

اندازه‌گیری و تخمین تغییرات زمانی رسوب معلق با استفاده از رویکرد منحنی سنجۀ رسوب در رودخانه مرگ

سهیلا آقابگی امین* - استادیار منابع طبیعی (علوم و مهندسی آبخیزداری)، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
حیدر میرزایی - استادیار منابع طبیعی (مهندسی مرتعداری)، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۹

وصول: ۱۳۹۵/۱۲/۰۶

چکیده

رسوب معلق به عنوان یک جزء مهم هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و اکولوژیکی، عامل مستقیم ناپایداری رودخانه‌ها شناخته شده است؛ بنابراین، شناخت تغییرپذیری آن در رودخانه‌ها برای مدیریت منابع آب و مسائل محیط‌زیستی امری ضروری است. به این منظور، تعداد پنج رگبار طی یک دوره ۴ ماهه در سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵ در رودخانه مرگ نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل شدند. نمونه‌برداری‌ها، در فواصل زمانی دو تا چهار ساعته انجام گرفت و میزان غلظت رسوب معلق در آزمایشگاه با استفاده از کاغذ صافی به دست آمد. تخمین تغییرات زمانی رسوب معلق طی رگبار با استفاده از منحنی‌های سنجۀ رسوب صورت گرفت. رویکردهای مختلفی از جمله تهیه منحنی سنجۀ رسوب بر اساس الگوی حلقه‌های رسوبی، تفکیک هیدرولوژیکی و مقیاس فصلی به کار گرفته شد. رگبارهای اندازه‌گیری شده دارای مقادیر دبی بیک از ۱/۳۸ تا ۴۹/۴۰ متر مکعب بر ثانیه بودند که دامنه مناسبی از دبی‌های بیک کم تا زیاد در این رودخانه را پوشش می‌دهد. همچنین غلظت رسوب حداکثر اندازه‌گیری شده در این رگبارها نیز از حداقل ۱ تا حداکثر ۱۵/۲ گرم بر لیتر به دست آمد. میانگین بار رسوب معلق در دوره مطالعاتی ۱۵۹۱۹ تن بوده است. اندازه‌گیری رسوب معلق طی دو فصل زمستان و بهار در حوضه مورد مطالعه نشان داد که میزان تولید و انتقال رسوب در بهار بیشتر از زمستان است. روابط برآزش شده بر تمامی منحنی‌های سنجۀ معتبر و دارای ضریب تبیین بالای ۰/۵ و خطای تخمین زیر ۵۰٪ بودند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که منحنی سنجۀ در رودخانه مرگ می‌تواند تخمین قابل قبولی از بار رسوب معلق بدون نیاز به طبقه‌بندی یا تفکیک داده‌ها ارائه دهد.

واژگان کلیدی: آب‌نمود، الگوی حلقه رسوب، رسوب‌نمود، رگبار، حوضه آبخیز مرگ.

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل وجود رگبارها و فقدان پوشش حفاظت طبیعی خاک، پتانسیل بالایی برای تولید و انتقال مقادیر زیادی از رسوبات در فصل بارندگی توسط رواناب‌ها وجود دارد (وی^۱ و همکاران ۲۰۱۶). به دلیل اهمیت شناخت الگوهای توزیع فرسایش، غلظت و انتقال رسوب در حوضه رودخانه‌ها، باید به مدیریت رودخانه‌ها توجه بیشتری شده و مطالعات بر روی تغییرات، نوسانات و پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها و دبی رسوب در سیستم‌های رودخانه افزایش یابد (سویف^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). رسوب، نقش مهمی در فرایندهای هیدروفیزیکی و اکولوژیکی حوضه رودخانه‌ها دارد. ورود رسوب به رودخانه‌ها باعث ایجاد بسیاری از مشکلات از جمله کاهش ظرفیت ذخیره مخازن از طریق رسوب‌گذاری و افزایش گل‌آلودگی در سیستم‌های توزیع آب می‌شود. نرخ کاهش ظرفیت ذخیره مخازن توسط رسوبات معلق در دنیا به طور متوسط ۱٪ در سال گزارش شده است (روویرا^۳ و همکاران، ۲۰۱۵).

وجود عوامل طبیعی زمینه‌ساز فرسایش در ایران، باعث شده‌اند که پتانسیل بالایی را برای فرسایش آبی داشته (مصفايي و طالبی، ۲۰۱۴) و به دلیل اقدامات مخرب مانند تغییر کاربری اراضی و جنگل‌زدایی و کاهش شدید پوشش گیاهی، بار رسوب بسیار قابل توجه باشد. این در حالی است که هیچ‌گونه داده جامعی از رسوب معلق برای رودخانه‌های کشور وجود ندارد و داده‌های رسوب بسیار پراکنده و نامنظم و به تعداد معدودی به طور تصادفی در طول سال توسط ادارات و وزارت نیرو برداشت می‌شود. این فقدان اطلاعات تغییرات گل‌آلودگی در رودخانه‌ها، مانع اجرای صحیح طرح‌های مدیریت منابع آب می‌شود (رستریو^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). در بسیاری از حوضه‌ها، وقایع بارشی کوتاه‌مدت و شدید، دلیل بخش بزرگی از انتقال رسوب کل حوضه است (بوسی^۵ و همکاران، ۲۰۱۶)؛ بنابراین، شناخت تغییرپذیری در مقیاس‌های مختلف عرضه رسوب (سالانه، فصلی، روزانه و...) از جمله در مقیاس رگبار برای مدیریت و درک سیستم رودخانه و سازه‌های آبی بسیار مهم است. تخمین بار رسوب معلق باید بر اساس داده صورت گیرد. نبود داده‌های کافی و مناسب باعث شده است که روش‌های تجربی به طور گسترده‌ای برای این امر مورد استفاده قرار گیرند (اسلمن، ۲۰۰۶؛ هوروویتز^۷، ۲۰۰۸؛ هیگینز^۸ و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، انتخاب روش مناسب برای تخمین بار رسوب معلق در رودخانه‌های فاقد آمار یا با آمار ناکافی، بسیار مهم است (خانچول^۹ و همکاران، ۲۰۱۲).

