

## تعیین پارامترهای اساسی در فرآیند ذوب برف در تخمین آبنگار سیل در حوضه آبریز کارون

فاطمه کاراندیش<sup>۱\*</sup>، جهانگیر پرهمت<sup>۲</sup> و کیومرث ابراهیمی<sup>۳</sup>

### چکیده

هیدرولوژی برف پیچیده‌تر از باران بوده و معمولاً به صورت مستقیم در تولید رواناب اثرگذار نیست. در حوضه‌های کوهستانی ذوب برف دربرگیرنده بخش اصلی جریان کل در خروجی حوضه است. پس در این بررسی، به واسنجی و صحت‌یابی دو پارامتر درجه حرارت بحرانی و ضریب درجه روز در حوضه آبریز کارون، به عنوان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های کوهستانی ایران پرداخته شد. شبیه‌سازی سیلاب با نرم‌افزار HEC-HMS انجام شد. بهترین مقدار ضریب درجه روز و درجه حرارت بحرانی برای منطقه حوضه آبریز رودخانه کارون تا خروجی پل شالو به ترتیب برابر ۳/۲ میلی‌متر بر درجه سلسیوس روز و ۲/۵ درجه سلسیوس به دست آمد. بررسی خصوصیات هیدروگراف سیل‌های منتخب در این بررسی و ارزیابی مقادیر به دست آمده بر اساس شاخص‌های آماری مجذور مربعات خطا و ضریب تبیین نشان داد که با واسنجی پارامتری درجه حرارت بحرانی و ضریب درجه روز به عنوان پارامترهای مؤثر بر رواناب حاصل از ذوب برف برازش خوبی بین هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حاصل شده است. همچنین با در دست داشتن مقادیر بهینه شماره منحنی، زمان تأخیر و تلفات اولیه به عنوان پارامترهای مؤثر در پیدایش رواناب مستقیم در حوضه می‌توان برازش دقیقی بین هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسباتی با مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف و بارش در منطقه ایجاد کرد.

**واژه‌های کلیدی:** درجه حرارت بحرانی، ضریب درجه-روز، هیدروگراف سیل، HEC-HMS.

**ارجاع:** کاراندیش ف. پرهمت ج. و ابراهیمی ک. ۱۳۹۵. تعیین پارامترهای اساسی در فرآیند ذوب برف در تخمین آبنگار سیل در حوضه آبریز کارون. مجله پژوهش آب ایران. ۲۱: ۱۳۳-۱۴۲.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.

۲- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران.

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

\* نویسنده مسئول: [F.karandish@uoaz.ac.ir](mailto:F.karandish@uoaz.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۱۰

## مقدمه

در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا، منابع آبی به دلیل افزایش نیاز در راستای افزایش جمعیت و مصارف بالاتر در صنایع و کشاورزی محدود است (بودهار و همکاران، ۲۰۰۹). وقوع سال‌های خشک پی‌درپی در بسیاری از مناطق دنیا همچون نواحی مدیترانه‌ای (کودنک و همکاران، ۲۰۰۷) و احتمال افزایش این سال‌ها در نتیجه تغییر اقلیم در آینده (کبالوس و همکاران، ۲۰۰۸) نقش مناطق کوهستانی را در توازن آب یک منطقه مشخص می‌کند (خزایی و همکاران، ۲۰۰۳). در حوضه‌های کوهستانی و مرتفع بخش عمده نزولات آسمانی به شکل برف بوده و هیدرولوژی برف، به ویژه ذوب و رواناب حاصل از برف در این مناطق بیشتر می‌باشد. وقوع بارش در یک منطقه به صورت باران و یا برف، نحوه عکس‌العمل حوضه آبریز در سیلاب‌های خروجی حوضه را تعیین می‌کند، زیرا برف قبل از تبدیل به رواناب به شکل ذخیره‌ای سرد تا مدت‌ها در حوضه باقی می‌ماند (اسلاتر و کلارک، ۲۰۰۶). وجود برف انباشته در حوضه بر بیلان انرژی و آب اثرگذار می‌باشد. افزایش ضریب بازتاب امواج کوتاه رسیده به سطح زمین و کاهش گرما در سطح زمین را می‌توان از جمله این تأثیرات دانست. شایان ذکر است که برف تازه، دارای ضریب بازتابی بیش از ۸۰ درصد بوده که با ضریب بازتاب سطوح پوشیده از گیاه (ضریب بازتاب ۱۵ درصد) به طور کامل متفاوت است (پرهت، ۱۳۸۴). هیدرولوژی برف پیچیده‌تر از باران بوده و معمولاً صورت مستقیم در تولید رواناب اثرگذار نیست. ذوب برف یکی از مؤلفه‌های اصلی سیکل هیدرولوژی در مناطق زیادی از دنیا بوده و دربرگیرنده بخش اصلی جریان کل در بسیاری از مناطق کوهستانی دنیا است (لیوسلی، ۱۹۸۹ و رنگو، ۱۹۷۷). در حوضه‌های کوهستانی و مرتفع که بخش عمده نزولات آسمانی به شکل برف است، ذوب برف از جمله منابع اصلی رواناب سطحی در فصل‌های گرم سال بوده و پایش زمانی و مکانی آن می‌تواند سبب انجام پیش‌بینی‌های مناسب از شرایط آبی هر سال شود. برآورد مقدار ذوب برف و درنظر گرفتن آن در میزان رواناب حوضه آبریز همیشه از مجهولات بررسی‌ها بوده است. در این راستا برخی پژوهش‌گران تلاش نموده‌اند تا با مدل‌های هیدرولوژیکی موجود همچون SRM میزان عمق آب معادل برف را شبیه‌سازی کنند (کلارک و همکاران، ۲۰۰۶).

نرم‌افزار HEC-HMS یکی از نرم‌افزارهای توانا در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با درنظر گرفتن اثر ذوب برف بوده که کارایی آن در پژوهش‌هایی با هدف‌های متفاوت بررسی شده است. از جمله این پژوهش‌ها، می‌توان به بررسی نقش خصوصیات بارش در پیدایش سیل (ماسکی و همکاران، ۲۰۰۴)، بررسی تأثیر حوضه‌های تأخیری در دبی اوج هیدروگراف (امرسون و همکاران، ۲۰۰۳)، تهیه سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای تخمین هدررفت آب ناشی از تخبیر از سطح حوضه (موگز و همکاران، ۲۰۰۳) و بررسی نقش داده‌های بارش رادار در افزایش دقت شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در مقایسه با داده‌های نقطه‌ای بارش (نیری و همکاران، ۲۰۰۴) اشاره کرد.

