

## بررسی تغییرات غلظت رسوب معلق در سیلاب‌های فصلی ناشی از باران و ذوب برف

سهیلا آقابگی امین\*<sup>۱</sup>، عبدالرسول تلوری<sup>۲</sup>، سید خلاق میرنیا<sup>۳</sup>، سادات فیض‌نیا<sup>۴</sup> و مهدی وفاخواه<sup>۵</sup>  
<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، <sup>۲</sup> دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، <sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده منابع طبیعی،  
دانشگاه تربیت مدرس، <sup>۴</sup> استاد، دانشکده منابع طبیعی، <sup>۵</sup> استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

### چکیده

غلظت رسوب در رودخانه‌ها و به‌ویژه در رودخانه‌های فصلی متأثر از جریان ناشی از تغییرات باران و یا ذوب برف در مواقع سیلابی است. با توجه به این‌که آب‌گیری و همچنین، عمر مفید مخازن سدهای احداث شده بر روی رودخانه‌های فصلی به‌شدت وابسته به جریان‌های سیلابی است، بررسی این موضوع، مهم و ضروری به‌نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر، تغییرات میزان غلظت رسوب معلق در سیلاب‌ها و همچنین، رواناب ناشی از ذوب برف در فصل بهار در رودخانه آبشینه در حوضه سد اکباتان همدمان مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، در طول دوره پیش‌بینی شده برای انجام این پژوهش، تعداد سه واقعه رگباری در فصل پاییز، دو واقعه رگباری در فصل بهار و پنج واقعه ذوب برف انتخاب و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. تعداد کل نمونه‌های برداشت شده برای اندازه‌گیری بار معلق ۲۲۶ عدد است که تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان از تغییرپذیری بار رسوب معلق در این حوضه دارد. ترسیم منحنی‌های سنج رسوب برای داده‌ها در پایه‌های زمانی مختلف روندهای متفاوتی را نشان می‌دهند. مقدار ضریب هم‌بستگی برای هر دو وقایع رگباری و ذوب برف به‌طور جزء به‌ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۵۰ و برای کل داده‌های سال ۰/۷۹ است. همچنین، بررسی مقادیر ضریب و توان منحنی‌های سنجه بیانگر عدم تفاوت در فرسایش‌پذیری حوضه در دو فصل بررسی شده از سال است. تفکیک دو بخش بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف و بررسی اثر دبی آن‌ها باعث بهبود روابط برازش شده بر منحنی سنج رسوب شد. همچنین، الگوهای روابط بین دبی و غلظت رسوب به شکل حلقه‌های ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد و الگویی مرکب از این دو نشان از توزیع منبع رسوب در سراسر حوضه آبخیز است.

**واژه‌های کلیدی:** بار معلق، حوضه آبخیز سد اکباتان، رگبار، رودخانه فصلی، منحنی سنج رسوب

### مقدمه

بار رسوبی در رودخانه‌ها است و عامل اصلی گل‌آلودگی آب رودخانه‌ها طی دوره‌های رگباری است، بنابراین، بررسی تغییرات بار رسوبی در وقایع کوتاه‌مدت رگباری مهم است (Eder و همکاران، ۲۰۱۰). از سویی، ارزیابی صحیح و کافی رسوب سیلاب تنها با اندازه‌گیری‌های پیوسته امکان‌پذیر است.

مطالعات زیادی تغییرات زمانی و مکانی انتقال رسوب معلق در مقیاس حوضه آبخیز را بررسی و اثبات نموده است. بنابراین، تخمین رسوب معلق در مقیاس‌های زمانی مختلف برای مدیریت انواع رودخانه‌ها و آبخیزها یک ضرورت است. از آن‌جایی‌که رسوب معلق از ترکیبات غالب

سالانه نشان می‌داد. به طوری که ۹۰ درصد بار رسوبی طی سیلاب‌هایی که در ۱۸ درصد از طول سال رخ دادند، انتقال یافتند. همچنین، در این مطالعه فرایند انتقال و تحویل رسوب با استفاده از الگوی روابط بین دبی و غلظت رسوب مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن حاکی از توزیع احتمالی منابع رسوب در سراسر حوضه بود. با توجه به انتقال رسوب طی کل وقایع رخ داده حلقه‌های ساعت‌گرد نشان دادند که ۶۸ درصد منابع رسوب از رسوبات ته‌نشین شده رودخانه و مناطق نزدیک بوده و حلقه‌های پادساعت‌گرد بیانگر این بودند که ۲۹ درصد از منابع دور دست می‌باشد و همچنین، سه درصد هم‌زمانی رسوب و دبی را نشان دادند.

Gao و Josefson (۲۰۱۲) با جمع‌آوری رسوب معلق در مقیاس رگباری به مدت سه سال در یک حوضه کشاورزی در نیویورک به بررسی منحنی‌های سنجه در مقیاس رگباری فصلی و سالانه پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرپذیری در مقادیر رسوب فصلی بیشتر بوده، بنابراین برای داده‌های هر فصل باید منحنی سنجه جداگانه به دست بیاید، اما تغییرات رسوب سالانه می‌تواند به وسیله تنها یک منحنی سنجه توصیف شود.

در حوضه‌های کوهستانی کشور دبی رودخانه تحت تأثیر وقایع رگباری بهاری و ذوب برف است. از آنجایی که ریزش برف در فصل زمستان در ارتفاعات این‌گونه حوضه‌ها قابل توجه است، ذوب برف در بهار سهم زیادی در میزان دبی رودخانه و حمل رسوب ایفا می‌کند. در پژوهش حاضر برای بررسی این موضوع حوضه کوهستانی سد اکباتان در استان همدان انتخاب شد. در این حوضه، بارش‌های فصلی از اواسط آبان تا اواخر اردیبهشت باعث جاری شدن رواناب و رسوب از دامنه‌ها به سمت رودخانه می‌شود، در صورتی که در فصل زمستان به دلیل رژیم برفی منطقه، مقدار انتقال رسوب قابل اغماض به نظر می‌رسد. در این بررسی، منحنی‌های سنجه رسوب وقایع رگباری پاییز و بهار به طور جداگانه و ترکیبی و همچنین، منحنی سنجه رسوب ناشی از ذوب برف در بهار برای حوضه سد اکباتان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** رودخانه آبشینه که برای پژوهش حاضر در نظر گرفته شده، در بالادست سد اکباتان و در

اگرچه ممکن است بار رسوب معلق را با استفاده از انواع مدل‌های آبخیز با پایه فیزیکی برآورد کرد، اما نتایج مدل‌سازی نیاز به ارزیابی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری رسوب معلق دارد. در غیاب داده‌های واقعی غلظت رسوب معلق معمولاً از منحنی‌های سنجه رسوب برای برآورد غلظت رسوب معلق استفاده می‌شود.

به دلیل دینامیک پیچیده انتقال رسوب معلق اغلب روابط ضعیفی بین آن با دبی برقرار می‌شود. به همین دلیل محققان زیادی سعی در بهبود این رابطه نموده‌اند. برخی از محققان (Picouet و همکاران، ۲۰۰۱؛ Hudson، Old و همکاران، ۲۰۰۵؛ Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۶؛ Eder و همکاران، ۲۰۱۰ و Oeurng و همکاران، ۲۰۱۰) روابط جداگانه‌ای برای شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف وقایع آرایه نمودند و برخی دیگر (Asselman، ۲۰۰۰؛ Horowitz، ۲۰۰۳ و Schmidt و Morche، ۲۰۰۶) از توابعی غیر از توابع توانی استفاده کرده‌اند.

