علوم و مهندسی آبیاری
جلد ۴۰، شماره‌ی۳، پاییز ۹۶، ص. ۱۶۶-۱۵۱

ارزیابی روش‌های مختلف توسعه منحنی سنجه رسوب و مدل‌های شبیه‌سازی کامپیوتری به منظور تخمین بار رسوبی حوضه آبریز مازندران

منوچهر حیدرپور[۱]، فاطمه فتاحی[۲]، امیر حق‌شناس آدرمنابادی[۳*] و نادیا کیا[۴]

۱- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳*- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان haghshenasamir@yahoo.com
۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۲۳

چکیده

هدف از این مطالعه تجزیه و تحلیل بار رسوبی در آبراهه‌های حوضه آبریز مازندران با استفاده از روش‌های مختلف تولید منحنی‌های سنجه رسوب و روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از داده‌های شدت جریان و غلظت رسوب معلق می‌باشد. به همین منظور شش روش مختلف برای تولید منحنی‌های سنجه رسوب (داده‌های خام، داده‌های کلاسه‌بندی‌شده، متوسط ماهانه، متوسط فصلی، متوسط سالانه و داده‌های دوره‌های سیلابی- کم‌آبی) در ۲۶ ایستگاه هیدرومتری دارای آمار بلندمدت (بیش از ۲۹ سال) روی هشت رودخانه این حوضه مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی دقت این منحنی‌ها با استفاده از چهار معیار آماری مختلف انجام گرفت. نتایج حاصل از این محاسبات نشان داد که منحنی‌های تولیدشده با استفاده از داده‌های خام کم‌ترین دقت را در محاسبه بار رسوبی در ایستگاه‌های مختلف داشته، و در مقابل، منحنی‌های تولیدشده با داده‌های متوسط سالانه و داده‌های کلاسه-بندی‌شده بیشترین تطابق را با داده‌های اندازه‌گیری‌شده دارا بودند. ۲۲درصد مساحت حوضه آبریز مازندران دارای رسوب‌دهی ویژه زیر ۱۰۰ و ۳۵درصد نیز بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ تن در کیلومتر مربع در سال بودند. متوسط خطای محاسبات بار رسوبی در حوضه آبریز مازندران ۰/۱۶- (بین ۰/۵۴- تا ۰/۳۲) بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری حوضه با نرم‌افزار SWAT نیز نشان داد که در آبراهه‌هایی که منشأ رواناب بیشتر ناشی از بارش باران باشد، دقت مدل در برآورد شدت جریان و بار رسوبی آبراهه مناسب خواهد بود و رژیم برفی- بارانی در آبراهه، تأثیر آب زیرزمینی و مخازن و سدها روی آبراهه سبب کاهش دقت مدل در تخمین شدت جریان و بار رسوبی آبراهه خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: منحنی سنجه رسوب، حوضه آبریز مازندران، معیارهای آماری، شبیه‌سازی، SWAT.

مقدمه

تخمین بار رسوب در رودخانه ها نقش بسیار مهمی در موضوعاتی مانند مطالعات کیفیت آب، بهره‌برداری و نگهداری مخازن و شبکه‌های انتقال آب و انتقال آلاینده‌ها دارا می‌باشد (هرینگتون و هرینگتون[۱]، ۲۰۱۳). برای تخمین بار رسوبی درون حوضه‌های آبریز روش‌های متفاوتی ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. در حوضه‌هایی که داده‌های دبی و غلظت رسوبات به صورت مداوم و یکنواخت وجود نداشته باشد استفاده از مدل‌های هیدرودینامیکی محاسبه بار رسوبی بسیار رایج می‌باشد (ون‌گرینسون و همکاران[۲]، ۲۰۱۳؛ دی‌ونته و همکاران[۳]، ۲۰۱۳). امروزه برخی از مدل‌های بهینه‌سازی مانند بهینه‌سازی کلونی مورچگان و الگوریتم ژنتیک نیز برای پیش‌بینی بار رسوبی حوضه‌های آبریز مورد استفاده قرار گرفته است (محمدرضاپور و همکاران[۴]، ۲۰۱۲). در حوضه‌هایی که ایستگاه‌های هیدرومتری کافی با پراکندگی مناسب و داده‌های غلظت دبی مداوم وجود داشته باشد استفاده از منحنی‌های سنجه رسوب برای تخمین بار رسوبی بسیار مناسب‌تر خواهد بود.

منحنی سنجه رسوب روشی برای توصیف رابطه بین دبی رودخانه و بار رسوبی معلق آن است. قدمت استفاده از منحنی‌های سنجه رسوب توسط متخصصین علم هیدرولوژی برای پیش‌بینی بار رسوبی رودخانه‌ها به بیش از ۶۰ سال می‌رسد (هورویتز[۵]، ۲۰۰۲). دست‌یابی به دقت بالا در تخمین بار رسوبی رودخانه‌ها با استفاده از منحنی‌های سنجه وابستگی زیادی به وجود داده‌های بلندمدت و مداوم دبی- غلظت دارد. امروزه استفاده از روش رگرسیون توانی برای ایجاد منحنی‌های سنجه رسوب بیشتر معمول می‌باشد (اسلمان[۶]، ۲۰۰۰):

$$Q_s = aQ^b \qquad (۱)$$

شکل دیگر این رابطه، رابطه خطی برای داده‌های لگاریتمی دبی- بار رسوب است:

$$\text{Log}\,(Q_s) = \log\,(a) + b \log\,(Q) \qquad (۲)$$

1 - Harrington and Harrington
2 - Van Griensven *et al.*
3 - De Vente *et al.*
4 - Mohamad Reza Pour *et al.*
5 - Horowitz
6 - Asselman

که در آن Q: دبی رودخانه (مترمکعب بر ثانیه)، Q_s: بار رسوبی رودخانه (تن بر سال)، a و b نیز ثابت‌های رگرسیون می‌باشند. در هنگام استفاده از روش رگرسیون توانی به منظور تخمین منحنی سنجه رسوب، بازگرداندن داده‌ها از فضای لگاریتمی به فضای هندسی سبب ایجاد یک اریبی در داده‌ها می‌گردد این امر در نهایت منجر به تخمین پایین بار رسوبی خواهد شد (کرودر و همکاران[1]، ۲۰۰۷).

از روش منحنی سنجه رسوب به عنوان روش جعبه سیاه نیز نام برده می‌شود زیرا بسیاری از متغیرهای مؤثر روی میزان بار رسوب مانند تأثیر فصول، در دسترس بودن رسوبات و فاصله حمل آن‌ها در این روش مورد توجه قرار نمی‌گیرد. ثابت‌های منحنی سنجه (a و b) در واقع دارای معنی فیزیکی خاصی نمی‌باشند و باید از طریق روش رگرسیون‌گیری مورد محاسبه قرار گیرند. این پارامترها به شرایط ژئوگرافیکی حوضه بستگی دارند و ممکن است در طول زمان بطور وسیعی دچار تغییر شوند (ونگ و همکاران[2]، ۲۰۰۸). هیو و همکاران[3] (۲۰۱۱) بیان کردند که این پارامترها با مورفولوژی رودخانه‌ها (شکل و شیب آبراهه) و میزان قابلیت فرسایش خاک رابطه دارند. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که فعالیت‌های بشری مانند ساخت سدها و مخازن می‌تواند مقدار این پارامترها را به مقدار زیادی تحت تأثیر قرار دهد.

هر چند استفاده از روش رگرسیون توانی به منظور تولید منحنی‌های سنجه رسوب به دلیل سادگی اولیه در مکان‌هایی که دارای داده‌های بلندمدت دبی–بار رسوب هستند بسیار متداول است اما استفاده از این روش دارای محدودیت‌هایی نیز بوده که در هنگام تحلیل نتایج آن باید مورد توجه قرار گیرد. به عنوان نمونه در صورت استفاده از رابطه (۱) تخصیص وزن زیاد به مقادیر دبی بالا سبب می‌گردد تا قابلیت بازتولید داده‌ها با استفاده از رگرسیون‌گیری توانی کاهش یابد. هم‌چنین اگر از داده‌های لگاریتمی رگرسیون خطی گرفته شود (رابطه ۲) وزن زیادی به مقادیر کم اختصاص داده می‌شود و این امر موجب تخمین پایین نتایج خواهد شد (جنسون[4]، ۱۹۹۶). هرینگتون و هرینگتون (۲۰۱۳) بیان می‌دارند که استفاده از رگرسیون‌گیری توانی برای ایجاد منحنی‌های سنجه در مکان‌هایی که بازه وسیعی از داده‌های غلطت– دبی در اختیار می‌باشد مناسب‌تر خواهد بود. مقایسه بارهای تخمینی توسط منحنی‌های مختلف سنجه با بارهای رسوب واقعی در حوضه‌های گوناگون نشان داده است که اغلب این منحنی‌ها سبب تخمین بالا و یا پایین بار رسوب شده‌اند، به همین دلیل روش‌های اصلاح مختلفی برای بهبود این منحنی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها تقسیم داده‌های بار رسوب– دبی به دوره‌های زمانی ماهانه، فصلی و یا دوره‌های هیدرولوژیکی است (هورویتز، ۲۰۰۳).