پارامترهای درجه حرارت بحرانی و ضریب درجه روز، از جمله مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر در برآورد رواناب حاصل از ذوب برف بوده که تعیین مقدار آن در هر منطقه باید به صورت جداگانه انجام شود. آگاهی از مقدار این دو پارامتر، کمک زیادی در راستای پایش زمانی و مکانی رواناب حاصل از ذوب برف در مناطق کوهستانی خواهد کرد. با توجه به مهم بودن حوضه آبریز کارون به عنوان یکی از بزرگ‌ترین حوضه‌های کوهستانی ایران، در این بررسی، به تعیین پارامترهای درجه حرارت بحرانی و ضریب درجه روز با استفاده از مدل HEC-HMS برای این منطقه پرداخته شده است. پس در این بررسی، پس از واسنجی پارامترهای حوضه، به واسنجی پارامترهای ضریب درجه روز و درجه حرارت بحرانی با نرم‌افزار HEC-HMS پرداخته شد.

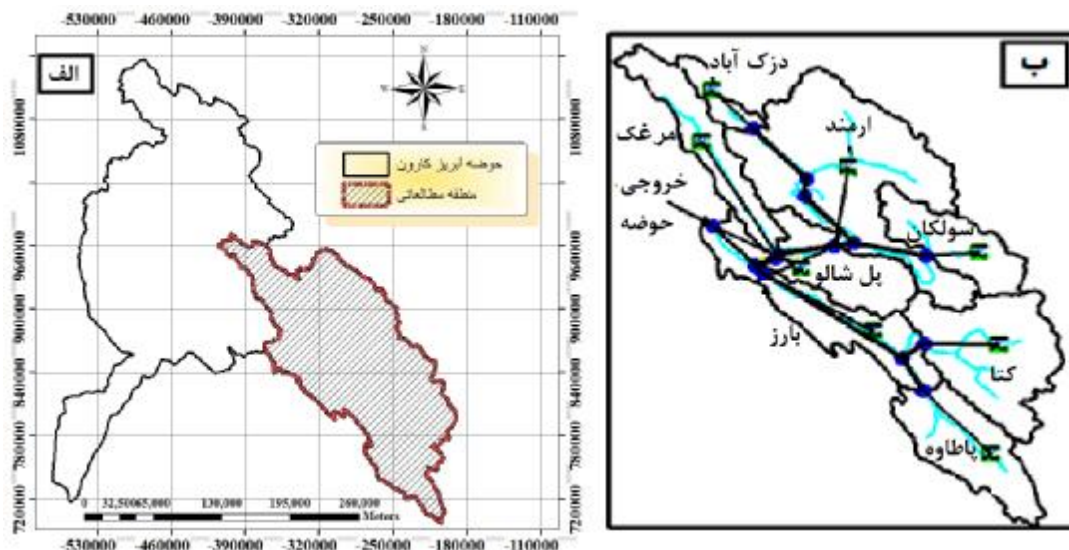
## مواد و روش‌ها

## منطقه مطالعاتی

منطقه مورد بررسی بخشی از حوضه آبریز کارون در جنوب‌غربی ایران، در داخل ارتفاعات زاگرس میانی و محدود به مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۳ دقیقه و ۳۷ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۵۴ دقیقه و ۲۹ ثانیه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۱۶ دقیقه و ۵۰/۴۰ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۳۲ دقیقه و ۱۸/۳ ثانیه عرض شمالی است (شکل ۱). منشأ عمده بارندگی در حوضه مورد نظر جریان هوای مرطوبی است که به همراه مراکز کم فشار مهاجر از سمت مدیترانه، خلیج فارس، دریای سرخ، اطلس شمالی و دریای سیاه به

فاصله ماه‌های آبان تا اردیبهشت است و حداکثر بارش بیشتر در یکی از ماه‌های بهمن یا اسفند رخ می‌دهد (پرهت، ۱۳۸۴).

منطقه می‌رسد. پدیده برف در مناطق مرتفع شرقی میانی حوضه حدود نیمی از بارش را به خود اختصاص داده و بنابراین در هیدروکلیماتولوژی منطقه اثرات تلفیقی برف و باران نیازمند توجه ویژه است. حدود ۹۶ درصد بارش در



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی (الف) و زیرحوضه‌ها (ب)

#### شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف

برای شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف، نیاز به ورود مجموعه داده‌هایی از جمله عمق آب معادل برف در سطوح ارتفاعی مختلف و در شروع رخداد بارش منتخب، مساحت هر یک از سطوح ارتفاعی مورد نظر، متوسط درجه حرارت روزانه در این سطوح و الگوی ذوب برف در منطقه است. بدین منظور، ابتدا بر اساس مدل رقومی منطقه، نقشه هیپسومتریک با فواصل ارتفاعی ۱۰۰ متری تعیین و مساحت آن‌ها محاسبه شد. سپس با روابط ارتفاع و دما در منطقه مطالعاتی، نقشه‌های هم‌دما و مقادیر متوسط دمای روزانه در هر یک از باندهای ارتفاعی و دمای متوسط روزانه در پایین‌ترین نقطه هر زیرحوضه تعیین و وارد مدل شد.

