

تعیین مناسب‌ترین مدل برآورد رسوب معلق در رودخانه زارم رود استان مازندران

سیدحسین روشن: دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 قربان وهاب‌زاده کبریا*: دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 کریم سلیمانی: استادگروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 عبدالواحد خالدی درویشان: استادیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۹)

چکیده

تخمین میزان بار رسوبی معلق، از مهمترین عوامل در مطالعه‌ی رفتار هیدرولیکی، ریخت‌شناسی و هیدرولیک رسوب رودخانه به شمار می‌رود و مبنای اساسی مدیریت صحیح منابع آب و خاک در حوضه‌های آبخیز است. برآورد میزان کل بار معلق رودخانه، اغلب با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری از برقراری روابط منحنی-های سنج رسوب با استفاده از روش‌های متداول ممکن می‌باشد. در این مقاله، میزان برآورد رسوبی رودخانه‌ی زارم-رود از طریق آمار ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری واقع بر این رودخانه برآورد شد. این امر با استفاده از مدل‌های USBR، چندخطی USBR، منحنی حد وسط دسته‌ها، منحنی سنج فصلی و روش FAO صورت گرفت. در این پژوهش، ضمن نمونه‌برداری بار معلق در دوره‌ی ۳۰ روزه - که در نهایت ۶۰ نمونه از بار معلق برداشت شد - مدل انتخابی ارزیابی شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل منحنی حد وسط دسته‌ها ضمن داشتن کمترین میزان RME (۱۷۳/۶۵) و بیشترین میزان ضریب تبیین (۹۶٪)، به عنوان بهترین مدل در برآورد بار معلق رودخانه‌ی زارم رود انتخاب شد. همچنین مدل منحنی سنج یک خطی، دارای بیشترین میزان انحراف از داده‌های مشاهده‌ای بود که پیشنهاد می‌شود در به کار بردن آن، بازنگری و از روش‌هایی که خطای کمتری در برآورد میزان رسوب رودخانه دارند، برای رودخانه‌ی مورد مطالعه استفاده شود.

واژگان کلیدی: بار رسوبی، رودخانه‌ی زارم رود، نمونه‌برداری بار معلق، RME.

۱- مقدمه

معادلات عددی برای حمل رسوب طی دهه‌های گذشته توسعه یافت و بازبینی شد (Sinnakaudan et al, 2010). این معادلات در نتیجه‌ی پارامترهای مورد استفاده و مباحث ریاضی و تکنیک‌های نمونه‌برداری، در کارایی دارای تفاوت-هایی هستند (Yang, 1996). پیش‌بینی درست میزان حمل بار رسوبی رودخانه‌ها، عاملی اصلی در مطالعات مورفولوژیک رودخانه، سواحل و محیط زیست دریاها است (Camenen and Larson, 2005). به طور کلی، حمل رسوب در دو حالت اصلی رخ می‌دهد؛ بار بستر و بار معلق. بار بستر بخشی از بار کل است که بلافاصله بالای بستر حرکت می‌کند (Wilson, 1966). بار معلق نیز بخشی از بار کل رسوبی است که در وهله‌ی اول به وسیله‌ی جریان‌های متلاطم حمل

می‌شود (Fredsoe and Deigaard, 1994). بنابراین بار بستر عمدتاً حمل رسوب برای مواد درشت یا ریز است (Einstein, 1950) که به صورت غلطیدن، لغزیدن و جهش، بر روی سطح بستر حرکت می‌کند (Lajeunesse et al, 2010). هر چند هر دو نوع حمل می‌تواند باهم رخ دهد، ولی محدوده‌ی بین آنها همیشه برای مشخص کردن آسان نیست. غالباً بار کف به طور مستقیم اندازه‌گیری نشده‌است، بلکه از طریق اعمال نظارت کارشناسی، بخشی از بار کل (۵ تا ۲۵ درصد) به عنوان سهم بار کف تلقی می‌شود (Shafae-Bajestan, 2011)، اما تفاوت در ویژگی‌های اقلیمی، ساختار زمین‌شناسی و توپوگرافی، باعث شده این روش به صورت عملی دقت چندانی نداشته باشد. از طرفی تغییرات میزان رسوب در حال انتقال در رودخانه‌ها، اغلب در زمینه‌ی تغییرات دبی است (Ludwing and Probst, 1998 & Morehead et al, 2003). روش اندازه‌گیری بار معلق - که بر پایه‌ی اندازه‌گیری مستقیم یا معادلات تجربی است - روش مطمئنی است مستلزم اندازه‌گیری پیوسته و معمولاً برای رودخانه‌های مهم و دائمی مقدور است (Telvari, 2002 & Pavanelli and Bigi, 2004 & Sadeghi, 2005 & Arabkhedri, 2005 & Porhemat and Domiri-Ganji, 2005). گرچه اندازه‌گیری مستقیم درجه اعتبار زیادی دارد، بسیار پرهزینه است و نمی‌تواند برای سطح وسیعی از رودخانه استفاده شود. با این حال، اکثر معادلات برآورد کننده‌ی بار معلق رسوبی، نیازمند داده‌های دبی و رسوب حاصل از این اندازه‌گیری‌ها است (Ozturk et al, 2001). بنابراین، از طریق داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی بار معلق و به کمک منحنی سنج رسوب، می‌توان رسوب انتقالی به وسیله‌ی رودخانه را برآورد کرد، گرچه برآورد بار معلق از طریق این معادله، همواره با مقداری خطا همراه است (Mosaedi, 1998 & Asselman, 2000 & Arabkhedri et al, 2004 & Zhang et al, 2012). برآورد صحیح حجم رسوب حمل شده به وسیله رودخانه، برای بسیاری از پروژه‌های منابع آب بسیار مهم است (Cobaner et al, 2009).

پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی روش‌های برآورد بار معلق رسوب در داخل و خارج از کشور اجرا شده‌است که در اینجا به ذکر چند مورد اکتفا می‌شود. لطیفیان و حسن‌زاده^۱ (2007) با بررسی مقادیر رسوب انتقالی در پنج ایستگاه هیدرومتری روی رودخانه گاماسیاب و سرشاخه‌های اصلی آن، به کمک معادلات انتقال رسوب و با آزمون چند روش به این نتیجه رسیدند که روش تلفیق دبی متوسط روزانه جریان و منحنی سنج تک خطی، از کمترین میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب تبیین نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است. پوراغنیایی^۲ و همکاران (2008) با استفاده از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری در پیرامون حوضه‌ی رودخانه‌ی صیدون، همچنین با استفاده از روش‌های منحنی سنج تک خطی، سنج دو خطی، سنج فصلی و روش تعدیل بار رسوبی (FAO)، مقادیر رسوب را برآورد کردند. در نهایت با توجه به شرایط منطقه‌ای، روش تعدیل بار رسوبی به عنوان روش مناسب در برآورد رسوب معلق برای منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب شد. اعظمی^۳ و همکاران (2009) در تحقیق خود، به تعیین روش مناسب در برآورد بار معلق رسوبی در حوزه‌ی سد ایلام پرداختند. آنها برای یک دوره‌ی ۴۰ روزه‌ی جریان، از غلظت رسوب در حالت جریان پایه و سیلابی نمونه‌برداری و بار رسوبی واقعی را تعیین کردند، سپس آن را با مقادیر برآوردی توسط مدل‌های منحنی سنج رسوب خطی، خطی شکسته، حد وسط دسته‌ها با دو نوع جریان متوسط روزانه و تداوم جریان مقایسه کردند. نتایج تحقیق آنها

¹ Hassanzadeh and Latifian

² Pouraghniaei et al

³ Aazami et al

نشان داد بین مقادیر برآوردی بار رسوبی و مدل‌های استفاده شده، اختلاف وجود دارد و براساس شاخص‌های آماری، مدل‌های منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها در تلفیق با دبی متوسط روزانه، به عنوان روش مناسب برای منطقه انتخاب شد. سبحانی^۱ (2010) نیز روش‌های آماری برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها را در حوزه‌ی حبله‌رود بررسی و ارزیابی کرد و به این نتیجه رسید که روش آماری حد وسط داده‌ها و دو خطی در بین روش‌های آماری مورد آزمون، دارای کمترین میزان مربعات خطاست و در حوزه‌ی آبخیز موردنظر، بهترین قابلیت پیشگویی را در برآورد رسوب معلق دارد.