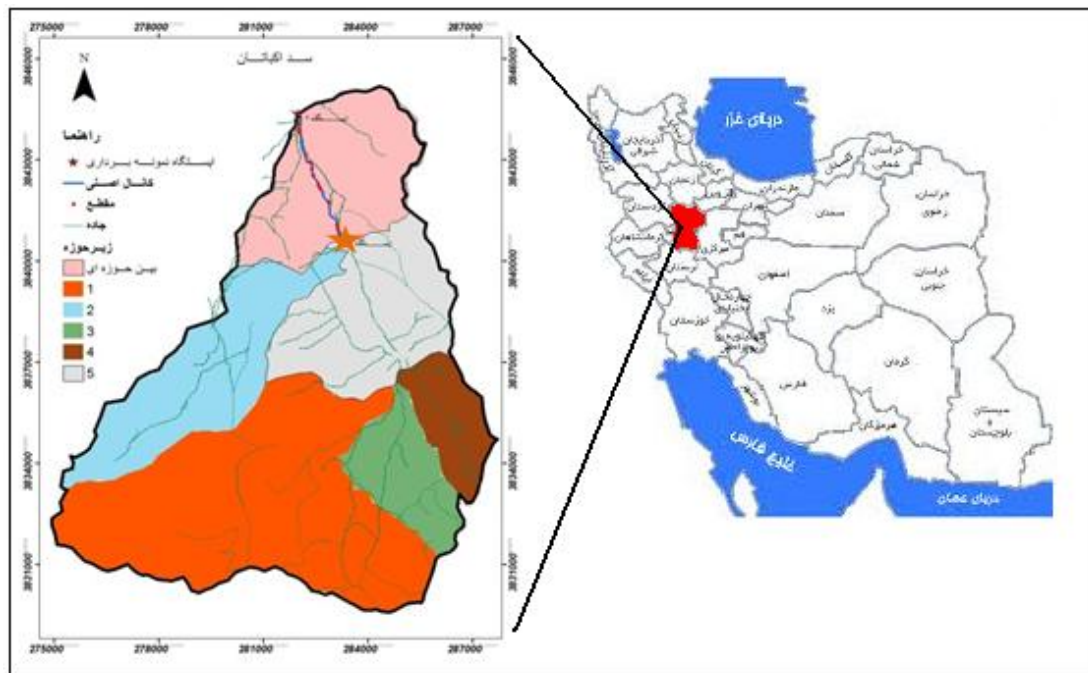
پژوهشگرانی (Horowitz، ۲۰۰۳؛ Smith، ۲۰۰۵؛ Rovira و Batalla، ۲۰۰۶ و Schmidt و Morche، ۲۰۰۶) هم با استفاده از روش‌های تغییر شکل داده‌ها سعی در آرایه روابط بین دبی و رسوب نموده‌اند. برای مثال، Sadeghi و همکاران (۲۰۰۸) در یک حوضه جنگلی در ژاپن به بررسی انواع مختلف تغییر شکل داده‌های غلظت رسوب و دبی و روابط خطی و غیرخطی بین آن‌ها در پایه رگبار پرداختند و به این نتیجه رسیدند که منحنی سنجه توانی ریشه چهارم داده‌های غلظت رسوب و دبی در شاخه بالارونده و پایین‌رونده به طور جداگانه بهترین برازش را نشان می‌دهد.

بررسی منحنی سنجه رسوب در مقیاس‌های مختلف زمانی از رگبار تا فصلی، ماهانه و سالانه به وسیله پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های Horowitz (۲۰۰۳) و Rovira و Batalla (۲۰۰۶) اشاره نمود. Oeurng و همکاران (۲۰۱۰) در یک حوضه بزرگ کشاورزی در فرانسه با پایش دوساله رسوب معلق، موفق به جمع‌آوری داده‌های غلظت و بار رسوب معلق ۱۷ رگبار شدند. نتایج تغییرپذیری شدیدی را در داده‌های فصلی، سالانه و درون

<sup>1</sup> Data Transformation

به‌صورت برف است. از اواخر فروردین تا اواخر اردیبهشت که هوا گرم‌تر است، باران‌های رگباری از یک سو و از سوی دیگر به‌دلیل عدم رشد کافی پوشش گیاهی و اشباع شدن لایه‌های فوقانی خاک با آب ناشی از ذوب برف‌ها با اندک بارندگی رواناب به‌صورت سیلاب جریان می‌یابد.

۱۷ کیلومتری شهر همدان قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه تحت تاثیر آب و هوای مدیترانه‌ای بوده و از نظر اقلیم‌شناسی جز اقلیم نیمه‌خشک سرد کوهستانی محسوب می‌شود. بارش متوسط سالانه در سطح حوضه ۳۱۸ میلی‌متر است. بیشترین بارش از آذر تا اواخر اردیبهشت نازل می‌شود که در فصل زمستان غالباً



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و شمایی از حوضه مورد مطالعه

شکل منظم هندسی و بتونی بودن دیواره‌ها و ثابت بودن بستر این مکان مدنظر قرار گرفت. به‌دلیل فقدان نمونه‌بردار استاندارد، نمونه‌های رسوب با استفاده از ظروف سه لیتری (شکل ۲) و تا حد امکان در وسط رودخانه انجام شد. به این ترتیب که ظرف در بسته تا نزدیک کف بستر پایین برده می‌شد و سپس با باز نمودن در ظرف به آرامی تا سطح آب بالا آورده می‌شد به‌صورتی که تقریباً از کل پروفیل آب نمونه‌برداری شود.

جمع‌آوری داده‌ها در دو فصل بهار و پاییز ۱۳۹۰ از دو شرایط متفاوت (رواناب ناشی از بارندگی و رواناب ناشی از ذوب برف) برداشت شد. برای نمونه‌برداری در پایه رگبار، با شروع بارندگی و هم‌زمان با شروع رواناب، نمونه‌برداری با فواصل زمانی نیم‌ساعته (Gentile و همکاران، ۲۰۱۰) آغاز و تا پایان توقف رواناب، نمونه‌برداری‌ها ادامه می‌یافت. برای نمونه‌برداری از رواناب ناشی از ذوب برف بر اساس تجربه و مشاهدات از زمان شروع ذوب برف و رسیدن

از لحاظ لیتولوژیکی در حدود ۶۳ درصد از مساحت حوضه شامل سنگ‌های دگرگونی متشکل از هورنفلس، آندالوزیت، استارولیت، گارنت و شیبست است و در حدود ۲۲ درصد آن شامل سنگ‌های رسوبی متشکل از سنگ‌های آهکی، آهک‌های دولومیتی و شیل است و حدود ۱۵ درصد بقیه شامل سنگ‌های آذرین و از نوع گرانیت و گرانودیوریت است. به لحاظ توپوگرافی شیب دامنه‌ها و آبراهه‌ها عمدتاً تند بوده و به‌دلیل نفوذپذیری کم با توجه به وضعیت لیتولوژیکی منطقه قابلیت تولید رواناب بسیار زیاد است (Mazaheri, ۱۹۹۷).

