

تغییرات سهم رواناب ناشی از ذوب برف با ارتفاع در حوضه های آبخیز

بهرام ثقفیانⁱ، حمید گهرنژادⁱⁱ، احسان اسدیⁱⁱⁱ

چکیده

رودخانه‌های دائمی در ایران که از مناطق کوهستانی سرچشمه می‌گیرند، طی فصول خشک دبی پایه خود را از رواناب ناشی از ذوب برف در ارتفاعات تامین می‌کنند. در مطالعات مربوط به بارش-رواناب، افزایش ارتفاع با دو پدیده همراه است. با افزایش ارتفاع دمای هوا کاهش یافته و این کاهش دما باعث تغییر نوع ریزش‌های جوی در مناطق بالاتر از خط دمای آستانه، از باران به برف می‌گردد. همچنین با فرض شکل هرمی کوهها، با افزایش ارتفاع مساحت کاهش می‌یابد که به نوبه خود حجم ذخیره برف را در کوهستان کاهش می‌دهد. با توجه به ضرورت بررسی اثرات تغییرات ارتفاع بر رواناب ناشی از ذوب برف، رودخانه کارون تا قبل از سد کارون^۱، به عنوان حوضه تحقیق انتخاب گردید. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سطوح تحت برف در منطقه در یک دوره تاریخی استخراج شد. منطقه با بکارگیری نرم افزار GIS به پنج ناحیه ارتفاعی تقسیم گردید و مساحت متناظر با هر دامنه ارتفاع تعیین شد. در ادامه مدل هیدرولوژیکی (SRM (Snowmelt Runoff Model) با وارد کردن متغیرهای اقلیمی موردنیاز برای دو دوره آماری شامل یک دوره ترسالی (۹۲-۱۹۹۱) و خشکسالی (۹۳-۱۹۹۲) واسنجی و اعتباریابی شد. نتایج نشان داد این مدل در پیش بینی رواناب حاصل از ذوب برف در جریان‌های روزانه حوضه‌های برف‌گیر فاقد داده‌های زمینی، با استفاده از سطح پوشش برف حاصل از تصاویر ماهواره‌ای قابلیت خوبی دارد. سپس سهم هیدروگراف رواناب حاصل از ذوب برف از طریق وارد کردن سطح برف در طول دوره مورد مطالعه و با حذف (به صورت مصنوعی) ریزش باران شبیه‌سازی شد. بررسی تغییرات رواناب ذوب برف بازای تغییرات ارتفاع نشان داد که در حوضه مورد تحقیق با افزایش ارتفاع ذوب برف نقش بیشتری در رواناب ایفاء می‌کرد. با استفاده از نتایج مدل، آبدهی ویژه ناشی از ذوب برف در دو دوره آماری ترسالی و خشکسالی به ترتیب برابر با (m^3/km^2) ۰/۷۰ و ۰/۲۳ بدست آمد. حجم رواناب ناشی از ذوب برف نیز برای دو سال آبی تر (۹۲-۹۱) و خشک (۹۲-۹۳) بترتیب برابر ۱۶۸۳۳/۹ و ۵۴۹۲/۵ میلیون مترمکعب برآورد گردید.

کلمات کلیدی: ارتفاع ذوب برف، تصاویر ماهواره‌ای، مدل SRM، حوضه رودخانه کارون

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۶/۱۸

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۲/۱۰

ⁱ نویسنده مسئول، عضو هیات علمی دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی،

b.saghafian@gmail.com

ⁱⁱ دانشجوی دکتری تخصصی عمران آب- واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

ⁱⁱⁱ کارشناس ارشد عمران آب- واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

سازمان هواشناسی جهانی (WMO) برای شبیه سازی رواناب مورد تایید قرار گرفته است (WMO, 1986). مدل SRM برای سه هدف متفاوت کاربرد دارد، این سه هدف شامل شبیه سازی جریان روزانه در فصل ذوب برف در یک سال و یا در سال‌های متوالی، پیش بینی رواناب در کوتاه مدت و فصلی و ارزیابی پتانسیل تاثیر تغییرات اقلیمی بر روی رواناب و سطح پوشش برف فصلی می باشد (Rango و Martinec, 1989).

مدل‌های ذوب برف به دو دسته کلی مدل‌های درجه-روز و مدل‌های بیلان انرژی تقسیم می‌شوند. شبیه سازی ذوب برف در شرایط معین اقلیمی و فیزیوگرافی تابعی از داده‌های قابل دسترس، ویژگیهای منطقه‌ای، توسعه مدل ذوب برف و کاربرد این مدل‌ها می‌باشد. مشکلات اصلی شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف مربوط به داده های قابل دسترس، کیفیت داده و نیز امکان برون‌یابی داده ها با دقت کافی می‌باشد (Leavesley, 1983). جهت پیش بینی رواناب ناشی از ذوب برف داده‌های مهم مورد نیاز شامل وسعت و تغییرات پوشش برف (توزیع مکانی و زمانی سطح تحت پوشش برف)، بارندگی و درجه حرارت است (US Army Corps of Engineers, 1998). با وجود تغییرات زیاد در توزیع زمانی و مکانی برف انباشته، اطلاعات مشاهده‌ای زمینی برف اندک و معمولاً به نواحی با ارتفاع کمتر محدود می‌شود. این موضوع کاربرد سنجش از دور در تامین بخشی از اطلاعات برف را از دهه‌های پیش اجتناب ناپذیر نموده است. بعلاوه اینکه مدل‌های پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف نیاز به اطلاعاتی دارند که این اطلاعات با فقر آمار در مناطق برفگیر حوضه‌های آبریز عمدتاً قابل دسترس و یا تامین نیستند. با این وصف تکنیک سنجش از دور به عنوان ابزاری جدید و مفید برای بدست آوردن داده‌های برف در پیش بینی رواناب حاصل از ذوب برف مطرح می‌باشد (Gurney & Engman, 1991)

هدف این تحقیق جداسازی رواناب حاصل از ذوب برف از رواناب حاصل از بارش مستقیم (باران) و تعیین تغییرات سهم رواناب ذوب برف با ارتفاع در طول مسیر رودخانه با استفاده از داده های سنجش از دور و مدل هیدرولوژیکی SRM می‌باشد. کارایی و توانایی این مدل در پیش بینی رواناب حاصل از ذوب برف در منطقه مورد مطالعه نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. جداسازی سهم ذوب برف از کل رواناب با کمک مدل SRM برای اولین

محدودیت منابع آب و تقاضای روزافزون آب و بخصوص خشکسالی‌های اخیر، ضرورت برآورد دقیق‌تر منابع آب موجود را بیش از پیش ضروری می‌کند. در مناطق کوهستانی که سرچشمه رودخانه‌های پرآب و دائمی محسوب می‌شود، بخش عمده ریزش‌ها بصورت برف می‌باشد. ویژگی اصلی ریزش در مناطق کوهستانی این است که بارش‌ها مستقیماً و بلافاصله به رواناب تبدیل نمی‌شوند. برف حجم عظیمی از رواناب حوضه های کوهستانی را در غرب و شمالغرب ایران تشکیل می‌دهد که در طی فصول بهار و تابستان ذوب شده و جریان را در رودخانه تامین می‌کند. معمولاً پس از بارش در مناطق مرتفع و سرد کوهستانی، برف در سطح زمین انباشته می‌شود و در فصول گرم با افزایش دما به تدریج ذوب می‌شود. رواناب حاصل از ذوب برف در تامین منابع آب آشامیدنی و کشاورزی و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی موثر است که در برخی موارد نیز منشاء بروز سیلاب‌های مخرب می‌باشد. لذا شناخت دقیق ویژگی‌های ذوب برف در زمان و مکان و پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف بمنظور مدیریت صحیح و موثر منابع آب حائز اهمیت می‌باشد.

