین همبستگی بین آب معادل برف با عامل ارتفاع از سطح دریا و کمترین آن با عامل شمالی بودن است.

تعیین مدل مناسب بین آب معادل برف با متغیرهای مستقل

بر اساس آنچه که در روش پژوهش بیان شد، با توجه به حجم زیاد محاسبات برای تعیین شاخص بادپناهی و نیز برای مشخص کردن تأثیر شاخص بادپناهی بر دقت روش به کارگرفته در برآورد آب معادل برف، در گام اول این مرحله، رابطه مناسب بین آب معادل برف با متغیرها به روش رگرسیون گام به گام بدون دخالت شاخص بادپناهی تعیین شد که به صورت رابطه ۱۰ است.

$$SWE = 0.031Height + 0.206Slope + \quad (9)$$

$$10.763Northern - 2.905PlanCurve - 57.327$$

جدول ۵. ضرایب همبستگی بین متغیرهای کمکی مستقل دارای رابطه معنادار با آب معادل برف

متغیر وابسته	ضریب همبستگی	سطح معناداری
ارتفاع از سطح دریا	۰/۶۰۷	۰/۰۱
شیب	۰/۵۵	۰/۰۱
شمالی بودن	۰/۲۰۴	۰/۰۵
شرقی بودن	-۰/۳۷	۰/۰۱
تابش خورشیدی	-۰/۲۵۶	۰/۰۱
شاخص بادپناهی	۰/۳۳۲	۰/۰۱

جدول ۶. میزان شاخص‌های آماری مدل‌های رگرسیونی در تخمین آب معادل برف در مرحله آزمون

شاخص آماری	MBE	MAE	RMSE	R
مدل رگرسیونی بدون دخالت شاخص بادپناهی	۱/۲	۳/۶۵	۴/۷۷	۰/۷۶
مدل رگرسیونی با دخالت شاخص بادپناهی	۰/۹۹	۳/۵۴	۴/۵	۰/۷۹

متغیرهای دیگر قرار گرفته است. بقیه متغیرهای بررسی شده (پنج متغیر) اثر معنادار در سطح ۱ درصد روی آب معادل برف دارند. متغیر ارتفاع با آب معادل برف ارتباط مستقیم دارد که این امر به دلیل افت آهنگ دما بر اثر افزایش ارتفاع و به تبع آن افزایش بارش برف است. این

بررسی ارتباط بین آب معادل برف با متغیرهای بررسی شده (جدول ۵) نشان می‌دهد متغیرهای انحنای افقی، انحنای عمودی و شاخص وضعیت توپوگرافی همبستگی معناداری با آب معادل برف در محدوده مطالعاتی ندارد. احتمالاً تأثیر این متغیرها تحت تأثیر شعاع

