

# برآورد رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS

بهزاد رایگانی<sup>۱</sup>، کارشناس ارشد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان  
 سعید سلطانی کوپایی، استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان  
 سید جمال‌الدین خواجه‌الدین، دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان  
 سوسن براتی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۰۸/۲۴

دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۰۳/۰۸

## چکیده

بارش برف و ذوب آن یک‌سوم از آب مورد نیاز برای فعالیت‌های کشاورزی و آبیاری را در سراسر کره زمین تامین می‌کند. به‌همین علت، برآورد میزان آب و رواناب ناشی از ذوب برف یکی از فعالیت‌های عمده هیدرولوژیست‌ها به‌شمار می‌رود. به‌منظور محاسبه رواناب ناشی از ذوب برف روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که بیش‌تر آن‌ها نیاز به پایش پیوسته پوشش برفی دارند. اکثر روش‌های کارآمد پایش پیوسته پوشش برفی، بر پایه سنجش از دور با ماهواره استوار می‌باشند. در این تحقیق، با استفاده از درجه حرارت‌های بیشینه و متوسط روزانه و با اندازه‌گیری میزان ذوب روزانه و همچنین تصاویر ماهواره‌ای MODIS، رواناب برف با روشی جدید و پیشنهادی محاسبه شد. نتایج نهایی این تحقیق مشخص کرد که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان با دقت مناسب، سطح پوشیده از برف را نقشه‌برداری نمود و برای محاسبات مربوط به توده برفی مورد استفاده قرار داد. همچنین، با آزمایش‌های مختلف انجام شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای با روش‌های جدید، تغییرات سطح پوشیده از برف در زمان‌هایی که تصاویر ماهواره‌ای موجود نبود، محاسبه شد. دقت این روش در مقایسه با تصاویر واقعی، بسیار خوب ارزیابی شد. در این روش، معادلاتی برای محاسبه میزان ذوب ناشی از تغییرات درجه حرارت به‌دست آمد که تطبیق بسیار مناسبی با واقعیت داشتند. با توجه به تغییرات دبی، معادلاتی نیز برای برآورد دبی از ذوب روزانه حاصل شد که نتایج این معادلات نیز با واقعیت تطبیق مناسبی را نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: درجه حرارت، رواناب برف، سطح پوشیده از برف، سنجش از دور، شاخص نرمال تمایز برفی

## مقدمه

بیش از ۴۰ درصد از مساحت نیم‌کره شمالی در فصل زمستان پوشیده از برف است. آلبیدوی بالای برف به‌همراه گسترش سطحی بالای آن، تأثیر زیادی بر بیلان تابشی زمین دارد (Hall و همکاران، ۱۹۷۷). پوشش برف و حجم آب معادل آن، حدود یک‌سوم آب مورد نیاز برای آبیاری و رشد محصولات کشاورزی در سراسر جهان را تامین می‌کند. رواناب حاصل از ذوب برف، منبع آبی بسیار مهمی در بیش‌تر مناطق کره زمین محسوب می‌شود. در کوه‌های راکو آمریکا ۷۵ درصد بارش سالیانه به‌صورت برف است و درصد رواناب سالیانه از ذوب برف حاصل می‌شود (Goodinson و همکاران، ۲۰۰۰). در بیش‌تر مناطق شمالی نیم‌کره شمالی و محیط‌های آلپی، رواناب برف هم مسئول دبی بیشینه لحظه‌ای بوده و هم بخش مهمی از دبی سالیانه است (Marsh و Woo، ۱۹۸۵). پیش‌بینی دقیق و زمان‌بندی رواناب برف برای مدیریت کارآمد و تصمیم‌گیری درباره توزیع آب، لازم و ضروری است (Engman و Gurney، ۱۹۹۱). محاسبه رواناب حاصل از ذوب برف نیاز به پایش مداوم سطح پوشیده از برف دارد تا رواناب حاصله با دقت مناسب

<sup>۱</sup> raighani@yahoo.com

برآورد گردد. اکثر روش‌های کارآمد پایش گستردگی برفی، با استفاده از پایش از راه دور با استفاده ماهواره است. خوشبختانه خصوصیات فیزیکی برف، پایش با سنسور از دور را میسر ساخته است (Hall و همکاران، ۱۹۹۸). به دلیل نیاز به پایش مداوم سطح برف‌گیر، استفاده از ماهواره‌هایی که دوره بازگشت تصاویر آن‌ها کوتاه است (Marsh و Woo، ۱۹۸۵)، مانند NOAA با دادن دو سری داده از یک منطقه در یک روز و MODIS با یک سری داده از یک منطقه پس از گذشت بیشینه دو روز، معمول است. سنسور MODIS در مقایسه با سایر سنسورهای محیطی دیگر مانند AVHRR قدرت تفکیک زمینی بهتری داشته و باندهای طیفی بیشتری دارد و در ضمن روش‌های تفکیک ابر در این ماهواره بهتر انجام می‌شود؛ به همین علت تصویر ماهواره‌ای دارای ابر و برف، با این ماهواره از نظر تفکیک، مشکل کمتری پیش دارد (Ackerman و همکاران، ۱۹۹۶).

پوشش برفی از نظر هیدرولوژی اهمیت ویژه‌ای دارد. لذا، مطالعات مختلفی به منظور برآورد رواناب ناشی از ذوب برف در دنیا صورت گرفته است. در سال ۱۹۸۶ Bergstrom از میان متغیرهای مؤثر بر رواناب برف، شاخص حرارتی را در شکل کلاسیک روش درجه-روز، بهتر ارزیابی کرده و یادآور شده است که در مدل‌های رواناب برف این مدل به صورت گسترده استفاده می‌شود. Fergusen (۱۹۹۹)، با مطالعه مدل هیدرولوژیکی SRM گزارش نموده که نتیجه هر مدل هیدرولوژیکی به نوع چرخه آب و مراحل و منابع آن بستگی دارد. همچنین، Fergusen در سال ۱۹۹۹ با مطالعه مدل هیدرولوژیکی SRM یا مدل رواناب برف به این نتیجه رسید که این مدل در کوهستان‌های بلند، نتایج عالی می‌دهد.

Marsh و Woo (۱۹۹۸)، اشاره می‌کنند که یکی از خصوصیات برف، طبیعت غیرهم جنس آن است و تلاش می‌شود تغییرپذیری زمینی آن به صورت صحیح در نظر گرفته شود و اگر چه مطالعات نشان‌دهنده تغییرات زمینی توده برف زیاد است، ولی به علت محدودیت در درک تئوری و قدرت محاسبات، محدوده یا سطح برفی را به صورت هم‌جنس در نظر گرفته می‌شود. Sasaki و Takeuchi (۲۰۰۰)، در اوموری<sup>۱</sup> ژاپن و با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی سد رودخانه آسشی<sup>۲</sup>، رواناب برف را از رابطه زیر محاسبه نمودند.

$$R_m = bcT \quad (1)$$

که در آن،  $b$  و  $c$  ضرایب منطقه‌ای تبدیل دما به رواناب و  $T$  درجه حرارت منطقه مورد نظر است. نتایج به دست آمده از این معادلات با مشاهدات مقایسه شدند و مشخص شد دبی تخمین زده شده با این مدل برفی، تطبیق خوبی با مشاهدات در زمستان داشته و پیش‌بینی رواناب برف در ماه‌های آوریل، مه، ژوئن و بهار در مدل فوق نیز دقت خوبی داشتند. Fontana و Gazorzi (۱۹۹۶)، در حوزه آبخیز کاردول<sup>۳</sup> در یونان، اندازه‌گیری‌های آب معادل برف را در بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۱ انجام دادند و با استفاده از معادله زیر میزان ذوب برف را محاسبه نمودند.

$$MELT_{hj} = CMF.EI_j.T_{hj} \quad (2)$$

که در آن،  $CMF$  عامل ترکیبی ذوب برف،  $EI_j$  شاخص انرژی در هر بخش ارتفاعی،  $T_{hj}$  درجه حرارت در هر بخش ارتفاعی،  $CMF$  پارامتری است که برای هر منطقه باید واسنجی شود و عامل زمان نیز در آن ثابت است.  $EI$ ، از روی نقشه‌های موجود باید برای تمامی ارتفاع‌ها حساب شود. این عامل از روی نمودارهای موجود برای منطقه یا با دستگاه اندازه‌گیری شاخص انرژی به دست می‌آید. در مطالعه مذکور با مقایسه مشاهدات، ضریب  $CMF$  بین ۰/۱۶ تا ۰/۲۴ به دست آمده و رگرسیون میان اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات  $r^2$  معادل ۰/۹۳ داشته است و ارزیابی مدل با توجه به مشاهدات، خوب بوده است.