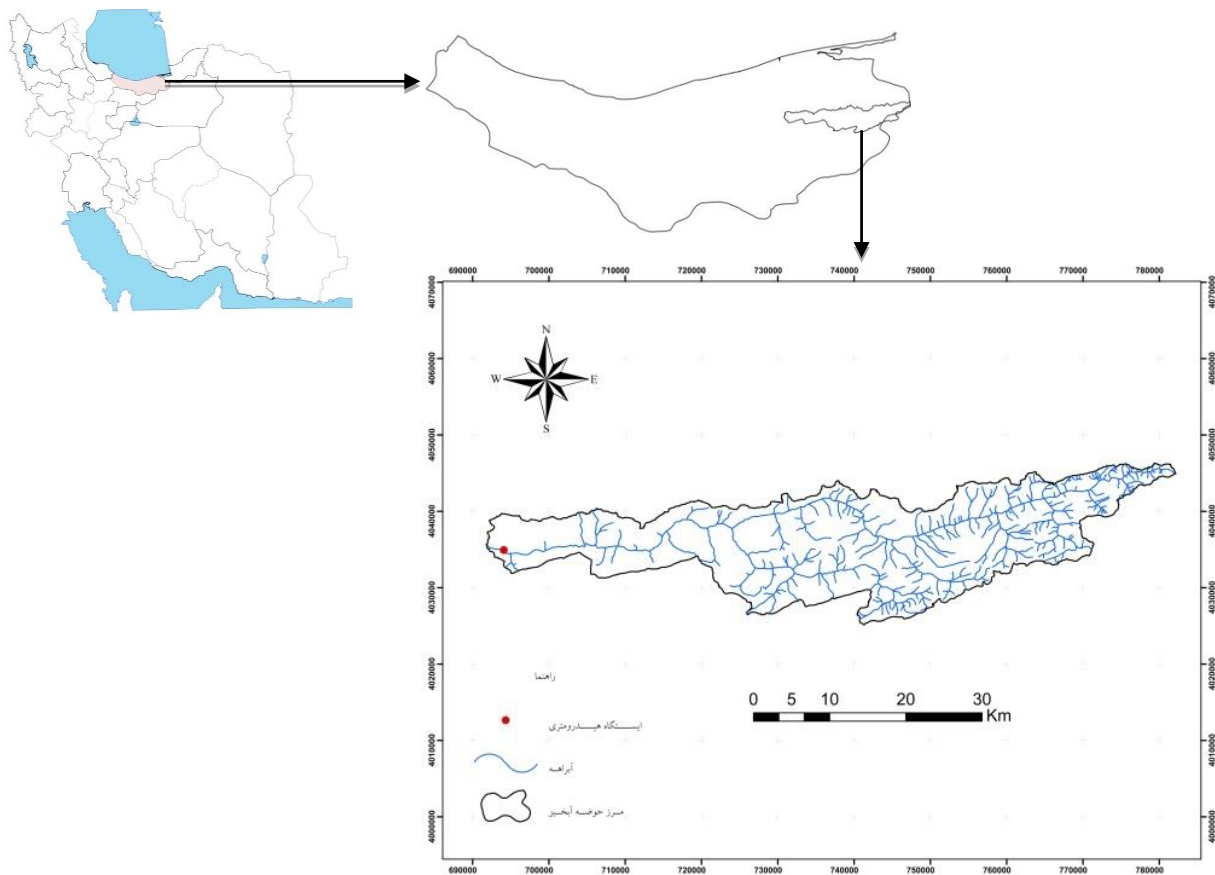
Crawford (1991)، چندین روش را برای محاسبه‌ی پارامترهای منحنی سنجه رسوب مقایسه کرد و در نهایت، نتیجه گرفت که مدل خطی تغییر یافته (مدل توانی لگاریتمی شده) نسبت به روش‌های غیرخطی ارجحیت دارد. Nelson and Booth (2002) با بررسی‌هایی که در حوضه‌ی آبریز رودخانه ایساکو انجام دادند، تولید رسوب سالیانه‌ی این رودخانه را حدود ۶۴۰۰ تن در سال برآورد کردند و رسوب‌گذاری ویژه را نیز ۴۴ تن بر کیلومترمربع در سال تخمین زدند. Achite and Ouillon (2007) در تحقیق خود نشان دادند که مقادیر پیش‌بینی شده در برآورد رسوب معلق با استفاده از مدل روابط رگرسیونی، تا ۲۵ درصد بیش از مقادیر واقعی است و براساس سری‌های زمانی موجود، برآورد دقیق‌تر نیازمند به دوره‌های اندازه‌گیری طولانی مدت است. Rodriguez-Belanco و همکاران (2010) با استفاده از داده‌های رسوب معلق و دبی جریان، در طی مدت سه سال (2004 - 2007) تغییرات زمانی انتقال رسوب را در حوزه‌ی آبخیز آتلانتیک واقع در شمال اسپانیا بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که تغییر در مقدار تولید رسوب معلق با تعداد و شدت وقایع رواناب رابطه‌ی معنی‌داری دارد. آنها همچنین بر نقش رسوب در انتقال مواد مغذی و آلاینده‌ها به مناطق ساحلی منطقه‌ی مورد مطالعه تأکید داشتند. در سال‌های اخیر، مداخلات بشر در سیستم طبیعی از جمله تغییر کاربری اراضی، برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها و ساخت و ساز در حریم آنها، به افزایش بار رسوب معلق و در نتیجه فرسایش در کشور به خصوص در استان‌های شمالی منجر شده‌است. در پژوهش حاضر از شش مدل منحنی سنجه شامل مدل‌های منحنی سنجه خطی، خطی شکسته (چند خطی)، حد وسط داده‌ها، فصلی و FAO استفاده شد. سپس براساس معیارهای آماری و با مشاهدات واقعی (داده‌های اندازه‌گیری شده) برای یک دوره‌ی معین از رسوب معلق و جریان آب، به انتخاب مدل مناسب برای برآورد بار رسوبی رودخانه زارم‌رود واقع در استان مازندران پرداخته شد.