میزان ذوب برف تابع پیچیده‌ای از خصوصیات فیزیکی برف و مقدار انرژی حرارتی موجود می‌باشد. آشکارسازی و تعیین ویژگیهای مختلف برف و یخ با استفاده از داده های سنجش از دور روش نوینی را در بدست آوردن پارامترهای مورد نیاز هیدرولوژی پدید آورده است. با توجه به شرایط صعب‌العبور مناطق کوهستانی و یخچالی، تعداد ایستگاههای هواشناسی در این مناطق برای تعیین این ویژگیها ناکافی است. بنابراین استفاده از داده‌های سنجش از دور گزینه جایگزین مناسبی به نظر می‌رسد.

مدل (snowmelt runoff model) SRM از جمله مدل‌های هیدرولوژیکی است که به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان روزانه در حوضه‌ها و رودخانه‌های کوهستانی متأثر از ذوب برف استفاده می‌شود. این مدل برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ برای حوضه‌های کوچک در اروپا توسعه یافت و با پیشرفت سنجش از دور برای حوضه‌های بزرگتر (تا ۱۲۰۰۰۰ کیلومترمربع) نیز بکار گرفته شد (Rango و Martinec, 1998). این مدل توسط

بار مورد تحقیق قرار گرفته و گزارش می‌شود.

۲- سوابق تحقیق

در سال ۱۹۹۰، Lettenmaier و Gan نشان دادند که در حوضه‌های غربی آمریکا، در اثر افزایش اندک دما، زمان حداکثر جریان رواناب ناشی از ذوب برف زودتر اتفاق می‌افتد و تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد (Gan & Lettenmaier, 1990).

۸ سال بعد، Mitchell و DeWalle با بکارگیری پوشش برف کاربرد مدل SRM را بررسی نمودند و نشان دادند کاربرد مدل برای منطقه فونداکریک مناسب می‌باشد (DeWalle & Mitchell, 1998).

در ادامه تحقیقات Sorman و همکاران در سال ۲۰۰۱ مدل SRM را در حوضه‌های دجله و فرات بکار گرفته و نتیجه‌گیری کردند که در این شرایط، مدل با در صد اختلاف حجم به ترتیب ۰/۲۵ تا ۲/۴۷ در صد و درجه برآزش به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۵ دبی را برآورد می‌کند (Sorman et al., 2001).

در همین سال Gomez Landesa و Rango با استفاده از داده‌های سنجش از دور و بکارگیری SRM برای پیش‌بینی رواناب در ۴۲ حوضه در اسپانیا نتیجه‌گیری نمودند خطای مدل در پیش‌بینی حجمی در حوضه‌های مختلف بین ۶/۹ تا ۲۵/۳ درصد می‌باشد (Rango & Gomez Landesa, 2001).

پرهمت و همکاران نیز در سال ۲۰۰۵ به پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل‌های هیدرولوژیکی SRM و HEC-HMS در حوضه خراسان از زیر حوضه‌های کارون پرداختند. آنها عنوان کردند مدل SRM بر خلاف ادعای طراحان مدل، مدل نیاز به واسنجی پارامترها دارد (پرهمت و همکاران، ۲۰۰۵).

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، Saghafian و Davtalab در سال ۲۰۰۷ مقدار میانگین آب معادل برف (SWE) را در حوضه کارون حدود ۱۲۵/۹ میلی متر دست آوردند (Saghaifian & Davtalab, 2007).

قربانی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از مدل SRM و GCM اثر تغییر اقلیم بر زمان اوج رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های دز و کارون را مطالعه کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که در نیم قرن آینده تحت شرایط

تغییر اقلیم با توجه به افزایش دمای زمستان مقدار ذوب برف بلافاصله بعد از بارش برف افزایش خواهد یافت و بیشترین مقدار دبی این فصل اتفاق می‌افتد (قربانی‌زاده و همکاران، ۲۰۰۸).

Immerzeel و همکاران در سال ۲۰۰۹ رواناب و پوشش برف را در حوضه رودخانه هیمالیا با استفاده از مدل SRM و سنجش از دور شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف را در هیمالیا و تاثیر کاهش پوشش برف و عقب نشینی یخچالها را روی دبی بالادست رودخانه Lndus مورد مطالعه قرار گرفت. محققین اظهار داشتند که افزایش ذوب برف ناشی از افزایش دمای حاصل از تغییر اقلیم جهانی است (Immerzeel et al., 2009).

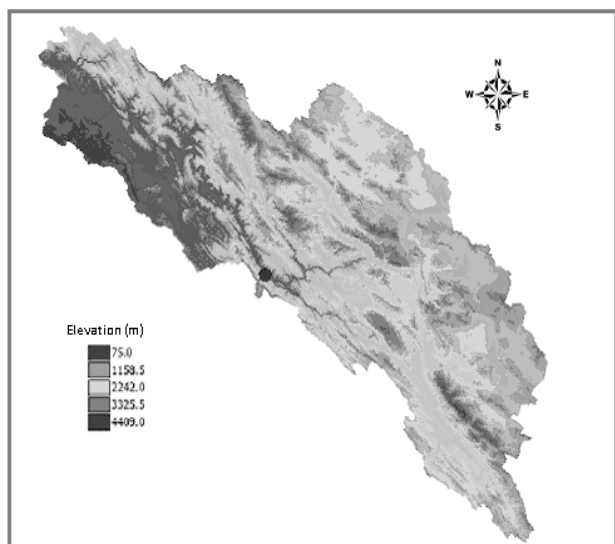
با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در پیشینه تحقیقات، تاکنون بررسی جامعی در تغییرات رواناب ناشی از ذوب برف در طول رودخانه و با تغییرات ارتفاع صورت نگرفته است. همچنین تفکیک سهم ذوب برف به ندرت انجام گرفته است. تلاش این تحقیق یافتن راهی برای این تفکیک در قالب عملکرد مدل شبیه‌سازی SRM و بررسی تغییرات رواناب ذوب برف با ارتفاع می‌باشد.

۳- منطقه تحقیق

حوضه آبریز کارون بزرگ در جنوب غربی ایران یکی از بزرگترین حوضه‌های آبریز رتبه دو می‌باشد که طیف ارتفاعی گسترده‌ای از جلگه‌های پست ساحلی تا مناطقی که فراز آنها از ۴۰۰۰ متر بیشتر است را در برمی‌گیرد. این حوضه در ایستگاه هیدرومتری پل‌شالو کمتر از نیمی از مساحت حوضه کارون بزرگ را (حدود ۲۴ و ۰۰۰ کیلومترمربع) به خود اختصاص می‌دهد. این حوضه به ارتفاعات زردکوه واقع در شمال و شمال غربی و کوهستانهای کم ارتفاع شرقی مشرف به حوضه آبریز مرکزی ایران محدود می‌شود و بخش‌هایی از استان اصفهان و چهارمحال و بختیاری را زیر پوشش قرار می‌دهد. حوضه آبریز رودخانه کارون در بالادست پل شالو به دنبال سیستم کوهستانی بخش مرکزی زاگرس توسط ارتفاعات مختلفی که در جهات گوناگونی گسترش یافته‌اند، احاطه شده است. در شکل ۱ موقعیت حوضه مورد تحقیق در کشور و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مشخص شده است.