**روش پژوهش:** این بررسی بر پایه داده‌هایی است که با اندازه‌گیری جریان و رسوب برای رواناب‌های ناشی از باران و ذوب برف به‌دست آمده است. بدین منظور، با بررسی رودخانه آبشینه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و آبراهه و بازدید میدانی یک ایستگاه نمونه‌برداری واقع در زیر یک پل انتخاب و به اندازه‌گیر مجهز شد (شکل ۱). به‌دلیل

که معمولا شکل توانی (Asselman, ۲۰۰۰؛ Syvitski و همکاران، ۲۰۰۰؛ Morehead و همکاران، ۲۰۰۳؛ Hu و همکاران، ۲۰۰۹ و Gao و Josefsen، ۲۰۱۲) آن مورد استفاده قرار می‌گیرد (رابطه ۱). هر چند مطالعاتی نیز بر روی سایر روابط (نمایی، خطی و...) صورت گرفته است (Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۸).

$$C_s = aQ^b \quad (1)$$

که در آن،  $C_s$  غلظت رسوب معلق (گرم در لیتر)،  $Q$  دبی (مترمکعب بر ثانیه) و  $a$  و  $b$  ضریب و توان منحنی سنجه می‌باشند. توان نشان‌دهنده قدرت فرسایشی جریان آب و ضریب بیانگر میزان فرسایش‌پذیری حوضه است (Asselman, ۲۰۰۰).

بدین منظور، ابتدا ویژگی‌های آماری داده‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری تعیین شد. سپس، با توجه به پایه‌های زمانی مختلف، داده‌ها در چند گروه تقسیم‌بندی شده و منحنی سنجه برای هر گروه ترسیم و مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. پایه‌های زمانی شامل وقایع (رگباری یا برفی) و فصل (بهار و پاییز) است. بر این اساس، منحنی سنجه برای هر واقعه برفی و بارانی و برای تمامی وقایع برفی و بارانی به‌طور جداگانه در فصل پاییز و بهار ترسیم شد. یک منحنی سنجه برای تمامی داده‌های موجود در طول دوره مطالعه نیز تعیین و با دیگر منحنی‌های سنجه مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. منحنی‌های سنجه داده‌های دبی آب و غلظت رسوب بر روی محورهای لگاریتمی ترسیم شد.

### نتایج و بحث

در طول دوره مطالعه از پنج واقعه بارندگی طی دو فصل بهار و پاییز و پنج واقعه ذوب برف در سال ۱۳۹۱ نمونه‌برداری شد. تعداد کل نمونه‌ها برداشت شده ۲۲۶ عدد است که ۵۴ نمونه در فصل پاییز، ۱۰۲ نمونه مربوط به فصل بهار و ۷۰ نمونه از روان‌آب‌های ناشی از ذوب برف برداشت شد. دامنه میزان غلظت رسوب نمونه‌های اندازه‌گیری شده از ۰/۶۷ تا ۴۸۸۶۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده است. تاریخ و مشخصات وقایع نمونه‌برداری شده به تفکیک سیلاب‌های رگباری و ذوب برف در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

**تغییرات رسوب در پایه‌های زمانی:** تحلیل داده‌های غلظت رسوب معلق جمع‌آوری شده در حوضه مورد

رواناب به رودخانه که اغلب در حدود ساعت یک بعدازظهر بود، نمونه‌برداری مطابق با آنچه در رواناب ناشی از باران آمده است، صورت گرفت. جداسازی کامل رواناب و رسوب ایجاد شده به‌وسیله سیلاب ناشی از باران و یا ذوب برف به راحتی امکان‌پذیر نیست، به‌ویژه که در فصل بهار با وجود برف روی زمین و ریزش باران بر آن رواناب جاری می‌شود و در این صورت جداسازی آن‌ها بسیار پیچیده‌تر می‌شود. در این پژوهش رواناب‌هایی که در زمان بارش باران ایجاد می‌شوند، به‌عنوان سیلاب رگباری محسوب شدند، حتی اگر در زمان‌هایی غیر از بارندگی، ذوب برف هم در آن دخالت داشت، به‌عنوان رواناب و رسوب ناشی از ذوب برف در نظر گرفته شدند. سپس، نمونه‌ها جمع‌آوری شده و در آزمایشگاه تحلیل و میزان غلظت رسوب آن‌ها تعیین شد. برای تعیین غلظت رسوب موجود در نمونه‌های رسوب از فیلتراسیون با کاغذ صافی ۴۲ در آزمایشگاه استفاده شد (Eder و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۲- ظروف مورد استفاده در نمونه برداری آب و رسوب

هم‌زمان با نمونه‌برداری، ارتفاع آب در مقاطع رودخانه نیز یادداشت شد. طی دوره نمونه‌برداری چندین نوبت و در سطوح مختلف جریان کمینه تا بیشینه اقدام به اندازه‌گیری سرعت آب با استفاده از مولینه و همچنین، اندازه‌گیری سطح مقطع مربوطه شد. دبی‌های اندازه‌گیری شده در ۱۰ مورد برای برقراری روابط دبی-اشل مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از این روابط میزان دبی‌های معادل ارتفاع‌های مختلف آب در محل اندازه‌گیری به‌دست آمد.

به‌منظور بررسی تغییرات غلظت رسوب معلق در مقیاس‌های زمانی مختلف از منحنی سنجه استفاده شد. منحنی سنجه یک گراف یا معادله بین داده‌های دبی و غلظت رسوب متناظر با آن برای یک مقطع مشخص است

مطالعه نشان از تغییرپذیری بار رسوب معلق در این حوضه دارد. بر اساس جدول ۳، مقدار میانگین غلظت رسوب معلق برای کل داده‌های جمع‌آوری شده از رگبار ۳/۳۴ و وقایع ذوب برف ۰/۱۷ گرم در لیتر بوده است. براساس داده‌های برداشت شده، بیشترین غلظت رسوب در طول دوره بررسی در فصل بهار و مربوط به واقعه ۱۸ اردیبهشت و کمترین آن نیز در تاریخ ۱۵ آبان اتفاق افتاده است.