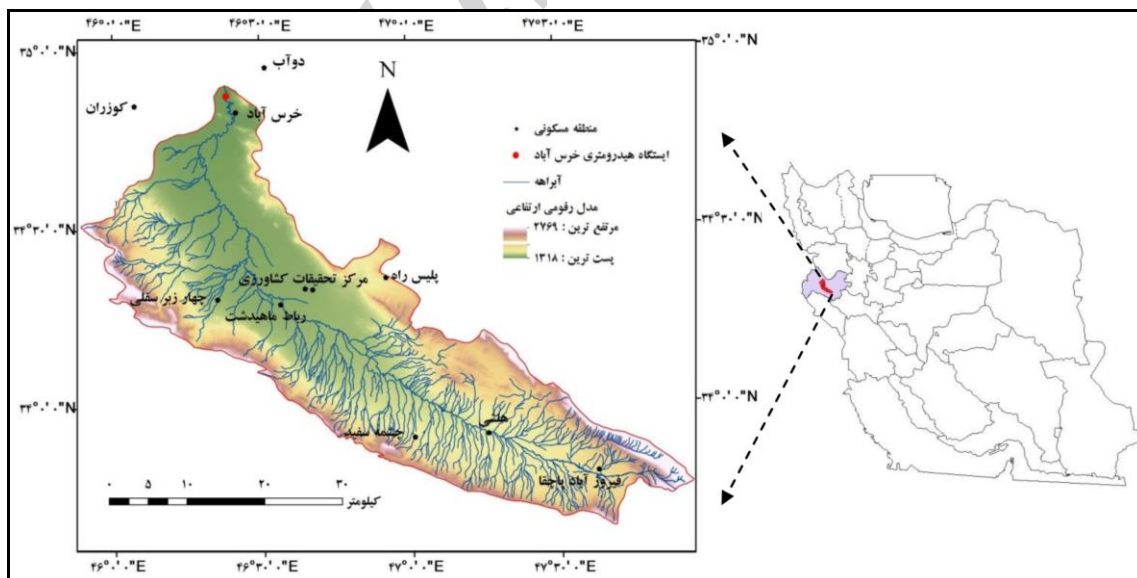
منحنی‌های سنجه رسوب و روابط رگرسیونی به طور گسترده برای تخمین بار رسوب معلق به کار می‌روند (کویلب^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۶؛ صادقی و همکاران، ۲۰۰۸؛ دروری^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۹؛ ترامبلی^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۰؛ ادر^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۰؛ هو^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۱؛ هارینگتون^۱ و هارینگتون، ۲۰۱۲؛ گائو و

- 1- Wei
- 2- Suif
- 3- Rovira
- 4- Restrepo
- 5- Bussi
- 6- Asselman
- 7- Horowitz
- 8- Higgins
- 9- Khanchoul
- 10- Quilbe
- 11- Drewry
- 12- Trambly
- 13- Eder
- 14- Hu

جفرسون^۱، ۲۰۱۲؛ سینگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۳؛ هیگینز^۳ و همکاران، ۲۰۱۵ و اولیویرا و کوارسما^۵، ۲۰۱۷). مطالعات در زمینه رسوب معلق در رودخانه‌های ایران به دلیل نبود و یا وجود داده‌های پراکنده، بسیار مشکل بوده و بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه (فضلی و همکاران، ۱۳۸۹؛ ریسی و صادقی، ۱۳۸۹؛ نور و صادقی، ۱۳۹۰؛ آقابگی امین و همکاران، ۱۳۹۲؛ اسدالهی و همکاران، ۱۳۹۲؛ عرب‌خداری، ۱۳۹۳؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۴ و سعیدی و همکاران، ۱۳۹۵) اگرچه دارای نتایج ارزشمندی است، اما کافی نبوده و ضرورت مطالعه و بررسی هرچه بیشتر تغییرات زمانی رسوب معلق به‌ویژه طی رگبار برای دستیابی به مدیریت پایدار رودخانه‌ها همچنان وجود دارد، و این امر مستلزم تخمین گذشته، حال و آینده بار رسوب معلق برای ارزیابی مقدار رسوب و نرخ کاهش کیفیت آب و مخازن است. هدف از این مطالعه، بررسی تغییرات درون رگباری و فصلی رسوب معلق طی رگبار و ارزیابی رویکرد منحنی سنجه رسوب در تخمین رسوب معلق در پایه رگبار در حوضه آبخیز رودخانه مرگ واقع در استان کرمانشاه است.

مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز مرگ با مساحت ۱۴۴۶ کیلومتر مربع در غرب ایران و در استان کرمانشاه قرار دارد (شکل ۱). این حوضه یکی از مهم‌ترین زیرحوضه‌های رودخانه قره‌سو و کرخه است. حوضه مرگ، منطقه‌ای نسبتاً کوهستانی است که ۳۷٪ اراضی آن را کوه‌ها و تپه‌ها تشکیل می‌دهند. ارتفاع متوسط حوضه ۱۵۲۴ متر از سطح دریا است. شیب عمومی حوضه در حدود ۶٪ است. طول رودخانه مرگ تا محل ایستگاه هیدرومتری خرس آباد ۱۲۱/۳۴ کیلومتر است که از ارتفاعات کوه سفید در شمال شرقی و کوه نثار در جنوب شرقی حوضه سرچشمه گرفته و سرانجام در شرق روستای خرس آباد از محدوده خارج می‌شود (کریمی و همکاران، ۱۳۸۸). زمان تمرکز این حوضه بر اساس روش کالیفرنیا ۱۵/۴ ساعت است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز مرگ در ایران و استان کرمانشاه

- 1- Harrington
- 2- Gao & Josefson
- 3- Singh
- 4- Higgins
- 5- Oliveira & Quaresma

برای انجام پژوهش حاضر و تهیه داده‌های رسوب معلق و دبی جریان، نمونه‌برداری از آب و رسوب در محل ایستگاه آب‌سنجی خرس‌آباد در دو فصل زمستان ۱۳۹۴ و بهار ۱۳۹۵ صورت گرفت. در زمان وقوع بارندگی، هم‌زمان با تشکیل رواناب و بالا آمدن سطح آب در رودخانه در فواصل زمانی مختلف از ۲ تا ۴ ساعت نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌برداری‌ها تا حدّ ممکن از وسط رودخانه و به روش انتگراسیون عمقی صورت گرفت. در طول مدت نمونه‌برداری سعی بر این شد تا وقایع رگباری که دارای حجم قابل توجهی از رواناب و رسوب بودند نمونه‌برداری شده و در طول سیلاب نیز تا حدّ امکان نمونه‌برداری‌ها در دفعات زیاد صورت گیرد. هرچند مشکلاتی در نمونه‌برداری در طول شب وجود داشته و مانع از اخذ نمونه به‌ویژه در فواصل زمانی بین ساعت ۱۰ شب تا ۷ صبح شده است؛ سپس نمونه‌های آب حاوی رسوب به آزمایشگاه منتقل شده و برای اندازه‌گیری رسوب معلق از روش صاف کردن کاغذ صافی استفاده شد (آقابیگی امین و همکاران، ۱۳۹۲). دبی‌های متناظر با نمونه‌های رسوب نیز، با استفاده از رابطه دبی اشل ایستگاه سازمان آب منطقه‌ای محاسبه شد. جداسازی آب پایه و رسوب پایه به روش خطّ مستقیم (سینگ، ۱۹۹۲) انجام شد. به این ترتیب، داده‌های غلظت رسوب معلق و دبی جریان در دو فصل زمستان و بهار به دست آمد. با توجه به داده‌های دبی و رسوب، آب‌نمود و رسوب‌نمود را رسم و متغیرهای مختلف آنها مانند حداکثر، متوسط، زمان تا اوج و زمان پایه آب‌نمود و رسوب‌نمود تعیین شد؛ همچنین اطلاعات بارش ایستگاه روانسر که در فاصله ۲/۶ کیلومتر از ایستگاه هیدرومتری قرار دارد، نیز از اداره هواشناسی اخذ و خصوصیات مختلف مانند بارندگی کل، حداکثر و متوسط شدت بارش برای هر سیلاب به دست آمد.