۲- منطقه مورد مطالعه

رودخانه‌ی زارم‌رود در استان مازندران در ۳۰ کیلومتری جنوب شهر ساری قرار دارد. این رودخانه حوضه‌ای به مساحت ۹۰۵۶۸ هکتار را زهکش می‌کند (شکل ۱). از نظر جغرافیایی بین طول شرقی ۵۳° ۸' ۱۱" تا ۵۳° ۱۷' ۲" و عرض شمالی ۳۶° ۲۴' ۴۲" الی ۳۶° ۹' ۱" قرار دارد. حوزه‌ی آبخیز زارم‌رود، پوشش گیاهی و جنگلی انبوه با دامنه‌هایی با شیب متوسط دارد که قسمت اعظم بارش در آن به صورت باران است، ولی بارش برف در ماه‌های زمستانی سال به طور محلی دیده می‌شود. تنها ایستگاه هیدرومتری موجود بر این رودخانه که تقریباً در خروجی حوضه واقع شده‌است، گرم‌رود نام دارد. براساس آمار ثبت شده در این ایستگاه، بیشترین میزان دبی متوسط سالیانه ۴/۸ مترمکعب بر ثانیه و حجم آورد سالانه‌ی آن معادل ۱۵۲ میلیون مترمکعب است. همچنین آبدهی ماهانه حداکثر در فروردین ماه و حداقل آن

^۱ Sobhani

در مرداد ماه بوده و بیشترین آبدهی فصلی، مربوط به فصل بهار و کمترین آبدهی مربوط به فصل تابستان است. آمار دبی جریان و رسوب از سال ۱۳۶۱ تا ۱۳۹۴ در این ایستگاه ثبت شده‌است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه رودخانه‌ی زارمرد در استان مازندران و ایران

۱-۲- مواد و روش

مجموعه داده‌های متناظر دبی جریان و رسوب ایستگاه هیدرومتری گرمرد در طول دوره‌ی آماری ۱۳۶۱ تا ۱۳۹۴، از شرکت مدیریت منابع آب کشور و شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران اخذ و تجزیه و تحلیل شد. با توجه به اینکه داده‌های مورد استفاده باید دارای سه شرط کفایت، درستی و مرتبط بودن باشند (Mahdavi, 2013)؛ به کنترل، تصحیح و بازسازی داده‌های ایستگاه‌ها، آزمون کفایت، آزمون داده‌های پرت و آزمون نرمال بودن داده‌ها پرداخته شد. همچنین برای اطمینان از همگنی داده‌ها، تست همگنی آنها با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف، در محیط نرم‌افزار SPSS اجرا شد. با اطمینان از کافی بودن داده‌ها و همگن بودن آنها، مدل‌های زیر در مورد داده‌های متناظر دبی جریان (Q_w) و دبی رسوب (Q_s) آزموده شدند.

- مدل خطی یا روش U.S.B.R¹

در این روش، پس از تعیین غلظت نمونه‌های رسوب با اطلاع از میزان آبدهی رودخانه در زمان برداشت نمونه، یک رابطه‌ی ریاضی (معمولاً غیرخطی) بین بار رسوبی معلق و دبی جریان برقرار می‌شود. سپس داده‌های دبی آب و دبی

¹ United State Bureau of Reclamation

رسوب متناظر با آن، به صفحه‌ی مختصات لگاریتمی منتقل و خط بهترین برازش بر مبنای روش حداقل مربعات خطا (LSE) از میان آنها عبور داده می‌شود. سپس رابطه‌ی رگرسیونی به صورت معادله‌ی توانی ۱ که به منحنی سنجه رسوب معروف است، بین دو متغیر برقرار می‌شود.

$$Q_s = aQ_w^b \quad (1)$$

مقدار a ضریب فاصله‌ی قائم محل تقاطع خط بهترین برازش با محور قائم تا مبدأ مختصات و مقدار نمای b برابر با شیب خط بهترین برازش است. ضریب a دارای محدوده‌ی خاصی نیست، ولی ضریب b محدوده‌ی نسبتاً کوچکی دارد. اگر $b=1$ باشد؛ به معنی آن است که غلظت c ثابت و مستقل از Q_w است و اگر b از یک بیشتر شود؛ به معنی افزایش c ثابت و مستقل از Q_w است. مقادیر a و b از طریق روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$\log a = \frac{\sum_{i=1}^n \log Q_s - b \sum_{i=1}^n \log Q_w}{N}$$

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^n \log Q_w \times \log Q_s) - (\sum_{i=1}^n \log Q_w \times \sum_{i=1}^n Q_s)}{N(\sum_{i=1}^n (\log Q_w)^2 - \sum_{i=1}^n (\log Q_s)^2)} \quad (2)$$

- مدل خطی شکسته یا چند خطی U.S.B.R

در این روش به جای یک منحنی بر مبنای دسته‌بندی گذر حجمی رودخانه، چند منحنی رسوب از میان داده‌های اندازه‌گیری شده عبور داده می‌شود. این روش برای مناطق و حوضه‌های با رژیم برفی - بارانی توصیه شده‌است (Mirabolghasemi and Morid, 1995). همچنین در این روش براساس توصیه‌ی U.S.B.R بر مبنای گذر حجمی رودخانه، چنانچه وضعیت پراکندگی داده‌ها اقتضا کند به جای یک خط رگرسیون می‌توان دو یا چند خط از میان داده‌های اندازه‌گیری شده عبور داد که خط بهترین برازش نیز بر مبنای روش حداقل مربعات است؛ یعنی دو رابطه‌ی رگرسیونی یا بیشتر، برای محاسبه‌ی بار معلق دراز مدت با توجه به چگونگی کاربردهای مختلف گذر حجمی استفاده می‌شود. خطوط برازش داده شده، بایستی از ضریب همبستگی قابل قبولی برخوردار باشند (Mohammadi et al, 2007).

- مدل حد وسط داده‌ها

این روش اولین بار توسط جانسون (1985) پیشنهاد داده شد. در این روش برای هر Q_w یا برای هر گذر حجمی متوسط هر دسته، بار معلق متوسط اندازه‌گیری شده‌ی همان دسته را برآورد می‌کنند. به این ترتیب، داده‌هایی که به صورت همزمان در آنها دبی آب و غلظت رسوب اندازه‌گیری شده‌است، براساس حجم جریان (از کوچک به بزرگ) مرتب و به دسته‌هایی تقسیم می‌شوند. سپس به ازای دبی متوسط هر دسته (دبی میانه)، غلظت متوسط آن دسته به دست می‌آید و بین دو سری داده‌ی غلظت و جریان رابطه‌ی رگرسیونی، توانی برقرار می‌شود که ضریب همبستگی بالایی دارد. ادامه‌ی محاسبات نیز همانند روش U.S.B.R است (Arabkhedri et al, 1999). در این تحقیق برای برآورد بار رسوب معلق براساس این مدل دسته‌ها، ابتدا دبی‌های جریان براساس نمونه‌ای معین به ۱۵ دسته تقسیم شدند و برای متوسط هر دسته، میانگین رسوب همان دسته تعیین شد.

- مدل منحنی سنج رسوب فصلی

اساس این مدل شبیه مدل خطی U.S.B.R است؛ با این تفاوت که در این مدل، تفکیک داده‌ها به صورت فصلی بررسی می‌شود.