Gratton و Richarc (۲۰۰۱)، در حوزه رودخانه Bariscan ایالت Quebec مدل رواناب برف را با توجه به روش ناحیه‌ای نقطه‌ای و وزن‌دهی و با استفاده از درجه حرارت مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که وقتی در

<sup>۱</sup> - Aomori

<sup>۲</sup> - Aseishi

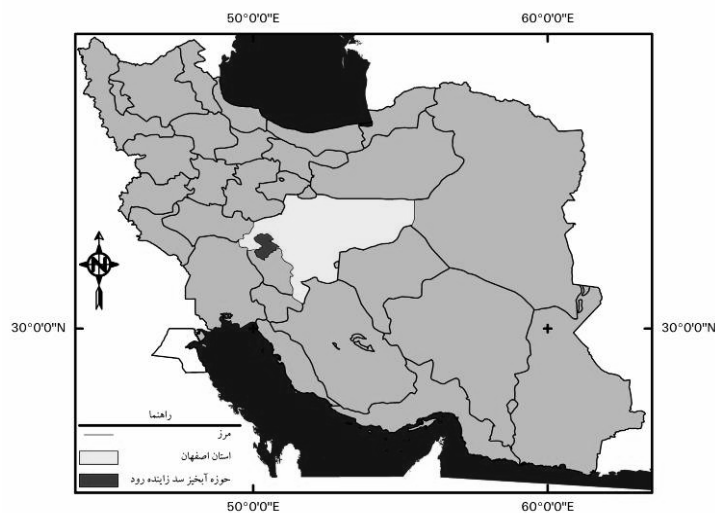
<sup>۳</sup> - Cordevole

منطقه ایستگاه وجود ندارد، روش ناحیه‌ای کردن ایستگاه، راه حل مناسبی است. همچنین، عواملی مثل توپوگرافی، پوشش گیاهی و جای ایستگاه، تأثیر مهمی در ثبت درجه حرارت و دقت مدل و همچنین درجه حرارت، تأثیر انکارناپذیری در نتایج مدل رواناب ذوب برف دارد. Akyu و همکاران (۲۰۰۵)، با استفاده از مدل رواناب برف یا SRM، میزان رواناب برف را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS اندازه‌گیری نمودند، ولی به علت ابری بودن منطقه در بیش‌تر فصل برفی، به نتیجه دل‌خواه دست نیافتند.

با توجه به اهمیت پوشش برفی در مطالعات هیدرولوژی، هدف این تحقیق، برآورد میزان ذوب روزانه پوشش برفی و دبی ناشی از آن با استفاده از روابطی جدید ولی مشابه به مدل SRM می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** منطقه مورد مطالعه، شامل حوزه آبخیز سد زاینده رود است که در محدوده  $۵۰^{\circ}$  تا  $۵۳^{\circ}$  طول خاوری و  $۱۱^{\circ}$  تا  $۳۲^{\circ}$  عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). مساحت کل حوزه آبخیز سد زاینده رود  $۴۲۰۰$  کیلومترمربع و محیط آن  $۳۶۰$  کیلومتر است. حوزه آبخیز سد زاینده رود بین ارتفاعات بیشینه  $۳۹۷۴$  متر در جنوب باختری و کمینه  $۱۹۷۶$  متر قرار دارد و ارتفاع متوسط حوزه  $۲۴۷۷$  متر است.  $۹۵/۶$  درصد مساحت حوزه بین ارتفاعات  $۱۹۷۶$  و  $۳۰۰۰$  متر و  $۴/۴$  درصد بین ارتفاعات  $۳۰۰۰$  و  $۳۹۷۴$  متر واقع است. رودخانه‌های مهم این حوزه پلاسجان و شاخه اصلی منتهی به سد زاینده رود هستند که این دو رودخانه به هم پیوسته و رودخانه زاینده رود را تشکیل می‌دهند. بارندگی در سراسر منطقه متفاوت است، به طوری که در جنوب باختری یعنی چلگرد و کوه‌رنگ در حدود  $۱۴۰۰$  میلی‌متر، در شمال باختر یعنی دره کمندان و دره تخت در حدود  $۷۰۰$  میلی‌متر و در خاور در حدود  $۳۰۰$  میلی‌متر است. رژیم بارندگی نیز همانند اکثر نقاط ایران مدیترانه‌ای است و بخش اعظم بارش بین ماه‌های مهر تا اواخر اردیبهشت رخ می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

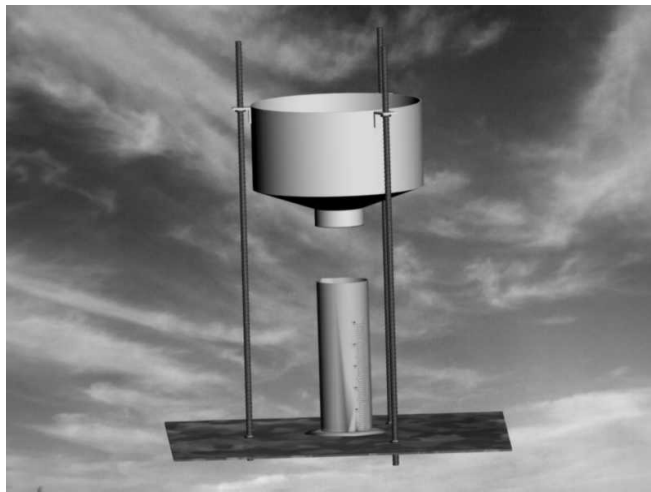
## روش تحقیق

در ابتدا، در یک فصل برفی به کمک دو ابزار اندازه‌گیری، میزان ذوب روزانه برف در دو جهت شیب (Aspect) شمالی و جنوبی به دست آمد. سپس، با استفاده از آمار درجه حرارت در ایستگاه مجاور محل برداشت میزان ذوب، یک معادله به منظور برآورد میزان ذوب هر شیب حاصل شد. در بخش دیگر به کمک آمار درجه حرارت ایستگاه‌های موجود در منطقه، روابط رگرسیونی میان درجه حرارت روزانه و ارتفاع (برای هر روز) محاسبه شد و از سوی دیگر به کمک

تصاویر ماهواره‌ای MODIS سطوح برفی نقشه‌برداری شد و در روزهایی که تصویر MODIS ابری یا دارای نویز (Noise) بود، تغییرات این سطوح به کمک آمار دمایی و تصویر میزان شیب و جهت شیب برآورد شد تا به کمک آن برای تمامی دوره مورد بررسی، تصویر سطح پوشیده از برف حاصل شد. با استفاده از تصویر DEM منطقه و معادلات روزانه درجه حرارت-ارتفاع، تصاویر درجه حرارت روزانه به دست آمد. با تصاویر روزانه سطح پوشیده از برف و تصاویر درجه حرارت روزانه و تصویر جهت شیب شمالی و جنوبی منطقه، با معادلات برآوردکننده میزان ذوب روزانه برف که از طریق برداشت زمینی به دست آمده بود، برای هر جهت شیب، میزان ذوب برآورد و با تلفیق آن‌ها میزان ذوب برف روزانه برای کل منطقه برآورد شد. در نهایت، میزان ذوب روزانه بر حسب سانتی‌متر به دبی ذوب تبدیل شد و به کمک آمار ایستگاه هیدرومتری موجود در منطقه، به دبی رواناب برف تبدیل شد.

**داده‌های حاصل از برداشت زمینی میزان ذوب:** برای تعیین مدل مناسب تخمین حجم رواناب برف در منطقه مورد مطالعه، دو دستگاه اندازه‌گیری ذوب برف تهیه شد که به شکل یک استوانه با انتهای قیفی شکل بود. در دهانه خروجی این دو دستگاه از پارچه حریر به منظور عبور آب حاصل از ذوب برف و جلوگیری از خروج برف استفاده شد و به وسیله سه پایه در زمین تعبیه شدند و برای تشابه بازتاب آن‌ها به برف با رنگ سفید رنگ‌آمیزی شدند (شکل ۲).

برای اندازه‌گیری حجم ذوب از یک استوانه مدرج یا مزور استفاده شد که به طور کامل در داخل دهانه قیف قرار می‌گرفت. دستگاه‌ها از تاریخ ۲۱ دی ماه ۱۳۸۳ در دو شیب شمالی-جنوبی قرار گرفتند. برف حاصل از بارش در داخل این استوانه‌ها وارد می‌شد و اندازه‌گیری‌های میزان ذوب، هر روز رأس ساعت ۱۲:۳۰ انجام می‌گرفت. این برداشت‌ها تا تاریخ شش اسفند ماه ۱۳۸۳ یعنی اتمام تقریبی پوشش برفی در منطقه برداشت میزان ذوب، ادامه پیدا کرد.