به منظور تخمین رسوب معلق از رویکرد منحنی سنجی رسوب استفاده شد. منحنی سنجی رسوب به طور گسترده برای تخمین غلظت رسوب معلق و تعیین دبی رسوب در مناطقی که داده‌های رسوب به طور پراکنده وجود دارد استفاده می‌شود. معمولاً با برازش رابطه خطی بر لگاریتم داده‌های دبی یا رسوب معلق و یا برازش رابطه توانی بر داده‌های نرمال، این منحنی به دست می‌آید. در این مطالعه از رابطه توانی برای به دست آوردن منحنی سنجی رسوب استفاده شد. از آنجایی که استفاده از یک منحنی سنجی برای کلّ واقعه سیلابی ممکن است خطای نسبتاً زیادی را در برآورد بار رسوبی در برخی وقایع ایجاد کند، برای اجتناب از این امر، منحنی سنجی جداگانه برای شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف، داده‌های فصلی (زمستان و بهار) و همچنین الگوی حلقه‌های رسوبی تهیه شد و با منحنی سنجی به دست آمده از کلّ داده‌ها مورد مقایسه قرار گرفتند. یکی از راه‌ها برای به دست آوردن بهترین منحنی سنجی رسوب، ترسیم الگوهای حلقه رسوب و به دست آوردن منحنی سنجی رسوب بر اساس الگوهای متفاوت در رگبارها است. بدین منظور، ابتدا الگوی حلقه‌های رسوب برای هر یک از وقایع رگباری ترسیم گردید، تا در صورت وجود الگوهای متفاوت در یک رگبار منحنی سنجی جداگانه برای هر الگو رسم شود.

برای ارزیابی منحنی‌های سنجی رسوب، علاوه بر ضریب تبیین از معیار خطای نسبی تخمین نیز استفاده گردید (هوروویتز، ۲۰۰۸؛ کرودر^۲ و همکاران، ۲۰۰۷؛ هارینگتون و هارینگتون، ۲۰۱۲). به همین دلیل، در هر واقعه رگباری ۳۰٪ داده‌ها کنار گذاشته شده و منحنی سنجی با باقی داده‌ها به دست آمد؛ سپس برای ارزیابی منحنی‌های سنجی تهیه‌شده و به دست آوردن خطای تخمین از داده‌های کنار گذاشته‌شده استفاده شد.

1- Horowitz

2- Crowder

نتایج

برای به دست آوردن داده‌های دبی و رسوب معلق، از وقایع رگباری متعددی که از بهمن تا اردیبهشت سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵ به وقوع پیوستند نمونه‌برداری صورت گرفت. از بین رگبارهای نمونه‌برداری شده در نهایت پنج رگباری که به تعداد کافی از آنها نمونه‌برداری شده و این نمونه‌ها پراکنش مناسبی از شروع تا پایان سیلاب داشتند، انتخاب شدند (جدول ۱)؛ بنابراین، سیلاب‌هایی که تعداد نمونه‌های رسوبی آنها محدود و پراکنده بودند حذف شدند. با آنالیز نمونه‌ها، داده‌های غلظت رسوب معلق به دست آمد. از آنجا که نمونه‌برداری به صورت دستی و در فواصل زمانی چند ساعته صورت گرفت، ممکن است در حد فاصل بین نمونه‌برداری‌ها مقادیر مهم و حداکثری از دست رفته باشد. رگبارها دارای مقادیر دبی پیک از $1/38$ تا $49/40$ متر مکعب بر ثانیه بودند که دامنه مناسبی از دبی‌های پیک کم تا زیاد در این رودخانه را پوشش می‌دهد. از بین وقایع، واقعه تاریخ $1394/12/26$ کمترین مقدار دبی میانگین، دبی حداکثر و رسوب میانگین و رسوب حداکثر را داراست در حالی که واقعه رگباری تاریخ $1395/1/25$ بیشترین میزان دبی میانگین و غلظت رسوب میانگین را داراست و واقعه رگباری $1395/1/8$ از نظر دبی و رسوب پیک بیشترین مقدار را در میان تمامی رگبارها دارد. در کل، تعداد ۸۲ نمونه رسوبی در طول دوره نمونه‌برداری اندازه‌گیری و آنالیز شدند.

از آنجا که مقدار کل بارندگی در رگبارهای اندازه‌گیری شده دارای اختلاف قابل ملاحظه از $27/5$ تا 109 میلی‌متر هستند، در نتیجه منجر به تولید دبی‌های میانگین با مقادیر متفاوت از $0/79$ تا $10/29$ متر مکعب بر ثانیه شده‌اند. بر همین اساس، دامنه تغییرات دبی حداکثر نیز از $1/38$ تا $49/4$ متر مکعب بر ثانیه مشاهده شده است. مقادیر متفاوت دبی منجر به مقادیر متفاوت غلظت میانگین و حداکثر رسوب در این رگبارها نیز شده است؛ در نتیجه آن، غلظت رسوب معلق میانگین از $0/31$ تا $4/05$ گرم در لیتر و غلظت حداکثر از 1 تا $15/2$ گرم بر لیتر نمونه‌های آنالیز شده به دست آمده‌اند.