- مدل FAO یا روش سازمان خواربار و کشاورزی

در این روش که توسط جونز و همکاران (1981) تشریح شده‌است، ابتدا بهترین خط را با معادله به روش حداقل مربعات به مقادیر لگاریتمی (نه مقادیر واقعی) برازش می‌دهند. این حالت باعث شده تا بار معلق برآورد شده برای هر گذر حجمی مشاهده شده (Q_w) در طول دوره‌ی آماری، به حالت مقادیر حداقل مشاهده‌ای نزدیکتر باشد. این حالت به خصوص در نواحی خشک و نیمه خشک که پراکندگی داده‌ها در آن زیاد است، بیشتر به چشم می‌خورد. به منظور تعدیل ارقام و نزدیک کردن مقادیر برآورد شده به مقادیر مشاهده شده، FAO توصیه کرده‌است در معادله‌ی منحنی سنج رسوب به جای a از ضریب a' که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید، استفاده شود.

$$a' = \frac{Q_s}{Q_w} \quad (4)$$

معیارهای ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی مدل‌ها، انتخاب بهترین مدل و تعیین دقت آن، از شاخص‌های میانگین توان دوم خطا (MSE) و ضریب همبستگی (ضریب تبیین) (R) استفاده شد. بدین منظور با استفاده از معادله‌ی (۱)، روابط رگرسیونی بین دبی جریان و دبی رسوب متناظر آن برقرار شد. براساس شاخص میانگین توان دوم خطا، هر چه مقادیر برآورد شده از مدل-های انتخابی به مقادیر مشاهده‌ای نزدیکتر باشد، مجموع مربعات خطا کاهش می‌یابد و در نتیجه، میانگین توان دوم خطا - که از تقسیم مجموع مربعات خطا بر درجه‌ی آزادی به دست می‌آید - نیز کمتر می‌شود (روابط ۵ و ۶). بنابراین در هر مدل که میانگین مربعات خطا کمتر باشد، آن مدل نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. همچنین هر چه مقدار ضریب تبیین به یک نزدیکتر باشد، معادله‌ی رگرسیونی به دست آمده بهتر می‌تواند روابط بین دو پارامتر موردنظر را بیان کند (رابطه‌ی ۷).

$$SSE = \sum_{i=1}^n (\log Q_{sio} - \log Q_{sic})^2 \quad (5)$$

$$MSE = \frac{SSE}{DF} \quad (6)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{sic} - \log \bar{Q}_s)(\log Q_{wi} - \log \bar{Q}_w)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\log Q_{sic} - \log \bar{Q}_s)^2 \sum_{i=1}^n (\log Q_{wi} - \log \bar{Q}_w)^2}} \quad (7)$$

در روابط فوق:

SSE: مجموع مربعات خطا، MSE: میانگین مربعات خطا، Q_{sio} : دبی بار معلق اندازه‌گیری شده، Q_{sic} : دبی بار معلق محاسبه شده، Q_{wi} : دبی جریان اندازه‌گیری شده، \bar{Q}_w : میانگین دبی جریان اندازه‌گیری شده، \bar{Q}_s : میانگین بار معلق اندازه‌گیری شده، DF: درجه‌ی آزادی و R ضریب همبستگی است.

در مرحله‌ی بعد برای ارزیابی مدل مناسب (منحنی سنجی مناسب در تلفیق با دبی متوسط روزانه)، به اندازه‌گیری بار معلق رسوبی در طی یک دوره‌ی ۳۰ روزه پرداخته شد. ضمن اینکه در طول این مدت هر روز دو بار به روش نمونه برداری تجمعی نقطه‌ای^۱، از بار معلق رودخانه نمونه‌برداری می‌شد. همزمان با نمونه‌برداری رسوب، خصوصیات هیدرولیکی جریان مثل سرعت جریان، سطح مقطع و عمق جریان نیز اندازه‌گیری و مشخص می‌شد. در طول مدت نمونه‌برداری، یک واقعه سیل مشاهده شد. همچنین بیشترین و کمترین مقدار دبی جریان اندازه‌گیری شده در مدت نمونه‌برداری، به ترتیب ۵/۷۹ و ۰/۰۹۱ مترمکعب بر ثانیه است. بعد از نمونه‌برداری، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شد و پس از جداسازی مواد رسوبی به وسیله‌ی کاغذ صافی، آن را در آون خشک کردند و بعد از توزین غلظت نمونه‌های رسوب بر حسب میلی‌گرم در لیتر و با توجه به دبی جریان همزمان اندازه‌گیری شده، میزان دبی رسوب از طریق رابطه-ی (۸) تعیین شد:

$$Q_s = 0.0864 \times C \times Q_w \quad (8)$$

در این رابطه، Q_s دبی بار رسوبی معلق بر حسب تن بر روز، Q_w دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه و C متوسط غلظت مواد رسوبی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر است. برای ارزیابی دقت مدل‌های مورد استفاده در برآورد بار رسوب با میزان اندازه‌گیری شده، از معیار آماری میانگین درصد خطای نسبی (RME) استفاده شد (روابط ۹ و ۱۰):

$$RME = \frac{\sum_{i=1}^n RE_i}{n} \quad (9)$$

$$RE_i = \left| \frac{S_o - S_c}{S_o} \right| \times 100 \quad (10)$$

در این معادلات:

RME: میانگین درصد خطای نسبی، RE_i : درصد خطای نسبی هر برآورد، S_o : میزان رسوب معلق اندازه‌گیری شده (مشاهده شده)، S_c : میزان رسوب معلق برآورد شده و n : تعداد دفعات مقادیر برآورد شده رسوب معلق است. هرچه مقدار این شاخص کمتر و به صفر نزدیک باشد، نشان دهنده‌ی این است که معادله‌های مربوط از دقت بالاتری برخوردار هستند. معمولاً از این شاخص، در پیش‌بینی و برآورد معادله‌های رگرسیونی استفاده می‌شود.

۳- یافته‌ها (نتایج)

به منظور انتخاب و گزینش مناسب‌ترین مدل برآورد بار رسوبی در رودخانه‌ی زارم‌رود، براساس آنالیز داده‌های دبی جریان و دبی رسوبی متناظر در طی دوره‌ی آماری ۱۳۶۱ تا ۱۳۹۴، ضمن کنترل، تصحیح و بازسازی داده‌ها، آزمون

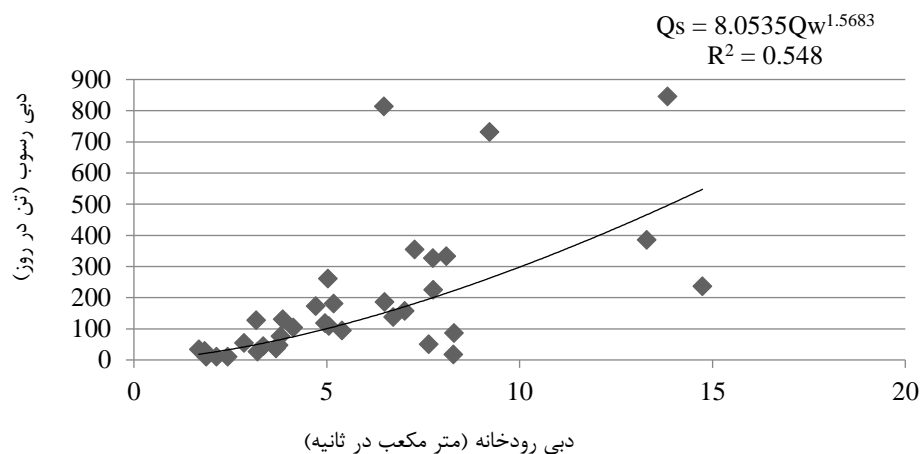
¹ Point Integrated

کفایت داده‌ها، پرت بودن، نرمالیده و همگن بودن داده‌ها اجرا شد. سپس مدل‌های موردنظر برای برآورد بار رسوبی با استفاده از روابط حاکم محاسبه شدند (جدول ۱):