شکل ۲- ابزار اندازه‌گیری میزان ذوب

**داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی:** برای ایجاد رابطه میان ذوب روزانه برف ناشی از برداشت زمینی و درجه حرارت، از آمار ایستگاه هواشناسی قلعه شاهرخ که در مجاورت محل برداشت زمینی قرار دارد، استفاده شد. همچنین، به منظور برآورد میزان ذوب در واحدهای پیکسلی، باید درجه حرارت در ارتفاعات مختلف برآورد می‌شد. بنابراین، گرادبان قائم درجه حرارت برای هر روز به دست آمد. بدین منظور، با استفاده از رگرسیون رابطه میان درجه حرارت و ارتفاع برای هر روز به وسیله ایستگاه‌های هواشناسی قلعه شاهرخ، تیران، سد زاینده رود ۱ و ۲، چادگان، سینگرد، باديجان و بنا به ضرورت ۱ و ۲ به دست آمد. از این ایستگاه‌ها روزهایی که بارش باران وجود داشت، استخراج شد تا به علت ذوب مازاد ناشی از باران در مقایسه با دبی برآورد شده و مشاهده شده ناشی از ذوب برف، این روزها حذف شود و همچنین روز بعد از بارش باران نیز در روزهایی که بارش بعد از ظهر داشتند، حذف شد. آمار بارش برف نیز از این ایستگاه‌ها به دست آمد تا در برآوردهای تغییرات سطح برف به کار رود.

**داده‌های ایستگاه هیدرومتری قلعه شاهرخ و تونل‌های کوه‌رنگ:** میزان ذوب برآورد شده به‌وسیله پارامترهای درجه حرارت، باید به‌طریقی تبدیل به رواناب ذوب برف شود. در مدل‌های مختلف، این کار به‌کمک یک ضریب به‌نام ضریب رواناب برف و یا به کمک یک رابطه، میزان ذوب به رواناب ناشی از ذوب تبدیل می‌شود. بنابراین، به‌منظور محاسبه میزان ضریب رواناب ناشی از ذوب برف از آمار ایستگاه هیدرومتری موجود در منطقه یعنی قلعه شاهرخ استفاده شد. این ایستگاه در خروجی زیر حوزه قلعه شاهرخ قرار گرفته است و آب‌های دو تونل کوه‌رنگ به این ایستگاه وارد می‌شود. لذا، آمار دبی ورودی این دو تونل نیز استفاده شد و مجموع دبی ورودی آن‌ها از دبی کل کم شد تا دبی مربوط به حوزه حاصل شود. در نهایت با استفاده از هیدروگراف، مقدار آب پایه برای دوره مورد بررسی برآورد شد و دبی ناشی از ورود بارش و ذوب برف به‌دست آمد که این دبی در مقایسه‌ها و آنالیزها به‌کار رفت.

**داده‌های ماهواره‌ای:** به‌منظور برآورد رواناب برف در (تمامی مدل‌ها) به برآورد سطح پوشیده از برف و با توجه به مدل مورد استفاده در این تحقیق به پایش مداوم سطح پوشیده از برف نیاز بود. بنابراین از داده‌های ماهواره‌ای MODIS استفاده شد. برای استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در هر منطقه باید پردازش اولیه بر روی آن‌ها انجام گیرد تا آماده استفاده شوند. پس از بررسی‌های اولیه مشخص شد که در سال برداشت زمینی، داده‌های ماهواره‌ای MODIS پراکنش زمانی بسیار ضعیفی داشتند و در اکثر روزها منطقه مورد مطالعه پوشیده از ابر و در عمل غیر قابل استفاده بود. بنابراین داده‌های این سنجنده در سال قبل از برداشت زمینی، یعنی در سال ۱۳۸۲، بررسی شد و نسبت به سال ۱۳۸۳ از نظر پراکنش زمانی تصاویر فاقد ابر و دارای برف، مناسب‌تر تشخیص داده شد. لذا، این سال به‌منظور سفارش تصاویر انتخاب شد. با توجه به این‌که در صورت وجود ابر در تصاویر منطقه مورد مطالعه، داده‌های آن قابل استفاده نمی‌باشد، تصاویری سفارش داده شد که در آن‌ها یا ابر وجود نداشت یا میزان ابر در آن‌ها کم بود که این داده‌ها شامل ۱۴ گذر ماهواره MODIS بودند. عملیات آماده‌سازی شامل تصحیح اتمسفری، تصحیح هندسی، ثبت تصاویر به یک تصویر ثبت شده و ادغام قدرت تفکیک زمینی به‌منظور تهیه تصاویری با اندازه پیکسل ۲۵۰ متری بر روی تمامی تصاویر صورت گرفت تا آماده استفاده شود.

جدول ۱- تاریخ‌های ۱۴ گذر سفارش داده شده

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
تاریخ	۱۳۸۲/۱۰/۲۶	۱۳۸۲/۱۱/۱۱	۱۳۸۲/۱۱/۱۹	۱۳۸۲/۱۱/۲۳	۱۳۸۲/۱۲/۰۱	۱۳۸۲/۱۲/۰۵	۱۳۸۲/۱۲/۱۰	۱۳۸۲/۱۲/۱۶	۱۳۸۲/۱۲/۲۱	۱۳۸۲/۱۲/۲۶	۱۳۸۳/۰۱/۰۱	۱۳۸۳/۰۱/۱۵	۱۳۸۳/۰۱/۲۶	۱۳۸۳/۰۲/۰۸

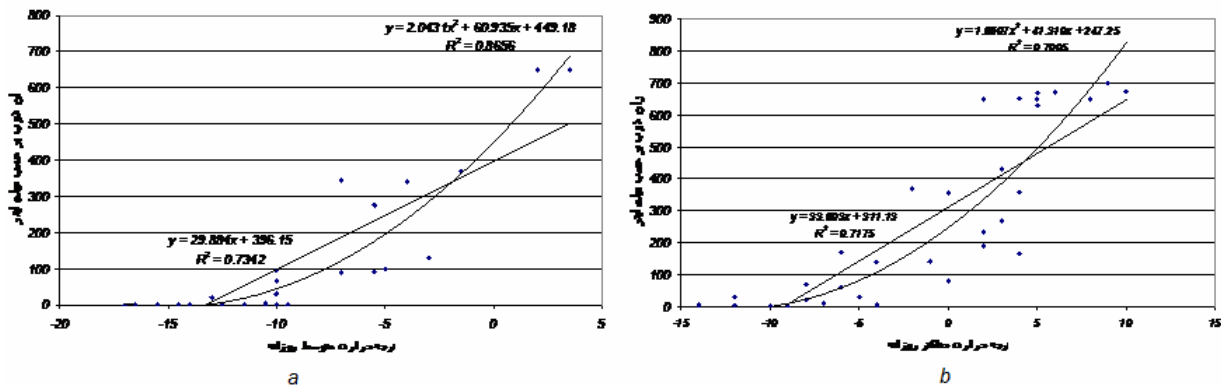
**مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و مرز منطقه مورد مطالعه:** به‌منظور برآورد میزان شیب، جهت شیب و تخمین دماهای روزانه در ارتفاعات مختلف، از مدل رقومی ارتفاعی منطقه که توسط سازمان جغرافیایی ارتش ایران تهیه شده بود، استفاده شد. به‌علت اندازه پیکسل کمینه تصاویر MODIS معادل ۲۵۰ متر، تصویر رقومی بر پایه اندازه پیکسل ۲۵۰ متر تهیه و سپس برای تهیه تصاویر مذکور از آن‌ها استفاده شد. همچنین، به‌منظور برش منطقه مورد مطالعه، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ مرز منطقه جدا شد و رقومی شد.

## نتایج و بحث

**برآورد رابطه میان ذوب روزانه و پارامترهای دمایی:** با توجه به زمان برداشت زمینی، که به‌علت محدودیت و مشکلات نمونه‌برداری در ساعت ۱۲:۳۰ هر روز انجام می‌گرفت و این نکته که کمینه دمای روزانه اندکی بعد از طلوع آفتاب و بیشینه آن بین ساعات ۲ تا ۴ بعد از ظهر به‌علت کم بودن ضریب انتقال حرارتی هوا اتفاق می‌افتاد، تعریف یک شبانه روز با این شرایط در نظر گرفته شد. این شبانه روز جدید از ساعت ۱۲:۳۰ ظهر شروع و تا ۱۲:۳۰ روز بعد ادامه

می‌یافت. همان‌گونه که ذکر شد در این شبانه روز جدید دمای کمینه که در ایجاد ذوب برف موثر بود، در حقیقت دمای کمینه اتفاق افتاده در همان روز و دمای بیشینه موثر در این ذوب، دمای بیشینه اتفاق افتاده در روز قبلی است. بنابراین، به‌منظور محاسبه دمای متوسط روزانه در یک روز خاص، از میانگین‌گیری کمینه همان روز و بیشینه روز قبلی استفاده شد. اعداد میزان ذوب مشاهده شده در هر شیب با پارامترهای دمایی در شبانه روز جدید ارزیابی و ارتباط‌دهی شد و ملاحظه شد که از میان این پارامترها درجه حرارت بیشینه و متوسط، بیش‌ترین همبستگی را با میزان ذوب روزانه دارند. بنابراین، از رابطه‌های خطی و غیرخطی استفاده شد تا بهترین خط میان این اعداد برآورد داده شود. شکل (۳) ارتباط دهی پارامترهای دمایی و میزان ذوب را در شیب جنوبی نشان می‌دهد.