با استفاده از روابط دما و ارتفاع در روزهای ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۷۶، مقدار متوسط نرخ کاهش حرارت در منطقه برابر با ۵/۵- درجه در هر کیلومتر به دست آمد. الگوی سه ساعته توزیع حرارت نیز با استفاده از اطلاعات دما در نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به خروجی هر کدام از زیرحوضه‌ها تهیه شد. بدین منظور از ایستگاه‌های ایذه، کوهرنگ، شهرکرد، عدل، امام قیص، لردگان، عدالت و

#### تعیین ورودی‌های مدل HEC-HMS

با استفاده از مدل رقومی ارتفاع رادار با پیکسل‌های ۸۵ متر و کاربرد برنامه جانبی HEC-Geo HMS، مدل حوضه و خصوصیات فیزیوگرافی آن در محیط GIS پردازش و در نظر گرفته شد (شکل ۱-ب). نقشه هم‌باران با روش کریجینگ تهیه و مقدار بارش متوسط در کل منطقه برآورد شد. همچنین با استفاده از اطلاعات باران‌نگارهای ثابت در ایستگاه‌های یاسوج و چلگرد، هیتوگراف‌های بی‌بعد ۴۸ و ۷۲ ساعته با فاصله زمانی یک ساعته به دست آمد. ضمن اجرای مدل، با واسنجی پارامترهای شماره منحنی، زمان تأخیر و تلفات اولیه از حوضه با استفاده از سیلاب‌های بدون برف، اختلاف بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسباتی به حداقل رسید. معیار ارزیابی سه خصوصیت اصلی هیدروگراف شامل: دبی حداکثر لحظه‌ای، عمق متوسط سیل و زمان رسیدن هیدروگراف به نقطه اوج در نظر گرفته شد. پس از واسنجی خصوصیات حوضه، به واسنجی پارامترهای ذوب برف بر اساس رخداد ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۷۶ که در آن سطح وسیعی از حوضه از برف پوشیده شده بود، پرداخته شد. در نهایت صحت‌سنجی مدل بر اساس سیل فروردین ۱۳۷۷ انجام شد.

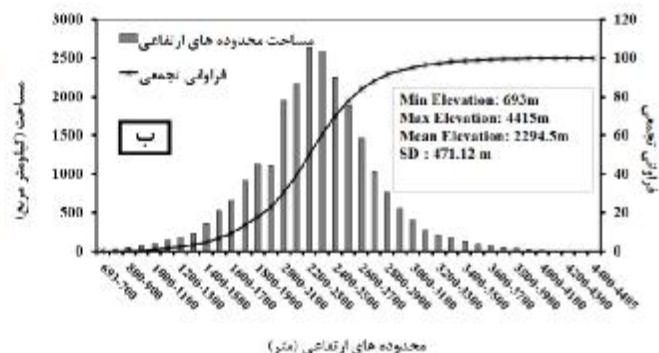
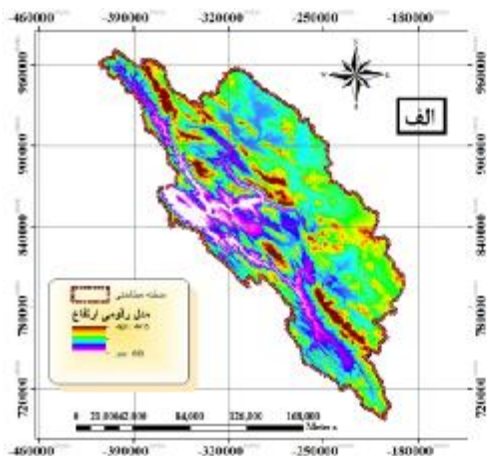
موجود در نزدیک‌ترین ایستگاه‌های برف‌سنجی به منطقه مطالعاتی محاسبه شد. بدین منظور، ابتدا رابطه عمق آب معادل برف و ارتفاع بر اساس آمار وجود در این ایستگاه‌ها به دست آمد. سپس با محاسبه مقادیر روزانه ذوب برف با رابطه (۱)، میزان عمق آب معادل برف در هر یک از محدوده‌های ارتفاعی در شروع سیلاب‌های مورد بررسی به دست آمد (رنگو و مارتینک، ۱۹۹۸).

$$M = a.(T - T_b) \quad (1)$$

که در آن عمق آب حاصل از ذوب برف (میلی‌متر)،  $T$  درجه حرارت متوسط روزانه (درجه سلسیوس)،  $T_b$  درجه حرارت پایه (درجه سلسیوس) که دمای بیشتر از آن سبب ذوب برف می‌شود و ضریب درجه-روز (میلی‌متر بر درجه سلسیوس) است. ذوب برف فقط در حداصل محدوده خط برف و منطقه‌ای که در آن عمق آب معادل برف و دما برابر صفر است، رخ می‌دهد. پس ابتدا، محدوده مستعد ریزش برف در هر یک از روزهای مورد بررسی تعیین و سپس محاسبات ذوب برف انجام شد.

### نتایج و بحث

بررسی نقشه هیپسومتریک با محدوده‌های ارتفاعی ۱۰۰ متری نشان داد که محدوده ارتفاعی در منطقه مطالعاتی در حداصل ۶۹۳ تا ۴۴۱۵ متر است (شکل ۲). همچنین بر اساس منحنی فراوانی مساحت، ۲۲ درصد از کل منطقه مطالعاتی در محدوده ارتفاعی ۶۹۳ تا ۲۰۰۰ متر، ۷۰ درصد در محدوده ارتفاعی ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر و فقط هشت درصد در محدوده ارتفاعی بالاتر از ۳۰۰۰ متر قرار دارد (شکل ۲).



شکل ۲- مدل رقومی ارتفاع رادار و مساحت محدوده‌های ارتفاعی ۱۰۰ متری در نقشه هیپسومتریک منطقه مطالعاتی

یاسوج استفاده شد. با استفاده از این الگوها، الگوی بدون بعد حرارت در هر ایستگاه به دست آمد.

### درجه حرارت بحرانی و ضریب درجه روز

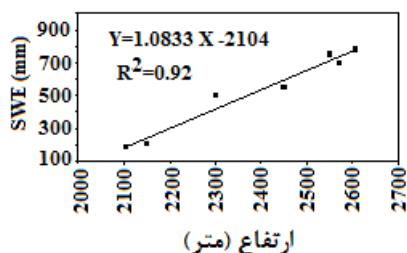
برای شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف، به واسنجی و صحت‌یابی دو پارامتر مهم درجه حرارت بحرانی و ضریب درجه روز در منطقه پرداخته شد. درجه حرارت بحرانی برای تعیین نوع بارش (باران یا برف) و تعیین محدوده‌ای ریزش برف به کار می‌رود. بررسی منابع مختلف نشان داد محدوده این پارامتر بین صفر تا سه درجه سلسیوس توصیه شده است. مدل هیدرولوژیکی SRM، مقدار آن را برابر ۰/۷۵ درجه سلسیوس پیشنهاد کرده است (رنگو و مارتینک، ۱۹۹۸). در این پژوهش پارامتر مذکور با فرض اولیه ۰/۷۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته و سپس با واسنجی مقدار آن تعیین شد.