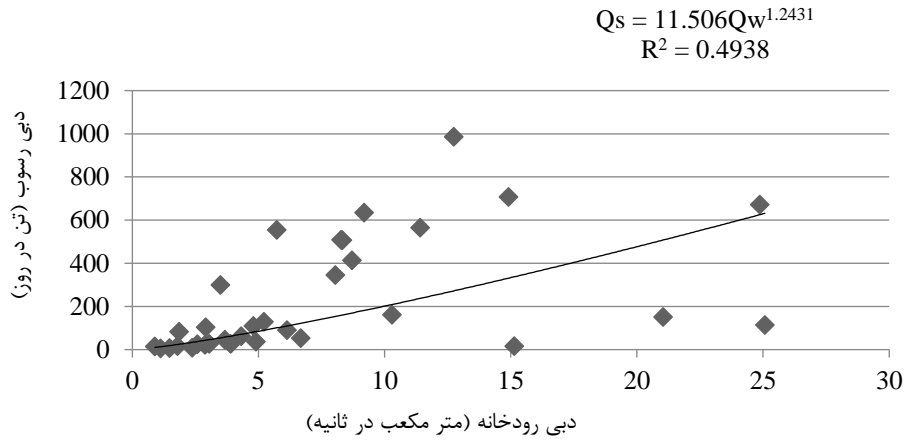
جدول ۱: مقادیر میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین در مدل‌های مورد بررسی

ردیف	نام مدل	میانگین مربعات خطا هر بخش از مدل	میانگین مربعات خطا در هر مدل	ضریب تبیین R^2 (%)	رابطه رگرسیونی توانی
۱	سنجه یک خطی	۰/۲۳	۰/۲۳	۷۲	$Q_s = 8.794 Q_w^{1.712}$
۲	چند خطی	۰/۴۶	۰/۱۸	۴۹	$Q_s = 10.411 Q_w^{1.392}$
۳	حد وسط داده‌ها	۰/۰۲۲	۰/۰۲۲	۴۳	$Q_s = 5.492 Q_w^{1.998}$
۴	مدل FAO	۰/۱۳	۰/۱۳	۹۶	$Q_s = 8.973 Q_w^{2.019}$
۵	مدل فصلی	بهار	۰/۳۵	۴۹	$Q_s = 27.066 Q_w^{1.712}$
		تابستان	۰/۲۲	۵۹	$Q_s = 11.506 Q_w^{1.243}$
		پاییز	۰/۴۵	۵۴	$Q_s = 9.834 Q_w^{1.357}$
		زمستان	۰/۱۹	۵۵	$Q_s = 5.920 Q_w^{1.648}$
					$Q_s = 8.053 Q_w^{1.568}$

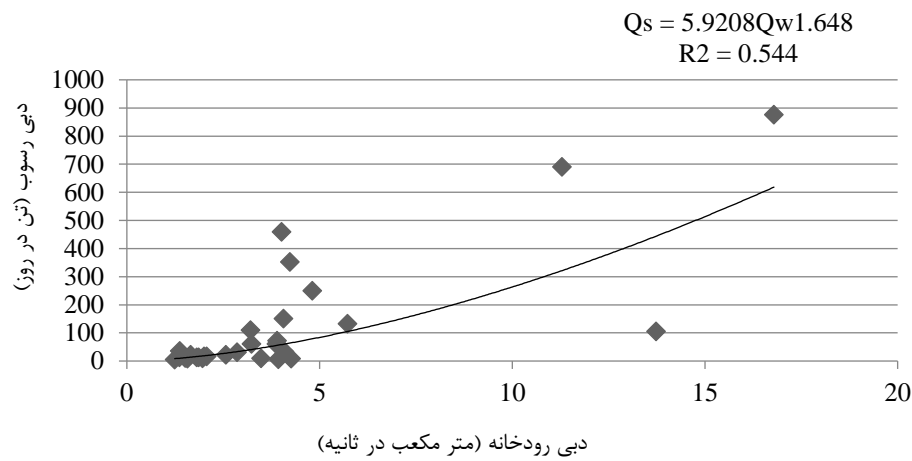
در شکل‌های ۲ تا ۵، مدل‌های منحنی سنجه رسوب فصلی برای تمام داده‌ها در دوره‌ی آماری به همراه مدل رگرسیونی و ضریب تبیین آنها حاصل شد.



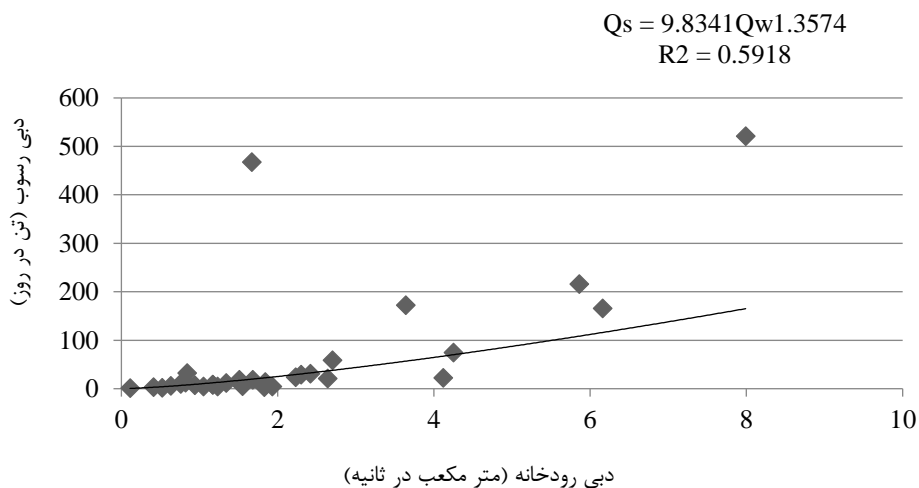
شکل ۳: منحنی سنجه رسوب ایستگاه هیدرومتری گرمود مربوط به فصل زمستان



شکل ۴: منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری گرمروود مربوط به فصل بهار



شکل ۵: منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری گرمروود مربوط به فصل پاییز



شکل ۶: منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری گرمروود مربوط به فصل تابستان

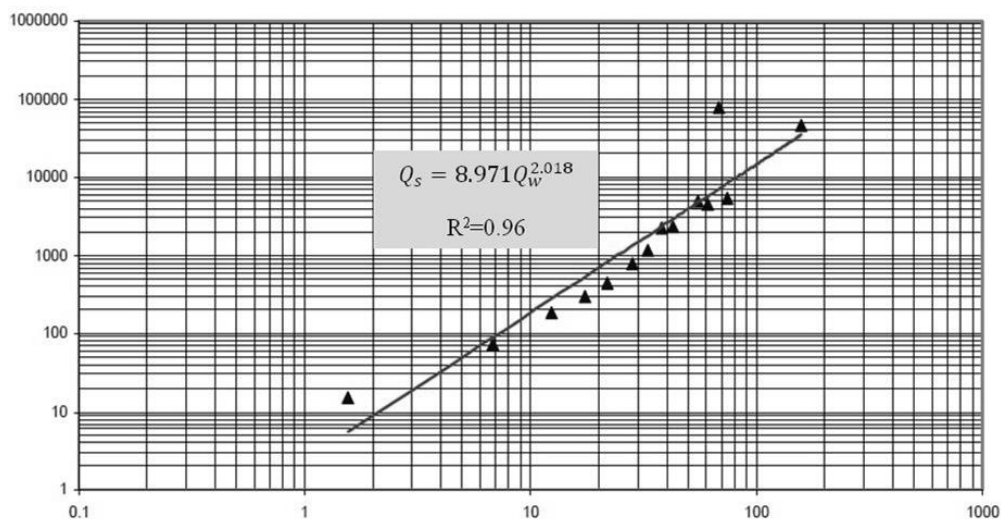
داده‌های به دست آمده در طول دوره‌ی اندازه‌گیری مستقیم بار رسوبی معلق، برای تعیین میزان انحراف مدل‌ها از مقدار واقعی با استفاده از رابطه‌ی ۹ و ۱۰ اجرا شد. برای تعیین میزان انحراف مدل‌ها از مقدار واقعی براساس رابطه‌ی ۹ و