به‌دلیل بالاتر بودن ضریب همبستگی در رابطه غیر خطی در هر دو پارامتر دمایی، از این رابطه به‌منظور ایجاد معادله برآورد ذوب استفاده شد (شکل‌های ۳ و ۴). همچنین مشخص شد در روزهایی که درجه حرارت متوسط یک‌سان است، عامل تعیین‌کننده میزان ذوب، درجه حرارت بیشینه روزانه است. به‌عنوان مثال همان‌گونه که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، وقتی درجه حرارت متوسط روزانه در دو روز مختلف با هم برابر باشند، میزان ذوب در حالتی که درجه حرارت بیشینه بیشتر است، به‌طور قابل ملاحظه‌ای زیاد می‌شود.



شکل ۳- رابطه میان میزان ذوب برف و درجه حرارت بیشینه روزانه درجه حرارت متوسط روزانه (a) و در شیب جنوبی (b)

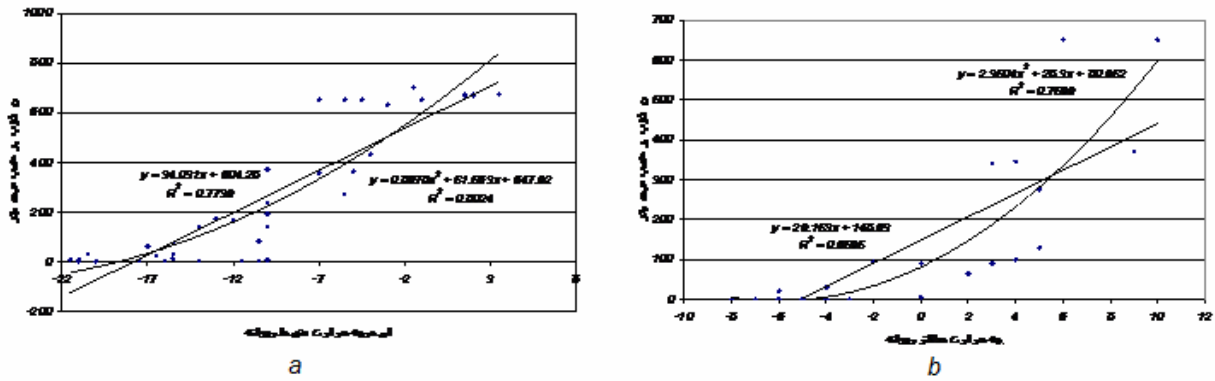
جدول ۲- مقایسه اثر درجه حرارت بیشینه

درجه حرارت بیشینه (°C)	درجه حرارت متوسط (°C)	حجم ذوب (ml)
-4	-10	5
2	-10	190

در شیب شمالی نیز همانند شیب جنوبی رابطه غیر خطی ضریب همبستگی بالاتری نشان می‌دهد (شکل ۴)، بنابراین، در این شیب نیز از رابطه غیر خطی استفاده شد. همچنین با توجه به اهمیت هر دو پارامتر درجه حرارت متوسط و درجه حرارت بیشینه در برآورد میزان ذوب، از هر دوی آن‌ها در معادله‌سازی استفاده شد. در نهایت، برای هر شیب یک معادله به‌منظور برآورد میزان ذوب روزانه با استفاده از درجه حرارت بیشینه و متوسط روزانه به‌دست آمد (رابطه ۳ و ۴). به‌کمک این دو رابطه، میزان ارتفاع ذوب در هر شیب بر حسب سانتی‌متر به‌دست می‌آید.

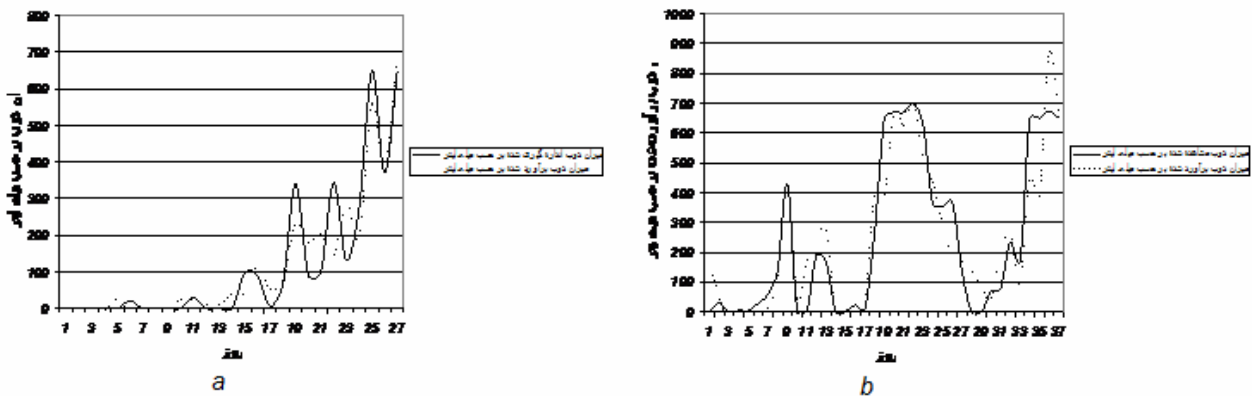
$$\text{Melt}_{\text{NORTH}} = \frac{(55.174T_{\text{Mean}} + 2.15T_{\text{Mean}}^2 + 8.18T_{\text{Max}} - 0.078T_{\text{Max}}^2 + 393.896)}{314.159} \quad (3)$$

$$\text{Melt}_{\text{SOUTH}} = \frac{(25.061T_{\text{Mean}} + 0.132T_{\text{Mean}}^2 + 18.463T_{\text{Max}} + 1.35T_{\text{Max}}^2 + 460.767)}{314.159} \quad (4)$$



شکل ۴- رابطه میان ذوب روزانه و درجه حرارت بیشینه روزانه و درجه حرارت متوسط روزانه (a) و در شیب شمالی (b)

به دلیل سهمی بودن رابطه‌های (۳) و (۴)، شاخه صعودی در سمت کاهش درجه حرارت در برآوردهای نهایی ذوب روزانه حذف شد تا از تخمین‌های غلط جلوگیری شود. با استفاده از دو رابطه مذکور، میزان ذوب روزانه برآورد و با مقادیر مشاهده شده، مقایسه شدند (شکل ۵). ضریب همبستگی در شیب جنوبی ۰/۸۳ و در شیب شمالی ۰/۸۷ به دست آمد.



شکل ۵- مقایسه میزان ذوب مشاهده شده و برآورد شده در شیب شمالی (a) و شیب جنوبی (b)

**برآورد گرادیان‌های قائم درجه حرارت متوسط و بیشینه روزانه:** با استفاده از معادلاتی که به منظور برآورد میزان ذوب برف به دست آمد، مقادیر درجه حرارت بیشینه و متوسط روزانه در واحدهای عملیاتی یا همان پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای حاصل می‌شود. بنابراین، لازم بود روابط میان ارتفاع و درجه حرارت بیشینه و متوسط در روزهای مورد مطالعه برآورد شده و از روی این روابط و DEM منطقه، مقادیر دمایی در هر پیکسل به دست آید. این کار به وسیله رگرسیون خطی و آمار دمایی ایستگاه‌های موجود در منطقه صورت گرفت و این روابط برای تمامی روزهای مورد مطالعه استخراج شد.

**تهیه تصاویر سطح پوشیده از برف:** در مدل‌های رواناب برف، لازم است سطح پوشیده از برف برآورد شود. در این تحقیق به منظور برآورد سطح پوشیده از برف از تصاویر ماهواره‌ای MODIS استفاده شد و سطوح برفی جدا شد. در مقایسه با دیگر پوشش‌های سطحی زمین، برف با دو خصوصیت متمایز می‌شود: اول بازتاب شدید در بخش مرئی و باند شماره ۴ و ۲ و دوم بازتاب کم در مادون قرمز با طول موج کوتاه یا باند شماره ۶. برای محاسبه و جداسازی برف می‌توان از دو خصوصیت بالا بهره جست و با ترکیب طیفی امکان عملیات به طور کامل خودکار و با صرفه اقتصادی برای تعیین برف را به وجود آورد. ترکیب بازتاب مرئی و بازتاب مادون قرمز با طول موج کوتاه، در شاخص نرمال تمایز برفی به کار می‌رود. این شاخص با رابطه (۵) برآورد می‌شود (Hall و همکاران، ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸).