جدول ۱- مشخصات سیلاب‌های رگباری در ایستگاه مورد مطالعه

تاریخ سیلاب	مدت جریان (ساعت)	دبی پیک (مترمکعب بر ثانیه)	میانگین دبی (مترمکعب بر ثانیه)	حجم جریان (هزارمترمکعب)	رسوب حداکثر (گرم بر ثانیه)	میانگین رسوب (گرم بر ثانیه)
۱۳۹۰/۰۱/۱۶	۲۲/۵	۵/۸۹	۲/۰۸۲	۲۳۶/۸۵	۴/۲۲	۱/۵۹
۱۳۹۰/۰۲/۰۶	۲۰/۵	۵/۸۱	۲/۲۵	۱۶۹/۳۷	۶/۸۸	۲/۴۸
۱۳۹۰/۰۲/۱۸	۲۴/۵	۲۵/۳۱	۵/۲۱	۴۳۸/۱۵	۴۸/۴۱	۴/۸۹
۱۳۹۰/۰۸/۰۷	۱۹	۱۳/۸	۳/۷۴	۲۷۳/۴۴	۱۸/۵۷	۲/۸۶
۱۳۹۰/۰۸/۱۵	۹	۱/۶۲	۰/۷۹	۲۷/۰۴	۰/۶۹	۰/۲۷

جدول ۲- مشخصات سیلاب‌های ذوب برف در ایستگاه مورد مطالعه

تاریخ ذوب برف	مدت جریان (ساعت)	دبی پیک (مترمکعب بر ثانیه)	میانگین دبی (مترمکعب بر ثانیه)	حجم جریان (مترمکعب)	رسوب حداکثر (گرم بر ثانیه)	میانگین رسوب (گرم بر ثانیه)
۱۳۹۰/۰۲/۰۱	۱۲	۱/۱۳	۰/۵۷	۲۴/۴۳	۰/۰۹	۰/۰۳۵
۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۱۵	۱/۰۷	۰/۶۷	۲۹/۹۸	۰/۱۹	۰/۱۰
۱۳۹۰/۰۲/۰۳	۱۷	۱/۰۷	۰/۷۰	۳۲/۳۸	۰/۳۹	۰/۲۷
۱۳۹۰/۰۲/۱۳	۱۴	۱/۳۷	۰/۸۹	۴۰/۷۴	۰/۵۳	۰/۳۲
۱۳۹۰/۰۲/۱۴	۱۷	۱/۰۷	۰/۷	۳۸/۲۹	۰/۳۰	۰/۱۸

جدول ۳- ویژگی‌های آماری نمونه‌ها در پایه‌های زمانی مختلف

متغیر	ویژگی‌های آماری	پایه زمانی		
		بهار	پاییز	رگبار
دبی (مترمکعب بر ثانیه)	انحراف معیار	۳/۵۷	۲/۹۴	۳/۴۲
	حداکثر	۲۵/۳۱	۱۳/۸۰	۲۵/۳۱
	حداقل	۰/۲	۰/۳۴	۰/۲۰
	میانگین	۳/۶۶	۳/۳۲	۳/۶۴
	ضریب تغییرات	۰/۹۸	۰/۸۸	۰/۹۴
	انحراف معیار	۶/۵۳	۳/۹۵	۶/۱۱
	حداکثر	۴۸/۴۱	۱۸/۵۶	۴۸/۴۱
غلظت رسوب (گرم بر لیتر)	حداقل	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۱
	میانگین	۳/۷۱	۲/۳۰	۳/۳۵
	ضریب تغییرات	۱/۸۵	۱/۷۱	۱/۸۲
ذوب برف	انحراف معیار	۳/۵۷	۲/۹۴	۳/۴۲
	حداکثر	۲۵/۳۱	۱۳/۸۰	۲۵/۳۱
	حداقل	۰/۲	۰/۳۴	۰/۲۰

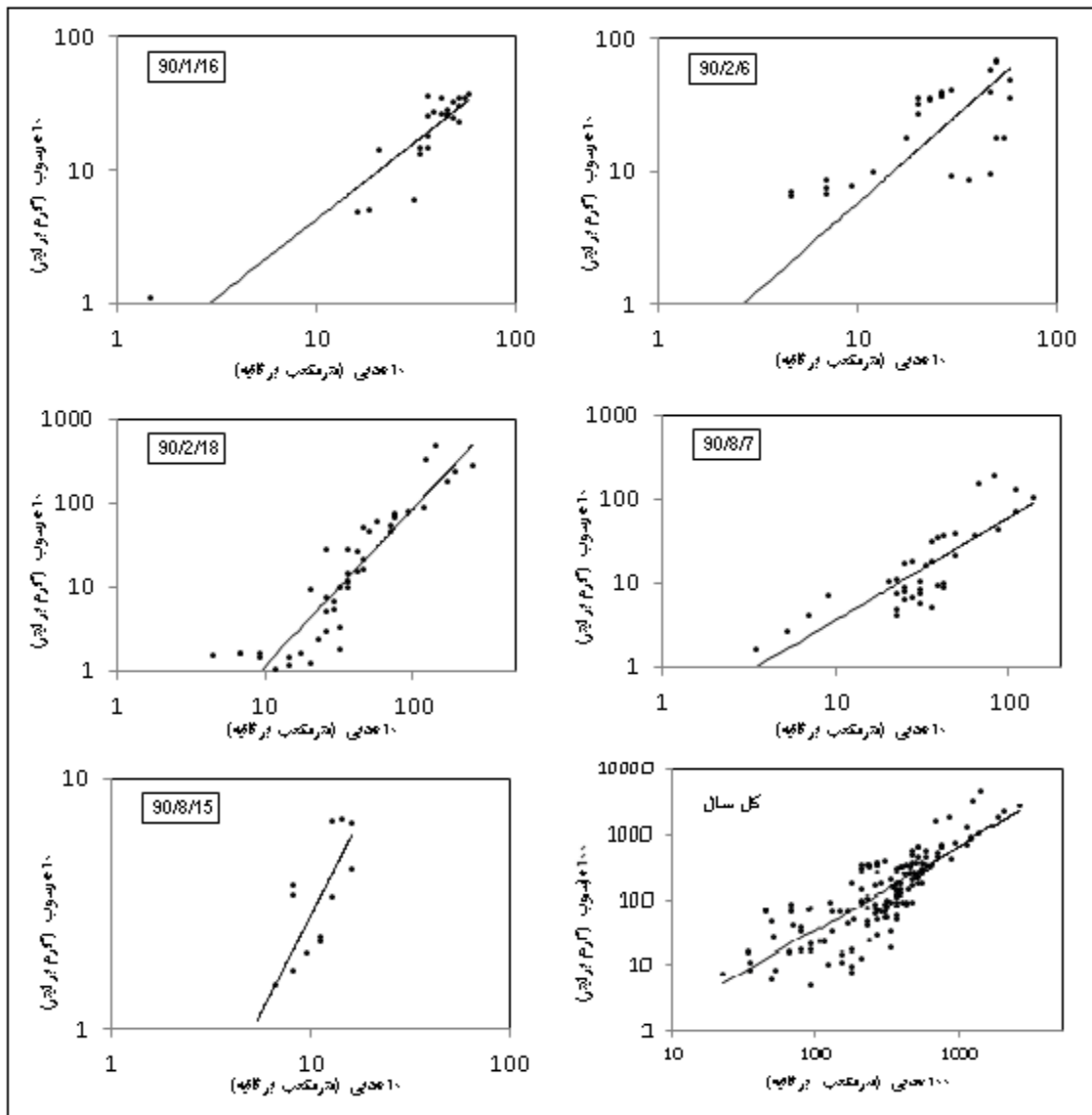
مقایسه میانگین غلظت رسوب و دبی در دو فصل بهار و پاییز حاکی از این است علی‌رغم نزدیک بودن دبی

بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده نیز نشان می‌دهد که دبی بالاتر رسوب بیشتری را با خود حمل کرده است.