پدیده برف در مناطق مرتفع شرقی و میانی حوضه،

های شیب و جهت شیب برای منطقه تهیه شدند. تقسیم حوضه به نواحی ارتفاعی برای مدل رواناب و ذوب برف ضروری می‌باشد. براین اساس با استفاده از نقشه DEM (شکل ۲) و منحنی ارتفاع-مساحت، حوضه به ۵ ناحیه مختلف ارتفاعی تقسیم گردید. درصد مساحت هر ناحیه از کل شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۲): نقشه DEM حوضه آبریز کارون تا محل ایستگاه پل-شالو

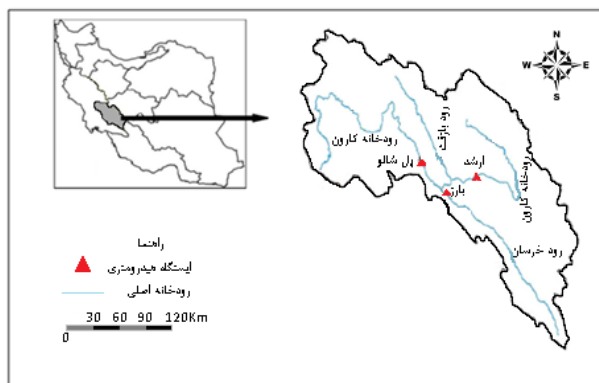
در تحقیقات گذشته که توسط پرهمت و همکاران (۱۳۸۴) و نیز Ghanbarpour و همکاران در سال ۲۰۰۷ صورت پذیرفت، اطلاعات سطح پوشش برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بصورت روزانه استخراج شده‌است که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته‌است (Ghanbarpour et al., 2007).

مدل (SRM (Snowmelt runoff model): برای تفکیک شبیه‌سازی مجموع رواناب ناشی از باران و ذوب برف مورد استفاده قرار گرفت. SRM مدلی مفهومی است که بر اساس روش درجه-روز استوار شده است. در این مدل رواناب ناشی از ذوب برف و بارش باران به طور روزانه محاسبه گردیده و به دبی جریان فروکش (دبی پایه) اضافه می‌شود. سپس با لحاظ نمودن ضریب انتقال به دبی خروجی از حوضه تبدیل می‌گردد. عوامل هواشناسی مورد نیاز این مدل، سطح تحت پوشش برف، بارندگی و درجه حرارت می‌باشد (Rango & Martinec, 1998).

رابطه‌ای که مدل بر مبنای آن محاسبات رواناب ناشی از ذوب برف را انجام می‌دهد بصورت زیر می‌باشد:

$$Q_{n+1} = [C_{s_n} a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{Rn} P_n] \times \frac{A10000}{86400} (1 - K_{n+1}) + Q_n K_{n+1} \quad ()$$

حدود نیمی از بارش را شامل می‌گردد. به عنوان نمونه نسبت برف از کل بارش در ارتفاعات کوه‌رنگ در سالهای مختلف بین ۳۴ تا ۵۹ درصد متفاوت بوده است. به این دلیل در هیدروکلیماتولوژی منطقه، اثرات تلفیقی برف و باران شایان توجه ویژه است (وزارت نیرو، ۱۳۸۴).



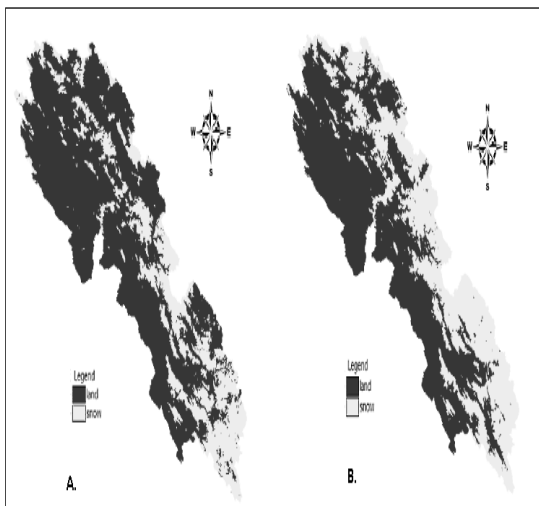
شکل (۱): موقعیت حوضه کارون در ایران و جابجایی ایستگاه‌های هیدرومتری در این حوضه

با توجه به نقش مهم برف در برنامه‌ریزی منابع آب، ۳۲ ایستگاه برف‌سنجی تا سال ۱۳۶۳ (سال احداث آخرین ایستگاه برف‌سنجی) در حوضه کارون احداث شد. بوجود آمدن عوارض مصنوعی در مجاورت بعضی ایستگاهها باعث مشکلاتی در دقت اندازه‌گیری گردید. بنابراین در طول عملیاتی در تابستان ۱۳۸۰ جابجایی لازم در محل تعدادی از ایستگاهها داده شد بطوریکه ۱۳ ایستگاه از مجموع ۳۲ ایستگاه به محل‌های جدید انتقال یافت. در حال حاضر شبکه برف‌سنجی حوضه کارون متشکل از ۴۵ ایستگاه در محدوده ارتفاعی ۲۷۰۰ - ۱۵۰۰ متر است. مرتفع‌ترین و کم ارتفاع‌ترین ایستگاه به ترتیب ساخت قباد در منطقه سمیرم با ۲۷۰۰ متر و پاتاوه در منطقه یاسوج با ارتفاع ۱۵۲۲ متر است. بیشترین تراکم شبکه با ۸ ایستگاه در محدوده ارتفاعی ۲۶۰۰ - ۲۴۰۰ متر است ولی در ارتفاعات ۱۷۰۰-۱۸۰۰ متر فاقد ایستگاه برف‌سنجی وجود ندارد. در اکثر نقاط مرتفع حوضه چه در بخش شمال در زیر حوضه‌های کارون‌علیا و بازفت و چه در بخش جنوبی زیرحوضه خرسان مقدار قابل توجهی از بارشها به صورت بارش برف می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۸۴).

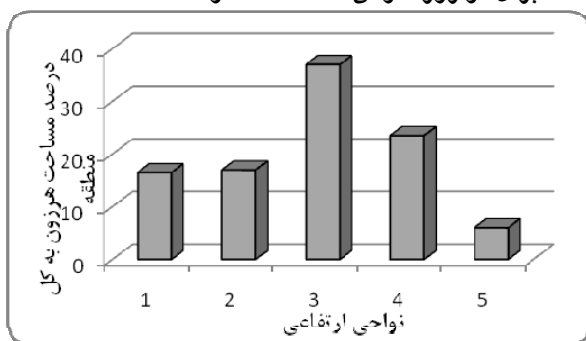
۴- روش تحقیق

در تحقیق حاضر ابتدا با رقومی کردن منحنی‌های میزان در محیط GIS، مدل رقومی ارتفاعاتی (DEM) تهیه گردید. در ادامه با استفاده از نقشه DEM به ترتیب لایه

دبی روزانه می‌باشند.