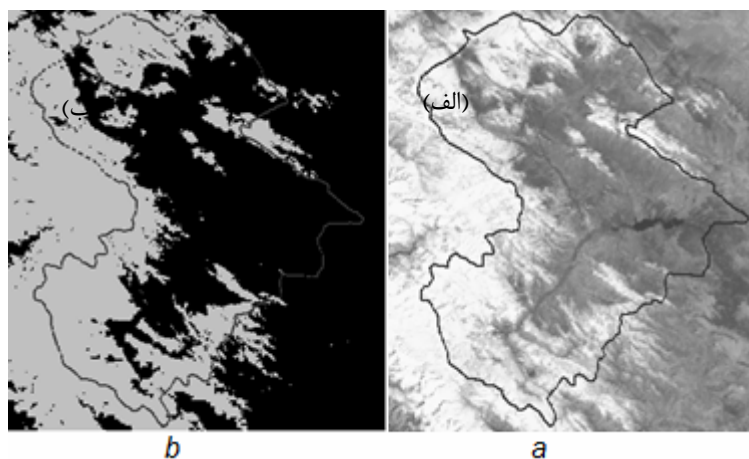
$$NDSI = \frac{MODIS4 - MODIS6}{MODIS4 + MODIS6} \quad (5)$$

به‌طور کلی، برف با مقادیر بالای<sup>۱</sup> NDSI از دیگر سطوح زمینی متمایز می‌شود. در جداسازی پیکسل‌های برفی، مقادیری که NDSI بالاتر یا مساوی ۰/۴ دارند، به‌عنوان برف در نظر گرفته می‌شوند (Hall و همکاران، ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸). بنابراین، از رابطه (۵) برای تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد تا سطح برف جدا شود. به‌غیر از NDSI، از دو معیار دیگر برای طبقه‌بندی برف به‌شرح ذیل استفاده می‌شود (Hall و همکاران، ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸).

۱. بازتاب مطلق باند ۲ بالاتر از ۰/۱۱، این معیار برای جداسازی برف از آب لازم است زیرا آب نیز NDSI بیشتر از ۰/۴ دارد.

۲. بازتاب باند ۴ بالاتر و مساوی ۰/۱۰، این عامل اشیای تاریک را از طبقه‌بندی در واحد برف‌دار جدا می‌سازد، هرچند این اشیای دارای NDSI بالاتر از ۰/۴ باشند. با ترکیب مجموع این عامل‌ها پیکسل‌های برف‌دار به‌راحتی جدا می‌شوند.

دو معیار بالا نیز بر تصاویر اعمال شد تا سطح پوشیده از برف واقعی برای روزهای دارای تصویر به‌دست آید (شکل ۶).



شکل ۶- مقایسه سطح پوشیده از برف در تصویر ماهواره‌ای مودیس (a) و سطح پوشیده از برف در تصویر نهایی (b)

برآورد تغییرات سطح پوشیده از برف در روزهای فاقد تصویر: با توجه به اهمیت جهت شیب در میزان انرژی دریافتی و به‌دنبال آن میزان ذوب (Fontana و Gazorzi، ۱۹۹۶)، مطالعه‌ای بر روی تغییرات روزانه درجه حرارت در شیب‌های مختلف با سه تصویر NOAA متعلق به سه مقطع زمانی در یک روز انجام شد که به‌دلیل نیافتن رابطه منطقی، نتیجه‌ای در بر نداشت. بنابراین به‌منظور برآورد تغییرات سطح پوشیده از برف، در حالتی که بین دو تصویر متوالی موجود برف نباریده بود، در ابتدا سه تصویر متوالی که هیچ‌گونه بارش برف در فاصله زمانی میان آن‌ها رخ نداده بود و همچنین هیچ‌گونه مشکل تابش‌سنجی و نویز در آن‌ها وجود نداشت، به تاریخ ۱ اسفند، ۵ اسفند و ۱۰ اسفند انتخاب شدند. تصویر ۲ یا ۵ اسفند برای ارزیابی هر مرحله آزمون مدل کنار گذاشته شد تا برآوردها با واقعیت مقایسه شده و روشی که کم‌ترین خطا را در برآورد تغییرات سطح برف دارد، انتخاب شود. سپس بخشی از برف که بین دو تصویر ۱ و ۱۰ اسفند پس‌روی کرده بود، از کل منطقه جدا شد و به‌عنوان سطح عمل در نظر گرفته شد.

جداسازی سطح تغییرات و پیش‌بینی‌ها بر روی آن‌ها در مورد روش نهایی نیز به‌کار گرفته شد تا خطای احتمالی تنها در سطح تغییر باشد نه کل منطقه. در برآورد تغییرات سطح پوشیده از برف، روش برآورد بر این منطق استوار بود

<sup>۱</sup> Normalized Difference Snow Index



که بیشینه تغییر در یک بازه زمانی، در گرم‌ترین روز موجود در این بازه زمانی اتفاق می‌افتد؛ یعنی برف تا بالاترین ارتفاع عقب‌نشینی می‌کند. بنابراین لازم بود در تمامی مراحل آزمایشی اولیه و نهایی روز گرم در هر نوع طبقه‌بندی یا حتی هر نوع روش به صورت جداگانه در هر واحد یا جزء محاسباتی، مشخص شده و سایر روزها با مقایسه با این روز گرم به دست آید. کلیه تصویرهای درجه حرارت، با تصویر رقومی ارتفاعی و با استفاده از گرادیان قائم درجه حرارت ایجاد شدند. بنابراین تنها عواملی را که مستقیم یا غیرمستقیم در ارتباط با تصویر رقومی هستند می‌توان در روش برآورد تغییرات وارد نمود که شامل میزان شیب و ارتفاع است. در نتیجه منطقه به طبقات شیب مختلف و ارتفاعات مختلف تقسیم شد و برآوردها در این طبقات صورت گرفت همچنین در برخی موارد جهت‌های مختلف جداگانه آنالیز شدند و در پایان با آنالیزهای متعدد نتایج زیر حاصل شد:

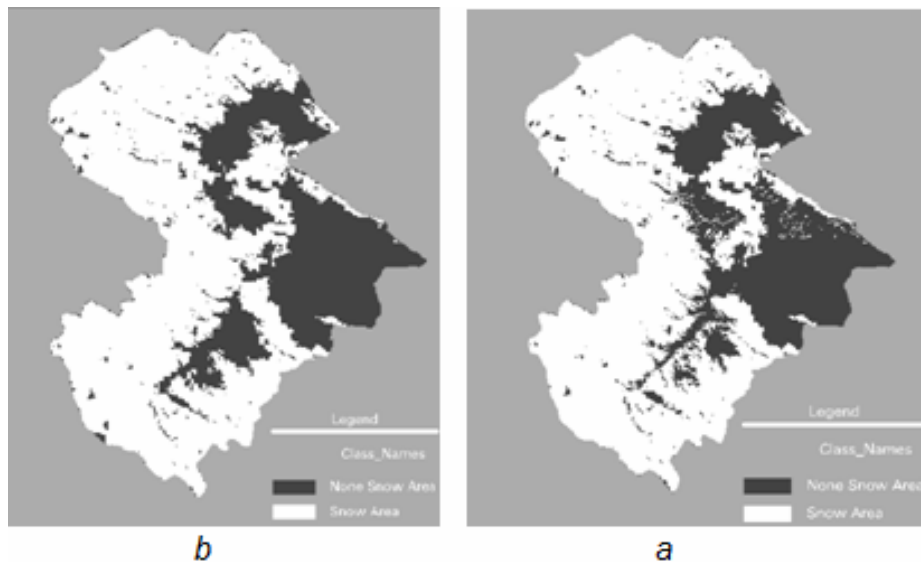
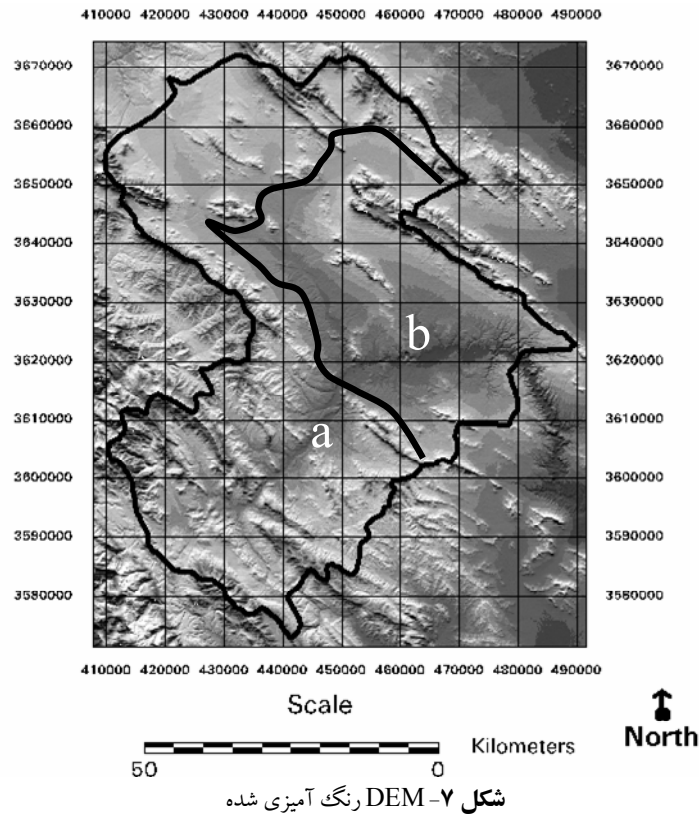
۱. برای رسیدن به شباهت زیاد و دل‌خواه، می‌توان سطح واحدها را کوچک کرد و تعداد آن‌ها را افزایش داد.
۲. دقت در تقسیم واحدها با استفاده از ارتفاع متوسط هر واحد، تنها در سطح تغییر یافته برای تقسیم‌بندی هر واحد به دو جزء، به ایجاد شباهت بیش‌تر کمک می‌نماید (پیرو نتیجه قبلی).
۳. جدا نمودن جهت شیب در هر واحد کاری و انجام عملیات مستقل بر روی آن به ایجاد شباهت بیش‌تر کمک می‌نماید.
۴. استفاده از درجه حرارت متوسط روزانه برای شیب جنوبی و استفاده از درجه حرارت بیشینه روزانه برای سایر جهات شیب در طبقه‌بندی چهار جهته شیب، به ایجاد شباهت بیش‌تر منجر می‌شود.
۵. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، منطقه مورد مطالعه به دلیل داشتن توپوگرافی شدید (شکل ۷) در بخش جنوبی، باختری و قسمتی از شمال (بخش a) مستقل از بخش خاوری و مناطق اطراف دریاچه (بخش b) است. به عبارت دیگر بخش خاوری و کم ارتفاع مرکزی به دلیل نداشتن توپوگرافی شدید، گرم‌تر از سایر نواحی است. به همین دلیل لازم است منطقه بخش‌بندی شده و آنالیزهای ذکر شده به‌طور مستقل در هر بخش انجام گیرد تا نهایت شباهت در تصویر ایجاد شده و تصویر واقعی شکل بگیرد.