کرافورد[5] (۱۹۹۱) دریافت که تخمین پارامترهای منحنی سنجه با استفاده از روش رگرسیون‌گیری خطی از داده‌های لگاریتمی بر اساس حداقل مربعات دقت بیشتری را نسبت به مدل‌های غیرخطی و وزنی غیرخطی بر اساس حداقل مربعات خواهد داشت. به هرحال دقت منحنی‌های سنجه رسوب به عوامل گوناگونی از جمله ویژگی‌های حوضه، گام‌های زمانی محاسبه بار و روش مورد استفاده برای ایجاد رابطه بین داده‌های دبی– بار رسوب بستگی دارد (والینگ[6]، ۱۹۷۷).

تأثیر روش‌های مختلف تقسیم داده‌ها روی دقت منحنی‌های سنجه رسوب در پژوهش‌های اندکی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف در این مقاله ایجاد منحنی‌های سنجه رسوب برای ۲۶ ایستگاه هیدرومتری در حوضه آبریز مازندران با استفاده از روش‌های مختلف شکست داده‌ها (روزانه، ماهانه، فصلی، سالانه، طبقه‌بندی‌شده و ماهانه سیلابی– غیرسیلابی) می‌باشد. کارایی و راندمان هر منحنی با استفاده از پارامترهای مختلف آماری مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. هدف دیگر تخمین بار رسوب و بار ویژه رسوب در کل حوضه آبریز مازندران و تهیه نقشه رسوب این حوضه خواهد بود.

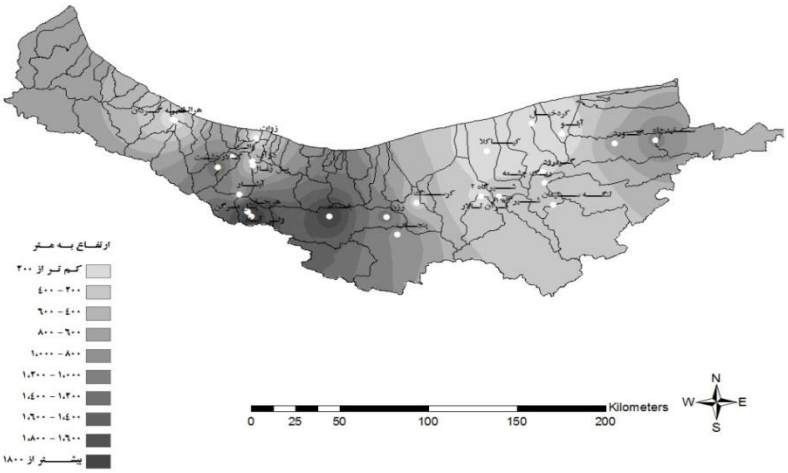
ویژگی های حوضه آبریز مازندران

حوضه آبریز مازندران در شمال ایران واقع گردیده و کل مساحت این حوضه بالغ بر ۲۵۵۱۵ کیلومترمربع می‌باشد. حوضه مازندران از شمال به وسیله دریای خزر و از جنوب توسط رشته کوه‌های البرز محدود شده است (شکل ۱). متوسط بارندگی سالانه درون حوضه بین ۱۴۰۰ میلی‌متر در نزدیکی سواحل دریای خزر تا ۳۰۰ میلی‌متر در دره نمارقستان متغیر می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه در مناطق کوهستانی حوضه ۷۰۵ میلی‌متر و در نواحی دشت‌های آن ۹۶۲ میلی‌متر برآورد شده است. متوسط بارندگی در کل حوضه نیز ۷۶۴ میلی‌متر تخمین زده شده است. میانگین دمای سالانه حوضه نیز از ۱۶ درجه سانتی‌گراد در نزدیکی سواحل دریای خزر تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد در قله دماوند متغیر است. آب و هوای حوضه آبریز مازندران بر این اساس معتدل و مرطوب تلقی می‌شود. تراز ارتفاعی نقاط مختلف حوضه نیز دارای اختلاف بسیار است و از صفر در سواحل دریای خزر تا ۵۶۷۰ متر در قله دماوند تغییر می‌نماید. حوضه مازندران به هشت زیرحوضه اصلی تقسیم شده است که در هر زیرحوضه یک رودخانه اصلی جریان دارد. این زیرحوضه‌ها عبارتند از نکارود، تجن، بابلرود، تالار، هراز، چالوس، چشمه‌گیله و سرابرود.

داده های هیدرومتریک شامل داده‌های دبی آبراهه‌ها و بار رسوبی معلق در ۱۱۶ ایستگاه هیدرومتری در نقاط مختلف حوضه مازندران توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران برداشت می‌شود. مدت زمان برداشت این داده‌ها در ۴۳ ایستگاه بیش از ۲۰ سال و

1 - Crowder *et al.*
2 - Wang *et al.*
3 - Hu *et al.*
4 - Jansson
5 - Crawford
6 - Walling

در ۲۶ ایستگاه بالای ۲۹ سال می‌باشد. این ۲۶ ایستگاه برای ایجاد منحنی‌های سنجه و تحلیل آن‌ها انتخاب شدند (شکل ۱). ویژگی‌های ایستگاه‌های مورد نظر در جدول (۱) نمایش داده شده است. مساحت تحت پوشش ایستگاه‌های مختلف مورد نظر متفاوت بوده و بین ۵۹ کیلومترمربع برای ایستگاه پل‌مرگن تا ۳۹۸۷ کیلومترمربع برای ایستگاه کرسنگ تغییر می‌کند.



شکل ۱- جانمایی حوضه آبریز مازندران و ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

نام ایستگاه	نام رودخانه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	مساحت(کیلومترمربع)
آبشار	چالوس	۳۶ ۱۹ ۵۰	۵۱ ۱۵ ۲۱	۵۸۶
آبلو	نکا	۳۶ ۳۸ ۵۴	۵۳ ۱۷ ۴۱	۱۹۰۶
بلده	نور	۳۶ ۱۲ ۱۸	۵۱ ۴۹ ۱۴	۷۳۵
پل ذغال	چالوس	۳۶ ۳۰ ۳۸	۵۱ ۲۰ ۱۳	۱۵۸۳
پل مرگن	چالوس	۳۶ ۱۲ ۳۰	۵۱ ۱۹ ۴۸	۵۹
پنجاب	هراز	۳۶ ۰۵ ۴۶	۵۲ ۱۴ ۴۱	۲۳۶
هریجان	چالوس	۳۶ ۱۳ ۵۷	۵۱ ۱۸ ۵۶	۸۵
دوآب	چالوس	۳۶ ۲۹ ۴۱	۵۱ ۲۰ ۱۴	۶۲۷
رزن	هراز	۳۶ ۱۱ ۴۷	۵۲ ۱۰ ۴۹	۱۱۸۲
ریگ چشمه	تجن	۳۶ ۲۲ ۳۱	۵۳ ۱۰ ۳۱	۲۷۱۵
زوات	سردابرود	۳۶ ۳۸ ۴۳	۵۱ ۲۱ ۵۴	۴۱۹
سفیدچاه	نکا	۳۶ ۳۵ ۵۵	۵۳ ۵۲ ۵۸	۱۰۳۷
سلیمان تنگه	تجن	۳۶ ۱۵ ۱۲	۵۳ ۱۳ ۴۱	۱۲۳۹
قرآن تالار	بابلرود	۳۶ ۱۸ ۱۸	۵۲ ۴۶ ۲۳	۴۰۷
قلعه گردن	چشمه‌کیله	۳۶ ۴۴ ۳۹	۵۰ ۵۱ ۰۰	۱۶۲
کردخیل	تجن	۳۶ ۴۲ ۳۶	۵۳ ۰۶ ۱۷	۴۰۲۷
کرسنگ	هراز	۳۶ ۱۶ ۲۵	۵۲ ۲۲ ۰۵	۳۹۸۷
شیرگاه ۱	تالار	۳۶ ۱۷ ۵۷	۵۲ ۵۳ ۱۰	۱۷۷۶
شیرگاه ۲	کسیلیان	۳۶ ۱۸ ۰۵	۵۲ ۵۳ ۱۴	۳۴۳
کلاردشت	سردابرود	۳۶ ۲۸ ۵۷	۵۱ ۰۷ ۲۱	۱۹۰
گرمرود	تجن	۳۶ ۲۶ ۱۷	۵۳ ۰۹ ۵۴	۸۷۷
گلورد	نکا	۳۶ ۳۵ ۱۹	۵۳ ۳۷ ۲۹	۱۴۲۸
هرات بر	چشمه کیله	۳۶ ۵۹ ۵۳	۵۰ ۱۸ ۱۱	۷۷۶
والت	سردابرود	۳۶ ۳۲ ۳۱	۵۱ ۱۲ ۴۵	۳۳۱
ولی‌آباد	چالوس	۳۶ ۱۴ ۰۰	۵۱ ۱۸ ۱۰	۱۸۱
کیاکلا	تالار	۳۶ ۳۳ ۳۴	۵۲ ۴۸ ۴۱	۲۳۸۷

مواد و روش ها

قبل از هرگونه آنالیز آماری روی داده‌ها باید از همگنی داده‌ها و تصادفی بودن آن‌ها اطمینان حاصل می‌شد. برای این منظور از نرم‌افزار Minitab 16 و آزمون همگنی ران تست[1] در سطح اطمینان ۹۵درصد استفاده گردید.