ضریب درجه روز به طور معمول در طول فصل ذوب برف تغییر می‌کند و به تدریج از اوایل فصل ذوب برف به سمت پایان آن افزایش می‌یابد (رنگو و مارتینک، ۱۹۹۸). مقدار این پارامتر بر اساس توصیه رنگو و مارتینک (۱۹۹۸) به عنوان فرض اولیه برابر ۳/۲ میلی‌متر بر درجه سلسیوس در نظر گرفته و سپس واسنجی شد.

### محاسبات روزانه ذوب برف و تعیین SWE

از آنجایی که در منطقه مطالعاتی، به دلیل فقدان ایستگاه‌های برف‌سنجی، آمار مشاهده‌ای کافی برای عمق آب معادل برف (SWE) در ابتدای بازه شبیه‌سازی سیل با مدل HEC-HMS وجود ندارد، لذا در این پژوهش، مقادیر SWE در هر یک از محدوده‌های ارتفاعی بر اساس آمار

است که این نتیجه، نشان از دقت خوب روابط در نظر گرفته شده در منطقه مطالعاتی است.



شکل ۳- رابطه عمق آب معادل برف در روز ۱۸ اسفند ۷۶ بر اساس ایستگاه های برف سنجی موجود در منطقه مطالعاتی

رابطه عمق آب معادل برف و ارتفاع در ایستگاه های برف سنجی موجود در منطقه مطالعاتی در روز ۱۸ اسفند ۱۳۷۶ با ضریب همبستگی ۹۲ درصد در شکل ۳ نشان داده شد. بالا بودن ضریب همبستگی نشان از مناسب بودن مقادیر ارتفاع به عنوان یک متغیر کمکی در تعیین گستره برف انباشته در طول دوره محاسبات است.

روابط دما و ارتفاع نیز در روزهای مورد بررسی در جدول ۱ خلاصه شد. ضریب های همبستگی در تمام روزهای مورد بررسی بیشتر از ۹۵ درصد بوده و میزان مجذور مجموع مربعات خطا در آنها کمتر از یک درجه سلسیوس

جدول ۱- روابط دما و ارتفاع در روزهای ۱۸ تا ۲۸ اسفند ۱۳۷۶

RMSE (°C)	R <sup>۲</sup>	رابطه دما و ارتفاع	تاریخ
۰/۳۰	۰/۹۸	$T^* = (-0/0054) * (H) + 14/262$	۱۸ اسفند ۱۳۷۶
۰/۳۲	۰/۹۷	$T = (-0/0064) * (H) + 15/191$	۱۹ اسفند ۱۳۷۶
۰/۳۶	۰/۹۶	$T = (-0/0073) * (H) + 17/568$	۲۰ اسفند ۱۳۷۶
۰/۴۰	۰/۹۶	$T = (-0/0068) * (H) + 18/400$	۲۱ اسفند ۱۳۷۶
۰/۴۴	۰/۹۶	$T = (-0/0066) * (H) + 19/936$	۲۲ اسفند ۱۳۷۶
۰/۴۶	۰/۹۸	$T = (-0/0063) * (H) + 20/300$	۲۳ اسفند ۱۳۷۶
۰/۳۹	۰/۹۷	$T = (-0/0055) * (H) + 17/329$	۲۴ اسفند ۱۳۷۶
۰/۴۲	۰/۹۶	$T = (-0/0063) * (H) + 18/833$	۲۵ اسفند ۱۳۷۶
۰/۴۴	۰/۹۶	$T = (-0/0051) * (H) + 18/771$	۲۶ اسفند ۱۳۷۶
۰/۵۰	۰/۹۶	$T = (-0/0052) * (H) + 20/736$	۲۷ اسفند ۱۳۷۶
۰/۳۲	۰/۹۷	$T = (-0/0047) * (H) + 14/181$	۲۸ اسفند ۱۳۷۶

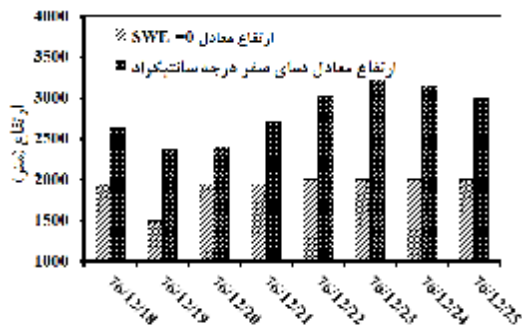
محدوده ها، تغییری در محدوده برف انباشته رخ نداده است. این مسئله در ارتفاعات بالاتر بیشتر محسوس است که دلیل آن را می توان به پایین تر بودن دما در ارتفاعات بالاتر و عدم رسیدن آن به حد دمای بحرانی برای شروع ذوب برف نسبت داد. بالاتر بودن مقادیر ذوب برف در برخی روزها و کاهش مقادیر برف انباشته در این روزها نتایج به دست آمده در شکل ۴ را تأیید می کند. همچنین نظر به اینکه بخش زیادی از منطقه مطالعاتی در محدوده ارتفاعی بالاتر از ۲۰۰۰ متر است (شکل ۲)، می توان ادعا کرد که بخش زیادی از بارش در منطقه مطالعاتی به شکل برف است که نتایج مربوط به محاسبات عمق آب معادل برف و گستره برف انباشته در روزهای مورد بررسی نیز، این نتیجه را تأیید می کند (شکل های ۵ و ۶).

شکل ۶- الف گستره برف انباشته در نظر گرفته شده در

با در دست داشتن روابط دما و ارتفاع و رابطه عمق آب معادل برف در شروع محاسبات (۱۸ اسفند ۱۳۷۶)، محدوده ارتفاعی ذوب برف در روزهای ۱۸ تا ۲۵ اسفند ۱۳۷۶ به دست آمد (شکل ۴). محاسبات ذوب روزانه برف با استفاده از محدوده های ذوب برف و مقادیر عمق آب معادل برف در محدوده های ارتفاعی ۱۰۰ متری انجام شد. این روند به صورت روزانه تکرار و در نهایت مقدار عمق آب معادل برف در شروع روز ۲۶ اسفند ۱۳۷۶ در محدوده های ارتفاعی ۱۰۰ متری به عنوان ورودی مدل تعیین شد. مقادیر SWE و ذوب برف در حواصل روزهای ۱۹ تا ۲۶ اسفند ۷۶ به ترتیب در شکل های ۵- الف و ۵- ب ارائه شده است.