۱۰ از داده‌های به دست آمده بار معلق در طول دوره‌ی اندازه‌گیری استفاده شد. نتایج این بخش نیز نشان داد مدل حد وسط دسته‌ها، دارای کمترین و مدل منحنی سنجه یک خطی، دارای بیشترین مقدار RME است؛ بنابراین مدل دارای کمترین مقدار میانگین درصد خطای نسبی، بیان‌کننده‌ی کمترین میزان انحراف نسبت به مقادیر واقعی است (جدول ۲).

جدول ۲: مقادیر RME مدل‌های مختلف مورد بررسی

مدل‌های برآورد	مدل منحنی سنجه یک خطی	مدل منحنی سنجه چند خطی	مدل حد وسط دسته‌ها	مدل منحنی سنجه فصلی	مدل FAO
RME	۱۹۸۴/۴۲	۷۴۵/۵۰	۱۷۳/۶۵	۲۲۷/۱۲	۴۲۶/۲۳

در مدل منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها، پراکنش نقاط کم شده و خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی به حداقل می‌رسد (شکل ۷)، ولی در مدل یک خطی، داده‌ها دسته‌بندی نشده‌است و فراوانی داده‌های دبی پایه بر مقادیر ضرایب منحنی سنجه رسوب تأثیر زیادی می‌گذارد. در مدل FAO با توجه به وجود داده‌های استثنایی با مقادیر رسوب زیاد در زوج متناظر دبی جریان و رسوب، تأثیر زیادی بر افزایش مقدار رابطه‌ی ۴ دارد که در آن تغییرات مخرج کسر، محدودتر از صورت کسر است. از این امر به عنوان یکی از نقاط ضعف این روش یاد می‌شود و آن به این معنی است که رابطه‌ی ۴، میزان رسوب معلق محاسبه شده را بیش از مقدار مشاهداتی نشان می‌دهد. در مدل‌های فصلی نیز مشاهده شد که بیشترین مقدار بار رسوبی معلق به فصل بهار مربوط است (جدول ۱) که از نوع کاربری در این فصل، همچنین شدت بالای باران‌های این فصل در حوضه‌ی آبخیز رودخانه‌ی زارم‌رود سرچشمه می‌گیرد.



شکل ۷: منحنی سنجه حد وسط داده‌ها

۴- بحث و نتیجه‌گیری

تعیین میزان رسوب انتقالی و تولید شده در حوضه‌های آبخیز، مبنای اساسی مدیریت صحیح منابع آب و خاک تلقی می‌شود. معمولاً در برآوردهای بار رسوبی، از معادلات رگرسیونی منحنی‌های سنج رسوب استفاده می‌شود که مهمترین دلیل آن سهولت کاربرد این معادلات است. اما از آنجایی که در این معادلات تنها یک متغیر مستقل وارد می‌شود؛ از این رو منحنی‌ها نمی‌توانند به پیش‌بینی دقیق و صحیح مقدار بار رسوبی واقعی رودخانه‌ها پردازند. بنابراین، سعی می‌شود با اعمال شرایط یا تغییراتی در آنها (از جمله دسته‌بندی داده‌ها و سایر مدل‌هایی که در بخش مواد و روش‌ها تشریح شد)، خطای برآورد رسوب را کاهش داد. در این تحقیق نیز با تجزیه و تحلیل داده‌های متناظر دبی جریان و رسوب در حوزه‌ی رودخانه زارم‌رود، پنج مدل رگرسیونی منحنی‌های سنجی برای برآورد میزان رسوب معلق رودخانه محاسبه شد. سپس با اندازه‌گیری مستقیم بار معلق و عملیات آزمایشگاهی، مدل‌های به دست آمده ارزیابی شد. با توجه به جدول ۱، منحنی حد وسط دسته‌ها دارای کمترین میانگین مربعات خطا، همچنین بیشترین مقدار ضریب تبیین و بهترین قابلیت پیش‌بینی است. در نتیجه، این مدل به عنوان مناسب‌ترین و بهترین مدل برآورد بار رسوب معلق از بین پنج مدل محاسباتی انتخاب می‌شود. همچنین در جدول ۱، بیشترین مقدار میانگین مربعات خطا مربوط به مدل منحنی سنج یک خطی است که این نتیجه با یافته‌های مساعدی^۱ و همکاران (2006)، اعظمی و همکاران (2009)، Porhemat and Domiri-Ganji (2005) و محمدی^۲ و همکاران (2007) مطابقت دارد و با نتایج لطفی و حسن‌زاده (2007) - که روش‌های مختلف برآورد بار رسوبی را بر رودخانه‌ی گاماسیاب مطالعه کرده و مدل منحنی سنج یک خطی را به عنوان دقیق‌ترین روش برآورد رسوب معرفی کرده بودند - مغایرت دارد. در این تحقیق، مدل حد وسط داده‌ها به عنوان مدل بهینه‌ی برآورد بار رسوبی معلق انتخاب شد. با اجرای تحقیق‌های مشابه، می‌توان میزان رسوب تولیدی در حوزه‌های آبخیز را با توجه به مدل بهینه‌ی آن حوزه به دست آورد. این امر ما را در اجرای طرح‌های حفاظت آب و خاک یاری خواهد داد. حوزه‌ی آبخیز زارم‌رود از نظر تولید رسوب از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا در پایین دست ساری واقع است که مکان اراضی کشاورزی و شالیزارها به شمار می‌رود. با اجرای این تحقیق، ضمن مدیریت میزان رسوب تولیدی حوزه‌ی آبخیز می‌توان از خسارات ناشی از رسوب‌زایی حوزه‌ی مورد مطالعه جلوگیری کرد، یا آنها را کاهش داد. همچنین به دلیل فقدان سیلاب (فقط یک مورد) در طول دوره‌ی نمونه‌برداری مستقیم از بار معلق رودخانه‌ی موردنظر و با توجه به اینکه بیشترین مقدار رسوب در پیک دبی جریان رخ می‌دهد، لازم است در مطالعات بعدی از جریان‌های سیلابی بیشتری نمونه رسوب معلق گرفته شود. از سوی دیگر، با توجه به فقدان امکانات و تجهیزات لازم در طول دوره‌ی نمونه‌برداری کوتاه مدت، پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی، این مشکلات حل و از تجهیزات به روز و افراد متخصص استفاده شود. مدل انتخاب شده نیز می‌تواند میزان پیش‌بینی‌های میزان بار رسوبی رودخانه را برآورد سازد تا برای استفاده در زمینه‌های مدیریت منابع آب و خاک از جمله شناسایی منابع تولید رسوب، تعیین مناطق با پتانسیل رسوب‌دهی بالا برای کاهش فرسایش در حوزه‌ی مورد مطالعه گام برداشته شود. از آنجایی که بر روی رودخانه‌ی موردنظر، کارگاه برداشت شن و ماسه وجود دارد؛ می‌توان میزان تولید رسوب رودخانه را به سبب چنین مطالعاتی

¹ mosaed² Mohammadi et al

تخمین زد که در تعیین میزان ظرفیت برداشت شن و ماسه از رودخانه، برای جلوگیری از خسارت‌های مورفولوژیکی، هیدرولیکی و ژئومورفولوژیکی به سامانه‌ی رودخانه اهمیت بالایی دارد.