منحنی‌های سنجه رسوب در هر ایستگاه با استفاده از رگرسیون توانی بر روی ۸۰ درصد از داده‌ها ایجاد شده و ۲۰ درصد دیگر داده‌ها نیز برای اعتبارسنجی این منحنی‌ها بکار گرفته شدند. ثابت‌های رگرسیون a و b با استفاده از رگرسیون خطی روی داده‌های لگاریتمی دبی و بار رسوب محاسبه شد. به منظور اجتناب از محاسبه بار رسوبی برای هر دبی متمایز، جانسون (۱۹۹۶) پیشنهاد می‌کند که داده‌های دبی به دسته‌های مختلف تقسیم شده و برای هر دسته میانگین دبی محاسبه شده و منحنی‌های سنجه روی این داده‌ها برازش داده شود.

برای هر ایستگاه شش دسته منحنی‌های سنجه ایجاد شد که عبارت بودند از

الف) منحنی سنجه رسوب با استفاده از تمامی داده‌ها بدون هرگونه جداسازی.

ب) منحنی سنجه با استفاده از بارهای رسوب میانگین برای دبی‌های دسته‌بندی شده.

ج) منحنی‌های سنجه ماهانه (دوازده منحنی برای هر ایستگاه).

د) منحنی‌های سنجه فصلی (چهار منحنی برای هر ایستگاه).

ه) منحنی‌های سنجه ماه‌های پربارش و کم بارش (ماه‌هایی که متوسط جریان در آن‌ها از متوسط جریان سالانه بیشتر باشد به عنوان ماه‌های سیلابی و ماه‌های دیگر به عنوان ماه‌های غیرسیلابی در نظر گرفته شدند).

و) منحنی‌های سنجه سالانه.

برای ایجاد منحنی‌های سنجه دسته‌بندی شده بر اساس پیشنهاد جانسون (۱۹۹۶) داده‌های دبی در هر ایستگاه بر اساس فواصل زمانی معین به چند دسته تقسیم شده و سپس میانگین دبی و میانگین بار رسوبی برای هر دسته تعیین گردید. سپس منحنی سنجه بر این داده‌های میانگین دبی- بار رسوب برازش داده شد. برای ایجاد منحنی‌های ماهانه بر اساس داده‌های بلندمدت هر ایستگاه متوسط جریان و متوسط بار رسوبی برای هر ماه محاسبه و منحنی به این داده‌ها برازش داده شد. همین روند نیز برای تولید منحنی‌های فصلی و سالانه به‌کار گرفته شد. در هر سال شش‌ماه دارای جریان بیش از متوسط جریان سالانه می‌باشد که به عنوان ماه‌های سیلابی و شش ماه دیگر نیز به عنوان ماه-های غیرسیلابی در نظر گرفته شده و منحنی‌های سنجه برای این دو گروه بطور جداگانه بر اساس داده‌های بلندمدت تولید شده است.

پس از واسنجی مدل، منحنی‌های سنجه تولیدشده با استفاده از ۲۰درصد باقیمانده داده‌ها اعتبارسنجی شدند. به منظور ارزیابی کارایی منحنی‌ها چهار معیار مختلف آماری به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفت:

$$R^2=\left[\frac{(\sum(Qsi-\bar{Q}si)(Qs-\bar{Q}s))}{\sqrt{\sum(Qsi-\bar{Q}si)^2}\sqrt{\sum(Qs-\bar{Q}s)^2}}\right]^2 \quad (۳)$$

$$RE_i=\left|\frac{(Qsi-Qs)}{Qs}\right| \quad (۴)$$

$$RME=\frac{\sum RE_i}{N} \quad (۵)$$

$$MSE=\frac{SS_E}{N-2} \quad (۶)$$

$$ME=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(Qs-Qsi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Qs-\bar{Q}s)^2} \quad (۷)$$

که در آن ME: ضریب نش- ساتکلیف (نش و ساتکلیف[2]، ۱۹۷۰)، R^2: ضریب تبیین[3]، Q_s و Q_{si}: به ترتیب مقدار جریان رسوب تخمینی و مشاهده‌ای، $\bar{Q}_{si}$ و $\bar{Q}_s$: به ترتیب متوسط جریان رسوب مشاهده‌ای و تخمینی، SSE[4]: مجموع مربعات خطا و MSE[5]: میانگین مربعات خطا، RE[6]: خطای نسبی و RME[7]: میانگین خطای نسبی می‌باشد.

هر کدام از معیارهای ارائه‌شده دارای بازه تغییرات و مقادیر مختلفی هستند که باید به صورت جداگانه مورد تفسیر قرار گیرد. بازه تغییرات ضریب تبیین بین صفر تا یک می‌باشد که این مقادیر به ترتیب عدم همبستگی و همبستگی کامل را بین دو گروه داده‌ها نشان می‌دهد. مدل‌های با کم‌ترین مقادیر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای نسبی تخمین بهتری را از شرایط واقعی نشان خواهند داد. مقادیر ضریب نش- ساتکلیف بین ∞- تا ۱ تغییر می‌نماید که مقادیر بالاتر نشانگر قابلیت بالاتر پیش‌بینی مدل خواهد بود (کراوس و همکاران[8]، ۲۰۰۵). هارینگتون و هارینگتون (۲۰۱۳) بیان می‌دارند که استفاده از یک پارامتر معیار مانند ضریب تبیین به تنهایی برای قضاوت در مورد مقدار قابلیت پیش‌بینی مدل‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با یکدیگر کافی نمی‌باشد، بنابراین استفاده از دیگر پارامترها مانند مانند درصد خطا نیز برای این منظور توصیه شده است (هورویتز، ۲۰۰۸).

کراوس و همکاران (۲۰۰۵) نیز بیان نمودند که هیچ یک از معیارهای ارزیابی آماری به تنهایی نمی‌توانند کارکرد ایده‌آل برای مقایسه مدل‌های مختلف داشته باشند. بنابراین آن‌ها استفاده از

1 - Run Test

2 - Nash and Sutcliffe
3 - coefficient of determination
4 - Sum of Square Error
5 - Mean of Square Error
6 - Relative Error
7 - Relative Mean Error
8 - Krause *et al.*

ترکیبی از این متغیرهای آماری را پیشنهاد نمودند. کاربرد ترکیبی از معیارهای ارزیابی آماری در بسیاری دیگر از پژوهش‌ها برای ارزیابی مدل‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (ایسیک[1]، ۲۰۱۳؛ محمدرضاپور و همکاران[2]، ۲۰۱۲؛ اورنگ و همکاران[3]، ۲۰۱۱).

به منظور مقایسه و انتخاب بهترین مدل برای پیش‌بینی بار رسوب ایستگاه‌های مختلف حوضه مازندران روش رتبه‌دهی معیارهای مختلف ارزیابی آماری مورد استفاده قرار گرفت. در این روش به هر مدل که بر اساس یک معیار خاص، پیش‌بینی بهتری را از داده‌های واقعی انجام داده باشد رتبه یک و به مدل‌های با دقت کم‌تر رتبه‌های بعدی تخصیص داده می‌شود. به عنوان نمونه مدلی که دارای کم‌ترین مقدار میانگین مجموع مربعات خطا و میانگین خطای نسبی باشد رتبه یک خواهد گرفت و برای مدل-های با میانگین مربعات خطا و میانگین خطای نسبی بالاتر مقادیر بالاتری به عنوان رتبه به مدل‌ها اختصاص می‌یابد. در مقابل مدلی که دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین و ضریب نش- ساتکلیف باشد رتبه یک را بر اساس این معیارها گرفته و مدل‌های دیگر بر حسب مقادیر این معیارها، رتبه‌های بعدی را دریافت می‌نمایند. پس از پایان رتبه‌دهی مدل‌ها مقادیر رتبه‌های هر مدل با یکدیگر جمع شده و در نهایت مدلی که کم‌ترین مقدار عددی رتبه را به خود اختصاص داده باشد مدل بهتری برای پیش‌بینی بار رسوب در حوضه مازندران خواهد بود.