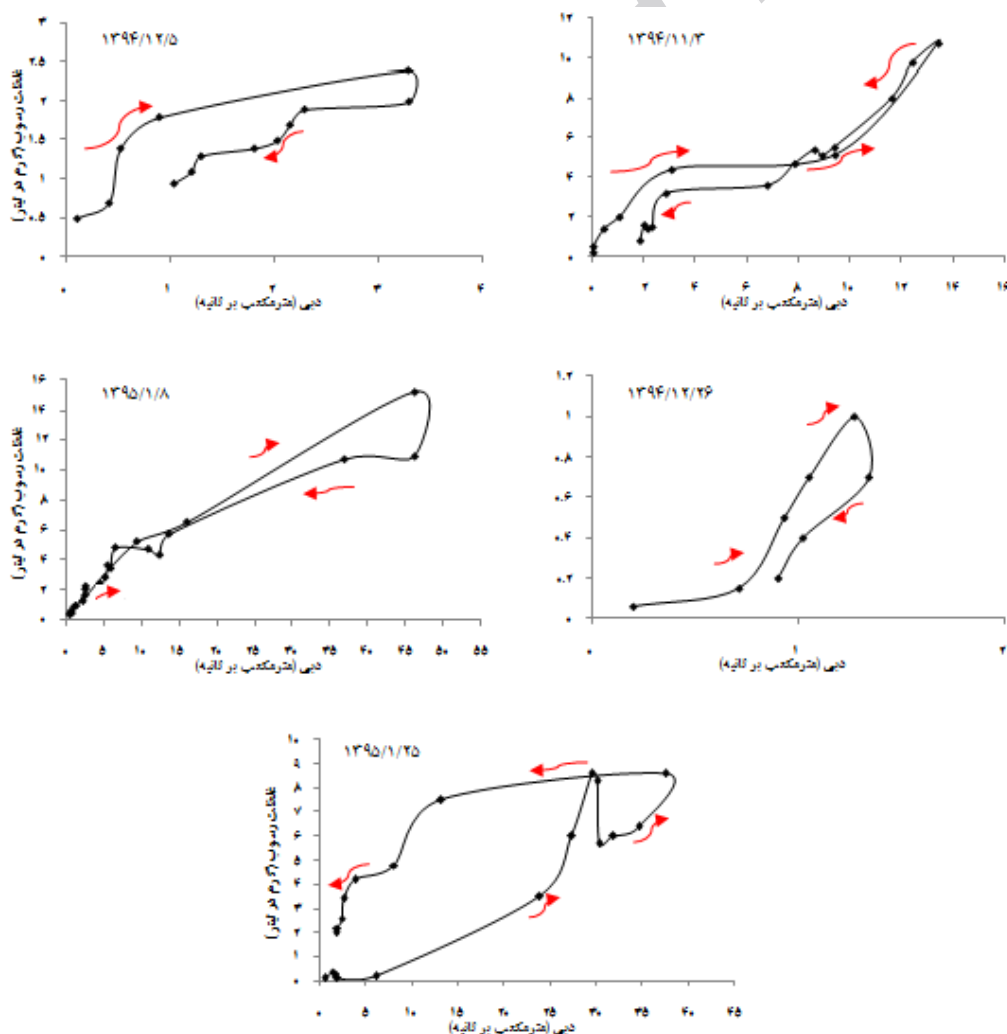
تهیه منحنی سنجه رسوب بر اساس الگوهای حلقه رسوب برای هر رگبار در شکل ۲ نشان داده شده است. رگبارهای $1394/11/3$ و $1395/1/8$ الگوی حلقه ۸ داشته و سایر رگبارها دارای الگوی ساده ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد هستند. حلقه‌های رسوب در واقع اختلاف بین حرکت آب و انتقال رسوب طی یک واقعه هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. اهمیت هیدرولیکی این اختلاف به این دلیل است که تأمین رسوب از دامنه‌ها و آبراهه‌ها از نظر زمانی و مکانی متغیر هستند؛ بنابراین، آنالیز حلقه‌های رسوب، ابزار مناسبی برای شناسایی فرایندهای مختلفی است که با توجه به دبی آب باعث تغییرات غلظت رسوب معلق می‌شوند.

جدول ۱. خصوصیات آماری رگبارهای اندازه‌گیری شده

تاریخ رگبار	مقدار کل بارش (میلی‌متر)	تداوم بارش (ساعت)	تعداد نمونه‌های رسوب	زمان پایه هیدروگراف سیل (ساعت)	شدت بارش (میلی‌متر بر ساعت)	میانگین دبی (مترمکعب بر ثانیه)	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	میانگین غلظت رسوب (گرم در لیتر)	حداکثر غلظت رسوب (گرم در لیتر)	زمان تا اوج رسوب معلق (ساعت)	زمان تا اوج رسوب معلق (ساعت)
۱۳۹۴/۱۱/۳	۶۰/۳۲	۵۰	۱۹	۹۹	۳/۳۳	۴/۹۶	۱۳/۴۱	۳/۷۵	۱۰/۷۰	۳۹	۳۹
۱۳۹۴/۱۲/۵	۲۷/۵۰	۳۰	۱۳	۷۴	۲/۱۷	۱/۴۱	۳/۴۶	۱/۴۳	۲/۴۰	۳۳	۳۳
۱۳۹۴/۱۲/۲۶	۲۷/۷۰	۴۳	۸	۶۸	۱/۰۰	۰/۷۹	۱/۳۸	۰/۳۱	۱/۰۰	۴۴	۴۴
۱۳۹۵/۱/۸	۱۰۴/۵۰	۸۱	۲۲	۱۱۸	۵/۱۷	۷/۹۲	۴۹/۴۰	۳/۹۲	۱۵/۲۰	۳۷	۳۷
۱۳۹۵/۱/۲۵	۱۰۹/۱۰	۹۰	۲۰	۹۶	۳/۵۰	۱۰/۲۹	۳۸/۹۰	۴/۰۵	۸/۶۰	۴۸	۴۸

در رگبار ۱۳۹۴/۱۱/۳ الگوی ۸ و پادساعتگرد در میانه آن به این دلیل است که مقدار غلظت رسوب معلّق در شاخه بالارونده کمتر از شاخه پایین‌رونده بوده است. این الگو، نشان‌دهنده این است که منابع رسوب معلّق در بالادست حوضه قرار داشته و زمان طولانی‌تری برای رسیدن به خروجی حوضه طی کرده‌اند. دلیل این امر، کشیده بودن شکل حوضه و همچنین پر شیب بودن بالادست حوضه نسبت به قسمت‌های میانی و پایین‌دست است که منجر به تولید رسوب بیشتر در قسمت‌های بالادست حوضه و انتقال آن طی رگبارهای شدید می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی ساعت‌گرد بر رگبارهای ۱۳۹۴/۱۲/۵ و ۱۳۹۴/۱۲/۲۶ تطابق دارد. ویژگی‌های این دو رگبار در جدول ۱، حاکی از این است که هم مقدار بارش کل و هم زمان پایه این دو رگبار نسبت به ۳ رگبار دیگر بسیار کمتر است. کم‌بودن مقدار و شدت بارندگی، دلیلی بر عدم توانایی کافی در انتقال رسوبات دوردست حوضه و غالب بودن رسوبات مناطق نزدیک به خروجی در اندازه‌گیری‌ها است. رگبار ۱۳۹۵/۱/۸ نیز الگوی ۸ داشته که در بخش میانه به ساعت‌گرد تبدیل شده است. با توجه به بزرگ و شدید بودن این رگبار، علاوه بر آورد رسوبات جدید، انتقال رسوباتی که در نتیجه فرسایش ناشی از رگبارهای قبلی در آبراهه‌های نزدیک به خروجی انباشته شده‌اند، باعث ایجاد چنین الگویی شده است.