شاخص بادپناهی عدد مثبت باشد، نقطه یادشده بادپناه است و انتظار می‌رود که عمق برف و مقدار آب معادل برف در آن نقطه زیاد باشد و به‌عکس هر جا شاخص بادپناهی عدد منفی باشد، نقطه یادشده بادروب است و انتظار می‌رود که عمق برف و آب معادل برف در آن نقطه کم باشد (با افزایش این شاخص عمق برف و آب معادل برف زیاد و با کاهش آن عمق برف و آب معادل برف کم می‌شود که علامت ضریب همبستگی مربوط به آن در جدول ۵ آن را نشان می‌دهد). با توجه به اینکه جهت باد در بازه زمانی مربوط به بارش برف و اندازه‌گیری آن بیشتر شمالی به جنوبی بوده است، می‌توان گفت که باد در تلفیق یا توپوگرافی در خلاف جهت شمالی بودن عمل می‌کند و سبب کاهش عمق برف و آب معادل برف در جهت‌های شمالی در مقایسه با جهت‌های جنوبی شده است به همین دلیل اثر شمالی بودن در مقایسه با سایر متغیرهای بررسی شده روی آب معادل برف ضعیف‌تر است. همبستگی بین آب معادل برف با شاخص بادپناهی برای فواصل مختلف نشان می‌دهد برای فاصله بررسی شده ۱۰۰ متری، همبستگی معنادار نیست. به‌بیانی در این فاصله باد نتوانسته است بر انباشت و برداشت برف تأثیر معنادار داشته باشد. همچنین برای فواصل بررسی شده ۶۰۰ و ۷۰۰ متر نیز همبستگی معنادار نیست و توپوگرافی محدوده نمونه برداری برف به گونه‌ای است که تأثیر باد بر برداشت و انباشت برف در این فواصل محسوس نیست. ضرایب همبستگی نشان می‌دهد فاصله ۳۰۰ متری، مؤثرترین فاصله برهم‌کنش باد و ناهمواری‌ها در ایجاد شرایط بادپناهی و بادروبی است. معروفی و همکارانش [۳۷] نیز با تحقیق در زیرحوضه آبخیز صمصامی، فاصله ۳۰۰ متری را مؤثرترین فاصله برهم‌کنش باد و ناهمواری‌ها در ایجاد شرایط بادپناهی و بادروبی معرفی کردند. مولوچ و همکارانش [۴۱] با تحقیق در حوضه توکوپا در رشته‌کوه‌های نوادا در کالیفرنیا طول ۱۰۰ متری را به عنوان مؤثرترین فاصله معرفی کردند. الدر و همکارانش [۱۹] و نیز مولوچ و همکارانش [۴۱] ارتباط معنادار باد و برف انباشت را نتیجه گرفتند.

با ملاحظه جدول ۶ مشخص می‌شود که دخالت عامل اقلیمی شاخص بادپناهی به‌رغم اینکه برای تعیین آن حجم زیاد محاسبات ضروری است. بر اساس میزان شاخص‌های

نتیجه با نتایج پژوهش شبان و همکارانش [۳۸] و کونوش و همکارانش [۳۹] همخوانی دارد و با نتایج پژوهش اریکسون و همکارانش [۱۵] همخوان نیست. متغیر شیب نیز با آب معادل برف در محدوده مطالعاتی ارتباط مستقیم دارد. این امر شاید به این دلیل است که در بیشتر قسمت‌های محدوده مطالعاتی شیب به اندازه‌ای نیست که ناپایداری برف و در نتیجه کاهش میزان عمق برف و آب معادل برف بر اثر افزایش شیب را سبب شود و احتمالاً چسبندگی برف مانع از جابه‌جایی آن و در نتیجه کاهش عمق برف و به تبع کاهش میزان آب معادل برف می‌شود. آبداربودن برف و زیادبودن چگالی آن مؤید چسبندگی توده برف است که این نتیجه با تحقیقات اریکسون و همکارانش [۱۵] و نیز مارچند و کلینگتویت [۱۳] همخوانی دارد و با نتایج پژوهش شبان و همکارانش [۳۸] و نیز بلوشل و همکارانش [۴۰] همخوانی ندارد. بنابراین، می‌توان گفت که تأثیر این متغیرها تحت شرایط منطقه‌ای قرار دارد. متغیر شمالی بودن در محدوده مطالعاتی با آب معادل برف رابطه مستقیم دارد و با حرکت از سمت شمال به جنوب است که میزان شمالی بودن کمتر می‌شود (بیشترین حد شمالی بودن از نظر تئوری +۱ یعنی زمانی که جهت پیکسل کاملاً در جهت شمال است و کمترین حد آن از نظر تئوری -۱ یعنی زمانی که جهت پیکسل کاملاً در جهت جنوب است). با دقت در رابطه ۱ نیز این مطلب قابل استنباط است که میزان عمق برف و آب معادل برف کمتر می‌شود و به عکس متغیر شرقی بودن با آن رابطه معکوس دارد و با حرکت از سمت شرق به غرب که میزان شرقی بودن کاهش می‌یابد، آب معادل برف افزایش می‌یابد. این امر احتمالاً با دریافت انرژی کمتر و ذوب کمتر برف در جهت‌های شمالی نسبت به جنوبی و عیناً در جهت‌های غربی نسبت به شرقی حتی در بازه زمانی کوچک‌تر (مدت زمان اندازه‌گیری برف) است. شایان یادآوری است که در متغیر شمالی بودن و شرقی بودن علاوه بر جهت، میزان شیب نیز دخالت می‌کند. ارتباط میزان تابش خورشیدی با آب معادل برف معکوس است که علت آن تأثیر متفاوت تابش خورشیدی در ذوب برف در نقاط مختلف اندازه‌گیری حتی در بازه زمانی کوچک‌تر (مدت اندازه‌گیری برف) است. شاخص بادپناهی نیز رابطه مستقیم با آب معادل برف دارد؛ به این معنا که هر جا که