برای پیشنهاد منحنی بهینه رسوب در هر ایستگاه تنها به واسنجی منحنی‌ها نباید اکتفا نمود و منحنی‌های تولیدشده باید بر اساس گروهی از داده‌ها مورد اعتبارسنجی قرار بگیرند تا قدرت پیش‌بینی آن‌ها نیز مورد ارزیابی واقع گردد. به همین منظور پس از تعیین منحنی‌های بهینه‌شده سنجه رسوب برای ایستگاه‌های مختلف، مرحله اعتبارسنجی مدل‌های بهینه‌شده با استفاده از دو روش انجام می‌گیرد. در روش اول مقدار دبی رودخانه مورد نظر به دو صورت ماهانه و روزانه در معادله منحنی سنجه رسوب مورد نظر قرار داده شده و مقدار دبی رسوب رودخانه به دست می‌آید. در روش دوم با استفاده از منحنی تداوم جریان رودخانه و تلفیق آن با منحنی سنجه رسوب مورد نظر مقدار توزیع فراوانی بار رسوب در مدت مورد نظر محاسبه می‌گردد. به این ترتیب با استفاده از شش مدل مختلف ترسیم منحنی و سه روش اعتبارسنجی مختلف، هجده مدل اعتبارسنجی‌شده برای هر ایستگاه به دست آمده و از میان آن‌ها بهترین مدل برای پیش‌بینی بار رسوب هر ایستگاه پیشنهاد می‌گردد.

اندازه‌گیری بار بستر در محل ایستگاه‌های هیدرومتری کار پیچیده‌ای بوده و معمولا توسط سازمان‌های متولی انجام نمی‌گیرد. گئورگیف[4] (۱۹۹۰) پیشنهاد می‌کند که برای تخمین بار رسوبی بستر در ایستگاه‌هایی که دارای آمار مناسب کمی و کیفی بار معلق هستند، بهتر است تا با استفاده از یک ضریب تبدیل (K) به صورت زیر رابطه‌ای میان بار بستر و بار معلق ایجاد گردد.

$$Q_{sb} = KQ_s \qquad (۸)$$

که در این رابطه Q_{sb}: بار رسوبی بستر و K: ضریب تبدیل بار بستر می‌باشد. برای تعیین ضریب تبدیل بار بستر روش‌هایی مختلفی پیشنهاد گردیده است ولی حیدرنژاد و همکاران[5] (۲۰۰۶) بیان نموده‌اند که منحنی تجربی کاراشف[6] که بر اساس شیب آبراهه ارائه گردیده است بهترین روش برای تخمین این ضریب در رودخانه‌های کشور ایران می‌باشد.

مقدار بار کل رسوب هر ایستگاه با جمع بار بستر و بار معلق در هر ایستگاه محاسبه شده و پس از آن مقدار رسوب‌دهی ویژه هر زیرحوضه بر اساس مقدار تقسیم بار کل رسوب به مساحت تحت پوشش هر ایستگاه مطابق رابطه زیر محاسبه گردید (ایسیک، ۲۰۱۳):

$$q_s = \frac{Q_T}{A} \qquad (۹)$$

که در آن q_s: مقدار رسوب‌دهی ویژه هر ایستگاه به تن در کیلومتر مربع در سال، Q_T: کل بار رسوبی حوضه (تن در سال) و A: مساحت تحت پوشش هر ایستگاه به کیلومترمربع می‌باشد.

در انتها مدل SWAT نسخه ۲۰۰۹ جهت شبیه‌سازی مقدار رواناب و رسوب حوضه‌ی آبریز مازندران مورد استفاده قرار گرفت. مدل SWAT با استفاده از معادله‌های ریاضی و فرمول‌های تجربی متعدد، برای شبیه‌سازی پارامترهای متفاوت به صورت روزانه، ماهانه و یا سالانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو روش شماره منحنی SCS و روش گرین- آمپت در مدل SWAT برای تخمین رواناب سطحی بکار گرفته شد. هم‌چنین برای شبیه-سازی بار رسوب، مدل SWAT از رابطه‌ی اصلاح شده‌ی معادله‌ی جهانی فرسایش ماسل[7] استفاده می‌کند. برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوضه آبریز مازندران ابتدا با استفاده از بخشی از داده‌های رواناب و بار رسوب مدل SWAT برای دوازده ایستگاه حوضه واسنجی شده و سپس با استفاده از مابقی داده‌ها مدل اعتبارسنجی شد. نرم‌افزار SWAT-CUP برای واسنجی مدل SWAT به کار گرفته شد.

پس از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به حوضه‌ی آبریز مازندران و تبدیل اطلاعات به فرمت قابل اجرا در مدل، کار با نرم‌افزار آغاز گردید. مدل با استفاده از واسطه‌ی Arcview GIS اجرا می‌شود. ابتدا بر اساس نقشه‌ی تراز ارتفاعی و شبکه‌ی جریان

1 - Isik
2 - Mohamad Reza Pour *et al.*
3 - Oeurng *et al.*
4 - Georgiev
5 - Heidarnejad *et al.*
6 - Karaushev
7 - MUSLE

رودخانه حوضه‌ی آبریز به زیرحوضه‌های مختلف تقسیم‌بندی شد و سپس با اضافه کردن تعدادی نقطه‌ی خروجی در موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری، حوضه‌ی مورد مطالعه به ۱۲۳ زیرحوضه تقسیم شد.

در گام بعدی، نقشه‌ی خاک و کاربری اراضی به منظور توصیف هر زیرحوضه و ساخت واحدهای واکنش هیدرولوژیک به همراه اطلاعات اقلیمی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری داده‌های اقلیمی وارد مدل شد. لازم به ذکر است که محل ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری بر هم منطبق می‌باشند. با توجه به در دسترس نبودن داده‌های اقلیمی تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد روش هارگریوز برای محاسبه‌ی تبخیر پتانسیل، روش گرین–آمپت برای محاسبه رواناب سطحی و روش ماسکینگهام برای روندیابی جریان انتخاب گردید. دمای پایه ذوب برف نیز مساوی ۰/۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه طول داده‌ی آماری برای اجرای مدل ۱۱ سال و از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۰ انتخاب گردید، مدل برای این بازه‌ی زمانی به صورت روزانه اجرا گردید.

پس از آماده‌سازی داده‌ها ابتدا با استفاده از دو سوم داده‌ها در هر ایستگاه مدل با استفاده از برنامه‌ی SUFI-2 واسنجی شده و سپس این مدل واسنجی شده در مدل SWAT نسخه ۲۰۰۹ اجرا شده و سپس نتایج حاصل مورد اعتبارسنجی قرار گرفت.

نتایج و بحث

برازش منحنی‌های رسوب

نتایج حاصل از آزمون همگنی داده‌ها برای متوسط سالانه داده‌های دبی جریان و رسوب در ایستگاه‌های مختلف نشان داد که داده‌ها از نظر آماری تصادفی بوده و در سطح ۹۵ درصد دارای همگنی می‌باشند. منحنی‌های سنجه رسوب در ۲۶ ایستگاه هیدرومتری موجود روی هشت رودخانه استان مازندران برای یک دوره ۳۰ ساله تولید شد. ۸۰ درصد از داده‌ها برای مرحله واسنجی و برازش منحنی‌ها و ۲۰ درصد باقیمانده برای اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌های برازش داده‌شده مورد استفاده قرار گرفتند.

به عنوان نمونه در جدول (۲) منحنی‌های مختلف سنجه رسوب تولیدی در ایستگاه هراز به همراه ضرایب a و b نشان داده شده است. ضریب a بین مقادیر ۰/۰۶ تا ۶۱/۰۵ و نمای b بین مقادیر ۰/۵۴ تا ۲/۹۱ تغییر نشان می‌دهد. اگر نمودار سنجه رسوب ماهانه در نظر گرفته شود مقادیر ضریب a بین ۰/۰۶ تا ۱۷/۳ و مقادیر توان b بین ۰/۰۶ تا ۲/۷۴ تغییرات نشان می‌دهد که هر دو این مقادیر با بازه ونگ و همکاران (۲۰۰۸) در مناطق با آب و هوای معتدل و گرم مطابقت دارد.