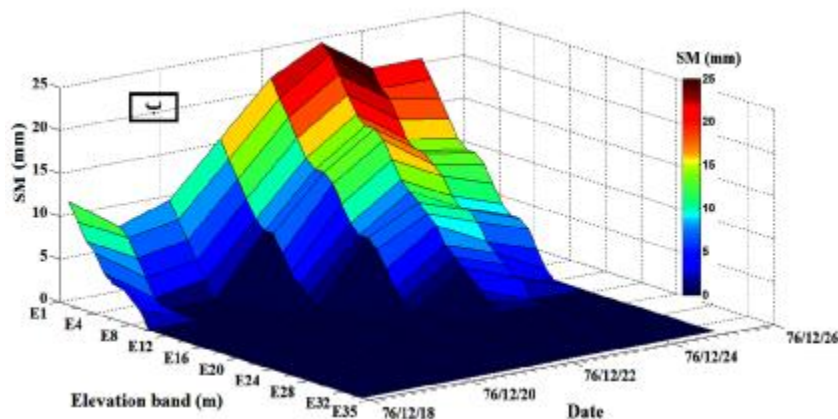
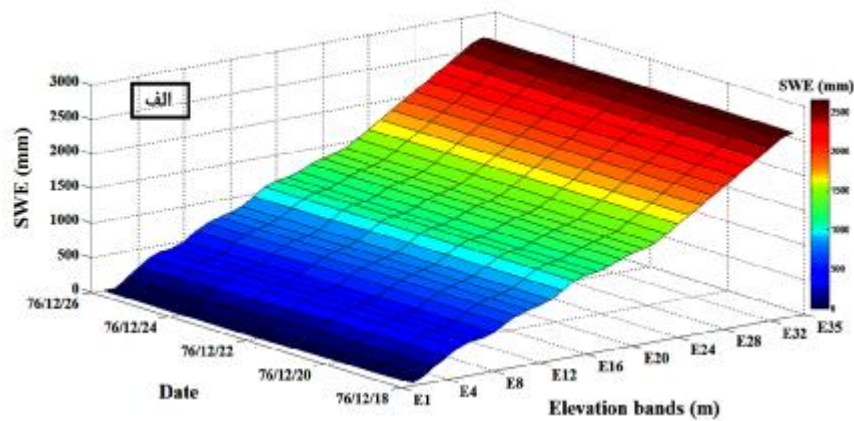
همان گونه از شکل ۵ برمی آید، مقدار ذوب برف در برخی از محدوده های ارتفاعی معادل صفر بوده و در این

۲۶ اسفند ۱۳۷۶ به عنوان ورودی مدل استفاده شده است.



شکل ۴- محدوده ذوب برف در روزهای ۱۸ تا ۲۵ اسفند ۱۳۷۶

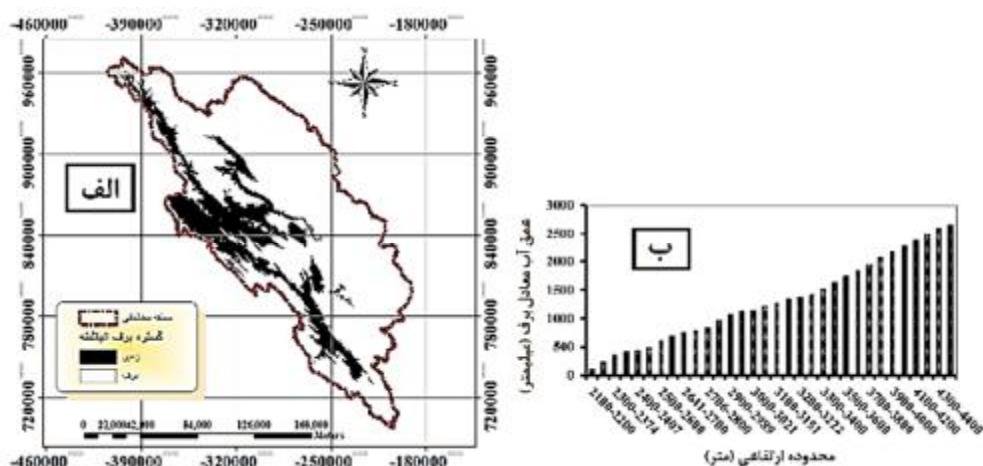
محیط GIS و شکل ۶- ب مقدار عمق آب معادل برف را در شروع رخداد مورد بررسی (۲۶ اسفند ۱۳۷۶) نشان می‌دهد. شکل ۶ گویای این واقعیت است که در روز ۲۶ اسفند ۱۳۷۶ احتمال وقوع برف محدود به ارتفاعات بالاتر از ۲۰۰۰ متر بوده و احتمال ذوب آن نیز برخلاف روز ۱۸ اسفند ۱۳۷۶ تا ارتفاع بالاتری وجود دارد. بررسی دمای روزانه منطقه مطالعاتی صحت نتایج به دست آمده را به اثبات می‌رساند. نظر به اینکه مدل HEC-HMS قادر به محاسبه ذوب روزانه برف در مدت وقوع سیل است، پس محاسبات عمق آب معادل برف در روزهای ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۷۶ و در نظر گرفتن آن در میزان رواناب خروجی به عهده مدل گذاشته و میزان عمق آب معادل برف در روز



E1=1943-2000	E6=2374-2400	E11=2641-2700	E16=2989-3000	E21=3200-3222	E26=3600-3700	E31=4100-4200
E2=2000-2100	E7=2400-2407	E12=2700-2706	E17=3000-3021	E22=3222-3300	E27=3700-3800	E32=4200-4300
E3=2100-2200	E8=2407-2500	E13=2706-2800	E18=3021-3100	E23=3300-3400	E28=3800-3900	E33=4300-4400
E4=2200-2300	E9=2500-2600	E14=2800-2900	E19=3100-3151	E24=3400-3500	E29=3900-4000	E34=4400-4500
E5=2300-2374	E10=2600-2641	E15=2900-2989	E20=3151-3200	E25=3500-3600	E30=4000-4100	