- [3]. Fathzadeh A, Gharraei-Manesh S. The application of artificial intelligence to simulate the spatial distribution of the density of the snow (Case Study: The branches of Ardakan\_Yazd Plain). *Geographical Search of Desert Areas*, 2014;1(2):1-16 [Persian].
- [4]. Asaoka Y, Toyoda Y, Takeuchi Y. The effect of the precipitation form discrimination method on river discharge estimation during winter. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*. 2010; 54 421-426.
- [5]. Pullianen J. Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space borne microwave diameter data and ground-based observation. *Remote Sense Environment*. 2006; 10 :257-269.
- [6]. Pomeroy J, Gray D.M. Snow cover Accumulation Relocation, and Management. National Hydrological Research Institute. Saskatoon, Sask., Canada. 1995; 144p.
- [7]. Groffman P, Driscoll C, Fahey T, Hardy J, Fitzhugh R, Tierney G. Colde soil in a warmer world: a snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem. *Biogeochemistry*. 200; 56:135-150.
- [8]. Keller F, Kienast F, Beniston M. Evidence of response of vegetation to environmental change on high-elevation sites in the Swiss Alps, Region. *Environment Change*. 2002; 1:70-77.
- [9]. Wipf S, Stoeckli V, Babi P. Winter climate change in alpine Tundra: Planet responses to change in snow depth and snow melt timing. *Climate Change*. 2009; 94 :105-121.
- [10]. Pomeroy J, Essery R, Toth B. Implication of Spatial Distribution of Snow Mass and Melt Rate For Snow Cover Depletion Observation In a Subarctic Mountain Catchment. *Ann. Glaciol*. 2004; 38:195-201.
- [11]. Barnett T, Adam J, Lettenmaier D. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*. 2005; 438:303-309.
- [12]. Egli L, Jonas T, Meistner R. Comparison of different automatic methods for estimating snow water equivalent. *Cold Regions Science and Technology*. 2009; 57: 107-115.
- [13]. Marchand W, Killingtevit A. Analyses of Relation between Spatial Snow Distribution and Terrain Characteristics. 58<sup>th</sup> Eastern Snow Conference Ottawa. Ontario, Canada. 2001.
- [14]. Elder K, Michaelsen J, Dozier J. Small basin modeling of snow water equivalent using binary regression tree method. *JAHS publ*. 1995; 228p.