شکل (۴): نقشه سطح پوشش برف در حوضه رودخانه کارون برای دو روز متوالی A. 31/1/93 و B. 1/2/93



شکل (۵): درصد مساحت نواحی ارتفاعی مختلف به مساحت حوضه کارون تا محل ایستگاه پل شالو

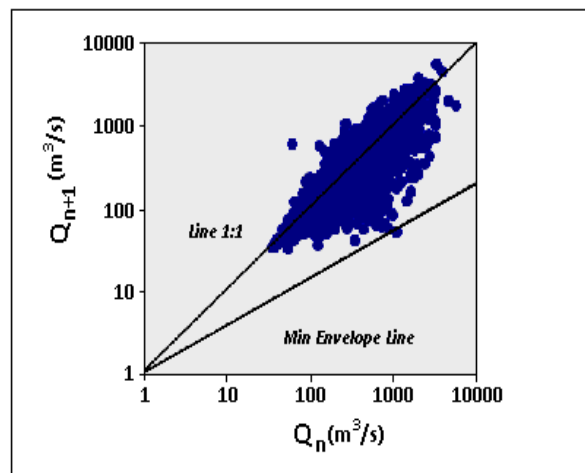
• داده‌های بارندگی

داده‌های بارش از سه ایستگاه بارز، پل شالو و مرگ گردآوری و در جدول ۱ توزیع میانگین منطقه‌ای درصد بارش ماه‌های مختلف سال نسبت به بارش کل سالانه آمده است. بر اساس داده‌های این جدول، حداکثر بارش در دی ماه با ۱۸/۴ درصد کل بارش و حداقل بارش با ۰/۱ درصد مربوط به شهریورماه می‌باشد. در شکل ۶ نیز میانگین‌های سالانه بارندگی در ایستگاه‌های مذکور ارائه شده است.

جدول (۱): رژیم میانگین منطقه‌ای بارندگی در حوضه کارون

ماه	درصد بارش	ماه	درصد بارش
مهر	۲/۰	فروردین	۱۲/۷
آبان	۸/۷	اردیبهشت	۶/۴
آذر	۱۶/۶	خرداد	۰/۸
دی	۱۸/۴	تیر	۰/۲
بهمن	۱۷/۸	مرداد	۰/۲
اسفند	۱۶/۱	شهریور	۰/۱

اجزای این معادله عبارتند از: Q دبی متوسط روزانه به مترمکعب بر ثانیه، Cs ضریب رواناب برف نسبت به نوب برف کل به صورت کسری از واحد، CR ضریب رواناب باران به صورت کسری از واحد، a فاکتور درجه روز بر حسب سانتیگراد بر درجه سانتیگراد در روز، T درجه حرارت ایستگاه مبنا بر حسب درجه سانتیگراد، ΔT تفاضل درجه حرارت در ایستگاه مبنا با درجه حرارت در محل متناظر با متوسط ارتفاع هیپسومتریک ناحیه ارتفاعی بر حسب درجه سانتیگراد، S نسبت پوشش برف به کل حوضه، P بارشی که در تولید رواناب شرکت می‌کند بر حسب سانتیگراد، A مساحت ناحیه ارتفاعی بر حسب کیلومتر مربع و K ضریب فروکش که نشان دهنده نرخ کاهش دبی در یک دوره زمانی بدون تاثیر برف می‌باشد. این مدل سه منبع برای تولید رواناب دارد که عبارتند از کل فروکش، سطح برف و بارندگی. منحنی فروکش جریان روز $n+1$ نسبت به روز n برای حوضه کارون در پل شالو بر اساس داده‌های روزانه جریان در یک دوره ۴۰ ساله در شکل ۳ ترسیم شده است و جهت مدلسازی از این نمودار بهره گرفته شده است.

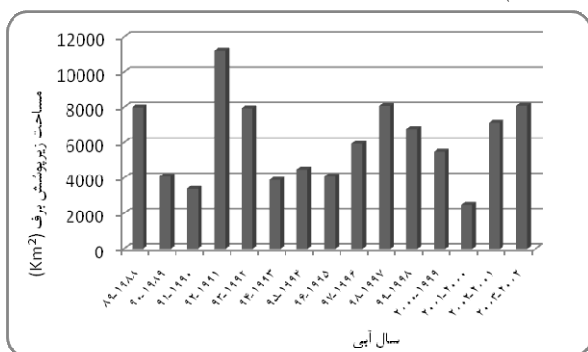


شکل (۳): نمودار منحنی فروکش جریان برای حوضه کارون در پل شالو

در ادامه نمونه‌ای از نقشه‌های GIS که سطح پوشش برف حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای برای دو روز مشخص از سال ۹۳ در شکل ۴ آمده است.

مرحله دیگر در تحقیق، جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها می‌باشد. پس از تقسیم حوضه مورد مطالعه به ۵ ناحیه و استخراج مساحت‌های متناظر با هر ناحیه (شکل ۵) آمار و داده‌های هواشناسی در ایستگاه‌های منطقه جمع‌آوری شد. متغیرهای هواشناسی و هیدرومتری ورودی مدل SRM شامل سری زمانی درجه حرارت، بارش، سطح برف و

مختلف در حوضه کارون در شکل ۷ آمده است (قربانی- زاده، ۱۳۸۷).



شکل (۷): میانگین مساحت سالانه سطح زیر پوشش برف در حوضه کارون (فصل زمستان)

در نهایت مدل هیدروگراف رواناب حاصل از نوب برف را با صفر قرار دادن کل بارش شبیه‌سازی گردید. بنابراین پس از اجرای مدل سهم نوب برف بدون بارش در رواناب کل منطقه تحقیق حاصل شد. جهت تفکیک رواناب حاصل از نوب برف در هر یک از نواحی ارتفاعی، مساحت ناحیه مورد نظر در مدل حفظ ولی مساحت سایر نواحی برابر صفر قرار داده شد. بنابراین رواناب ناشی از نوب برف با حذف بارش در ناحیه مورد نظر بدست می‌آید.

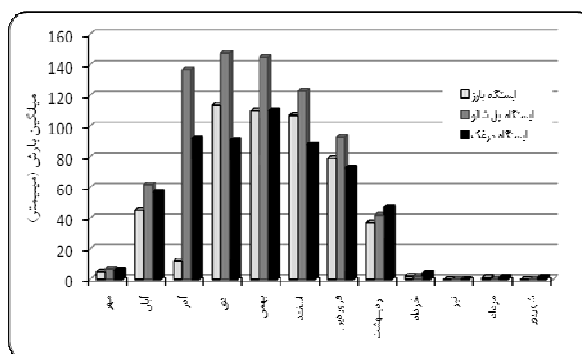
۵- نتایج و بحث

۵-۱- بررسی مدل SRM

جهت بررسی توانایی و کارایی مدل در شبیه‌سازی شرایط مختلف آبی مدل SRM مورد واسنجی و اعتبارسنجی در دو سال آبی ۹۲-۱۹۹۱ و ۹۳-۱۹۹۲ قرار گرفت که به ترتیب جزء سالهای آبی تر و خشک محسوب می‌شوند. نتایج دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در قالب نمودارهای پراکندگی (۵) و (۶) ارائه شده است و با ارائه شاخص‌های خطا مورد بررسی قرار گرفت. شاخص‌های بررسی خطا و فرمول متناظر آنها به شرح زیر می‌باشد.