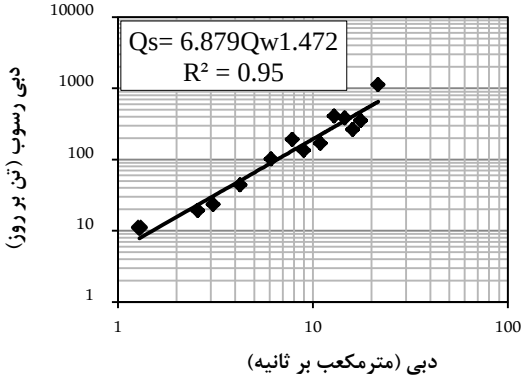
اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها

همان‌گونه که قبلا نیز بیان گردید، برای اعتبارسنجی مدل‌های مختلف سنجه رسوب و پیشنهاد بهینه‌ترین منحنی در هر ایستگاه از روش رتبه‌بندی آماری پارامترها بر اساس چهار پارامتر ضریب تبیین میانگین خطاهای نسبی، میانگین مربعات خطا و ضریب نش– ساتکلیف استفاده گردید. ابتدا این چهار پارامتر برای هر مدل در مرحله اعتبارسنجی محاسبه شده و سپس بر اساس مقادیر محاسبه‌شده رتبه‌بندی مدل‌ها انجام گرفت. جدول (۳) نتایج حاصل از آنالیز آماری منحنی‌های سنجه رسوب مختلف تولیدشده در ایستگاه بلده روی رودخانه هراز را نشان می‌دهد.

بیشترین مقدار ضریب تبیین برای منحنی سنجه رسوب تابستانه با مقدار ۰/۹۶۳ به دست آمد به همین دلیل به این مدل رتبه یک بر اساس پارامتر ضریب تبیین داده شد و بالعکس به منحنی رسوب زمستانه که کم‌ترین مقدار ضریب تبیین را داشت (۰/۰۳۷) بیشترین مقدار رتبه یعنی ۱۰ اختصاص داده شد. مقدار ضریب نش– ساتکلیف برای منحنی‌های تولیدشده در ایستگاه بلده بین ۰/۱۱۱– برای منحنی دبی سیلابی تا ۰/۸۳۵ برای داده‌های متوسط سالانه تغییر نشان داد به همین دلیل رتبه یک برای این پارامتر به منحنی متوسط سالانه داده‌ها و رتبه ۱۰ به منحنی داده‌های دوره سیلابی اختصاص داده شد. بر اساس پارامتر میانگین خطای نسبی منحنی رسوب بهاره کم‌ترین مقدار و منحنی رسوب تابستانه بیشترین مقدار را دارا بودند به همین دلیل نمودار بهاره و تابستانه به ترتیب رتبه‌های یک و ۱۰ را به خود اختصاص دادند. به همین ترتیب مقادیر رتبه یک و ۱۰ بر اساس پارامتر آماری میانگین مربعات خطا به ترتیب به منحنی‌های سنجه رسوب داده‌های سالانه و منحنی دوره سیلابی تخصیص داده شد چون کم‌ترین و بیشترین مقدار این پارامتر در این منحنی‌ها مشاهده گردید. همان‌گونه که در جدول (۳) نیز مشاهده می‌گردد استفاده از شاخص‌های مختلف ارزیابی آماری، نمودارهای متفاوتی را پیشنهاد می‌نماید. بنابراین به منظور قضاوت بهتر در مورد منحنی سنجه بهینه، مقادیر رتبه هر نمودار بر اساس پارامترهای مختلف با یکدیگر جمع شدند. به این ترتیب مدلی که کم‌ترین مقدار را از جهت مجموع رتبه‌ها دریافت نموده باشد را می‌توان به عنوان مدل بهینه پیشنهاد نمود.

بر اساس مجموع رتبه‌های هر مدل در ایستگاه بلده، منحنی سنجه رسوب تولیدشده با داده‌های دسته‌بندی‌شده کم‌ترین مقدار را دریافت نموده است، بنابراین این منحنی برای تخمین بار رسوبی در این ایستگاه پیشنهاد خواهد شد. بر این اساس معادله زیر به منظور تخمین بار رسوبی در این ایستگاه ارائه گردید (شکل ۲):

$$Q_s = 6.879\, Q_w^{1.472} \qquad (۱۱)$$



شکل ۲- منحنی سنجه رسوب بهینه پیشنهادی برای ایستگاه بلده (داده‌های کلاسه‌بندی‌شده)

جدول ۲- روابط رگرسیونی دبی شدت جریان-بار رسوب برای ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه هراز

نام مدل	کلاسه‌بندی دبی	$Q_S=aQ_w^b$			
		بلده	پنجاب	رزن نور	کرسنگ
منحنی سنجه یک خطی	کل داده‌ها	$۸/۲۲Q_w^{۱/۲۵}$	$۶/۷۷Q_w^{۲/۳۴}$	$۵/۲۸Q_w^{۱/۶۹}$	$۰/۴۵Q_w^{۲/۲۹}$
حد وسط دسته‌ها	کل داده‌ها	$۶/۸۸Q_w^{۱/۴۷}$	$۲/۰۴Q_w^{۲/۳۵}$	$۴/۷۹Q_w^{۱/۷۴}$	$۰/۰۶Q_w^{۲/۷۴}$
فصلی	پاییز	$۷/۸۳Q_w^{۰/۸۱}$	$۵/۱۳Q_w^{۲/۲۵}$	$۳/۸۳Q_w^{۱/۸۷}$	$۳/۳۱Q_w^{۱/۵۳}$
	زمستان	$۱۰/۰۳Q_w^{۰/۶}$	$۶/۴۷Q_w^{۱/۹۷}$	$۶/۲۴Q_w^{۱/۴۹}$	$۰/۶Q_w^{۲/۱۶}$
	بهار	$۱۷/۳Q_w^{۱/۱۳}$	$۱۴/۳۸Q_w^{۲/۲۲}$	$۱۶/۰۵Q_w^{۱/۴۲}$	$۰/۸۹Q_w^{۲/۱۵}$
	تابستان	$۹/۱۹Q_w^{۱/۱۱}$	$۱۰/۰۹Q_w^{۱/۶۴}$	$۱۳/۴۷Q_w^{۰/۹۹}$	$۲/۴۷Q_w^{۱/۸}$
سالانه	کل داده‌ها	$۱۵/۱۹Q_w^{۱/۲۱}$	$۱۰/۷Q_w^{۲/۹۳}$	$۳/۷۷Q_w^{۲/۲۶}$	$۲/۱۹Q_w^{۲/۰۲}$
سیلابی و غیرسیلابی	ماه‌های سیلابی	$۳/۸۵Q_w^{۱/۶۸}$	$۸/۹۷Q_w^{۲/۰۹}$	$۴/۳۸Q_w^{۱/۷۷}$	$۰/۹۷Q_w^{۲/۱۵}$
	ماه‌های غیرسیلابی	$۱۰/۲۴Q_w^{۰/۷۴}$	$۸/۳Q_w^{۲/۱۵}$	$۶/۷Q_w^{۱/۵۴}$	$۰/۵۵Q_w^{۲/۱۹}$
ماهانه	مهر	$۸/۴۹Q_w^{۰/۵۶}$	$۲/۸۵Q_w^{۲/۷۸}$	$۹/۲۸Q_w^{۱/۱۲}$	$۱/۴۳Q_w^{۱/۸۶}$
	آبان	$۸/۶۷Q_w^{۱/۰۹}$	$۵/۱۹Q_w^{۲/۴۶}$	$۲/۱۵Q_w^{۲/۴۳}$	$۱/۰۶Q_w^{۱/۹۶}$
	آذر	$۸/۱۹Q_w^{۰/۶۴}$	$۵/۹۷Q_w^{۱/۸۸}$	$۲/۷۱Q_w^{۲/۰۷}$	$۱۹/۳۴Q_w^{۰/۸۴}$
	دی	$۱۱/۰۲Q_w^{۰/۴۶}$	$۶/۹۳Q_w^{۱/۷۲}$	$۵/۹۷Q_w^{۱/۵۱}$	$۱۱/۰۶Q_w^{۱/۰۵}$
	بهمن	$۹/۵۹Q_w^{۰/۵۴}$	$۱۰/۴۵Q_w^{۱/۵۶}$	$۸/۹۲Q_w^{۱/۰۶}$	$۰/۶۸Q_w^{۲/۰۹}$
	اسفند	$۱۰/۵۱Q_w^{۱/۰۲}$	$۱۱/۵۱Q_w^{۱/۹۱}$	$۶/۴۵Q_w^{۱/۵۷}$	$۰/۵۴Q_w^{۲/۳۱}$
	فروردین	$۱۹/۰۶Q_w^{۰/۹۹}$	$۱۱/۴۳Q_w^{۲/۹۱}$	$۴۲/۴۸Q_w^{۰/۸۵}$	$۱/۴۱Q_w^{۲/۱۸}$
	اردیبهشت	$۲۴/۲۹Q_w^{۱/۱۴}$	$۱۰/۳۸Q_w^{۲/۶۱}$	$۲۳/۱Q_w^{۱/۵۱}$	$۰/۰۷Q_w^{۲/۷۱}$
	خرداد	$۶۱/۰۷Q_w^{۰/۵۶}$	$۲۳/۵۱Q_w^{۱/۷۶}$	$۱۸/۱Q_w^{۰/۵۱}$	$۰/۲۸Q_w^{۲/۲۹}$
	تیر	$۸/۲۷Q_w^{۱/۱۸}$	$۸/۸۱Q_w^{۱/۹}$	$۸/۷Q_w^{۱/۱۹}$	$۰/۳Q_w^{۲/۳۲}$
	مرداد	$۱۲/۹۶Q_w^{۰/۷۷}$	$۴/۰۴Q_w^{۲/۳۵}$	$۱۷/۲۱Q_w^{۰/۸۴}$	$۲/۳۳Q_w^{۱/۸۶}$
	شهریور	$۹/۱Q_w^{۰/۸۳}$	$۸/۰۳Q_w^{۱/۵۳}$	$۶/۵۷Q_w^{۱/۵۴}$	$۴/۸۶Q_w^{۱/۵۵}$