شکل ۵- مقادیر عمق آب معادل برف (SWE) (الف) و ذوب برف (SM) (ب) در روزهای ۱۸ تا ۲۶ اسفند





شکل ۶- گستره برف انباشته (الف) و مقدار عمق آب معادل برف در محدوده‌های ارتفاعی ۱۰۰ متری (ب) در شروع رخداد ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۷۶

معکوس در دبی حداکثر لحظه‌ای و عمق متوسط سیل داشته است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که هرچه شماره منحنی بیشتر و تلفات اولیه کمتر باشد، میزان عمق متوسط سیل و دبی حداکثر لحظه‌ای بیشتر خواهد شد که دلیلی بر صحت محاسبات است. تأثیر زمان تأخیر بر زمان بروز نقطه اوج هیدروگراف مهم است و با کاهش زمان تأخیر لحظه بروز نقطه اوج هیدروگراف زودتر رخ می‌دهد. مقادیر واسنجی شده پارامترهای حوضه در جدول ۲ ارائه شد.

قبل از تعیین پارامترهای ذوب برف در منطقه مطالعاتی، یکبار مدل بر اساس دو هیدروگراف سیل بدون واقعه برف در منطقه اجرا و بر اساس سیلاب دیگری صحت‌یابی انجام شد. بررسی همزمان تأثیر پارامترهای حوضه بر میزان تغییرات خصوصیات هیدروگراف سیل هنگام واسنجی نشان داد که در مجموع افزایش شماره منحنی سبب افزایش دبی حداکثر لحظه‌ای و عمق متوسط سیل و کاهش آن منتج به کاهش خصوصیات مذکور شده است. این در حالی است که افزایش و یا کاهش تلفات اولیه تأثیر

جدول ۲- مقادیر واسنجی شده خصوصیات منتخب حوضه

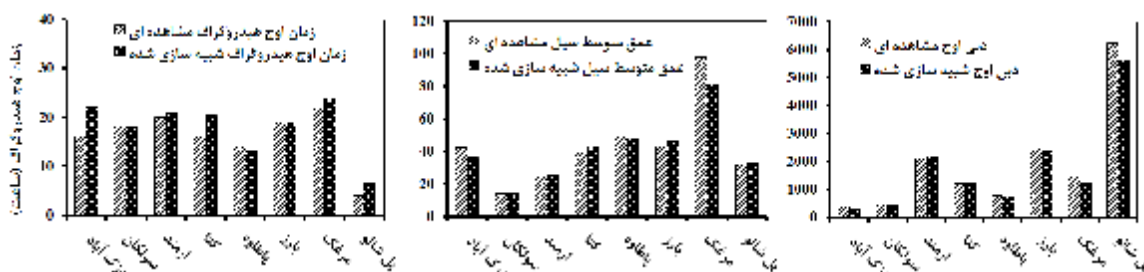
نام زیرحوضه	شماره منحنی	تلفات اولیه (میلی‌متر)	زمان تأخیر (دقیقه)
دزک آباد	۸۳/۴۲	۵/۰۲	۱۵۵
سولکان	۸۶/۱	۸/۲	۵۷۱/۱۲
ارمند	۹۱	۱۰/۶۵	۵۷۱/۱۲
کتا	۸۸/۲	۱۳/۵	-
پاژاوه	۷۹/۱	۱۳/۹۶	۵۶۰/۱
بارز	۷۹	۱۷	۲۰۰/۱۱
مرغک	۷۶/۶	۱۲	۵۰۰/۱۲
پل شالو	۷۹	۱۳/۵	۲۱۰

۲۰۰۰ متر در منطقه مطالعاتی پوشیده از برف بود، استفاده شد. ابتدا از مقادیر اولیه ۰/۷۵ درجه سلسیوس برای درجه حرارت بحرانی و ۳/۱ برای ضریب درجه روز استفاده شد. نتایج مربوط به واسنجی درجه حرارت بحرانی در تغییر مقادیر سه خصوصیت اصلی هیدروگراف سیلاب‌های خروجی در هر یک از زیرحوضه‌ها در منطقه

پس از واسنجی و صحت‌یابی پارامترهای حوضه بر اساس هیدروگراف‌های مشاهده‌ای، به واسنجی پارامترهای ذوب برف شامل درجه حرارت بحرانی و ضریب درجه روز پرداخته شد. بدین‌منظور، هیدروگراف ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۷۶ به عنوان یکی از مهم‌ترین سیلاب‌های واقع شده در حوضه کارون که در آن بخش وسیعی از ارتفاعات بالاتر از

افزایش درجه حرارت بحرانی زمینه لازم برای افزایش دبی اوج هیدروگراف در زیرحوضه ارمند را فراهم کرده است. این مسئله را می‌توان به مساحت نسبت داد. زیرحوضه ارمند با سطحی معادل ۶۳۴۷ کیلومترمربع، حدود ۲۶ درصد از سطح حوضه را به خود اختصاص داده و به طور متوسط، بین ۱/۶ تا ۱۶ برابر وسیع‌تر از سایر زیرحوضه‌های موجود در منطقه مطالعاتی است. افزایش مساحت زمینه لازم برای افزایش دبی حاصل از رواناب و ذوب برف را فراهم کرده است. همچنین نظر به اینکه عمق متوسط سیل تغییر چشم‌گیری نداشته است، این نتیجه سرعت خروج سیل از منطقه را افزایش داده و زمینه لازم برای کاهش زمان تأخیر را فراهم کرده است.