• ضریب شاخص قدرمطلق ضریب انحراف (Absolute Percent Bias):

این شاخص اختلاف زمانی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده اندازه‌گیری می‌کند. مقدار بیشتر شاخص APB نشان دهنده این است که حتی اگر سری داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری از لحاظ حجمی مشابه باشند، اختلاف زمانی در این دو سری از داده‌ها وجود دارد. مقدار این شاخص از رابطه ۲ بدست می‌آید. در رابطه



شکل (۶): میانگین بارش ماهانه در سه ایستگاه بارز، پل شالو و مرغک حوضه کارون

• دمای هوا

شبکه ایستگاه‌های دماسنجی در حوضه دز و کارون شامل ۵۷ ایستگاه است که از آن میان ۲۶ ایستگاه وابسته به وزارت نیرو و ۳۱ ایستگاه وابسته به سازمان هواشناسی کشور می‌باشد.

آماره‌های سالانه دما در ارتفاعات مختلف و برای مختصات میانگین (طول ۴۹/۷۲ درجه و عرض ۳۲/۰۹ درجه) در حوضه کارون مطابق جدول (۲) و میانگین ماهانه دمای ایستگاه‌های پل شالو و مرغک مطالعاتی در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۲): برآورد آماره‌های سالانه دمای روزانه در ارتفاعات حوضه کارون (درجه سانتیگراد)

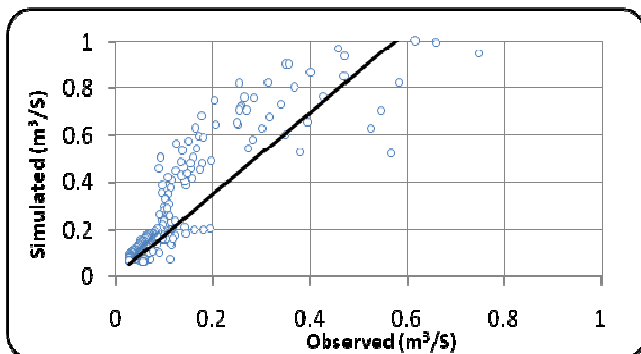
ارتفاع (متر)	آماره			
	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰
میانگین سالانه دمای حداکثر	۱۷/۳	۲۱/۷	۲۶/۱	۲۸/۳
میانگین سالانه دمای متوسط	۸/۶	۱۳/۵	۱۸/۴	۲۰/۹
میانگین سالانه دمای حداقل	۰/۱	۵/۵	۱۰/۹	۱۳/۶

جدول (۳): میانگین ماهانه دمای هوا بر حسب درجه سانتیگراد در شبکه ایستگاه‌های مطالعاتی حوضه کارون

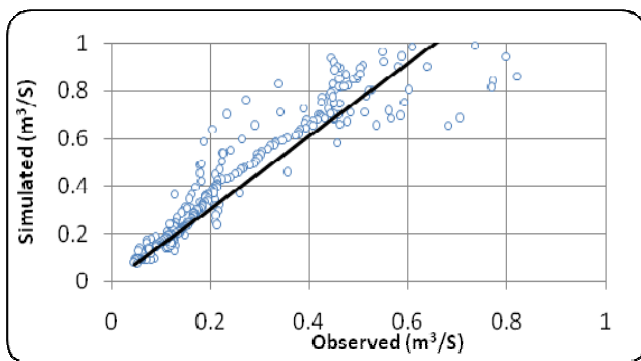
ایستگاه	مهر	آبان	آذر
پل شالو	۲۶/۱	۱۹/۹	۱۳/۶
مرغک	۲۳/۳	۱۶/۹	۱۱/۵
ایستگاه دی	دی	بهمن	اسفند
پل شالو	۱۰/۱	۱۰/۳	۱۳/۲
مرغک	۸/۳	۸/۷	۱۲/۰
ایستگاه فروردین	اردیبهشت	خرداد	
پل شالو	۱۷/۵	۲۳/۴	۳۰/۵
مرغک	۱۶/۷	۲۱/۵	۲۷/۵
ایستگاه تیر	مرداد	شهریور	
پل شالو	۳۴/۸	۳۵/۴	۳۲/۶
مرغک	۳۱/۴	۳۲/۱	۲۸/۱

مساحت متوسط (ماه‌های سرد سال) زیر پوشش برف بر حسب کیلومتر مربع (برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای) در فصول ریزش و نوب در سالهای آبی

ارزیابی کارایی مدل SRM، شاخص‌های آماری مختلف محاسبه شد که نتایج حاصل در جدول‌های شماره ۴ و ۵ ارائه شده است.



شکل (۸): نمودار دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی در دوره آماری واسنجی در سال آبی ۱۹۹۱-۱۹۹۲



شکل (۹): نمودار دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی در دوره آماری واسنجی در سال آبی ۱۹۹۲-۱۹۹۳

جدول (۴): ارزیابی آماری مدل SRM دبی‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی در سال آبی ۱۹۹۱-۱۹۹۲

PRMSE	RMSE	PAAE	ME	A.P.B	S _{mean}	O _{mean}	ماه (91-92)
۲۵/۴	۲۵/۴	۹/۷	۶۸/۴	۹/۷	۱۳۶/۰	۱۴۸/۱	Oct
۸/۵	۸/۵	۶/۸	۱۱/۷	۶/۸	۱۲۹/۷	۱۲۱/۴	Nov
۵۶/۱	۳۶۲/۶	۳۸/۶	۱۰۵۸/۷	۳۸/۶	۷۰۵/۲	۶۴۵/۵	Dec
۱۸/۱	۵۶/۹	۱۵/۷	۱۱۷/۴	۱۵/۷	۳۱۴/۴	۳۱۳/۹	Jan
۴۳/۷	۲۰۵/۴	۲۴/۰	۷۰۶/۷	۲۴/۰	۴۵۸/۲	۴۶۹/۸	Feb
۲۲/۹	۲۰۷/۴	۱۶/۳	۶۷۳/۷	۱۶/۳	۱۵۵/۵	۹۰۴/۳	Mar
۲۱/۱	۲۷۰/۰	۱۵/۵	۸۰۶/۷	۱۵/۵	۱۲۱۴/۰	۱۲۷۴/۶	Apr
۱۳/۷	۱۵۵/۳	۶/۵	۷۲۴/۰	۶/۵	۱۱۰۰/۰	۱۱۳۳/۵	May
۱۰/۷	۶۹/۲	۱۰/۰	۱۵۱/۹	۱۰/۰	۷۱۲/۱	۶۴۶/۹	Jun
۶/۹	۳۰/۴	۵/۶	۶۲/۰	۵/۶	۴۵۸/۷	۴۳۹/۰	Jul
۵/۷	۱۹/۰	۵/۰	۳۲/۲	۵/۰	۳۱۲/۶	۳۲۹/۱	Aug
۴/۰	۸/۹	۲/۷	۱۹/۵	۲/۷	۲۲۶/۲	۲۲۲/۴	Sep
۲۹/۵	۱۶۴/۲	۱۴/۵	۱۰۵۸/۷	۱۴/۵	۵۵۲/۲	۵۵۴/۵	سالانه