شکل ۲. الگوهای حلقه رسوب برای رگبارهای اندازه‌گیری شده

رگبار ۱۳۹۶/۱/۲۵ که از نظر بزرگی و شدت، دومین رگبار به وقوع پیوسته در دوره مطالعاتی است، دارای یک الگوی پادساعت‌گرد است و دلایلی که برای چنین الگویی در این حوضه بیان شد (کشیده بودن شکل حوضه و شیب تند در مناطق بالادست حوضه) در اینجا نیز صادق است. از آنجا که در هیچ‌کدام از رگبارها الگوی دوگانه دیده نشد؛ بنابراین، هیچ منحنی سنجه‌ای نیز بر اساس الگوهای حلقه رسوب ترسیم نگردید؛ اما در روش دیگری منحنی سنجه رسوب بر اساس داده‌های شاخه بالارونده و پایین‌رونده به دست آمد، که نتایج آن در جدول ۲ نشان می‌دهد که این روش توانسته است روابطی با ضریب تبیین بالاتر نسبت به منحنی سنجه کل رگبار ایجاد کند.

تمامی رگبارهای اندازه‌گیری شده به خوبی با یک منحنی سنجه با ضریب تبیین بالا برازش شدند. بالاترین ضریب تبیین (۰/۹۶) برای منحنی سنجه رگبار در تاریخ ۱۳۹۵/۱/۱۸ و کمترین (۰/۵۷) برای ۱۳۹۵/۱/۲۵ است. بیشترین تغییر در ضریب تبیین با تفکیک شاخه بالارونده و پایین‌رونده نیز مربوط به رگبار ۱۳۹۵/۱/۲۵ است. کمترین تغییر نیز برای منحنی سنجه ۱۳۹۵/۱/۸ است. برای قضاوت بهتر درباره دقت منحنی سنجه علاوه بر معیارهای برازش و میزان اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده که در مرحله تهیه منحنی سنجه رسوب کنار گذاشته شده بودند، با مقادیر تخمینی و همچنین خطای نسبی برآورد آنها نیز استفاده شد (جدول ۳).

بیشترین اختلاف بین مقادیر تخمینی و مشاهداتی کل داده‌ها مربوط به رگبار ۱۳۹۵/۱/۲۵ به مقدار ۳/۷۴ گرم در شاخه بالارونده است. کمترین اختلاف نیز در رگبار ۱۳۹۴/۱۲/۲۶ به میزان ۰/۰۲ گرم مشاهده می‌شود؛ بر همین اساس، بیشترین و کمترین خطای نسبی برآوردی هم مربوط به همان رگبارها است. بزرگ‌ترین عدم قطعیت (۰/۷۵/۶۸) برای رگبار ۱۳۹۵/۱/۲۵ به دلیل تخمین ضعیف در شاخه بالارونده آن است. با این حال، نه تنها منحنی سنجه به دست آمده از نظر آماری معنی‌دار است؛ بلکه وجود ضریب تبیین بالاتر از ۰/۵ آن حاکی از این است که خطای ایجادشده در این واقعه، از نظر آماری معنی‌دار نیست؛ اما به طور کلی،

جدول ۲. روابط برازش شده بر منحنی‌های سنجه رسوب رگبارهای اندازه‌گیری شده (**)

تاریخ رگبار	کل داده‌ها		شاخه بالارونده		شاخه پایین‌رونده	
	رابطه	ضریب تبیین	رابطه	ضریب تبیین	رابطه	ضریب تبیین
۱۳۹۴/۱۱/۳	$Sc = 1/59Q^{0.54}$	۰/۸۴	$Sc = 2/06Q^{0.55}$	۰/۹۵	$Sc = 0/67Q^{0.98}$	۰/۹۱
۱۳۹۴/۱۲/۵	$Sc = 1/24Q^{0.41}$	۰/۷۶	$Sc = 1/41Q^{0.45}$	۰/۸۴	$Sc = 0/96Q^{0.73}$	۰/۹۱
۱۳۹۴/۱۲/۲۶	$Sc = 0/44Q^{1.39}$	۰/۷۹	$Sc = 0/51Q^{1.24}$	۰/۸۷	$Sc = 0/35Q^{0.56}$	۰/۹۹
۱۳۹۵/۱/۸	$Sc = 0/72Q^{0.80}$	۰/۹۶	$Sc = 0/69Q^{0.81}$	۰/۹۶	$Sc = 1/18Q^{0.62}$	۰/۸۸
۱۳۹۵/۱/۲۵	$Sc = 0/41Q^{0.84}$	۰/۵۷	$Sc = 1/58Q^{0.60}$	۰/۶۹	$Sc = 0/12Q^{1.14}$	۰/۸۸

** سطح معنی‌داری تمامی رابطه‌ها کمتر از ۰/۰۵ است.

جدول ۳. معیارهای آماری ارزیابی منحنی‌های سنجه رسوب رگبارهای اندازه‌گیری شده (***)

تاریخ رگبار	کل داده‌ها***		شاخه بالارونده		شاخه پایین‌رونده	
	اختلاف (گرم)	خطای نسبی (%)	اختلاف (گرم)	خطای نسبی (%)	اختلاف (گرم)	خطای نسبی (%)
۱۳۹۴/۱۱/۳	-۰/۷۲	۳۱/۸۴	۰/۳۱	۳۵/۰۸	-۰/۸۲	۳۳/۱۶
۱۳۹۴/۱۲/۵	-۰/۱۵	۱۹/۴۰	۰/۲۵	۲۹/۷۷	-۰/۲۴	۲۲/۴۴
۱۳۹۴/۱۲/۲۶	۰/۰۲	۱۵/۴۱	۰/۲۳	۲۳/۵۷	۰/۱۴	۴۸/۲۰
۱۳۹۵/۱/۸	۰/۷۰	۲۵/۷۶	۰/۶۳	۲۶/۴۳	۰/۵۲	۱۳/۵۴
۱۳۹۵/۱/۲۵	-۰/۲۰	۴۵/۲۸	۳/۷۴	۷۵/۶۸	-۱/۳۱	۴۵/۱۶