همین روند برای ۲۵ ایستگاه هیدرومتری دیگر نیز انجام گرفت که نتایج زیر در این ایستگاه‌ها حاصل گردید:

- منحنی‌های سنجه رسوب با داده‌های خام بیشترین خطا را در تخمین بار رسوبی ایستگاه‌های مختلف نشان داد بنابراین این روش برای هیچ‌کدام از ایستگاه‌ها پیشنهاد نشد. این نتایج با یافته‌های حیدرنژاد و غلامی[1] (۲۰۱۲) در ایستگاه‌های هیدرومتری تله‌زنگ واقع در حوضه آبریز دز هم‌خوانی کامل داشت.
- منحنی‌های سنجه رسوب با داده‌های کلاسه‌بندی‌شده شدت جریان، بهترین نتایج را برای برآورد بار رسوب در ایستگاه‌های بلده، قرآن‌تالار، کردخیل، دوآب، پل‌زغال، رزن و هریجان نشان داد.

1 - Heidarnejad and Gholami

- در ایستگاه‌های ولی‌آباد، زوات، کلاردشت، والت و گلورد منحنی‌های سنجه ماهانه بهترین تخمین را برای برآورد رسوب به دست دادند.
- تنها ایستگاهی که منحنی‌های سنجه رسوب فصلی تخمین مناسبی را از بار رسوب مشاهده‌شده ارائه نمود ایستگاه کیاکلا روی رودخانه هراز بود.
- منحنی‌های سنجه رسوب سیلابی و کم‌آبی نیز در دو ایستگاه آبشار بر روی رودخانه چالوس و سفیدچاه بر روی رودخانه نکارود تخمین بهتری را از بار رسوبی ارائه دادند.
- منحنی‌های سنجه رسوب با داده‌های متوسط سالانه در مقایسه با دیگر روش‌ها در ایستگاه‌های بیشتری تخمین بهینه را برای برآورد بار رسوب ارائه نمودند. ایستگاه‌هایی که منحنی‌های سالانه رسوب برای برآورد بار رسوب در آن‌ها پیشنهاد گردید عبارت بودند از ریگ‌چشمه، سلیمان‌تنگه و گرمرود روی رودخانه تجن، پنجاب و کرسنگ بر روی رودخانه هراز، هراتبر و قلعه‌گردان بر روی رودخانه چشمه‌کیله، آبلو روی رودخانه نکارود، پل‌مرگن بر رودخانه چالوس و شیرگاه یک و دو روی رودخانه تالار. نتایج تحقیقات هرینگتون و هرینگتون (۲۰۱۲) نشان داد که میزان عدم قطعیت در منحنی‌های سنجه رسوب سالانه نسبت به منحنی‌های سنجه ماهانه کم‌تر است. هم‌چنین بر اساس نظر این محققین کلاسه‌بندی داده‌ها و فصلی نمودن آن‌ها تأثیر چندانی بر روی بهبود تخمین منحنی‌ها نخواهد داشت.

محاسبه بار رسوبی متوسط سالانه در درازمدت

همان‌گونه که بیان گردید بار رسوبی متوسط سالانه در هر ایستگاه با استفاده از شش منحنی مختلف سنجه رسوب و سه گونه داده‌های شدت جریان (متوسط شدت جریان روزانه، متوسط شدت جریان ماهانه و منحنی تداوم جریان) محاسبه گردیده و نتایج حاصله با استفاده از درصد خطا مورد ارزیابی قرار گرفت. از نظر هرینگتون و هرینگتون (۲۰۱۲) درصد خطا معیاری مناسب برای مقایسه دقت مدل‌های مختلف در برآورد رسوب سالانه می‌باشد. میزان بار رسوبی واقعی در ایستگاه بلده ۳۲۴۵۴/۵ تن در سال اندازه‌گیری شده است در حالی‌که با ترکیب داده‌های متوسط شدت جریان ماهانه با منحنی‌های سنجه رسوب ماهانه و منحنی سنجه رسوب کلاسه‌بندی‌شده شدت بار رسوبی محاسبه‌شده دارای کم‌ترین درصد خطا نسبت به روش‌های دیگر بوده‌اند (+۱ درصد و −۱ درصد). بنابراین با توجه به نتایج حاصل در بخش اعتبارسنجی ترکیب منحنی رسوب کلاسه‌بندی‌شده با داده‌های شدت جریان متوسط ماهانه برای پیش‌بینی رسوب سالانه در این ایستگاه پیشنهاد گردید.

منحنی‌های سنجه رسوب با داده‌های دسته‌بندی‌شده با توجه به کاهش اثر داده‌های شدت جریان پایین، تخمین بهتری را در ایستگاه‌هایی که بار رسوب آن‌ها بالا است به دست می‌دهد، بنابراین در ایستگاه‌هایی که در پایین‌دست حوضه‌های آبریز قرار گرفته‌اند (مانند کردخیل و رزن) و رودخانه دارای یک دبی پایه قابل توجه و شرایط نسبتاً سیلابی است این مدل کم‌ترین خطا را در برآورد بار رسوبی داشته است. ترکیب داده‌های دبی روزانه ایستگاه با منحنی سنجه رسوب کلاسه‌بندی شده در ایستگاه‌های کردخیل، دوآب، پل‌زغال و هریجان و ترکیب منحنی تداوم جریان با این منحنی‌ها در ایستگاه رزن بهترین تخمین را از بار رسوبی سالانه در این ایستگاه‌ها فراهم نمود. در ایستگاه‌هایی که میزان تغییرات شرایط اقلیمی (مانند بارش) و شرایط هیدرولیکی (مانند رواناب) در طول سال بالا بود منحنی‌های سنجه رسوب ماهانه مقادیر رسوب را با دقت بالاتری تخمین می‌زد. به این ترتیب در ایستگاه‌های ولی‌آباد، زوات، کلاردشت و گلورت ترکیب داده‌های متوسط ماهانه شدت جریان و در ایستگاه والت ترکیب داده‌های شدت جریان روزانه با منحنی‌های سنجه ماهانه رسوب بهترین مدل برای تخمین بار رسوبی سالانه بودند.