منابع

1. Aazami, A.; Berodian, N.; Najafinejad, A.; Yeghmaii, F.; & M. Arabkhedri, 2009. Determination the suitable method for estimate suspended sediment load In Ilam dam watershed, *Watershed Management Researches*, 83, 75-82. (In Persian).
2. Achite, M., & S. Ouillon, (2007). Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of Hydrology*. 343(3), 187-202.
3. Arabkhedri, M., 2005. A Study on the Suspended Sediment Yield in River Basins of Iran, *Iran-Water Resources Research*, 1(2), 51-60. (In Persian).
4. Arabkhedri, M.; Hakimkhani, Sh.; & A. Valikhojini, 1999. The necessity of revision of the conventional methods of estimating the suspended load of rivers, *5th International River Engineering Conference Shahid Chamran University*, 429-438. (In Persian).
5. Arabkhedri, M.; Hakimkhani, Sh.; & J. Varvani, 2004. The validity of extrapolation methods in estimation of annual mean suspended sediment yield (17 Hydrometric Station) , *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 11(3), 123-131. (In Persian).
6. Asselman, N. E. M., 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves, *Journal of Hydrology*, 234(3), 228-248.
7. Azami, A.; Najafinejad, A.; & M. Arabkhedri, 2005. Characteristics of the authors of the article Evaluation of hydrological models in estimating suspended sediment load in the Ilam dam basin and flood, Third National Conference on erosion and sediment, *Soil and Water Conservation Research Center*, Tehran, Iran. (In Persian).
8. Camenen, B., & M. Larson, (2005). A general formula for non-cohesive bedload sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 63(1), 249-260.
9. Cobaner, M.; Unal, B.; & O. Kisi, 2009. Suspended sediment concentration estimation by an adaptive neuro-fuzzy and neural network approaches using hydro-meteorological data, *Journal of Hydrology*, 367(1), 52-61.
10. Crawford, C. G., 1991. Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended-sediment loads, *Journal of Hydrology*, 129(1-4), 331-348.
11. Einstein, H. A., 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows (Vol. 1026), *Washington DC: US Department of Agriculture*.
12. Fredsoe, J., & R. Deigaard, (1992). Mechanics of Coastal Sediment Transport. *Advanced Series on Ocean Engineering*, Volume 3. Hackensack.
13. Lajeunesse, E.; Malverti, L.; & F. Charru, 2010. Bedload transport in turbulent flow at the grain scale: Experiments and modeling, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4).
14. Latifi, A., & Y. Hassanzadeh, (2007). The comparison of different methods of estimating the suspended sediment load in rivers and choosing the most appropriate method (case study: Gamasiab River), *7th International River Engineering Conference Shahid Chamran University*, 13-15 Feb., Ahwaz, Iran. (In Persian).
15. Ludwig, W., & J. L. Probst., (1998). River sediment discharge to the oceans; present-day controls and global budgets. *American Journal of Science*. 298(4), 265-295.
16. Mahdavi, M., 2013. Applied Hydrology, Vol 2, 8th publication, *Tehran University Press*, 437p. (In Persian).
16. Mirabolghasemi, M., & S. Morid., (1995). Investigation of hydrological methods for estimation of river suspended sediment. *Journal of water and technology, Ministry of energy*, 3(3), 45-67. (In Persian).

17. Mohammadi, A.; Masaedi, A.; & A. Heshmatpour, 2007. Determination of the best model to estimate suspended sediment loads in Ghazaghly gauge station-Gorganrood River, Iran. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(4), 232-240. (In Persian).
18. Morehead, M. D.; Syvitski, J. P.; Hutton, E. W.; & S. D. Peckham, 2003. Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins, *Global and Planetary Change*, 39(1), 95-110.
19. Mosaedi, A., 1998. Hydrological sizing of sediment reservoir system for irrigation and water supply (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Faculty of Civil Eng, *Technical University of Budapest*, Hungary, 101pp).
20. Mosaedi, A.; Shahabi, M.; & A. Mohammadi-Ostadkeyaleh, 2006. Investigating on Changing of Relations between Flow Discharge and Suspended Sediment During the times at Marave hydrometric Station (Atrak), 2th National Conference on Watershed Management and Water and Soil Management, Kerman, 1941-1948. (In Persian).
21. Nelson, E. J., & D. B. Booth., (2002). Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. *Journal of Hydrology*. 264(1), 51-68.
22. Ozturk, F.; Apaydin, H.; & D. E. Walling, 2001. Suspended sediment loads through flood events for streams of Sakarya River Basin, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25, 643-650.
23. Pavanelli, D., & A. Bigi, (2004). Suspended sediment concentration for three Apennine monitored basins, particle size distribution, and physical parameters, 537-544. In Proceeding of Agro-Environment Congress, Venice, Italy.
24. Porhemat, J., & M. Domiri-Ganji., (2005). Analysis of sediment relation in hydrometric stations Hendijan-Jarahi watershed. Third National Conference on erosion and sediment, *Soil, and Water Conservation Research Center*, Tehran, Iran. (In Persian).
25. Pouraghniaei, M.; Doumiri, G. M.; Yousefpour, A.; & B. Ghermez Cheshmeh, 2008. A Review of Estimation Methods for Suspended Load Case study: Seydon Basin, Iran, *Iran-Water Resources Research*, 3(3), 73-75. (In Persian).
26. Rodríguez-Blanco, M. L.; Taboada-Castro, M. M.; Palleiro, L.; & M. T. Taboada-Castro, 2010. Temporal changes in suspended sediment transport in an Atlantic catchment, NW Spain, *Geomorphology*, 123(1), 181-188.
27. Sadeghi, S.H.R., 2005. Development of sediment rating curve equations for rising and falling limbs of hydrograph using regression concept, *Iran-Water Resources Research*, 1(1), 101-103. (In Persian).
28. Shafae-Bajestan, M., 2011. Theoretical and practical principles of hydraulic sediment transport. 2th edition. *ShahidChamran University Press*, 566 p. (In Persian).
29. Sinnakaudan, S. K.; Sulaiman, M. S.; & S. H. Teoh, 2010. Total bed material load equation for high gradient rivers, *Journal of Hydro-environment Research*, 4(3), 243-251.
30. Sobhani, H., 2010. Application and comparison of statistical methods for estimating suspended sediment load (Case study: Hablehroud Watershed), Master thesis, Department of Desertification, *University of Semnan*. (In Persian).
31. Telvari, A., 2002. The relationship between suspended sediment yield and some catchment characteristics in sub-catchment of Dez and Karkheh river in Lorestan province, *Pajouhesh&Sazandagi*, (56&57), 56-61. (In Persian).
32. Wilson, K. C., 1966. Bed-load transport at high shear stress, *Journal of the hydraulics division*, 92(6), 49-59.
33. Yang, C. T., 1996. Sediment transport: theory and practice, MCGRAW-HILL BOOK CO, (USA).
34. Zhang, W.; Wei, X.; Jinhai, Z.; Yuliang, Z.; & Y. Zhang, 2012. Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves, *Continental Shelf Research*, 38, 35-46.