*** علامت (-) نشان‌دهنده تخمین کمتر از مقادیر واقعی و (+) تخمین بیشتر از مقادیر واقعی است.

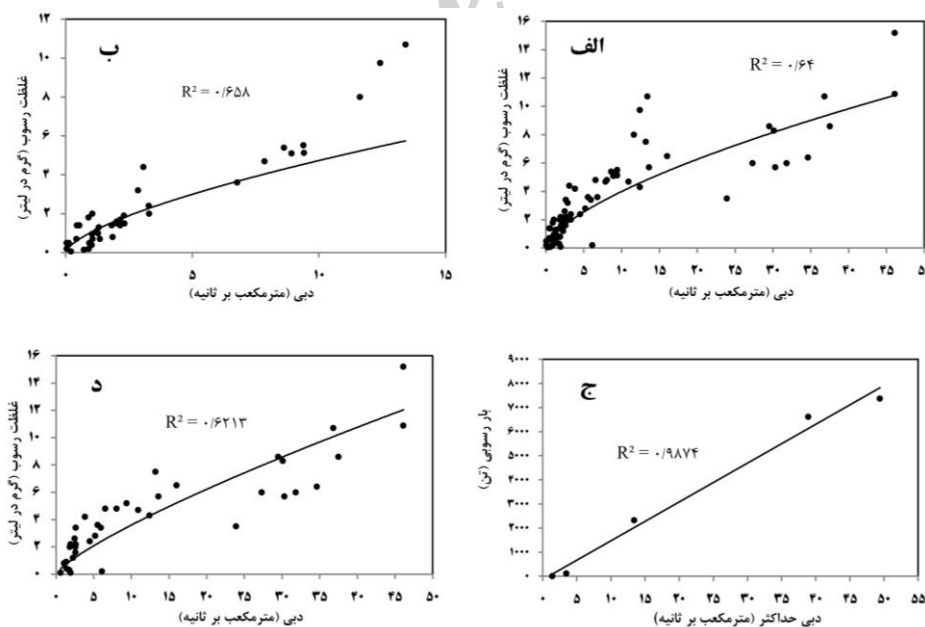
خطای نسبی غیر از رگبار ۱۳۹۵/۱/۲۵ در شاخه بالارونده در سایر موارد کمتر از ۵۰٪ است؛ افزون بر این، منحنی‌های سنجه جداگانه برای کل رگبارهای اندازه‌گیری‌شده در دوره مطالعاتی و رگبارهای رخ داده در فصل زمستان و بهار نیز تهیه (شکل ۳) و از نظر ضریب تبیین و خطای برآورد مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۴). زمانی که داده‌های کل دوره مطالعاتی با هم ترکیب شدند، یک منحنی سنجه رسوب معنی‌دار با ضریب تبیین بالای ۰/۶ به دست آمد که با تهیه منحنی‌های سنجه رسوب جداگانه برای داده‌های فصلی تغییری در آنها حاصل نشد.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، افزون بر اینکه خطای نسبی تخمین منحنی سنجه کل داده‌های برداشت‌شده حدود ۳۲٪ و در محدوده قابل قبول است. با تقسیم‌بندی داده‌ها بر اساس فصل، هیچ تغییر معنی‌داری در عدم قطعیت و بالا رفتن دقت در تخمین رسوب معلق رخ نداده است.

رابطه دبی پیک-بار رسوبی حوضه مورد مطالعه در شکل ۳ (د)، بر اساس ضریب تبیین به دست آمده (۰/۹۸) از آن نشان‌دهنده یک رابطه معتبر است. این مسئله، نشان‌دهنده این است که با وجود تغییرات درون رگباری غلظت رسوب معلق می‌توان اثر کلی رگبار را در یک رابطه ساده رگرسیونی خلاصه نمود.

بحث

بررسی داده‌های به دست آمده از آب‌نمود و رسوب‌نمودهای اندازه‌گیری‌شده نشان می‌دهد که رگبار ۱۳۰۵/۱/۸ با بالاترین شدت بارندگی (۵/۱۷ میلی‌متر در ساعت) بیشترین دبی اوج را ایجاد و در نتیجه آن منجر به بالاترین غلظت حداکثر رسوب معلق در نمونه‌ها شده است.



شکل ۳. رابطه بین داده‌های دبی و غلظت رسوب معلق در کل دوره مطالعاتی (الف)، زمستان (ب)، بهار (ج) و رابطه بین دبی اوج و بار رسوبی (د)

جدول ۴. روابط برازش شده بر منحنی سنجه رسوب داده‌های کل دوره مطالعاتی و فصلی و خطای برآوردی حاصل از آنها

تعداد داده	رابطه برازش شده	اختلاف (گرم)	خطای نسبی (%)
۸۲	$Sc = 0.8946Q^{0.65}$	۰/۳۵	۳۱/۸۰
۴۰	$Sc = 1/0.25Q^{0.66}$	۰/۲۲	۳۱/۸۹
۴۲	$Sc = 0.582Q^{0.79}$	-۲/۰۲	۳۶/۸۸

با وجود برابر بودن مقدار کلّ بارش (۲۷/۵ میلی‌متر) در رگبارهای ۱۳۹۴/۱۲/۵ و ۱۳۹۴/۱۲/۲۶، اما به دلیل بالاتر بودن شدت متوسط بارش در رگبار ۱۳۹۴/۱۲/۵ (۲/۱۷ میلی‌متر در ساعت) مقدار دبی و رسوب حداکثر آن نیز به طور قابل توجهی بالاتر بوده است. به طور کلی، اندازه‌گیری رسوب معلق طی دو فصل زمستان و بهار نشان داد که میزان انتقال رسوب در رگبارهای بهاری نسبت به رگبارهای زمستان بیشتر است که با نتایج مصفايي و همکاران (۲۰۱۵)، مبتنی بر بالا بودن فرسایش در فصل بهار نسبت به فصل زمستان هم‌راستا است. شدت و همچنین مقدار بالای بارندگی‌های بهاری در اوایل بهار که پوشش گیاهی به اندازه کافی بر روی زمین وجود ندارد، دلیل مهمی برای این امر است. در تلاش برای تخمین داده‌های رسوب معلق با دقت هرچه بیشتر، ترسیم الگوهای حلقه رسوب نشان داد که اغلب رگبارهای اندازه‌گیری شده دارای الگوی ساده ساعت گرد یا پادساعت گرد است که بیانگر غالب بودن یکی از منابع تأمین‌کننده رسوب (دامنه یا آبراهه) در هر رگبار بوده است.