زیر $i=1, \dots, N$ تعداد داده‌های سری و S مقدار شبیه‌سازی و O مقدار مشاهداتی می‌باشد.

$$APB = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (2)$$

• شاخص‌های RMSE, ME, PAAE و PRMSE: شاخص‌های RMSE (Root Mean Square Error), PAAE (Percent Average Error), ME (Max. Error) (Absolute Error) و PRMSE (Normalize RMSE) (by mean observed) اختلاف بین مدل‌های مختلف را تخمین زده و مقایسه نسبی بین مدل‌ها را انجام می‌دهد. این ضرایب در معادلات ۳، ۴، ۵ و ۶ ارائه شده‌اند و متغیرهای معادلات در ضرایب فرمول (۲) معرفی گردیده‌اند و میانگین دبی مشاهداتی در دوره آماری می‌باشد.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$ME = \text{Max}(S_i - O_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

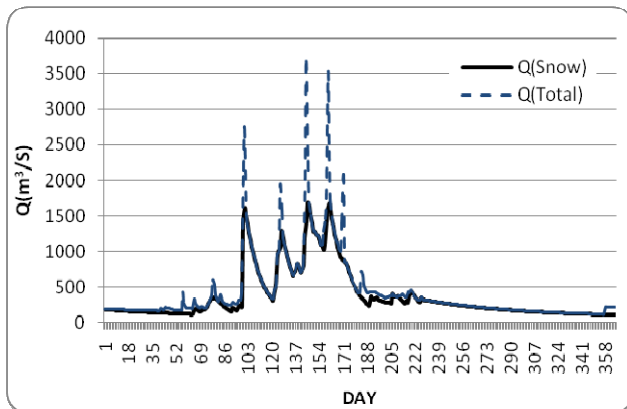
$$PAAE = \left\{ \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{\bar{O}} \right\} \times 100 \quad (5)$$

$$PRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (6)$$

چنان که از دو شکل ۸ و ۹ برمی‌آید، نتایج داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی مطابقت نسبی دارند. در ادامه

جدول (۵): ارزیابی آماری مدل SRM دبی های مشاهده شده و شبیه سازی در سال آبی ۱۹۹۳-

PRMSE	RMSE	PAAE	ME	A.P.B	S _{mean}	O _{mean}	ماه (91-92)
۹/۴	۱۶/۷	۸/۶	۲۸/۱	۸/۶	۱۶۲/۳	۱۷۷/۷	Oct
۴۱/۸	۸۰/۳	۲۲/۳	۳۰۲/۹	۳۲/۳	۱۲۹/۹	۱۹۲/۰	Nov
۳۰/۸	۸۴/۳	۲۴/۵	۲۵۱/۹	۲۴/۵	۲۲۱/۹	۲۷۹/۵	Dec
۵۸/۷	۳۴۴/۱	۴۱/۹	۱۱۴۷/۲	۴۱/۹	۶۵۸/۳	۵۸۵/۲	Jan
۵۳/۸	۵۳۳/۸	۳۳/۱	۲۲۵۲/۲	۴۳/۳	۱۰۳۲/۱	۹۹۲/۲	Feb
۴۶/۶	۴۹۳/۶	۲۹/۱	۱۹۳۲/۵	۲۹/۱	۹۹۹/۲	۱۰۵۸	Mar
۳۱/۳	۱۳۰/۵	۲۳/۸	۳۶۸/۱	۲۳/۸	۳۱۹/۲	۴۱۶/۰	Apr
۱۷/۰	۵۳/۴	۱۳/۶	۱۵۷/۳	۱۳/۶	۳۱۳/۹	۳۱۴/۳	May
۱۸/۳	۳۵/۹	۱۸/۱	۴۲/۲	۱۸/۱	۲۳۱/۷	۱۹۶/۱	Jun
۲۰/۸	۲۹/۳	۱۹/۹	۳۵/۸	۱۹/۹	۱۷۵/۱	۱۴۵/۹	Jul
۱۶/۸	۱۹/۹	۱۶/۴	۲۵/۹	۱۶/۴	۱۳۸/۱	۱۱۸/۶	Aug
۴۲/۷	۵۸/۳	۲۷/۰	۱۱۴/۲	۲۷/۰	۱۱۳/۸	۱۳۶/۵	Sep
۶۲/۰	۲۳۸/۱	۲۸/۱	۲۲۵۲/۲	۲۸/۱	۳۷۱/۲	۳۸۳/۷	سالانه

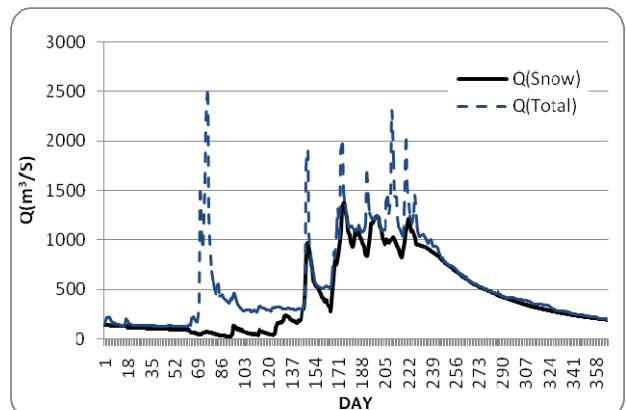


شکل (۱۱): هیدروگراف کل و رواناب ناشی از ذوب برف در سال ۱۹۹۲-۱۹۹۳ میلادی (زمان شروع اکتبر)

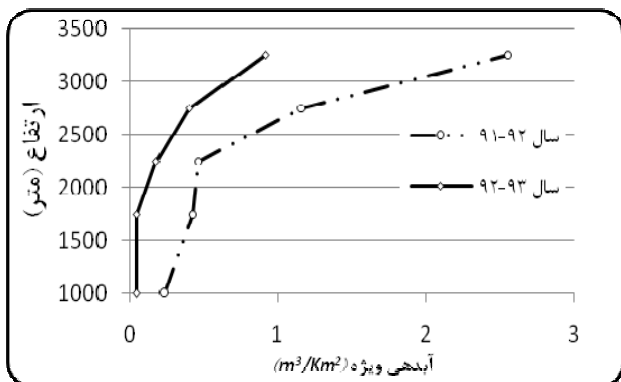
۵-۲- تاثیر ارتفاع و مساحت در رواناب ناشی از ذوب برف

در مناطق مرتفع‌تر حوضه، نسبت رواناب حاصل از ذوب برف بیشتر از مناطق با ارتفاع کمتر می باشد. علت این امر سه عامل عمده می تواند باشد. اولاً با افزایش ارتفاع دما کاهش می یابد و این امر موجب می شود بارندگیهای بیشتری به صورت برف شکل بگیرد. ثانیاً مقدار بارش معمولاً با ارتفاع افزایش می یابد. ثالثاً نرخ ذوب برف در ارتفاعات به دلیل دمای پایین تر، کمتر است. این عامل همچنین باعث می شود تا آب حاصل از ذوب برف فرصت کافی برای نفوذ به زمین را داشته باشد و بعداً به مرور توسط رودخانه زهکشی شود.