مطالعاتی در شکل ۷ و جدول ۳ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در زیرحوضه‌های سولکان، کتا، بارز، مرغک و پل‌شالو، بیشترین تأثیر را به ترتیب روی دبی حداکثر سیل و زمان تأخیر داشت. افزایش میزان ضریب درجه حرارت بحرانی از ۰/۵ به ۲/۵ درجه سلسیوس، سبب کاهش دبی اوج هیدروگراف و افزایش زمان رسیدن هیدروگراف به اوج شد. این نتیجه در حوضه پاتاوه نیز مشاهده می‌شود. افزایش درجه حرارت بحرانی سبب به تأخیر انداختن ذوب برف و باقیمانده برف انباشته در بازه زمانی طولانی‌تری در سطح حوضه می‌شود. به این ترتیب، سهم رواناب غیرمستقیم در دبی خروجی از حوضه کاهش یافته و در نهایت، منتج به کاهش دبی اوج هیدروگراف سیل می‌شود. با این وجود نتایج نشان داد که



شکل ۷- پارامترهای هیدروگراف سیل ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۷۶ بعد از واسنجی پارامترهای ذوب برف

جدول ۳- متوسط تغییرات خصوصیات هیدروگراف سیل ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۷۶

ایستگاه هیدرومتری	دزک آباد	سولکان	ارمند	کتا	پاتاوه	بارز	مرغک	پل شالو
متوسط تغییرات دبی شبیه‌سازی شده (%)	-۴/۷	-۱۷/۹	۱/۷	-۴/۴	-۳/۷	۳/۴	-۱/۴	-۳۳/۴
RMSE (m <sup>3</sup> )	۱۶	۲	۱۳	۴۸	۲۴	۱۰۰	۲۶	۳۳۰
R <sup>2</sup>	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۲
متوسط تغییرات عمق شبیه‌سازی شده	۲/۵	-۱۴/۲	۱۳/۸	-۲/۶	۱۲/۵	۳/۵	-۰/۳۵	-۱۹/۸
RMSE (mm)	۰/۸	۰/۳	۰/۸	۱/۴	۰/۶۴	۲/۵	۵	۰/۲
R <sup>2</sup>	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۹
متوسط تغییرات زمان اوج هیدروگراف (%)	۲۵/۱	۰/۶۹	-۲۱/۱	۱/۲	۹/۲	-۱/۲	۰/۷۴	۱۶/۴
RMSE (hr)	۰/۰۴	۲/۵	۰/۲۲	۱/۲۵	۱/۰۵	۴	۱/۸۳	۱/۰۷
R <sup>2</sup>	۰/۵۷	۰/۹۹	۰/۸۹	۰/۵۶	۰/۸۶	۰/۵	۰/۸۲	۰/۶۳

\* مقدار منفی نشان دهنده کاهش پارامتر و مقدار مثبت افزایش آن بعد از واسنجی است.

کمی بوده است. بر اساس بررسی که از سوی پرهمت (۱۳۸۱) در حوضه خرسان، که بخشی از حوضه کارون است، انجام شده است، مقدار درجه حرارت بحرانی بر اساس توصیه مدل SRM (رنگو و مارتینک، ۱۹۸۸) برابر با ۰/۷۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. در این بررسی، ضمن واسنجی این پارامتر مشخص شد که مقادیر

جدول ۴ خصوصیات هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده سیلاب ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۷۶ قبل و بعد از واسنجی درجه حرارت بحرانی را نشان می‌دهد. ارزیابی نتایج مدل بر اساس شاخص‌های ارزیابی RMSE و R<sup>2</sup> نشان داد که اختلاف خصوصیات مورد نظر در دو هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در هر سه خصوصیت بسیار



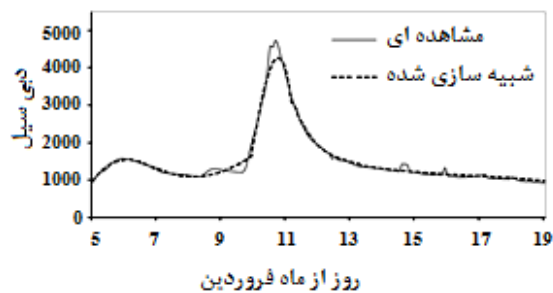
مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده سیلاب با درجه حرارت بحرانی ۲/۵ درجه سلسیوس کم است. پس می‌توان بیان کرد که مقدار واسنجی شده درجه حرارت بحرانی (۲/۵ درجه سلسیوس) برای حوضه آبریز کارون مناسب‌تر از سایر مقادیر گزارش شده در بررسی‌های دیگر است.

دبی حداکثر لحظه‌ای و عمق متوسط سیل در نهایت، به ترتیب با اختلاف ۱۴/۷ و ۱۴/۹ درصد نسبت به هیدروگراف مشاهده‌ای شبیه‌سازی شده است. در حالی که این اختلاف در خروجی حوضه این پژوهش به ترتیب برابر ۴/۵ و ۳/۴ درصد است. همچنین بررسی شاخص‌های آماری RMSE و  $R^2$  نشان از آن است که این اختلاف بین

جدول ۴- مقایسه خصوصیات هیدروگراف سیل ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۷۶ در خروجی حوضه قبل و پس از واسنجی پارامترهای برف

پارامترهای حوضه	دبی حداکثر لحظه‌ای	عمق متوسط سیل	زمان رسیدن هیدروگراف به اوج
قبل از واسنجی	۵۶۰۰	۳۲/۵	۱۹ مارس ۱۹۹۸ ساعت ۰۲:۵۰
RMSE	۶۳۰	۰/۶	۲/۷۵
$R^2$	۰/۷۰	۰/۹۰	۰/۵۳
بعد از واسنجی	۵۹۸۰	۳۱/۷	۱۹ مارس ۱۹۹۸ ساعت ۰۵:۰۴
RMSE	۳۳۰	۰/۲	۱/۰۷
$R^2$	۰/۹۲	۰/۹۹	۰/۷۳

است. بر اساس این جدول، مشخص است که اختلاف خصوصیات هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در هر سه مورد کمتر از ۵ درصد است. به این ترتیب، مقادیر واسنجی شده پارامترهای درجه حرارت بحرانی و ضریب درجه روز در منطقه مطالعاتی مقبول بوده و می‌توان در سایر پژوهش‌ها نیز از آن استفاده کرد.