وجود الگوهای ترکیبی و پیچیده نشان از منابع مختلف رسوب (بالادست حوضه و کانال) دارد. در صورت کم‌بودن مقدار و شدت بارندگی، رواناب تولیدی توانایی کافی در انتقال رسوبات دوردست حوضه را نداشته و منبع غالب رسوبات، مناطق نزدیک به خروجی است. در برخی موارد به دلیل بالا بودن شدت بارندگی و بیشتر بودن حجم و شدت رواناب مناطق بالادست حوضه، منبع اصلی رسوب معلق هستند؛ افزون بر این، کشیده بودن شکل حوضه و همچنین پراکنش بودن مناطق بالادست حوضه نسبت به قسمت‌های میانی و پایین‌دست، رسوب تولیدی در قسمت‌های بالادست حوضه بیشتر بوده که طی رگبارهای شدید به خروجی حوضه منتقل می‌شود. تنها رگباری که الگوی حلقه رسوب آن از حالت ساده محض بیرون آمده و تا حدی پیچیده شده است رگبار ۱۳۹۵/۱/۸ است؛ اگرچه روابط برازش شده بر کلّ داده‌های رگبارهای اندازه‌گیری شده دارای ضریب تبیین بالای ۰/۵ هستند، که نشان‌دهنده معتبر بودن منحنی سنجه و بهترین راه برای تخمین رسوب معلق است (کویلب و همکاران، ۲۰۰۶)، اما تفکیک بخش‌های بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف و اختصاص دادن منحنی‌های سنجه جداگانه به آنها (غیر از رگبار ۱۳۹۵/۱/۸) توانسته است ضریب تبیین را به میزان قابل توجهی ارتقا دهد. اختصاص دادن منحنی سنجه رسوب به شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده توانسته است بیشترین تغییر را در ضریب تبیین به میزان ۳۳٪ ایجاد کند؛ اما این امر نتوانسته است باعث افزایش دقت منحنی‌های سنجه شود. محاسبه خطای تخمین، حاکی از عدم اختلاف و حتی در برخی موارد بالا رفتن خطا با ایجاد منحنی سنجه جداگانه برای شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده است. معمولاً با بالا رفتن مقدار دبی جریان، پراکندگی داده‌های رسوب هم بیشتر می‌شود و یکی از دلایل بالا بودن خطا می‌تواند این مسئله باشد (گائو و جفرسون، ۲۰۱۲). اگرچه خطای نسبی و اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی با تفکیک هیدرولوژیکی منحنی سنجه افزایش داشته است؛ با این وجود، خطای نسبی همچنان کمتر از ۵۰٪ است. فضلی و همکاران (۱۳۸۹)، سعیدی و همکاران (۱۳۹۵) و اسدالهی و همکاران (۱۳۹۲) نیز خطای کمتر از ۵۰٪ گزارش کردند. در حالی که نتایج هارینگتون و هارینگتون (۲۰۱۲) حاکی از ۷۶٪- تا ۳۶۵٪+ خطای تخمین توسط منحنی‌های سنجه بوده است.

ادغام تمامی داده‌های برداشت‌شده در دوره مطالعاتی یک منحنی سنجه با ضریب تبیین پایین‌تری نسبت به منحنی سنجه رگبارها به تفکیک ایجاد کرده است. منحنی سنجه برای داده‌های فصلی هیچ تأثیری در دقت منحنی‌های سنجه و کم کردن خطای نسبی برآوردی نداشته است. این امر، حاکی از این است که

اختلافات فصلی که توسط دو رابطه آماری متفاوت نشان داده شده است از نظر آماری معنی‌دار نیست. این نتایج با یافته‌های گائو و جفرسون (۲۰۱۲)، مبنی بر تخمین بهتر رسوب معلّق با منحنی‌های سنجه رسوب جداگانه فصلی مغایر و منطبق بر نتایج هارینگتون و هارینگتون (۲۰۱۲) و اسدالهی و همکاران (۱۳۹۲) است. این مسئله نشان‌دهنده این است که تغییرات فصلی انتقال رسوب معلّق محدود است و دینامیک انتقال در مقیاس‌های زمانی کوتاه (رگبار و فصل) در حدّ متوسط قرار داشته و تفاوت قابل توجهی ندارند. بر اساس مطالعات گائو و جفرسون (۲۰۱۲)، بار رسوبی رگبار بیشتر تحت تأثیر دبی پیک رگبار است. اگرچه به دلیل پویایی رسوبات، مقدار آن در هر واقعه متفاوت از واقعه دیگر، حتی در یک فصل است؛ اما با ایجاد یک رابطه آماری معنی‌دار و قوی بین بار رسوبی و دبی پیک، میانگین عملکرد کلّ رگبار را می‌توان در یک معادله ساده ارائه داد، که با نتایج صادقی و همکاران (۱۳۹۴) نیز هم‌خوانی دارد. رابطه بار رسوب - دبی پیک می‌تواند به عنوان یک ابزار برای مدیران حوضه‌های آبخیز در تخمین بار رسوبی حوضه مورد مطالعه در هر رویداد رگباری مورد استفاده قرار گیرد؛ افزون بر این، روابط بار رسوب - دبی پیک می‌تواند برای سایر حوضه‌های آبخیز مشابه قابل استفاده باشد.

نتیجه‌گیری

در طول دوره آماری، رژیم هیدرولوژیکی، رودخانه مرگ شاهد تغییرپذیری زیادی بود. بر اساس نمونه‌های آنالیزشده، مقدار کلّ رسوب معلّق منتقل شده در طول دوره آماری (۴ ماه) ۱۵۹۱۹ تن بوده است. منحنی‌های سنجه رسوب برازش شده بر داده‌های دبی و رسوب معلّق رگبارهای اندازه‌گیری شده، با وجود ضریب تبیین بالا، خطای تخمین بالایی نیز داشتند؛ این مسئله، بیانگر این است که بالا بودن ضریب تبیین الزاماً نشان‌دهنده تخمین خوب و دقیق منحنی سنجه نبوده و می‌تواند هشدار برای ارزیابی منحنی‌های سنجه تنها بر اساس معیار برازش باشد.

فرایند انتقال رسوب در دو فصل اندازه‌گیری شده تقریباً دارای الگوی مشابهی است که بر اساس آن نتایج این پژوهش نشان داد که منحنی سنجه می‌تواند تخمین قابل قبولی از بار رسوب معلّق بدون نیاز به طبقه‌بندی یا تفکیک داده‌ها ارائه دهد. این نتایج به‌ویژه در ایران به دلیل مزایای رویکرد منحنی سنجه برای تخمین بار رسوب معلّق درازمدت با استفاده از داده‌های تاریخی جریان رودخانه بسیار قابل توجه است و می‌توان برای تکمیل پایگاه داده‌های محدود رسوب معلّق موجود از آن استفاده کرد.

منابع

- آقابگی امین، سهیلا؛ تلوری، عبدالرسول؛ میرنیا، سید خلاق؛ فیض‌نیا، سادات؛ وفاخواه، مهدی (۱۳۹۲) بررسی تغییرات غلظت رسوب معلّق در سیلاب‌های فصلی ناشی از باران و ذوب برف، *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۵ (۳)، صص. ۲۵۱-۲۱۱.
- اسدالهی، ذکریا؛ وفاخواه، مهدی؛ صادقی، سید حمید رضا (۱۳۹۲) تهیه مدل برآورد رسوب روزانه در حوضه آبخیز جنگلی کجور، *مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران*، ۶۷ (۱)، صص. ۱۵-۱.
- ریسی، محمد باقر؛ صادقی، سید حمید رضا (۱۳۸۹) دقت روش زمان مساحت در تهیه رسوب‌نگار در حوضه آبخیز کجور، *مرتع*، ۴ (۲)، صص. ۳۳۳-۳۲۰.
- سعیدی، پری؛ صادقی، سید حمید رضا؛ تلوری، عبدالرسول (۱۳۹۵) شبیه‌سازی رسوب‌نمود با استفاده از آب‌نمود، *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۸ (۱)، صص. ۴۱-۲۸.