براساس نتایج جداول ۴ و ۵، هرگاه مقدار ضریب PB زیاد باشد نشان دهنده این است که سری داده های شبیه سازی و اندازه گیری از لحاظ حجمی مشابه، ولی زمانهای آنها نزدیک به هم نیست و اختلاف زمانی در این دو سری از داده ها وجود دارد. همچنین مقدار PAAE نیز در بین دو عدد ۲۸/۱۹ و ۱۴/۵۸ قرار دارد که از لحاظ تحلیل های آماری مقدار مناسبی است و در نهایت مقادیر RMSE و PRMSE نیز به استثناء فصل زمستان که بارش ها بیشتر بصورت برف بوده و رواناب ناشی از برف نیز بدلیل سرمای حاکم بر ارتفاعات و عدم ذوب برف ها، در حد قابل قبولی قرار دارند. لذا با استفاده از مدل SRM به شبیه سازی رواناب ناشی از ذوب برف پرداخته شد که نتایج برای دوسال آماری ۹۱-۹۲ و ۹۲-۹۳ در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



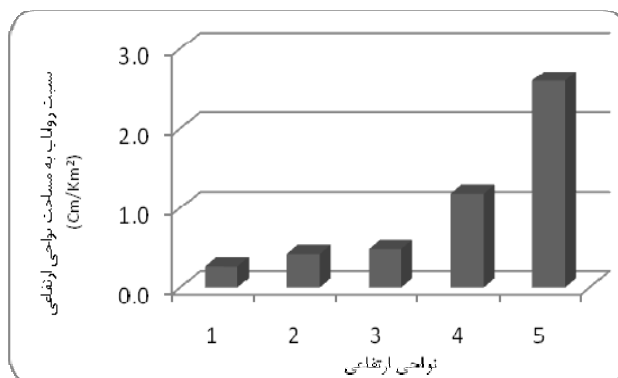
شکل (۱۰): هیدروگراف کل و رواناب ناشی از ذوب برف در سال ۱۹۹۱-۱۹۹۲ میلادی (زمان شروع اکتبر)



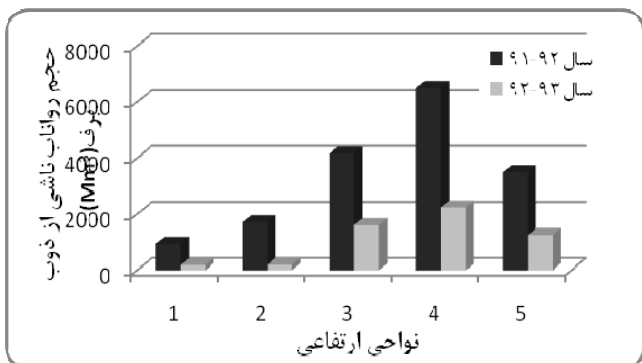
شکل (۱۳): رابطه آبدهی ویژه ذوب برف و ارتفاع برای دوره‌های آماری

تاثیر رواناب حاصل از ذوب برف در نواحی ارتفاعی مختلف منطقه در شکل ۱۴ ارائه شده که تایید کننده تاثیر بیشتر رواناب حاصل از ذوب برف در مناطق مرتفع حوضه می باشد.

در رابطه با مساحت در ارتفاعات به دلیل شکل هرمی کوه‌ها با افزایش ارتفاع مساحت کاهش می‌یابد و این مسئله باعث می‌شود کاهش میزان بودجه برفی با افزایش ارتفاع می‌گردد. در شکل ۱۲ برای حوضه آبریز کارون در سال ۱۹۹۱-۹۲ نسبت رواناب به مساحت هر ناحیه ارتفاعی حوضه برای ۵ ناحیه ارتفاعی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش ارتفاع نسبت رواناب به مساحت نواحی ارتفاعی افزایش نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): نسبت رواناب به مساحت نواحی ارتفاعی



شکل (۱۴): رواناب ناشی از ذوب برف با حذف بارش در نواحی ارتفاعی در دو سال آبی

آبدهی ویژه میزان تاثیر هر واحد از ناحیه ارتفاعی در مقدار رواناب ناشی از ذوب برف در خروجی از حوضه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل، رواناب ناشی از ذوب برف به تفکیک نواحی ارتفاعی مختلف تعیین شد. آبدهی ویژه هر یک از این نواحی با تقسیم حجم رواناب ناشی از ذوب برف بر مساحت ناحیه بدست آمد. که در شکل ۱۳ و جدول (۶) آبدهی ویژه ذوب برف سال-های آبی ۱۹۹۱-۹۲ و ۱۹۹۲-۹۳ برای کل حوضه نشان داده شده است.

جدول (۶): آبدهی ویژه ناشی از ذوب برف در نواحی ارتفاعی مختلف در سال آبی ۱۹۹۱-۱۹۹۲ و ۱۹۹۲-۱۹۹۳

سال	نواحی ارتفاعی (زون ها)						
	۱	۲	۳	۴	۵	کل حوضه	
۱۹۹۱-۱۹۹۲ (ترسالی)	مساحت (Km^2)	۴۰۰۴	۴۰۶۲	۸۹۵۲	۵۶۱۲	۱۳۷۰	۲۴۰۰۰
	ارتفاع (m)	۱۰۰۰	۱۷۵۰	۲۲۵۰	۲۷۵۰	۳۲۵۰	---
	حجم رواناب ذوب برف (Mm^3)	۹۴۳/۹	۱۷۱۴/۹	۴۱۵۴/۰	۶۵۱۸/۱	۳۵۰۳/۰	۱۶۸۳۳/۹
۱۹۹۲-۱۹۹۳ (خشکسالی)	آبدهی ویژه ذوب برف	۰/۲۳۵	۰/۴۲۲	۰/۴۶۴	۱/۱۶۱	۲/۵۵۶	۰/۷۰
	درصد نسبت به کل رواناب	۵/۶	۱۰/۱۹	۲۴/۶۸	۳۸/۷۲	۲۰/۸۱	---
	حجم رواناب ذوب برف (Mm^3)	۱۸۵/۵	۱۹۸/۲	۱۶۰۶/۱	۲۲۴۵/۴	۱۲۵۷/۳	۵۴۹۲/۵
	آبدهی ویژه ذوب برف	۰/۰۴۶	۰/۰۵۳	۰/۱۷	۰/۴۰	۰/۹۱	۰/۲۳
	درصد نسبت به کل رواناب	۳/۴	۳/۶۱	۲۹/۲۴	۴۰/۸۰	۲۲/۸۹	---

۶- نتیجه گیری

این تحقیق با هدف تفکیک سهم ذوب برف در رواناب کل یک حوضه برفی- بارانی و بررسی تغییرات میزان ذوب برف با ارتفاع در سطح حوضه انجام گرفت.