Determination of the Best Model to Estimate Suspended Sediment Load in Zaremrood River, Mazandaran, Iran

Sayed Hussein Roshun: *Ph.D. Candidate in Watershed Management, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari.*

Ghorban Vahabzadeh Kebria¹: *Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari.*

Karim Solaimani: *Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari.*

Abdulvahed Khaledi Darvishan: *Assistant Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modarres University, Tehran.*

Article History (Received: 12/07/2016

Accepted: 30/12/2017)

Extended abstract

1- Introduction

The phenomena of erosion, sediment transport, and sedimentations have tremendously destructive effects on the environment and hydraulics structures. In general, the sediment transportation depends on river discharges, but the proposed equations inherited serious errors. The estimation of suspended sediment load (SSL) is one of the most important factors in river hydraulics, morphology and sediment hydraulic studies. An accurate estimation of suspended sediment loads (SSL) is crucial for the management and construction of the water resources projects. This factor also is the fundamental basis for the proper management planning of the soil and water resource in the watershed. The estimation of the total suspended load of the river with measured data in the hydrometric stations using the relation sediment rating curves are possible through the conventional methods. Accurate and reliable suspended sediment estimates are required in a variety of experimental and operational hydrological situations for scientific and/or river management purposes. Sediment ratings may, for example, be used to estimate the long-term rates of landscape denudation, to reflect the river morphological changes, to gauge the sensitivity of catchments for varying land-use practices, or to accomplish specific project applications, such as the estimation of the reservoir lifetimes, or the identification of the tolerable effluent discharge, and/or the water quality inputs, around the hydroelectric turbines. Suspended sediment loads (SSL) are often estimated through an empirical relation between suspended sediment load (L) and streamflow (S). This relation is usually defined as a power function, $L = aS^b$, and is referred to as a suspended sediment rating curve. This function can be formulated as either a linear or non-linear model to find the solution of the rating curve parameters (a and b). Formulation of the power function as a linear model requires a logarithmic transformation to linearize the function and a subsequent correction for the transformation bias. Rating-curve parameter estimates for both the bias-corrected, transformed-linear or non-linear models can be obtained through the method of least squares.

2- Methodology

In this paper, the rate of the sediment load in Zaremrood river was estimated using USBR, Polyline USBR, moderate categories curve, seasonal rating curve and FAO models. In addition, during 30 days (60 samples), the suspended load sampling was conducted, then, the

¹ Corresponding Author: vabzadeh.ghorban@gmail.com

selected model was evaluated using a direct sampling of the suspended load. To evaluate the suspended sediment loads and an optimized model on them, in this research, the data were collected from the Iranian water resources management company and Mazandaran regional water authority. The data analysis first included the control and adequacy testing, detection of outliers and normality test. Also, to ensure the homogeneity of the data, the homogeneity test was performed using Kolmogorov-Smirnov test in the SPSS software. Finally, the five models were derived using the corresponding data of flow (Q_w) and sediment discharge (Q_s).

3- Results

The results of this study showed that the moderate categories curve model had the lowest RME rate (173/65) and the highest coefficients of determination (96%) (table 1), and as a result, this model was selected as the best model to estimate the suspended load of Zaremrood river (Figure 1).

Table 1. RME values for the models

FAO Model	Seasonal Rating Curve Model	Moderate Categories Curve Model	Multiline Rating Curve Model	Single Linear Rating Curve Model	Estimation Models
426.23	227.12	173.65	745.50	1984.42	RME

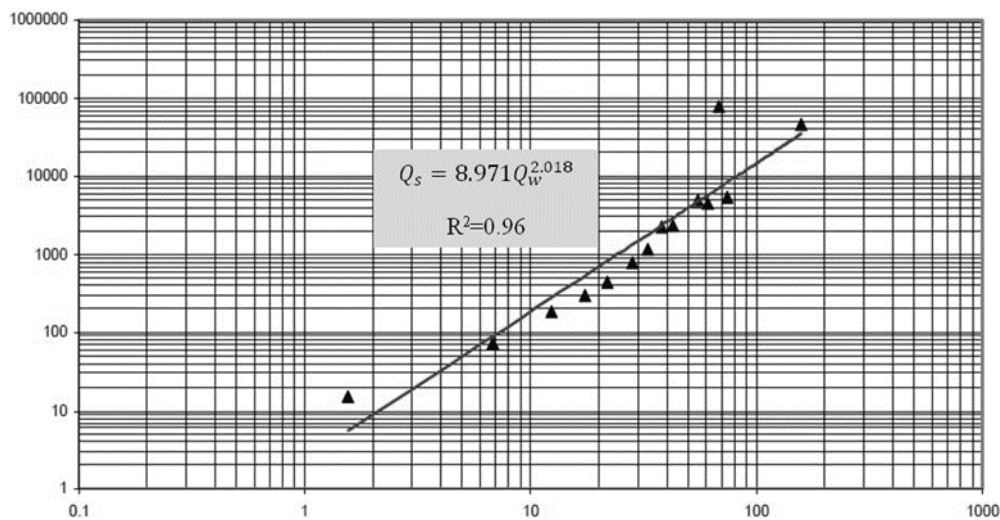


Fig. 1 Mid-Range Rating Curve

Also, with regard to the linear rating curve model having a maximum deviation from the observational data, it was recommended to apply this model to estimate the total suspended load, through the methods with the latest error to estimate the river sediment load in this case study. Finally, the results showed that the highest amount of suspended sediment load (SSL) in the spring season is due to the land use type in this season and also the high intensity of rainfall in this watershed.

4- Discussion & Conclusions

Correct estimation of sediment discharge and consequently, sediment load is an essential component in river management. The key objective of this study was to determine the best model to estimate the suspended sediment load (SSL) in Zaremrood river, Mazandaran province. Flow and sediment discharge data were collected and used to establish a sediment rating curve models. Then, five rating curve models including Single Linear Rating Curve Model, Multiline Rating Curve Model, Moderate Categories Curve Model, Seasonal Rating

Curve Model and FAO Model were conducted. Suspended sediment was sampled using a direct method and analysis in the laboratory to be evaluated through statistical evaluation indices. As a result, the moderate categories curve model was selected as the most suitable and best model for estimating the suspended sediment load in Zaremrood river. Zaremrood watershed was the most important in sediment production located at the upper Sari plain where agricultural land and rice fields were present. So, by considering the results of this research and the management of the sediment produced in this watershed, it is possible to prevent the damages caused by the sedimentation of the Zaremrood watershed. To conserve the water and soil in the watershed, a similar research is necessary. The selected model can estimate the total sediment load used in the water and soil resources management plan, including the identification of sources of sediment production, the determination of the areas with high potential sedimentation in order to reduce erosion in the studied area.

Key Words: Sediment Load, Suspended load Sampling, RME, Zaremrood River.