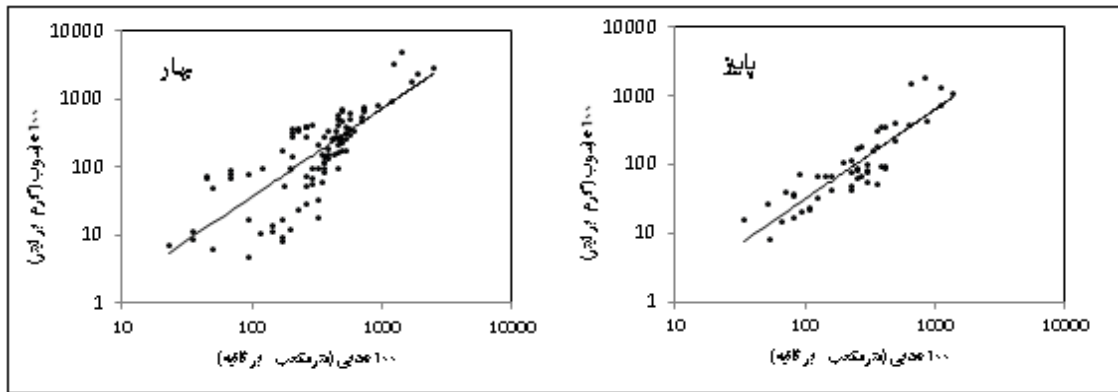
بارندگی کمتر است. همچنین، ضریب تغییرات آن‌ها (به ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۶۹) کمترین ضریب تغییرات است. **تفسیر و مقایسه منحنی‌های سنجه رسوب:** فرایند انتقال رسوب یک فرایند پویاست و از یک واقعه تا واقعه دیگر متغیر است. در مقیاس‌های زمانی متفاوت به دلیل دخالت فرایندهای گوناگون، انتقال رسوب باعث وجود روندهای مختلف در یک‌سری داده می‌شود (Gao و Josefsen, ۲۰۱۲). ترسیم منحنی‌های سنجه رسوب برای داده‌ها در پایه‌های زمانی مختلف در این مطالعه نیز روندهای متفاوت را نشان می‌دهد (شکل‌های ۳ و ۴)، هر روند با روابط خاصی برازش داده شده است و این به دلیل یکسان نبودن تولید مقدار رسوب و دبی طی وقایع سیلابی است (Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۸).

میانگین (۳/۶۶ و ۳/۳۲ مترمکعب بر ثانیه به ترتیب بهار و پاییز) در این دو فصل میانگین غلظت رسوب (۲/۷۱ و ۲/۳۰ گرم بر لیتر به ترتیب بهار و پاییز) ناشی از رویداد بارش بهاره بیشتر از پاییز بوده است. این اختلاف به دلیل پیک استثنایی بیش از ۲۵ مترمکعب بر ثانیه در ۱۸ اردیبهشت است. متغیرترین میزان رسوب و دبی نیز برای واقعه ۱۸ اردیبهشت است. همچنین، کمترین ضریب تغییرات برای داده‌های رسوب و رواناب مربوط به واقعه ۱۵ آبان ماه است. هم بیشترین و هم متغیرترین رسوب و رواناب مربوط به فصل بهار است.

این در حالی است که میانگین غلظت رسوب و رواناب ناشی از ذوب برف (به ترتیب ۰/۱۸ گرم بر لیتر و ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه) از کمترین میانگین داده‌های ناشی از



شکل ۳- منحنی‌های سنجه رسوب در پایه زمانی رگبار و سال



شکل ۴- منحنی‌های سنجه رسوب در پایه زمانی فصلی

می‌کند. نگاهی به مشخصات رگبارها در جدول ۱ و مقادیر ضرایب تاییدی بر این مسئله است که رگبارهای با مقدار دبی میانگین و اوج بالاتر دارای نمای بزرگ‌تری نسبت به ضریب هستند و این به دلیل بیشتر بودن توان فرسایشی این وقایع است که این مسئله نیز در مورد مقیاس فصلی صدق می‌کند، چرا که به هر حال فرایندهای مختلف انتقال رسوب تحت تاثیر همه وقایع رخ داده در آن فصل است، هر چند ممکن است نتایج متفاوت از وقایع منفرد در آن فصل باشد.

جزئیات منحنی سنجه به دست آمده برای داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف در جدول ۴ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کمترین مقدار ضریب همبستگی مربوط به داده‌های ذوب برف (۰/۵۰) و بیشترین مقدار متعلق به داده‌ها فصل پاییز (۰/۸۸) است. روابط برآزش شده بر داده‌های فصل بهار و پاییز وکل سال ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۸۸ و ۰/۷۹ را نشان می‌دهند. جدول ۶ نیز ضریب همبستگی برای داده‌های هر واقعه رگباری را در دامنه ۰/۶۵ برای رگبار مورخ ۹۰/۲/۶ تا ۰/۹۳ برای رگبار ۹۰/۲/۱۸ نشان می‌دهد.

جدول ۴- پارامترهای منحنی سنجه رسوب در پایه‌های مختلف

شاخه	زمانی					متغیر
	شاخه پایین رونده	ذوب برف	کل سال	پاییز	بهار	
ضریب نما	۰/۰۴	۰/۲۳	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۸	ضریب نما
ضریب همبستگی	۱/۵۶	۰/۷۷	۱/۳۲	۱/۳۰	۱/۳۳	ضریب همبستگی
تعداد داده‌ها	۰/۸۵	۰/۷۶	۰/۷۹	۰/۸۸	۰/۷۷	تعداد داده‌ها
	۱۰۶	۷۰	۱۵۶	۵۴	۱۰۲	

جدول ۵- پارامترهای منحنی سنجه رسوب در پایه رگبار

تاریخ وقوع	متغیر			تعداد داده‌ها
	ضریب همبستگی	نما	ضریب	
۹۰/۱/۱۶	۰/۹۰	۱/۱۷	۰/۲۹	۲۷
۹۰/۲/۶	۰/۶۵	۱/۳۲	۰/۲۸	۳۱
۹۰/۲/۱۸	۰/۹۳	۱/۸۷	۰/۰۱۵	۴۴
۹۰/۸/۷	۰/۸۳	۱/۲۳	۰/۲۱	۳۷
۹۰/۸/۱۵	۰/۸۲	۱/۵۵	۰/۰۸	۱۷

بر اساس جدول ۵ مقدار ضریب همبستگی برای سیلاب‌های ناشی از ذوب برف به مراتب بالاتر از کل داده‌های ذوب برف است. همبستگی پایین داده‌ها بیانگر ضریب تغییرات بالای آن‌ها می‌باشد. منحنی سنجه به دست آمده برای رگبارها به طور مجزا همبستگی بالاتری را نسبت به داده‌های کل سال نشان می‌دهد. ادغام سیلاب‌های با ویژگی‌های هیدرولوژیکی بسیار متفاوت می‌تواند باعث بالارفتن واریانس داده‌ها و در نتیجه کاهش ضریب همبستگی داده‌ها شود. بررسی روابط برآزش داده شده بر منحنی‌های سنجه (جدول‌های ۴، ۵ و ۶) نشان می‌دهد، مقدار نما در هر دو فصل بهار و پاییز کمتر از ضریب است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، بالا بودن مقدار توان نشان‌دهنده بالا بودن قدرت فرسایشی جریان آب بوده و میزان ضریب نشان‌دهنده میزان فرسایش‌پذیری حوضه است (Asselman, ۲۰۰۰، Gao و Josefsen, ۲۰۱۲ و Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۸). از آنجایی که انتقال رسوب معلق یک پدیده پویا و دینامیک است، به همین دلیل از یک واقعه تا واقعه دیگر تغییر