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری حاصل از روش‌های منحنی سنجه در مرحله اعتبارسنجی در ایستگاه بلده

	نام مدل	کلاسه‌بندی دبی	ضریب تبیین	میانگین	میانگین مربعات	میانگین مربعات
A	منحنی سنجه یک خطی	کل داده‌ها	۰/۶۸۹	۰/۵۰۰	۰/۰۹۵	۰/۰۹۵
B	حد وسط دسته‌ها	کل داده‌ها	۰/۹۳۱	۰/۴۹۵	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵
C	ماهانه	کل داده‌ها	۰/۱۶۵	۰/۵۷۱	۰/۲۰۲	۰/۲۰۲
D	فصلی	پاییز	۰/۲۸۶	۰/۵۷۱	۰/۱۰۶	۰/۱۴۶
		زمستان	۰/۰۳۷	۰/۵۱۳	۰/۱۵۵	
		بهار	۰/۷۸۷	۰/۴۵۱	۰/۱۷۶	
		تابستان	۰/۹۶۳	۱/۰۱۵	۰/۱۴۹	
E	سیلابی و غیرسیلابی	ماه‌های سیلابی	۰/۰۸۳	۰/۵۹۹	۰/۲۷۱	۰/۱۰۴
		ماه‌های غیرسیلابی	۰/۸۸۱	۰/۸۸۰	۰/۱۰۴	
F	سالانه	کل داده‌ها	۰/۸۷۳	۰/۶۶۹	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴

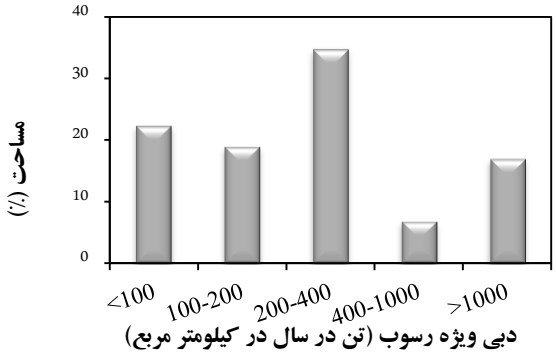
جدول ٤- خلاصه محاسبات انجام‌گرفته در ایستگاه‌های مختلف

نام ایستگاه	مساحت(کیلومترمربع)	بار معلق اندازه-گیری‌شده(تن در سال)	بار معلق محاسبه‌شده (تن در سال)	شیب رودخانه (درصد)	K	بار بستر (تن در سال)	کل بار رسوب (تن در سال)	رسوب‌دهی ویژه (تن در سال بر کیلومتر مربع)
آبشار	۵۸۶	۱۷۵۵۶۴	۹۳۰۱۳	۵	۳	۲۷۹۰۴۰	۳۷۲۰۵۳	۶۳۵
آبلو	۱۹۰۶	۷۱۹۵۴۶	۳۳۰۱۵۲	۰/۰۵	۰/۰۲۵	۸۲۵۳	۳۳۸۴۰۵	۱۷۷
بلده	۷۳۵	۳۲۴۵۴/۵	۳۳۰۲۲	۱۲	۳	۹۹۰۶۸	۱۳۲۰۹۱	۱۸۲
پل ذغال	۱۵۸۳	۶۷۵۰۰۰	۳۱۰۹۶۲	۱/۵	۱	۳۱۰۹۶۲	۶۲۱۹۲۵	۳۹۲
پل مرگن	۵۹	۶۷۰۶	۸۸۶۱	۲/۳	۳	۲۶۵۸۳	۳۵۴۴۵	۶۰۰
پنجاب	۲۳۶	۱۰۲۲۰۶	۱۰۹۳۰۶	۸	۳	۳۲۷۹۱۹	۴۳۷۲۲۵	۱۸۵۲
هریجان	۸۵	۴۱۰۰	۴۳۸۸	۸	۳	۱۳۱۶۶	۱۷۵۵۴	۲۰۶
دوآب	۶۲۷	۳۵۰۰۰	۲۱۹۴۱	۱	۰/۶	۱۳۱۶۴	۳۵۱۰۶	۵۶
رزن	۱۱۸۲	۶۲۰۰۰	۵۹۰۲۳	۱/۶	۱/۵	۸۸۵۳۵	۱۴۷۵۵۹	۱۲۴
ریگ چشمه	۲۷۱۵	۲۷۳۱۷۵	۲۲۹۳۶۹	۰/۵	۰/۱۸	۴۱۲۹۱	۲۷۰۶۸۷	۹۹
زوات	۴۱۹	۴۰۲۳۰	۲۲۴۴۸	۰/۷	۰/۳	۶۷۳۴	۲۹۱۸۲	۶۹
سفیدچاه	۱۰۳۷	۳۸۰۰۰	۲۴۲۰۸	۱/۸	۲	۴۸۴۱۶	۷۲۶۲۴	۷۰
سلیمان تنگه	۱۲۳۹	۶۹۹۸۶	۶۹۰۳۴	۱/۵	۱	۶۹۰۳۴	۱۳۸۰۶۸	۱۱۱
قرآن تالار	۴۰۷	۵۸۵۰۳	۶۶۷۰۰	۲/۵	۳	۲۰۰۱۰۰	۲۶۶۸۰۰	۶۵۶
قلعه گردن	۱۶۲	۲۱۷۳۹	۱۹۱۷۱	۰/۸	۰/۳۵	۶۷۰۹	۲۵۸۸۰	۱۶۰
کردخیل	۴۰۲۷	۱۳۰۰۰۰۰	۱۱۱۳۰۷۱	۰/۱	۰/۰۴	۴۴۵۲۲	۱۱۵۷۵۹۴	۲۸۷
کرسنگ	۳۹۸۷	۱۵۲۶۳۴۸	۱۲۰۸۲۲۳	۲	۲/۵	۳۰۲۰۵۵۷	۴۲۲۸۷۸۰	۱۰۶۱
شیرگاه ۱	۱۷۷۶	۴۰۶۰۶۴	۳۸۳۷۸۹	۰/۸	۰/۳۵	۱۳۴۳۲۶	۵۱۸۱۱۵	۲۹۲
شیرگاه ۲	۳۴۳	۲۸۷۶۹	۲۸۱۰۶	۱/۸	۲	۵۶۲۱۲	۸۴۳۱۸	۲۴۶
کلاردشت	۱۹۰	۱۴۹۹۱	۱۲۹۸۳	۱	۰/۶	۷۷۸۹	۲۰۷۷۳	۱۰۹
گرمرود	۸۷۷	۱۲۱۲۶۷	۸۶۴۵۱	۰/۵	۰/۱۸	۱۵۵۶۱	۱۰۲۰۱۳	۱۱۶
گلورد	۱۴۲۸	۳۷۰۰۰	۳۳۳۷۱	۰/۵	۰/۱۸	۶۰۰۶	۳۹۳۷۸	۲۸
هرات بر	۷۷۶	۱۴۱۳۷۰	۱۱۸۲۵۵	۰/۷	۱/۸	۲۱۲۸۵۹	۳۳۱۱۱۴	۴۲۷
والت	۳۳۱	۱۹۸۳۵	۱۷۷۳۱	۱/۷	۰/۳	۵۳۱۹	۲۳۰۵۰	۶۹
ولی‌آباد	۱۸۱	۲۳۵۲۶	۲۵۴۹۸	۱۲	۳	۷۳۷۹۶	۹۸۳۹۵	۵۴۴
کیاکلا	۲۳۸۷	۱۲۰۰۰۰۰	۵۵۳۹۶۹	۰/۱	۰/۰۴	۲۲۱۵۸	۵۷۶۱۲۷	۲۴۱

به منظور محاسبه بار بستر در هر ایستگاه ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10 شیب هر رودخانه محاسبه گردید. پس از آن بر اساس منحنی تجربی کاراشف مقدار ضریب تجربی K محاسبه شده و با ضرب نمودن این ضریب در بار معلق ، مقدار بار بستر در هر ایستگاه محاسبه گردید (جدول ۶). تغییرات شیب رودخانه در ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۰۵ درصد در ایستگاه آبلو تا ۱۲ درصد در ایستگاه‌های ولی‌آباد و بلده قرار داشت. بر این اساس مقدار ضرایب K انتخابی بین ۰/۰۲۵ برای ایستگاه آبلو تا ۳ برای ایستگاه بلده متغیر بود. حیدرنژاد و همکاران (۲۰۰۶) برای دو ایستگاه سیرا و بیلقان در شمال ایران مقدار K را به ترتیب ۲ و ۰/۴۵ پیشنهاد نمودند. هم‌چنین در تحقیق دیگری مقدار نسبت بار بستر به بار معلق رسوب برای دو رودخانه جاجرود و طالقان به ترتیب ۳۷۶ درصد و ۱۴ درصد محاسبه شد (کاظمی و همکاران[1]، ۲۰۱۲). در نهایت مقدار بار رسوب کل از جمع مقدار بار بستر و بار معلق در هر ایستگاه محاسبه گردید.

مقدار بار معلق اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های مختلف دارای بازه تغییرات وسیع بود، به‌طوری‌که مقدار بار معلق در ایستگاه‌های کرسنگ، کردخیل و کیاکلا بیش از یک میلیون تن در سال اندازه‌گیری شد درحالیکه این مقدار برای ایستگاه هریجان تنها ۴۱۰۰ تن در هکتار بود. بر اساس نتایج محاسبه‌شده در ۷۷ درصد ایستگاه‌ها مقدار بار تخمین‌زده‌شده توسط منحنی‌های سنجه رسوب، کم‌تر از مقادیر رسوب اندازه‌گیری‌شده بود. دلیل این امر تبدیل داده‌ها به مقیاس لگاریتمی است که سبب می‌شود تا وزن بیشتری به مقادیر کم اختصاص یابد و به این ترتیب سبب تخمین کم‌تر بار رسوب می‌گردد (جانسون، ۱۹۹۶).