براساس تحلیل هیدروگرافها؛ زمان تولید رواناب حاصل از ذوب برف از هر یک از نواحی ارتفاعی بدین شرح می‌باشد: حداکثر رواناب ناشی از ذوب برف از ارتفاعات بین ۷۰۰ متر تا ۱۵۰۰ متر در اواسط ماه فوریه یا اواخر بهمن‌ماه، از ارتفاعات بین ۱۵۰۰ متر تا ۲۰۰۰ متر در اواخر ماه فوریه یا اواسط اسفند ماه، از ارتفاعات بین ۲۰۰۰ متر تا ۲۵۰۰ متر در اواسط مارس یا اواخر اسفند ماه، از ارتفاعات بین ۲۵۰۰ متر تا ۳۰۰۰ متر در اواخر ماه آپریل یا اوایل اردیبهشت ماه و از ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر در اوایل ماه جون یا اواسط خرداد ماه رخ داده است. در مجموع مشاهده می‌شود که آبدهی ویژه حاصل از ذوب برف با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود. لیکن باید توجه داشت که امکان دارد برخی ارتفاعات محلی در داخل حوضه نیز وجود داشته باشد که مشارکت ذوب آن مناطق در فصول دیرتر سال انجام گیرد.

با توجه به هیدروگرافهای تولید شده رواناب حاصل از ذوب برف برای هر یک از نواحی ارتفاعی مشاهده گردید که حداکثر جریان ناشی از ذوب برف از هر یک از نواحی ارتفاعی در ماه خاصی رخ می‌دهد. به‌عنوان مثال حداکثر جریان ناشی از ذوب برف از ناحیه ارتفاعی ۵ که مرتفع ترین ناحیه است در اواسط ماه می (خرداد ماه) اتفاق می‌افتد و حداکثر جریان ناشی از ذوب برف از ناحیه ارتفاعی ۱ در اواسط ماه فوریه (بهمن) اتفاق می‌افتد. یعنی جریان ناشی از ذوب برف در نواحی کم ارتفاع حدود ۴ تا ۵ ماه زودتر از حداکثر جریان نواحی با ارتفاع بیشتر در رواناب رودخانه مشارکت می‌کند.

میانگین آبدهی ویژه ناشی از ذوب برف در دو دوره آماری ترسالی و خشکسالی به ترتیب برابر با (m^3/Km^2) ۰/۷۰ و ۰/۲۳ بدست آمد. حجم رواناب ناشی از ذوب برف نیز برای دو سال آبی تر (۹۱-۹۲) و خشک (۹۲-۹۳) بترتیب برابر ۱۶۸۳۳/۹ و ۵۴۹۲/۵ میلیون مترمکعب برآورد گردید.

۷- منابع

- [۱] پرهت، ج.، ثقفیان، ب.، صدقی، ح. (۱۳۸۴). بررسی کاربرد مدل SRM در شبیه سازی رواناب حاصل از ذوب برف با داده‌های ماهواره‌ای در حوضه‌های بدون آمار (مطالعه موردی حوضه خرسان در کارون). مجله تحقیقات منابع آب. شماره ۱، صفحه ۱۱-۱.
- [۲] قربانی زاده خرازی، ح. (۱۳۸۷). بررسی اثر تغییر اقلیم بر زمان پیک جریان رواناب ناشی از ذوب برف. رساله دکتری رشته آبیاری- هیدرولوژی و منابع آب. دانشگاه آزاد اسلامی. واحد علوم و تحقیقات تهران
- [۳] قربانی زاده خرازی، ح.، صدقی، ح.، ثقفیان، ب.، پرهت، ج. (۱۳۸۷). شبیه سازی زمان جریان رواناب ناشی از ذوب برف تحت شرایط تغییر اقلیم در نیم قرن آینده. چهارمین همایش زمین شناسی و محیط زیست.
- [۴] وزارت نیرو. سازمان آب و برق خوزستان. بهره برداری سد ونیروگاه. گزارش برفسنجی حوضه های آبریز دز و کارون در اسفند ماه سال ۱۳۸۴.
- [۵] Baumgartner, M. F., Spreafico, M. & Weiss, H. W., (2001). **Operational snowmelt runoff forecasting in the Central Asian mountains**. In Remote Sensing and Hydrology 2000. Proceedings of the Santa Fe Symposium, April 2000, IAHS Publ. No. 267: pp. 66-71
- [۶] Brubaker, K. and A. Rango, (2004). **Response of snowmelt hydrology to climate change**, Water, Air & Soil Pollution Journal Vol. 90, No 1&2, pp. 335-343.
- [۷] Engman, E.T. and R.J. Gurney, (1991). **Remote sensing in hydrology**. Chapman and Hall, London.
- [۸] Ghanbarpour, M.R., Saghafian, B., Mohseni, M. and Abbaspour, K.C., (2007). **Evaluation of spatial and temporal variability of snow cover in a large mountainous basin in Iran**. Nordic Hydrology, Vol. 38, No.1, pp. 45-58.
- [۹] Gomez-Landesa, E., Rango, A., and Bleiweiss, M., (2004). **An algorithm to address the MODIS bowie effect**. Canadian Journal of Remote Sensing. 30(4): 644-650.
- [۱۰] Immerzeel, W.W., P. Droogers, S.M. de Jong, M.F.P. Bierkens, (2009). **Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing**. Remote Sensing of Environment 113, 40-49
- [۱۱] Leavesley, G., (1983). **Precipitation runoff modeling system**. Denver,

- Rango, A., van Katwijk, V. (2002). [۱۷]
Climate change effects on the snowmelt hydrology of western North American mountain basins. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. GE-28(5):970-974
- Saghafian, B. and Davtalab, R., (2007). [۱۸]
Mapping Snow Characteristics Based on Snow Observation Probability. International Journal of Climatology, 1277-1286
- Sorman, A. U., Uzunoglu, E., & Kaya, I. (2001). [۱۹]
Applications of SRM and SLURP models in eastern Turkey using remote sensing and geographic information systems. In M. Owe, K. Brubaker, J. Ritchie, & A
- USACE (1998), **Engineering and Design – Runoff from snowmelt**, Engineering Manual 1110-2-1406. [۲۰]
- Colorado, USA' USGS Publ User manual.
 Lettenmaier, D.P., and T.Y. Gan. (1990)., [۱۲]
Hydrologic sensitivities of the Sacramento-san Joaquin river basin, California, to climate change. Water resources research, 26. 69-86.
- Marshall, J. D., J. M. Blair, D. PC. Peters, G. Okin, A. Rango, M. Williams. (2008). [۱۳]
Ecosystems and climate change at continental scale. The Ecological society of America, 6(5): 273-280
- Mitchell, K.M., & DeWalle, D.R., (1998). [۱۴]
Application of the Snowmelt Runoff Model using Multiple Parameter Landscape Zones on the Towanda Creek Basin, Pennsylvania. AWRA Water Resource Bulletin, Vol. 34 (2), pp. 335-346.
- Rango, A., Martinec, J., Chang, A.T.C., Foster, J.L. and van Katwijk, V., (1989). [۱۵]
Average areal water equivalent of snow in a mountain basin using microwave and visible satellite data. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. GE-27(6):740-745.
- Rango, A., van Katwijk, V. (1990). [۱۶]
Development and testing of a snowmelt-runoff foresting technique, Water Resources Bulletin, Vol. 26, No. 1, pp 135-144