اگرچه منحنی‌های سنجه رسوب از نظر آماری معنی‌دار و قابل قبول هستند، اما در بسیاری از مطالعات عدم کارایی منحنی سنجه رسوب در تخمین رسوب معلق گزارش شده است. معمولاً توصیه می‌شود برای بهتر شدن روابط دبی و غلظت رسوب معلق سالانه، روابطی به‌طور جداگانه بر داده‌های بخش بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف برآزش داده شود. میزان تغییرات انتقال رسوب از شاخه بالارونده به شاخه پایین‌رونده هیدروگراف تحت تأثیر بی‌ثباتی جریان است (De Sutter و همکاران، ۲۰۰۱ و Gao و همکاران، ۲۰۱۲). همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده، تقسیم داده‌ها به دو گروه بالارونده و پایین‌رونده باعث تفاوت در ضریب هم‌بستگی آن‌ها شده است. این مسئله به‌ویژه در مورد داده‌های شاخه بالارونده باعث بهبود روابط شده و یک مدل معتبرتر را ارائه داده است. این نتایج با یافته‌های Sadeghi و همکاران (۲۰۰۸) و همچنین Horowitz (۲۰۰۳) مطابقت دارد.

به‌طور کلی نتایج نشان‌دهنده عدم تفاوت در فرسایش‌پذیری حوضه در فصل‌های مختلف است. این امر با نتایج Gao و همکاران (۲۰۱۲) مبنی بر بالا بودن توان فرسایشی رگبارها در فصل پاییز تفاوت دارد. همچنین، براساس جدول‌های ۵ و ۶ و مقایسه روابط وقایع رگباری با وقایع برفی تأکیدی بر بیشتر بودن توان فرسایشی رواناب‌های ناشی از رگبار نسبت به ذوب برف است.

جدول ۶- پارامترهای منحنی سنجه رسوب در وقایع ذوب برف

تاریخ وقوع	متغیر		تعداد داده‌ها
	ضریب	نما	
۹۱/۲/۱	۱/۵۳	۰/۲۶	۱۰
۹۱/۲/۲	۲/۶۷	۰/۶۲	۱۱
۹۱/۲/۳	۲/۱۱	۰/۹۰	۱۷
۹۱/۲/۱۳	۳/۵۷	۱/۲۶	۱۵
۹۱/۲/۱۴	۱/۷۷	۰/۵۲	۱۷

جدول ۷- ویژگی‌های آماری نمونه‌ها ناشی از شاخه بالارونده و پایین‌رونده در پایه رگبار

تاریخ وقوع	کل هیدروگراف			شاخه بالا رونده			شاخه پایین رونده		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
۹۰/۱/۱۶	۲/۲۸	۰/۶۷	۰/۹۰	۱/۲۹	۰/۲۱	۰/۹۲	۰/۰۴	۱/۶۹	۰/۸۷
۹۰/۲/۶	۰/۵۸	۱/۳۲	۰/۶۵	۰/۸۲	۲/۵۰	۰/۸۸	۲/۹۹	۰/۴۶	۰/۷۵
۹۰/۲/۱۸	۰/۰۶۷	۲/۱۶	۰/۹۳	۲/۴۴	۰/۰۱۸	۰/۹۰	۰/۰۴	۱/۶۶	۰/۹۴
۹۰/۱/۷	۰/۳۵۵	۱/۲۲	۰/۸۳	۱/۵۵	۰/۱۲	۰/۸۷	۰/۲۶	۱/۱۰	۰/۸۷
۹۰/۱/۱۵	۱/۷۵	۰/۴۳	۰/۸۲	۱/۲۲	۰/۲۷	۰/۹۸	۰/۰۶	۱/۵۸	۰/۹۶

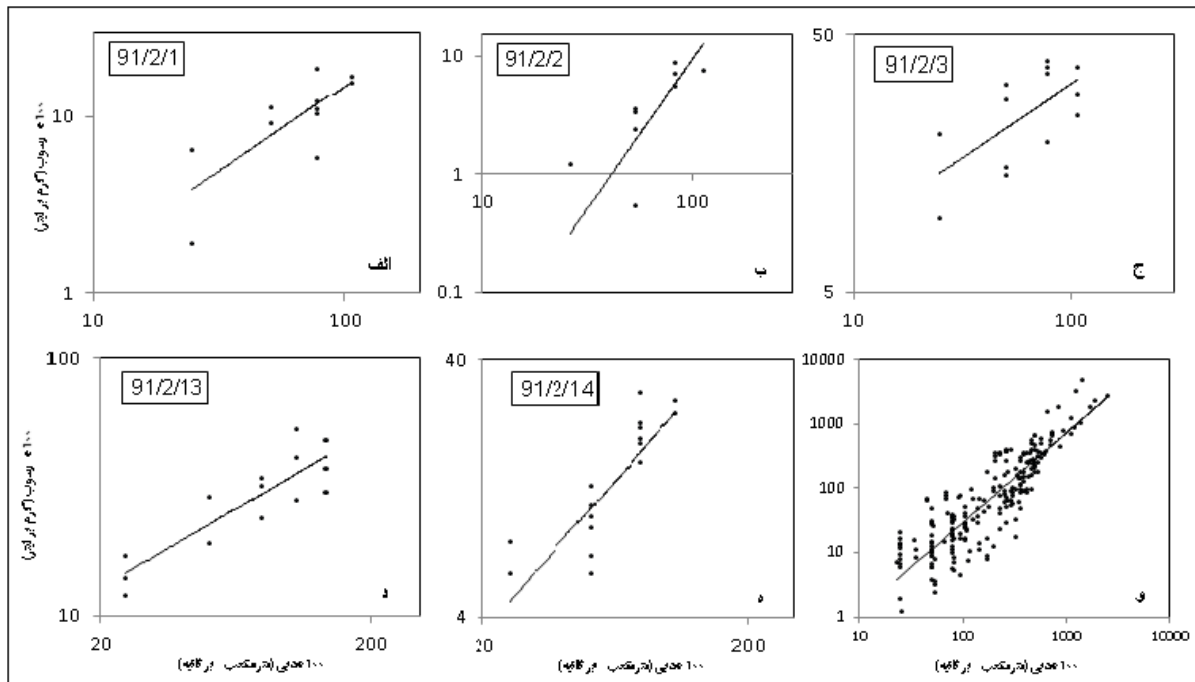
ساعت‌گرد در عوض مناطق منبع رسوب غالباً در دامنه‌ها قرار گرفته‌اند و مواد نسبت به دبی اوج به آرامی حرکت می‌کنند (Lenzi و همکاران، ۲۰۰۶ و Gentile و همکاران، ۲۰۱۰).