آماری، شاخص بادپناهی سبب بهبود کارایی مدل رگرسیونی (افزایش ضریب همبستگی، کاهش ریشه میانگین مربعات خطا، کاهش میانگین خطای مطلق و کاهش میانگین خطا) در پیش‌بینی آب معادل برف می‌شود.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر ارتباط معنادار بیشتر متغیرهای بررسی‌شده را با آب معادل برف نشان می‌دهد. در این پژوهش متغیرهای انحنای افقی، انحنای عمودی و شاخص وضعیت توپوگرافی ارتباط معناداری با آب معادل برف ندارند. با توجه به اینکه اثر این سه متغیر به همراه متغیرهای شمالی‌بودن، شرقی‌بودن و تابش خورشیدی اولین بار روی آب معادل برف در داخل کشور بررسی شده است و از طرفی، ممکن است اثر این متغیرها تحت تأثیر شرایط منطقه‌ای قرار گیرد و یا تحت شعاع متغیرهای ناشناخته و شناخته‌شده قرار گیرد، لازم است در پژوهش‌های بعدی اثر آنها بررسی شود تا شاید بتوان در مدل‌سازی مؤلفه‌های برف از آنها بهتر استفاده کرد. نقشه‌های رقومی به‌کار گرفته‌شده به غیر از نقشه شاخص بادپناهی به‌سپهولت از روی نقشه مدل رقومی ارتفاع تهیه می‌شود. این نقشه‌ها هم در بررسی ارتباط کمی بین مؤلفه‌های برف با متغیرهای بررسی‌شده و هم در تعیین مختصات نقاط نمونه‌برداری به روش نمونه‌برداری هایپرکیوب به‌کار گرفته می‌شود. با توجه به محدودیت‌های موجود به‌خصوص محدودیت‌های زمانی، سعی شد اندازه‌گیری عمق برف در کوتاه‌ترین زمان ممکن انجام شود؛ ولی خطاهای ناشی از تغییرات جزئی شرایط اندازه‌گیری حتی در زمان کوتاه نیز اجتناب‌ناپذیر است.

### منابع

- [1]. Porhemmat J. Distribution model Runoff from melting snow using Remote Sensing data and GIS. P.h.D. Thesis Islamic Azad university. Science and Research. 2003; 222p. [Persian].
- [2]. Tabari H, Marofi S, Zare Abyaneh H, Amiri Chayjan R, Sarifi M.R. Comparison of Multivariate Non Linear Regression with Computational Intelligence Methods in estimation of Spatial Distribution of Snow Water Equivalent. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 2008; 29: 13-41. [Persian].