با در نظر گرفتن مجموعه نتایج کسب شده در مطالعات اولیه به‌منظور برآورد سطح تغییرات پوشش برفی به طریقه زیر عمل شد.

۱. برای رسیدن به بالاترین واحد کاری و بیش‌ترین دقت در طبقه‌بندی واحدهای کاری، به‌جای طبقه‌بندی سطح منطقه از کوچک‌ترین واحد هر تصویر یعنی پیکسل برای مقایسه روزها و برآورد تغییرات سطح پوشیده از برف استفاده شد.
۲. برای انتخاب گرم‌ترین روز از آمار ایستگاه‌های هواشناسی، میانگین و بیشینه درجه حرارت‌های متوسط و بیشینه روزانه پیکسل‌های واقع در سطح تغییر، استفاده شد تا با بالاترین دقت روز گرم انتخاب شود.
۳. منطقه به شیب چهار جهته تقسیم شد و آنالیزها برای جهت جنوبی با استفاده از درجه حرارت متوسط روزانه و برای سایر شیب‌ها با استفاده از درجه حرارت بیشینه روزانه انجام گرفت.
۴. به‌جای استفاده از یک عدد در پیش‌بینی تغییرات سطح برف در هر روز، هر پیکسل با پیکسل مشابه خود در گرم‌ترین روز، مقایسه و در صورت بالاتر بودن عدد آن برای روز بعدی حذف می‌شد.
۵. منطقه به دو بخش خاوری- مرکزی و غیرخاوری تقسیم شد. برای بخش غیر خاوری از روش بالا برای برآورد تغییرات سطح برف در آن استفاده شد. ولی برای بخش خاوری- مرکزی به جای روز گرم، که قبلاً روش انتخاب آن ذکر شد، از متوسط تمامی روزهای واقع شده در میان دو تصویر متوالی ۱ و ۱۰ اسفند که به‌صورت یک تصویر درآمده بود، استفاده شد.

در نهایت با در نظر گرفتن نتایج فوق، تصاویر نهایی سطح پوشیده از برف تهیه و به‌منظور ارزیابی دقت آن نسبت به تصویر سطح پوشیده از برف واقعی، ماتریس خطا ایجاد شد و دقت روش تنها در سطح تغییر یافته در بخش

پیکسل‌های بدون برف ۷۸/۴۳ درصد، دقت تخمین پیکسل‌های برف‌دار ۹۳/۱۱ درصد و دقت کل ۸۹/۴۵ درصد به دست آمد. همان‌گونه که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، دو تصویر شباهت زیادی به یکدیگر دارند.



شکل ۸- مقایسه تصویر برآورد شده نهایی (a) و تصویر حقیقی (b)

لذا، این روش برای برآورد تغییرات سطح پوشیده از برف در فاصله زمانی دو تصویر متوالی، که هیچ‌گونه بارش برفی نداشته‌اند، به کار رفت. اما در حالت دوم وقتی بین دو تصویر متوالی بارش برف وجود داشت، آنالیز به دو بخش تقسیم شد. با توجه به اینکه اکثر ایستگاه‌های موجود در منطقه در ارتفاع کم و نزدیک به کم منطقه یعنی در ارتفاع ۲۱۰۰ متری بودند، قدر مسلم وقتی در این ایستگاه‌ها برف ریزش نماید در مناطق مرتفع‌تر نیز برف باریده است. در نتیجه،

تصویری از منطقه ساخته شد که در آن تمامی منطقه به جز دریاچه سد پوشیده از برف بود. بدین طریق که از روی تصاویر ماهواره‌ای، سطح دریاچه جدا و از تصویر اولیه کل منطقه کم شد تا دریاچه جدا شود. این تصویر در روزی که بارش برف اتفاق افتاده بود، به‌عنوان تصویر سطح پوشیده از برف در روز برفی به‌حساب می‌آمد.

طبیعی است که از روز بارش تا تصویر متوالی دوم به‌همان روش مورد اشاره، تصویر وسط ساخته می‌شدند. اما به‌دلیل نداشتن سطح تغییر و ندانستن چگونگی تغییرات سطح برف در فاصله میان تصویر اول و بارش برف و با در نظر گرفتن این نکته که برف در طی این روزها تغییراتی خواهد داشت و عدم محاسبه این تغییرات، میزان برآورد نهایی ذوب برف و دبی را تحت تاثیر قرار داده و باعث ایجاد خطا در برآورد می‌شود، باید به طریقی این تغییر برآورد می‌شد. برای برآورد تغییرات سطح برف در این روزها یک تصویر متوسط درجه حرارت، هم در مورد درجه حرارت متوسط روزانه و هم در مورد درجه حرارت بیشینه روزانه بین دو تصویر متوالی موجود ایجاد شد، سپس هر یک از این دو تصویر در سطح تغییر یافته میان همان دو تصویر متوالی ضرب شد و در نهایت متوسط این واحد تغییر یافته درباره درجه حرارت متوسط و درجه حرارت بیشینه روزانه به‌دست آمد. در حقیقت متوسط درجه حرارتی که باعث تغییر برف در میان این دو روز متوالی شده بود، به‌دست آمد. این عمل برای تمامی تصاویر متوالی انجام گرفت تا متوسط هر یک از این دو دما، که باعث حذف برف شده بود، به‌دست آید. برای محاسبه متوسط کل متوسط‌های حاصل شده در تعداد روزهایی که در تشکیل آن نقش داشتند، ضرب و به تعداد روزهای کل تقسیم شدند (میانگین وزنی - روزی) تا میانگین کل به‌دست آید. در باره درجه حرارت متوسط روزانه این عدد برابر  $3/76-$  و برای درجه حرارت بیشینه روزانه  $3/87+$  به‌دست آمد. برای محاسبه تغییرات در این قبیل روزها، اگر یک پیکسل در یک روز خاص درجه حرارت متوسط بالای  $3/76-$  و درجه حرارت بیشینه روزانه بالای  $3/87+$  می‌داشت، برای روز بعدی حذف می‌شد. به‌دلیل خرابی سنجنده در بعد از روز ۸ فروردین برای بعد از این روز تا روز اتمام پوشش برفی در منطقه (۳۱ فروردین) به‌همین شکل تغییرات برف محاسبه شد. بدین ترتیب برای تمامی روزهای مورد آزمایش تصویر سطح پوشیده از برف به‌دست آمد.

**برآورد میزان ارتفاع ذوب روزانه برف:** محاسبات مربوط به ذوب و رواناب در زیرحوزه قلعه شاهرخ که دارای ایستگاه هیدرومتری است، انجام شد. برای محاسبه میزان ذوب روزانه در یک روز با توجه به دو رابطه به‌دست آمده برای دو جهت شیب، نیاز به تصویر رقومی ارتفاعی منطقه با قدرت تفکیک زمینی هم‌اندازه با تصویر پوشش برفی در همان روز، تصویر سطح پوشیده از برف مربوط به منطقه در آن روز، همچنین تصویر شیب دو جهته که در هر مرحله یا شیب شمالی و یا شیب جنوبی وارد معادله می‌شوند، بود. به‌علت فرم سهمی‌وار دو معادله (سهمی فضایی) با عددگذاری و ترسیم هر یک از منحنی‌ها، شاخه صعودی سمت چپ سهمی به‌دست آمده و اعداد آن از تصویر درجه حرارت حذف شد. این اعداد در شیب شمالی در مورد درجه حرارت متوسط روزانه کم‌تر از  $15-$  و درباره درجه حرارت بیشینه کم‌تر از  $7-$  به‌دست آمد. در شیب جنوبی این اعداد به‌ترتیب  $18-$  و کم‌تر از  $8-$  حاصل شد.