- صادقی، سید حمید رضا؛ ابراهیمی محمدی، شیرکوه؛ چپی، کامران (۱۳۹۴) تحلیل فرایندهای درون رگباری تحویل رسوب معلق تعدادی از زیرحوضه‌های دریاچه زریوار به کمک الگوی حلقه‌های رسوبی، مرتع و آبخیزداری، ۶۸ (۲)، صص. ۳۲۳-۳۴۰.
- عرب‌خدری، محمود (۱۳۹۳) مروری بر نرخ فرسایش آبی و تولید رسوب در ایران، **ترویج و توسعه آبخیزداری**، ۲ (۴)، صص. ۲۳-۳۰.
- فضلی، سمیه؛ صادقی، سید حمید رضا؛ خالدی درویشان، عبدالواحد (۱۳۸۹) مدل‌سازی بارش روان‌آب و رسوب، **علوم و مهندسی آبخیزداری ایران**، ۴ (۱۱)، صص. ۴۱-۴۵.
- کریمی، زینب؛ حیدری‌زاده، مجید؛ پرهت، جهانگیر (۱۳۸۸) بررسی روند کاهش جریان و خشک‌شدن رودخانه دائمی مر با استفاده از مدل Salas، **پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلایای طبیعی)**، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- نور، حمزه؛ صادقی، سید حمید رضا (۱۳۹۰) مدل‌سازی رسوب‌نگار واحد لحظه‌ای، **تحقیقات منابع آب**، ۷ (۴)، صص. ۶۲-۷۰.
- Asselman, N. E. M. (2000) Fitting and Interpretation of Sediment Rating Curves, **Hydrology**, 234, pp. 228-248.
- Bussi, G., Dadson, S. J., C. Prudhomme, Whitehead, P. G. (2016) Modelling the Future Impacts of Climate and Land-Use Change on Suspended Sediment Transport in the River Thames (UK), **Hydrology**, 542, pp. 357-372.
- Crowder, D. W., Demissie, M., Markus, M. (2007) The Accuracy of Sediment Loads When Log Transformation Produces Nonlinear Sediment Load Discharge Relationships, **Hydrology**, 336, pp. 250-268.
- Drewry, J. J., Newhama L. T. H., Croke, B. F. W. (2009) Suspended Sediment, Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Exports During Storm-Events to the Tuross Estuary, **Australia, Journal of Environmental Management**, 90, pp. 879-887.
- Eder, A., Strauss, P., Krueger, T., Quinton, J. N. (2010) Comparative Calculation of Suspended Sediment Loads with Respect to Hysteresis Effects (in the Petzenkirchen Catchment, Austria), **Hydrology**, 389, pp. 168-176.
- Gao, P., Josefson, M. (2012) Temporal Variations of Suspended Sediment Transport in Oneida Creek Watershed, Central New York, **Hydrology**, 426-427, pp. 17-27.
- Harrington, S. T., Harrington, J. R. (2012) An Assessment of the Suspended Sediment Rating Curve Approach for Load Estimation on the Rivers Bandon and Owenabue, Ireland, **Geomorphology**, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.12.002.
- Higgins, A., Restrepo J. C., Ortiz J. C., Pierini J., Otero L. (2015) Suspended Sediment Transport in the Magdalena River (Colombia, South America): Hydrologic Regime, Rating Parameters and Effective Discharge Variability, **International Journal of Sediment Research**, doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.04.003.
- Horowitz, A. J. (2008) Determining Annual Suspended Sediment and Sediment-Associated Trace Element and Nutrient Fluxes, **Science of the Total Environment**, 4, pp. 315-343.
- Hu, B., Wang, H., Yang, Z., Sun, X. (2011) Temporal and Spatial Variations of Sediment Rating Curves in the Changjiang (Yangtze River) Basin and Their Implications, **Quaternary International**, 230, pp. 34-43.
- Khanchoul, K., Boukhrissa, Z. E. A., Acidi, A., Altschul, R. (2012) Estimation of Suspended Sediment Transport in the Kebir Drainage Basin, **Algeria Quaternary International**, 262, pp. 25-31.
- Mosaffaie, J., Ekhtesasi, M. R., Dastorani, M. T., Azimzadeh, H. R., Zare Chahuki, M. A. (2015) Temporal and Spatial Variation of the Water Erosion Rate, **Arabian Journal of Geosciences**, 8 (8), pp. 5971-5979.
- Mosaffaie, J., Talebi, A. (2014) A Statistical View to the Water Erosion in Iran, **Extension and**

- Development of Watershed Management**, 2 (5), pp. 9-17.
- Oliveira, K. S. S., Quaresma S. V. (2017) Temporal Variability in the Suspended Sediment Load and Stream Flow of the Doce River, **South American Earth Sciences**, 78, pp. 101-115.
- Quilbe, R., Rousseau, A. N., Duchemin, M., Poulin, A., Gangbazo, G., Villeneuve, J. (2006) Selecting a Calculation Method to Estimate Sediment and Nutrient Loads in Streams: Application to the Beaurivage River (Quebec, Canada), **Hydrology**, 326, pp. 295-310.
- Restrepo, J. C., Ortíz, J. C., Pierini, J., Schrottke, K., Maza, M., Otero, L., Aguirre, J. (2014) Freshwater Discharge into the Caribbean Sea from the Rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, Variability and Recent Changes, **Hydrology**, 509, pp. 266-281.
- Rovira A., Ibanez C., Martín J. P. (2015) Suspended Sediment Load at the Lowermost Ebro River (Catalonia, Spain). **Quaternary International**, pp. 1-11.
- Sadeghi, S. H. R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Fukushima, T., Mizugaki, S., Onda. Y. (2008) Development, Evaluation and Interpretation of Sediment Rating Curves for a Japanese Small Mountainous Reforested Watershed, **Geoderma**, 144, pp. 198-211.
- Singh, P. K., Jain, M. K., Mishra, S. K. (2013) Fitting a Simplified Two-Parameter Gamma Distribution Function for Synthetic Sediment Graph Derivation from Ungagged Catchments, **Arabian Journal of Geosciences**, 6 (6), pp. 1835-1841.
- Singh, V. P. (1992) **Elementary Hydrology, Economy Edition**, New Delhi, India.
- Suif, Z., Fleifle, A., Yoshimura, C., Saavedra, O. (2016) Spatio-Temporal Patterns of Soil Erosion and Suspended Sediment Dynamics in the Mekong River Basin, **Science of the Total Environment**, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.134.
- Tramblay, Y., Saint-Hilaire, A., Taha, B. M. J., Ouarda Moatar, F., Hecht, B. (2010) Estimation of Local Extreme Suspended Sediment Concentrations in California Rivers, **Science of the Total Environment**, 408, pp. 4221-4229.
- Wei, Y., Jiao, J., Zhao, G., Zhao, H., He, Z., Mua, X. (2016) Spatial–Temporal Variation and Periodic Change in Streamflow and Suspended Sediment Discharge Along Themainstreamof the Yellow River during 1950-2013, **Catena**, 140, pp. 105-115.