- [15]. Erikson A, Williams W, Winstral A. Persistence of topographic controls on the spatial distribution of snow in rugged mountain, Colorado, United States. *Water Resources Research*. 2005; 41(4):1-17.
- [16]. Douglas M. Geostatistical Methods for Estimating Snow Melt Contribution The Seasonal Water Balance In An Alpine Watershed. Colorado State University. Department of Forest Rangeland and Watershed Stewardship. 2006;30P.
- [17]. Graham A. Evaluating the spatial variability of snowpack properties across a northern Colorado basin. Department of ecosystem science and sustainability. 2012; 135P.
- [18]. Revuelto J, Lopez I, Azorin C, Vicent M. Topographic control of snow pack distribution in a small catchment in the central Spanish Pyrenees: intra and inter -annual persistence. *Journal of Cryosphere*. 2014; 8 :1937-1972.
- [19]. Elder K, Dozier J, Michaelsen J. Snow accumulation and distribution in an alpine watershed. *Water Resources Research*. 1991; 27(7):1541-1552.
- [20]. Minasny B, Mc Bratney A.B. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes. *Geoderma*. 2007; 142: 285-293.
- [21]. Sextone A.G. Evaluating the spatial variability of snowpack properties across northern Colorado basin. Department Of Ecosystem Science and Sustainability. 2012; 129p.
- [22]. Karl W. The effect of basin physiographic on the spatial distribution of snow water equivalent and snow density near peak accumulation. Montana State University. 2013;113P.
- [23]. Anderson B, Mcnamara J, Marshal H, Flores A. Insight in to the physical processes controlling correlations between snow distribution and terrain properties. *Water Resources Research*. 2014; 10: 1-19.
- [24]. Kucerova D, Jenicek M. Comparison of Selected Methods Used for The Calculation of the Snowpack Spatial Distribution, Bystrice River Basin. Czechia, *Geografie*. 2014;119 (3):199-217.
- [25]. Michele C, Avanzi F, Passoni D, Barzaghi R, Pinto L, Dosso P, et al. Micro scale Variability of snow depth using U.A.S technology. *Journal of Cryosphere*. 2015; 9: 1047-1075.
- [26]. Mizukami N, Perica S, Hatch D. Regional approach for mapping climatologically snow water equivalent over the mountainous regions of the Western United States. *Journal of Hydrology*. 2011; 40 :72-82.
- [27]. Sharifi M.R, Akhoond-Ali A, Porhemmat J, Mohammadi J. Evaluation of linear correlation and ordinary kriging in order to estimating the Spatial Distribution of Snow depth in samsami basin. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*. 2007; 1(11):24-38. [Persian].
- [28]. Sharifi M.R, Akhoond-Ali A, Porhemmat J, Mohammadi J. Effect of elevation, slope, aspect and on Snow depth in samsami basin. (Technical Report) *Iran Journal- Water Resources Research*. 2007; 3(3):69-72. [Persian].
- [29]. Marofi s, Tabari H, ZareAbyeane H. Predicting Spatial Distribution of Snow Water Equivalent Using Multivariate Non Linear Regression and Computational Intelligence Methods. *Water Resources Management*. 2011; 25:1417-1435.
- [30]. Taghizadeh-Mehrjardi R, Gharaei-Manesh S, Fathzadeh A. Predicting of spatial distribution snow depth using regression kriging method in the region of Yazd Sakhvidi. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*. 2015; 9(28):41-48.
- [31]. Gharaei-Manesh S, Fathzadeh A, Taghizadeh-Mehrjardi R. Comparison of artificial neural network and decision tree models in estimating spatial distribution of snow depth in a semi-arid region of Iran. *Cold Regions Science and Technology*. 2016; 122:26-35
- [32]. Taghizadeh -Mehrjardi R, Sarmadian F, Tazeh M, Omid M, Toomanian N, Rosta M-J. Comparison of different Sampling methods for digital soil mapping in Ardakan region. *Journal of Management and Watershed Engineering*. 2015; 4(6):353-363. [Persian].
- [33]. Pare-Zanganeh A, Hasaniha H. Detiled study of Sohrevard-Ghydar watershed. 2002;307p.. [Persian].
- [34]. Pahlavan -Rad M-R, Kormali F, Toomanian N, kiani F, Komaki-B CH. Digital soil mapping using Random Forest model in Golestan province. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2015; 6 (21):73-93 [Persian].
- [35]. Taghizadeh -Mehrjardi R, Sarmadian F, Omid M, Toomanian N, Rosta M- J, Rahimian M-H. Digital mapping of soil classes using of data mining techniques in Ardakan region of Yazd Province. *Journal of Scientific and Agriculture*. 2013; 37(2):101-115. [Persian].

- [36].Marofi s, Tabari H, Zare-Abyeane H, Sharifi M.R,Akhoond-Ali. Mapping of Snow Water Equivalent in one of Karoon mountain sub basin (Cass Study- Samsami basin).Journal of Agriculture and Natural Resources.2010;16(3):1-11.[Persian].
- [37].Marofi s, Tabari H, Zare-Abyeane H, Sharifi M.R. Investigating the influences of wind on spatial distribution of snow accumulation in one of Karoon sub basin (Cass Study- Samsami basin). Journal of Sciences of Research of Irrigation and Water 2011: 1(1):31-44. [Persian].
- [38].Shaban A, Faour G, Khawlie M, Abdallah C. Remote sensing application to estimate the volume of water in the form of snow on Mount Lebanon. Hydrological Sciences Journal. 2004; 49(4):643-653.
- [39].Konosuke S, Tsutomu K, Yinsheng Z, Mamoru I, Yoshihiro I. Altitudinal Distribution of Snow Water Equivalent in the Tuul River Basin, Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia.2006.
- [40].Bloschl G, Kirnbauer R, Gutknecht D, Distributed Snowmelt Simulation in an Alpine Catchment. Model Evaluation on the Basis of Snow Cover Patterns. Water Resources Research.1991; 27 (12) 3171-3179.
- [41].Molotch N, Colee M, Bales R, Dozier J. Estimating the spatial distribution of snow water equivalent in an alpine basin using binary regression tree models. the impact of digital elevation data independent variable selection. Hydrological Processes. 2005; 19(7):1459-1479.

Archive of SID