به‌منظور برآورد ذوب روزانه برف مدلی ایجاد شد و به‌شکل زیر عمل شد:

- از روی تصویر رقومی ارتفاعی منطقه با اندازه پیکسل مشخص، دو تصویر درجه حرارت متوسط و درجه حرارت بیشینه روزانه ساخته شد.
- مدل به دو بخش یا دو شاخه مجزا تبدیل شد و هر شاخه، محاسبات مربوط به تنها یک جهت شیب را انجام می‌داد.
- توسط رابطه مربوط به شیب شمالی، میزان ذوب در کل منطقه محاسبه شده و به‌صورت تصویر درآمد. برای داشتن تنها ذوب شمالی، این تصویر در سه تصویر شیب شمالی، سطح پوشیده از برف در آن روز خاص و تصویری که دماهای غیر مجاز را در شیب شمالی نداشت و به‌طور مستقیم در خود مدل تولید و مورد استفاده قرار می‌گرفت، ضرب شده و تنها ذوب برف در شیب شمالی به‌دست می‌آمد. در این مرحله مدل، برآوردهای منفی این شیب را حذف می‌نمود. در شاخه دیگر مدل شیب جنوبی به‌همان صورت محاسبه می‌شد.
- دو تصویر مربوط به ذوب شمالی و ذوب جنوبی با هم ترکیب شده و ذوب برف کل منطقه به‌دست آمد.



$$D = -6 \times 10^{-5} \times M^2 + 0.0226 \times M + 3.55 \quad (6)$$

که در آن،  $D$  دبی رواناب ناشی از ذوب برف برحسب مترمکعب بر ثانیه،  $M$  دبی ذوب برف برحسب مترمکعب بر ثانیه است.

با بررسی نتیجه این رابطه با دبی حقیقی و برقراری همبستگی مشخص شد که این رابطه در سطح اعتماد پنج درصد معنی دار است. از بخش دوم رابطه (7) به دست آمد که در سطح اعتماد پنج درصد معنی دار است.

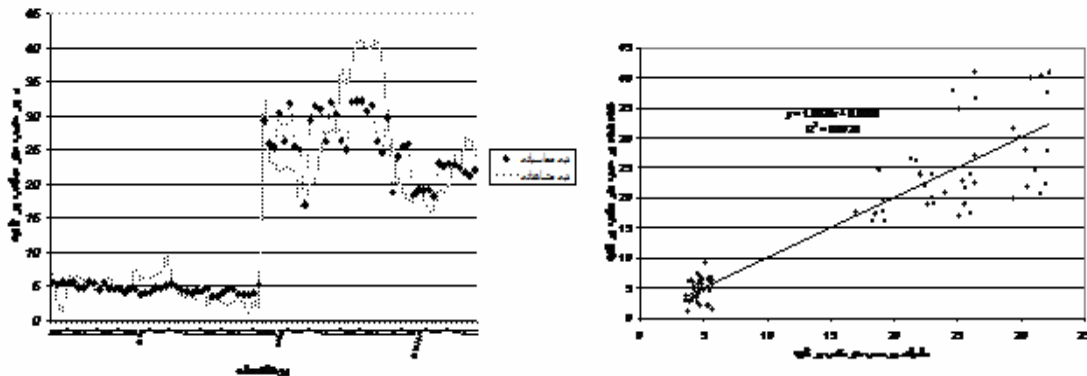
$$D = -0.0057 \times M^2 + 1.0374 \times M - 14.989 \quad (7)$$

از بخش سوم نیز رابطه (8) به دست آمد.

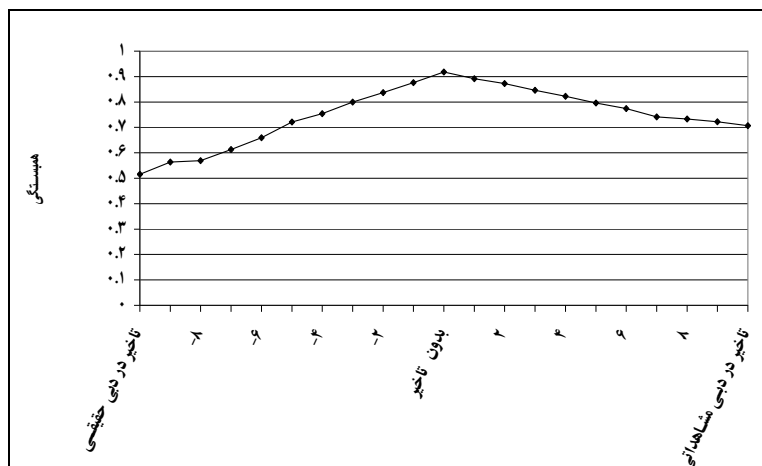
$$D = 42.593 \times M^{-0.1486} \quad (8)$$

این رابطه نیز مانند دو رابطه (6) و (7) در سطح اعتماد پنج درصد معنی دار است. در پایان با این سه رابطه، دبی ناشی از ذوب برف برآورد و با دبی حقیقی مقایسه شد (شکل 10).

با توجه به این که دبی برآورد شده متعلق به یک روز با تعریف خاص است و دبی مشاهده شده دبی در یک روز حقیقی است، تاخیرهایی به صورت تاخیر زمانی یک روزه به دبی برآورد شده و دبی مشاهده شده، داده شد، تا مشخص شود دبی برآورد شده دارای همبستگی بالایی با دبی حقیقی است یا دبی برآورد شده در تأخیر زمانی، همبستگی بیشتری دارد (شکل 10).



شکل 10- مقایسه دبی محاسبه شده و برآورد شده



شکل 11- مقایسه تغییر در همبستگی دبی مشاهده‌ای و دبی برآورد شده با تغییرات زمانی

همان گونه که در شکل (11) مشاهده می‌شود، بیش‌ترین همبستگی در زمان بدون تأخیر وجود دارد. بنابراین دبی برآورد شده از طریق معادلات متعلق به روز حقیقی است نه روز بعد از آن. با بررسی میزان دبی ناشی از ذوب برف

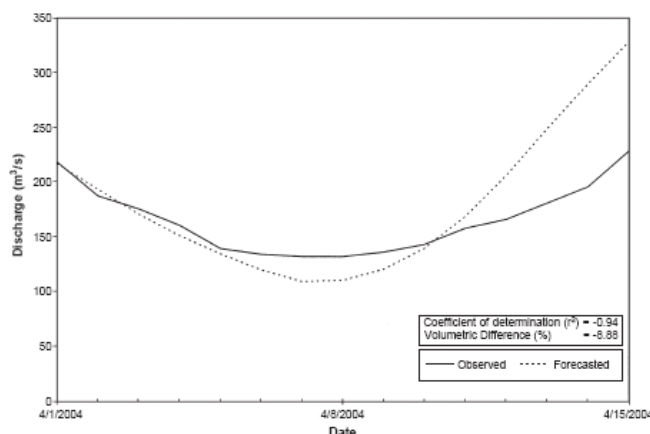
مشاهده شده و برآورد شده مشخص شد که به‌طور متوسط خطای برآورد دبی ناشی از ذوب برف ۱۳/۸۷ درصد است. همچنین، تفاوت حجم رواناب (Volumetric Difference) برآورد شده و مشاهده شده در دوره مورد بررسی که از رابطه (۹) به‌دست می‌آید، کم‌تر از یک درصد و در حدود ۰/۳۶ درصد است.

$$D_v[\%] = \frac{V - V'}{V} * 100 \quad (9)$$

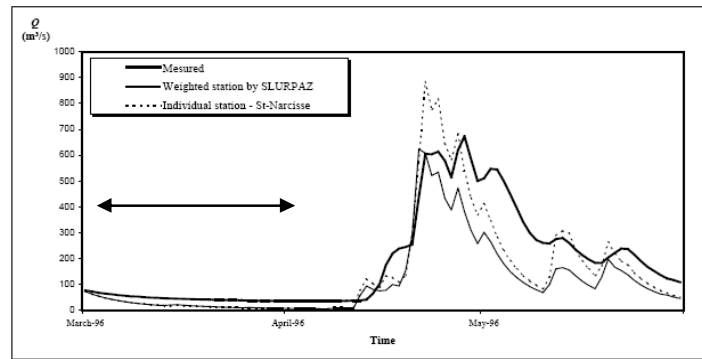
که در آن،  $V$  حجم رواناب فصلی یا سالیانه اندازه‌گیری شده و  $V'$  حجم رواناب فصلی یا سالیانه برآورد شده است. در حوزه رودخانه باتیسکان (Batiscan) در ایالت کبک (Québec) کانادا در سال ۱۹۹۶ با استفاده از SRM و ناحیه‌بندی منطقه با پلی‌گون‌های تیسن، رواناب سالیانه برآورد شده که ضریب همبستگی در پنج ناحیه به‌دست آمده، بین ۰/۰۷ تا ۰/۷۳ بوده است (Gratton و Richarc، ۲۰۰۱). شکل (۱۱) رواناب اندازه‌گیری شده و برآورد شده در یکی از ایستگاه‌های منطقه و ناحیه وزن‌دهی شده را نشان می‌دهد. با توجه به دوره مطالعه رواناب برف در اواسط دی، بهمن، اسفند و اوایل فروردین که ماه‌های میلادی ژانویه، فوریه و مارس را شامل می‌شود، در شکل ۱۲ منطقه مشخص شده با فلش، دوره مشابه در طی دوره مورد بررسی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در روش SRM رواناب برآورد شده در ماه مارس مقدار بسیار ناچیزی بوده و حتی نسبت به رواناب حقیقی، مقدار کم‌تر از نصف را در این دوره برآورد نموده است؛ یعنی در حدود ۵۰ درصد خطای برآورد شده را داشته است. در حالی که در این تحقیق در طول دوره برفی، کم‌تر از یک درصد خطای برآورد حجمی وجود داشته است.