در پژوهش مورد نظر، رگبارهای پاییزی دارای الگوی ساعت‌گرد و بهاری دارای الگوی مرکب از پادساعت‌گرد و ترکیبی هستند. با نگاهی به جدول ۱ و ویژگی‌های رگبارهای اندازه‌گیری شده معلوم می‌شود که وقایعی که در تاریخ ۱۶ فروردین، ۱۸ اردیبهشت و هفت آبان ماه اتفاق افتاده است تقریباً از شدت بالاتری برخوردار بوده است و همان‌طور که در شکل ۵ (و) آمده است، الگوی روابط آن‌ها هم از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. الگوهای روابط بین دبی و غلظت رسوب که به شکل

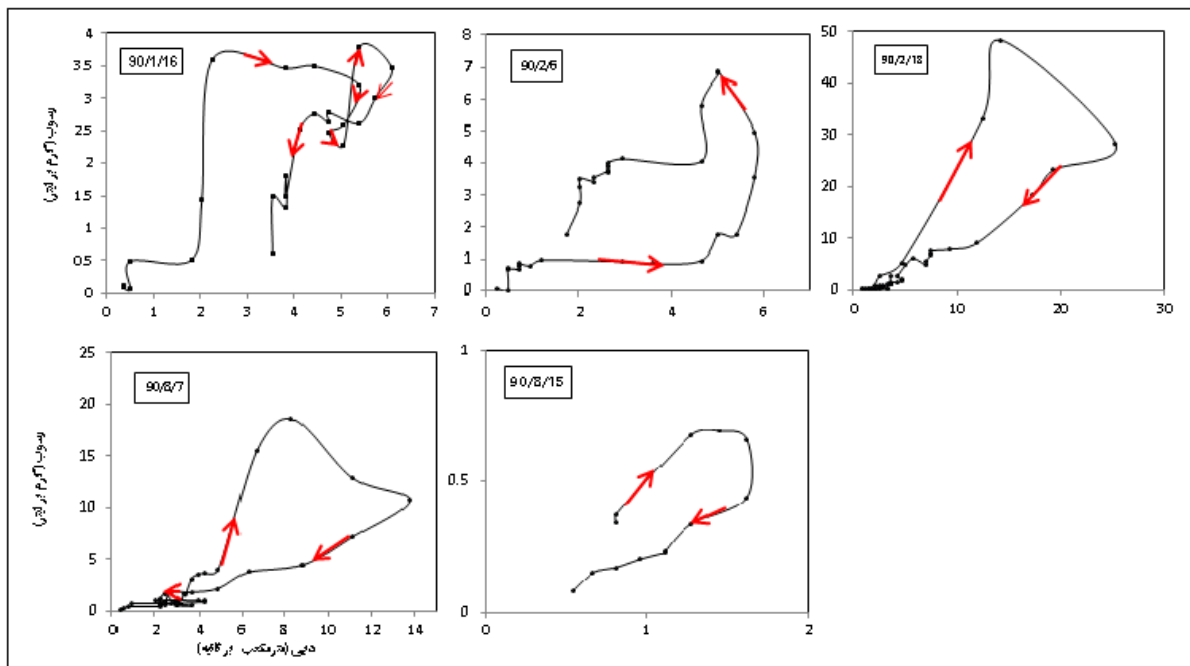
منحنی‌های سنجه به‌دست آمده برای نتایج حاصل از داده‌های رواناب و رسوب ناشی از ذوب برف در شکل ۵ (الف الی ه) ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده، روند متفاوتی با منحنی‌های ناشی از بارش باران دارند. با توجه به طبیعت رواناب‌های ناشی از ذوب برف و تفاوت آن با رواناب‌های ناشی از بارندگی و بحث ایجاد فرسایش بارانی دلیل تفاوت دینامیک انتقال رسوب به‌وسیله این دو واقعه است. الگوی روابط دبی و رسوب و به‌عبارت دیگر شکل حلقه‌ها بستگی به در دسترس بودن مقدار رسوبی دارد که از عرضه رسوب ناشی می‌شود (Gentile و همکاران، ۲۰۱۰). در حلقه‌های ساعت‌گرد یک افزایش سریع رسوب معلق در شروع رگبار در نتیجه وجود رسوب آماده در آبراهه به‌وجود می‌آید. در حلقه‌های خلاف



حلقه‌های ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد است نیز برای داده‌های برداشت شده به‌دست آمدند (شکل ۶).



شکل ۵- منحنی‌های سنجش ناشی از وقایع ذوب برف (الف الی ه) و منحنی سنجش ناشی از داده‌های رگبار و وقایع ذوب برف (و)



شکل ۶- الگوهای روابط دبی و رسوب رگباری

بنابراین، به‌سرعت رسوبات تخلیه شده و در شاخه پایین‌رونده با گذشت زمان مقدار رسوب کمتر می‌شود، در نتیجه نمودار به شکل حلقه‌ای ساعت‌گرد خواهد بود. از سوی دیگر در صورت شدیدتر بودن رگبار و بسته به اوج

مطالعات نشان داده است که معمولاً شدیدترین وقایع به‌وسیله حلقه‌های ساعت‌گرد یا ترکیبی تعیین شده‌اند. به این دلیل که هر چه رگبار شدیدتر باشد، مقدار رسوب در شاخه بالا رونده هیدروگراف به‌صورت افزایشی است.

هم‌زمان نبودن بارندگی‌ها با دوره رشد فعال گیاهان و بالاتر بودن شدت رگبارها در فصل بهار و در نتیجه توان بیشتر برای حمل رسوبات، باعث بالاتر بودن غلظت رسوبات در فصل بهار شده است. همچنین، در فصل بهار به دلیل وجود رواناب‌های ناشی از ذوب برف و حمل رسوب و بر جای‌گذاری آن‌ها در آبراهه‌ها با وقوع بارندگی و جاری شدن سیلاب این رسوبات در دسترس به داخل رواناب وارد شده و باعث بالا رفتن میزان غلظت رسوب می‌شود. بررسی منحنی‌های سنج در مقیاس رگبار، فصلی و سالی نشان از بهتر بودن روابط در استفاده از داده‌های رگباری دارد. این مسئله بیانگر تغییرپذیری زیاد رسوب در کل سال بوده و نشان می‌دهد که اگرچه داده‌های بیشتر اطلاعات زیادتری از تغییرات رسوب را به دست می‌دهد، اما ممکن است باعث ایجاد اختلال شده و منجر به ایجاد منحنی‌های با مقادیر ضریب تبیین پایین شود (Horowitz, ۲۰۰۳ و Crowder و همکاران، ۲۰۰۷).

#### تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از تمامی کسانی که در راه این پژوهش یاری رساندند، از جمله از زحمات بی‌شائبه جناب آقای مهندس بختیار فتاحی در برداشت نمونه‌های صحرایی و همچنین، از کارکنان سازمان آب منطقه‌ای استان همدان مخصوصاً جناب آقای مهندس که متحمل زحمت شدند، کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

گرفتن شدت یا کاهش آن با گذشت زمان ممکن است رواناب قادر به حمل رسوب بیشتر شود یا منابع جدید رسوب اضافه شود و یا برعکس توان حمل کاهش یابد. به‌همین دلیل، شکل حلقه رسوب حالت ترکیبی به خود خواهد گرفت.