شکل ۹- هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده واقعه فروردین ۱۳۷۷

پس از تعیین مقدار بهینه درجه حرارت بحرانی، در ادامه ضریب درجه-روز نیز واسنجی شد. مقدار این پارامتر در پیش فرض اولیه برابر با ۳/۲ میلی‌متر بر درجه سلسیوس روز تعریف شد. محدوده این پارامتر در منطقه مطالعاتی در منابع مختلف بین سه تا ۳/۲ میلی‌متر بر درجه سلسیوس روز تعریف شده است. نتایج به دست آمده با اجرای مدل به ازای مقادیر متفاوت ضریب درجه روز نشان داد که تغییر مقدار این پارامتر تأثیر چندانی روی نتایج حاصل نداشته و مقدار پیش فرض ۳/۲ برای آن، بسیار مناسب‌تر از سایر مقادیر است. برای بررسی صحت پارامترهای واسنجی شده، سیلاب دیگری که تحت بارش فروردین ۱۰ تا ۱۰ فروردین سال ۱۳۷۷ در فاصله زمانی ۹ تا ۱۴ فروردین ۱۳۷۷ در خروجی پل شالو مشاهده شده بود، با استفاده از پارامترهای واسنجی شده، شبیه‌سازی شد. هیدروگراف سیل مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل HEC-HMS در شکل ۹ و خصوصیات هیدروگراف‌های به دست آمده در جدول ۵ ارائه شده

جدول ۵- خصوصیات هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در سیلاب فروردین ۷۷

خصوصیات هیدروگراف	دبی حداکثر لحظه‌ای (مترمکعب در ثانیه)	عمق متوسط سیل (میلی‌متر)	زمان رسیدن هیدروگراف به اوج
مشاهده‌ای	۴۷۳۶	۲۵	۱۰ فروردین ۷۷
شبیه‌سازی شده	۴۵۳۰	۲۳/۹	۱۰ فروردین ۷۷
RMSE	۲۰۶	۱/۱	-
$R^2$	۰/۹۵	۰/۹۴	-

5. Cudennec C. Leduc C. and Koutsoyiannis D. 2007. Dryland hydrology in Mediterranean regions-a review. *Journal of Hydrological Science*. 52(6): 1077-1087.
6. Emerson H. Welty C. and Traver RG. 2003. Application of HEC-HMS to Model the Additive Effects of Multiple Detention Basins Over a Range of Measured Storm Volumes, *World Water and Environment Resource Congress and Related Symposia*. 23-26 June 2003, United State.
7. Khazaei E. Spink AEF and Warner JW. 2003. A catchment water balance model for estimating groundwater recharge in arid and semi-arid regions of south-east Iran. *Journal of Hydrogeol*. 11(3): 333-342.
8. Leavesley GH. 1989. problems of Snowmelt Runoff Modeling, *Hydrological Sciences Journal*. 34(6): 617-634.
9. Martinec J. and Rango A. 1986. Parameter values for snowmelt runoff modeling, *Journal of Hydrology*. 84:197-219.
10. Maskey Sh. Guinot V. Price RK. 2004. Treatment of Precipitation Uncertainty in Rainfall-Runoff Modeling: A Fuzzy Set Approach, *Advances in Water Resources*. 27(9): 889-898.
11. Moges SA. Katambara and Bashar K. 2003. Decision Support System of Estimation of Potential Evapo-Transpiration in Pangani Basin, *Physics and Chemistry of The Earth*. 28(20-27): 927-934.
12. Neary VS. Asce M. Habib E. Fleming M. 2004. Hydrologic Modeling With NEXRAD Precipitation in Middle Tennessee. *Journal of Hydrologic Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:5(339).
13. Rango AVV. Salomonson and Foster JL. 1977. Seasonal stream flow estimation in the region employing meteorological satellite snow cover observation, *Water Resources Research*. 13(1): 109-112.
14. Rango A. and Martinec J. 1998. The snowmelt runoff (SRM) users manual version 4, <http://hrdrolab.arsusda.gov/pub/srm/srm4.pdf>.
15. Slater AG and Clark MP. 2006. Snow data assimilation via an ensemble Kalman filter. *Journal of Hydrometeorology*. 7(3):478-493.

## نتیجه‌گیری

نظر به اهمیت تعیین پارامترهای ذوب برف در مناطق کوهستانی، در این بررسی، ضمن شبیه‌سازی چند سیلاب مهم در حوضه کارون مقادیر ضریب درجه-روز و درجه حرارت بحرانی برای منطقه حوضه آبریز رودخانه کارون تا خروجی پل شالو واسنجی و صحت یابی شده و به ترتیب برابر ۳/۲ میلی‌متر بر درجه سلسیوس روز و ۲/۵ درجه سلسیوس به دست آمد. بررسی خصوصیات هیدروگراف سیل‌های منتخب در این بررسی در خروجی منطقه مطالعاتی (پل شالو) و ارزیابی مقادیر به دست آمده بر اساس شاخص‌های آماری RMSE و  $R^2$  نشان داد که با واسنجی پارامتری درجه حرارت بحرانی و ضریب درجه-روز به عنوان پارامترهای مؤثر بر رواناب حاصل از ذوب برف برازش خوبی بین هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسباتی با مدل HEC-HMS حاصل شده است. پس می‌توان از این مقادیر در برآورد هیدروگراف سیل در مناطقی با شرایط رطوبتی مشابه منطقه مطالعاتی نیز استفاده کرد. همچنین در دست داشتن مقادیر بهینه شماره منحنی؛ زمان تأخیر و تلفات اولیه به عنوان پارامترهای مؤثر در پیدایش رواناب مستقیم در حوضه می‌توان برازش دقیقی بین هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسباتی با مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف و بارش در منطقه ایجاد کرد.

## منابع

۱. پرهت ج. ۱۳۸۴. بررسی کاربرد مدل SRM در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*. ۱(۱): ۱-۱۱.
2. Boudhar A. Hanichi L. Boulet G. Duchemin B. Berjamy B. and Chehbouni A. 2009. Evaluation of the snowmelt runoff model in the Moroccan High Atlas Mountains using two snow-cover estimates. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*. 54(6): 1094-1113.
3. Ceballos-Barbancho A. Morán-Tejeda E. Luengo-Ugidos MA and Llorente-Pinto JM. 2008. Water resources and environmental change in a Mediterranean environment: the south-west sector of the Duero River basin (Spain). *Journal of Hydrology*. 351(1): 126-138.
4. Clark MP. Slater AG. Barrett AP. Hay LE. McCabe GJ. Rajagopalan B. and Leavesley GH. 2006. Assimilation of snow covered area information into hydrologic and land surface models. *Water Resource*. 29(8): 1209-1221.