در حوزه کاراسو در ترکیه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و مدل SRM رواناب ناشی از ذوب برف برآورد شده است (Akyu و Emre، ۲۰۰۵). در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که برآورد رواناب برای یک دوره ۱۴ روزه انجام گرفته که تفاوت حجمی رواناب ۸/۸۸ درصد به دست آمده است. همچنین در پایان دوره ۱۴ روزه، اختلاف رواناب برآورد شده و مشاهده شده بسیار بالاست. در حوزه آبخیز میرآباد دریاچه ارومیه در ایران، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای NOAA و مدل SRM، رواناب ناشی از ذوب برف برآورد شده است (نجفی، ۱۳۸۲) (شکل ۱۴).

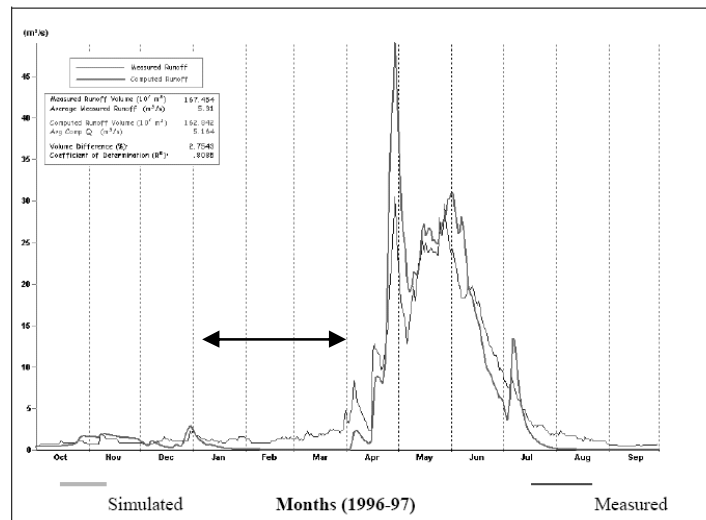
ضریب همبستگی میان دبی برآورد شده و مشاهده شده برای کل یک سال ۰/۸۱ است و تفاوت حجمی رواناب برای کل سال ۲/۷۸ درصد می‌باشد (Marsh، ۱۹۹۴). اما برای دوره برفی که با فلش در شکل ۱۳ مشخص شده است و دوره آن با دوره این تحقیق هم‌زمان است، برآورد میزان رواناب ناشی از ذوب برف با مدل SRM در حدود صفر است و برآورد رواناب توسط این مدل برای باقی سال ارتباط ناچیزی با ذوب برف دارد. بنابراین، در طی دوره یا فصل برفی عمل کرد مدل SRM بسیار ضعیف مشاهده می‌شود (شکل ۱۴).



شکل ۱۲- مقایسه رواناب مشاهده شده و برآورد شده توسط مدل SRM در کانادا



شکل ۱۳- نتیجه روش SRM در ترکیه



شکل ۱۴- مقایسه رواناب مشاهده شده و برآورد شده توسط مدل SRM در ارومیه

با توجه به مطالبی که ذکر شد و به‌ویژه مطالعه انجام شده در ارومیه، مشاهده می‌شود که نتایج حاصل شده با استفاده از این روش تحقیق دقت مناسبی داشته و عمل کرد این مدل در طول فصل برفی بسیار مناسب‌تر از مدل SRM است. علت این امر می‌تواند کوچک نمودن واحد عمل در برآورد ذوب و رواناب و اعمال مستقیم درجه حرارت هر واحد و استفاده از جهت شیب در برآورد میزان ذوب در این روش تحقیق باشد. به دلیل سادگی این روش تحقیق در صورت نتیجه دادن در حوزه‌ها و مناطق دیگر شاید بتوان آن را به‌عنوان روش جای‌گزین برای روش SRM به‌خصوص در مناطقی که روش SRM پاسخ نداده است، استفاده نمود.

## منابع

1. نجفی، ا. ۱۳۸۲. بررسی رواناب ناشی از ذوب برف در منطقه ارومیه با استفاده از تکنیک‌های RS و GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه انسکید (Enschede)، هلند.
2. Ackerman, S., B. Baum, R. Frey, L. Gumley, C. Moeller, P. Menzel, G.A. Riggs, C. Schaff, L. Strabala, and R. Welch. 1996. Discriminating clear-sky from cloud with MODIS. Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35), Version 3.0., p. 109.
3. Akyu, Z., A. Emre, A.S. Ensoyc, A.S. Ormanc, and A.U. Orman. 2005. Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. Remote Sensing of Environment, 97: 216-230.
4. Bergstrom, L. 1986. Recent developments in snowmelt-runoff simulation. Symposium Cold Regions Hydrology, Fairbanks, American Water resources Association, pp.461-468.

6. Colbeck, S.C. 1991. The layered character of snow covers, *Geophys.*, 29:81-96.
7. Engman, E.T. and R.J. Gurney. 1991. *Remote Sensing in Hydrology*. Chapman and Hall, Cambridge, London.
8. Ferguson, R.I. 1999. Snowmelt runoff models. *Progress in Physical Geography*, 23(2):205-227.
9. Fontana, G.D. and F. Gazorzi. 1996. Snowmelt modeling by combining air temperature and a distributed radiation index. *Journal of Hydrology*, Elsevier, 181:169-187.
10. Goodinson, B.E., A. Rango, and A.E. Walker. 2000. Snow and Ice. *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*, (eds by Ergman, E.T. and Schultz, G.A.), Springer, Berlin.
11. Gratton, D.G. and C. Richarc. 2001. The Importance of the air temperature variable for the snowmelt runoff modelling using the SRM model. 58th Eastern Snow Conference, Ottawa, Ontario, Canada.
12. Hall, D.K., A.G. Klein and G.A. Riggs. 1997. Improving the MODIS global snow-mapping algorithm. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS'97)*, pp. 619-621.
13. Hall, D.K., A.G. Klein, and G.A. Riggs. 1998. Global snow cover monitoring using MODIS. 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment, pp. 363-366.
14. Marsh, P. 1998. Snow-cover properties and processes. *International Conference on Snow Hydrology*, Editors: Hardy, J., M. Albert and p. Marsh, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
15. Marsh, P. and M.K. Woo. 1985. Meltwater movement in natural heterogeneous snow covers. *Water Resource*, 21:1710-1716.
16. Sasaki, M. and T. Takeuchi. 2000. Snow and snow melt models in Aomori prefecture. *Snow Engineering*, eds. Hansen, H., L. Holand and L. Norem, Balkema, Rotterdam.
17. Zhang, Y. 2003. Modis and snow-cover ma., [http://www.climate.eas.gatech.edu/yzhang/MODIS\\_snow.pdf](http://www.climate.eas.gatech.edu/yzhang/MODIS_snow.pdf).



## Estimate of Snowmelt runoff using MODIS data

Behzad Raighani<sup>1</sup>, MSc, Faculty of Natural Resources, Tehran University, Iran

Said Soltani Koopani, Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, Tehran University, Iran

Seyed Jamaledin Khajeddin, Associate Professor, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Iran

Sousan Barati, MSc Student, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Iran

Received: 28 May 2010

Accepted: 14 November 2010

### Abstract

Snow-cover and its equivalent water, supply 1/3 of the water requirements for farming and land irrigation throughout the world. Therefore, water contents estimation of a snow-cover or estimation of snowmelt runoff is necessary for hydrologists. Several snowmelt-forecasting models have been suggested which most of them require continuous monitoring of snow-cover. The most efficient means of monitoring snow-cover patches are remote monitoring through satellites imagery. In this research, snowmelt runoff forecasted in a new scheme, using maximum and mean daily temperatures, two snowmelt measuring device and MODIS data. According to the outcome results, one can map snow-covered area with sufficient precision using MODIS data, while the map is useful for related calculations about snow patches. We calculated, after studying the satellite images, the snow-cover changes predicted in a new way for the periods that the MODIS data was not available. Maps were produced and with control of ground truthing their very high precisions confirmed. The melted water resulted from temperature changes were modeled as equations, which, their calculated amounts are comparable to the ground truthing points very well. With regards of water flow changes, equations calculated to estimate the daily melted water flow. These equations are comparable to the ground truthing points as well.

**Key words:** NDSI, RS, Snow cover, Snowmelt runoff, Temperature

---

<sup>1</sup> raighani@yahoo.com