الگوی پادساعت‌گرد غالباً مربوط به وقایع با شدت متوسط است. در این حالت، رسوبات به آرامی در جریان حمل قرار می‌گیرند، بنابراین اوج رسوب بعد از اوج دبی اتفاق می‌افتد. رگبار ششم اردیبهشت را می‌توان جزء وقایع با شدت متوسط طبقه‌بندی کرد در حالی که رگبار ۱۵ آبان جزء رگبارهای با شدت کم است. در رگبارهای با شدت کم نیز الگوی حلقه به شکل ساعت‌گرد خواهد بود زیرا با گذشت زمان و در شاخه پایین‌رونده هیدروگراف مقدار رسوب در دسترس کاهش پیدا کرده است.

در این پژوهش، یک پایش یک‌ساله برای بررسی وضعیت انتقال رسوب معلق در مقیاس رگبار صورت گرفته است که طی آن پنج رگبار در فصول بهار و پاییز و پنج واقعه رواناب و رسوب ناشی از ذوب برف در فصل بهار جمع‌آوری شد. سپس، داده‌های به‌دست آمده برای بررسی روابط بین غلظت رسوب و دبی تحلیل شدند. بررسی‌ها حاکی از تغییرات پویای رسوب در مقیاس زمانی است. با توجه به نتایج، رگبارهای به‌وقوع پیوسته در فصل بهار از شدت و حجم بالاتری برخوردار هستند و از سوی دیگر به‌دلیل کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه، دوره رشد فعال گیاهان تقریباً اواخر اردیبهشت است در نتیجه،

#### منابع مورد استفاده

1. Asselman, N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234: 228-248.
2. Crowder, D.W., M. Demissie and M. Markus. 2007. The accuracy of sediment loads when log transformation produces nonlinear sediment load discharge relationships. *Journal of Hydrology*, 336: 250-268.
3. De Sutter, R., R. Verhoeven and A. Krein. 2001. Simulation of sediment transport during flood events: laboratory work and field experiment. *Hydrological Sciences*, 46 (4): 599-610.
4. Eder, A., P. Strauss, T. Krueger and J.N. Quinton. 2010. Comparative calculation of suspended sediment loads with respect to hysteresis effects (in the Petzenkirchen catchment, Austria). *Journal of Hydrology*, 389: 168-176.
5. Gao, P. and M. Josefson, 2012. Temporal variations of suspended sediment transport in Oneida Creek Watershed, Central New York. *Journal of Hydrology*, 426-427: 17-27.
6. Gao, P. and M. Josefson. 2012. Suspended sediment dynamics during hydrological events in a Central New York Watershed. *Geomorphology*, 139-140: 425-437.
7. Gentile, F., T. Bisantino, R. Corbino, F. Milillo, G. Romano and G. Trisorio Liuzzi. 2010. Monitoring and analysis of suspended sediment transport dynamics in the Carapelle torrent (Southern Italy). *Catena*, 80: 1-8.

8. Horowitz, A.J. 2003. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, 17: 3387–3409.
9. Hu, B., H. Wang, Z. Yang and X. Sun. 2009. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) Basin and their implications. *Quaternary International*, 230(1-2): 34–43.
10. Hudson, P.F. 2003. Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco Basin México. *Catena*, 52: 57–76.
11. Lenzi, M.A., L. Mao and F. Comiti. 2006. Effective discharge for sediment transport in a mountain river: computational approaches and geomorphic effectiveness. *Journal of Hydrology*, 326: 257–276.
12. Mazaheri, H. 1997. A research of identification and categorization of region susceptible to erosion in Abshineh River Catchment. PhD Thesis, 256 pages (in Persian).
13. Morehead, M.D., J.P.M. Syvitski, E.W.H. Hutton and S.D. Peckham. 2003. Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins. *Global and Planetary Change*, 39(1–2): 95–110.
14. Oeurng, C., S. Sauvage and J.M. Sánchez-Pérez. 2010. Dynamics of suspended sediment transport and yield in a large agricultural catchment. *Southwest France Earth Surface Processes and Landforms*, 35(11): 1289–1301.
15. Old, G.H., D.M. Lawler and A. Snorrason. 2005. Discharge and suspended sediment dynamics during two jokulhlaups in the Skaf River, Iceland. *Earth Surface Process Land*, 30: 1441–1460.
16. Picouet, C., B. Hingray and J.C. Olivry. 2001. Empirical and conceptual modeling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger River Basin. *Journal of Hydrology*, 250: 19–39.
17. Rovira, A. and R.J. Batalla. 2006. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: the Lower Tordera (NE SPAIN). *Geomorphology*, 79(1–2): 58–71.
18. Sadeghi, S.H.R., T. Mizuyama, S. Miyata, T. Gomi, K. Kosugi, T. Fukushima, S. Mizugaki and Y. Onda. 2008. Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. *Geoderma*, 144: 198–211.
19. Sadeghi, S.H.R., B. Toofighi and M. Mahdavi. 2006. Sediment estimation modeling in Zarrin Derakht Watershed. *Natural Resources Journal*, 58(4): 1-9 (in Persian).
20. Schmidt, K.H. and D. Morche. 2006. Sediment output and effective discharge in two small high mountain catchments in the Bavarian Alps Germany. *Geomorphology*, 80(1–2): 131–145.
21. Smith, R.J. 2005. Logarithmic transformation bias in allometry. *American Journal of Physical Anthropology*, 90(2): 215–228.
22. Syvitski, J.P.M., M.D. Morehead, D.B. Bahr, T. Mulder. 2000. Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters. *Water Resources Research*, 36(9): 2747–2760.

## Seasonal variations of suspended sediment concentration in rain and snow melting floods

Soheyla Aghabeigi<sup>\*1</sup>, Abdol Rasoul Telvari<sup>2</sup>, Sayed Khalagh Mirnia<sup>3</sup>, Sadat Feiznia<sup>4</sup> and Mehdi Vafakhah<sup>5</sup>

<sup>1</sup> PhD Student, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran <sup>2</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Unit, Islamic Azad University, Iran, <sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran, <sup>4</sup> Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran, <sup>5</sup> Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran

Received: 27 February 2013 Accepted: 27 August 2013

### Abstract

Sediment concentration in rivers, especially in seasonal ones, is affected by flood situation due to changes of rainfall or snowmelt events. Due to the importance of flooding flows in inundation and the useful age of reservoirs built on seasonal rivers, the study and assessment of this issue seems to be essential. In the present research, suspended sediment concentration variation in spring and autumn floods and runoff from snowmelt in spring, have been studied for Abshine River in Ekbatan Dam Watershed. Over the forecast period, three storms in autumn, two storms in spring and five snow melt events were selected and compared. Analyzing 226 suspended load samples showed its variability in the area. Sediment rating curves in different base times showed different trends. The correlation coefficient ( $r$ ) were 0.79 and 0.50 for storms and snowmelts and 0.81 for all data, respectively. Also, coefficient and power value analysis of sediment rating curve, presented the same erodibility for hill slope in both seasons (spring and autumn). Separating falling and rising limbs of flow hydrograph and assessing their effect on discharge explains a better Q-sediment concentration relationship. The hysteretic shape of discharge and sediment concentration had clockwise and anticlockwise form and compound pattern of both forms that reflected the distribution of probable sediment sources throughout the catchment.

**Key words:** Ekbatan Dam Watershed, Sediment rating curve, Seasonal river, Storm, Suspended load

---

\* Corresponding author: saghabeigi@yahoo.com