1 - Kazemi *et al.*



شکل ۳- توزیع دبی رسوب ویژه بر حسب مساحت تحت پوشش هر ایستگاه در حوضه آبریز مازندران

هم‌چنین برگرداندن داده‌ها از مقیاس لگاریتمی به مقیاس اصلی سبب ایجاد اریبی در داده‌ها می‌گردد که این امر نیز سبب تخمین کم‌تر بار رسوبی نسبت به مقدار واقعی آن خواهد شد (کرودر و همکاران، ۲۰۰۷). مقدار بار معلق تخمین‌زده‌شده توسط منحنی‌های سنجه رسوب در ایستگاه‌های مختلف از ۴۳۸۸ تن در سال در ایستگاه هریجان تا ۱۲۰۸۲۲۳ تن در سال در ایستگاه کرسنگ متغیر بود. به طور عمومی مقدار بار معلق محاسبه‌شده در ایستگاه‌های مختلف با افزایش سطح تحت پوشش هر ایستگاه و شیب رودخانه در آن ایستگاه افزایش نشان داد.

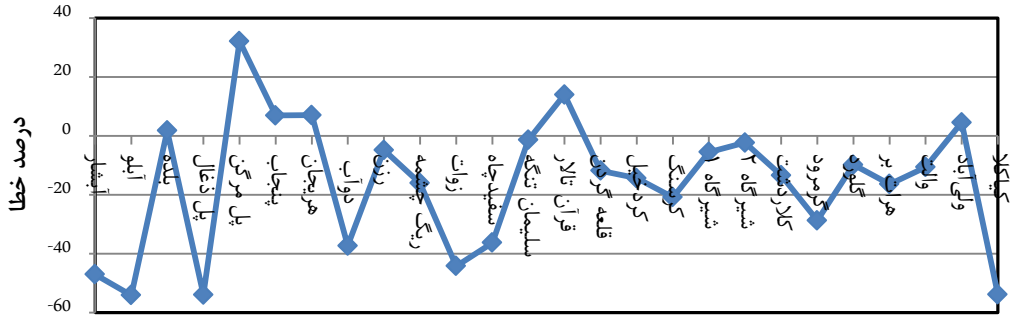
مقدار رسوب‌دهی ویژه هر ایستگاه نیز بر اساس نتایج حاصله محاسبه شده و نتایج آن در جدول (۴) ارائه گردید. مقدار تغییرات رسوب‌دهی ویژه در ایستگاه‌های مختلف نیز دارای بازه وسیع بود به‌طوری‌که این مقادیر از ۱۸۵۲ تن در کیلومترمربع در سال در ایستگاه پنجاب تا ۲۷/۶ تن در کیلومترمربع در سال در ایستگاه گلورد تغییر داشت.

مقدار رسوب‌دهی ویژه در ۲۲ درصد حوضه مازندران زیر ۱۰۰ تن در کیلومترمربع در سال بوده و در ۳۵ درصد مساحت این حوضه نیز مقدار رسوب‌دهی ویژه بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ تن در کیلومترمربع در سال اندازه‌گیری شد (شکل ۳). این نتایج با یافته‌های الکساندروف[1] (۲۰۰۷) که مقدار رسوب‌دهی ویژه در حوضه نیمه‌خشک اشتوما[2] در اسرائیل را ۲۹۰ تن در کیلومترمربع در سال به دست آورد، هم‌خوانی مطلوبی دارد. مقادیر رسوب‌دهی ویژه هر حوضه تابعی از عوامل کنترل رسوب و روندهای مختلف فرسایش است. ون‌مارک و همکاران[3] (۲۰۱۱) مقدار رسوب‌دهی ویژه در مناطق شمالی، غربی و مرکزی اروپا را بسیار اندک (۸۰ درصد موارد زیر ۲۰۰ تن در کیلومترمربع در سال) گزارش نمودند، اما در مناطق کوهستانی اروپا در بیش از ۵۰ درصد موارد مقدار رسوبدهی ویژه بیش از ۲۰۰ تن در کیلومترمربع در سال برآورد شد. هم‌چنین مقدار رسوب‌دهی ویژه رودخانه تانا[4] در کنیا نیز ۵۴ تن در کیلومترمربع در سال گزارش شد (کیتکا و همکاران[5]، ۲۰۰۵).

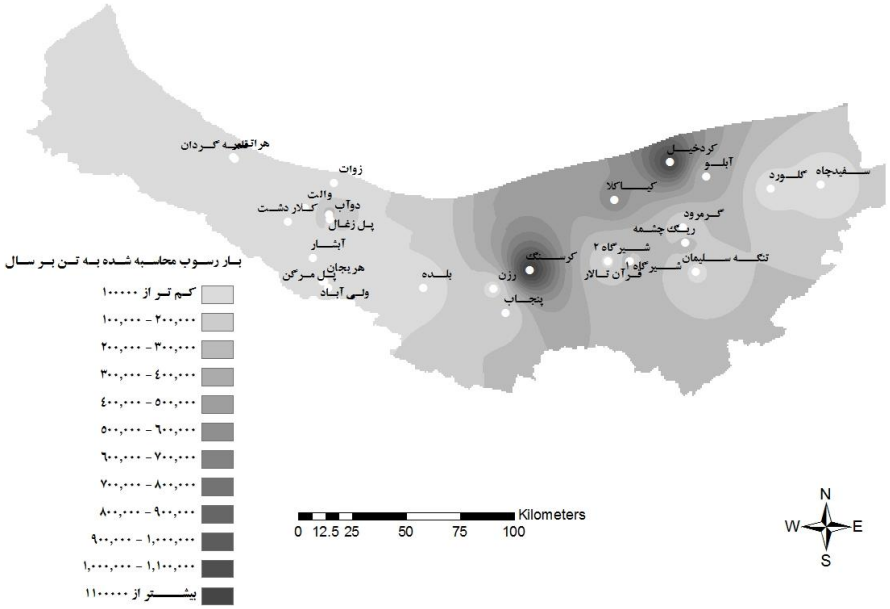
مقدار متوسط درصد خطای بار رسوبی محاسبه‌شده در حوضه مازندران حدود ۱۶- درصد بود. درصد خطای تخمین بار رسوبی در ایستگاه‌های مختلف از ۵۴-٪ در ایستگاه کردخیل تا ۳۲ درصد در ایستگاه پل‌مرگن تغییر داشت (شکل ۴). بر اساس نظر فرگوسن[6] (۱۹۸۶) مقدار تخمین کم بار رسوبی در ایستگاه‌های هیدرومتری ممکن است تا ۵۰ درصد نیز برسد. کرودر و همکاران (۲۰۰۷) روش رگرسیون غیرخطی را برای تولید منحنی‌های سنجه رسوب مورد استفاده قرار دادند اما مقدار درصد خطای این منحنی‌ها نیز در محاسبه مقدار رسوبدهی ویژه بین ۵۴- درصد تا ۱۱۲ درصد بود. نتایج تحقیقات والینگ (۱۹۷۷) نشان داد که استفاده از منحنی‌های سنجه رسوب که با داده‌های خام تولید شده‌اند ممکن است تا ۶۰ درصد در تخمین بارهای رسوبی دارای خطا باشند اما استفاده از منحنی‌های سنجه سیلابی و کم‌آبی می‌تواند سبب کاهش خطای تخمین بالای بار رسوبی تا ۳۰ درصد گردد.

توزیع بار رسوب محاسبه‌شده در حوضه مازندران با استفاده نرم‌افزار ArcGIS 10 ترسیم و در شکل(۵) نمایش داده شده است. مقایسه این نمودار با نمودار توزیع تراز ارتفاعی حوضه مازندران (شکل ۱) نشان می‌دهد که ایستگاه‌هایی که در شمال و شمال شرقی حوضه و در نزدیکی دریای خزر قرار گرفته‌اند و دارای تراز ارتفاعی کم‌تری می‌باشند (مانند ایستگاه‌های کردخیل، کرسنگ و کیاکلا) دارای بار رسوبی بیشتری هستند. در مقابل در ایستگاه‌هایی که در قسمت جنوبی حوضه، در نزدیکی رشته کوه‌های البرز و در ابتدای آبراهه‌ها قرار گرفته‌اند مقدار برآورد بار رسوبی کم‌تر بوده است. به عنوان نمونه در ایستگاه‌های سفیدچشمه، گلورد و آبلو که به ترتیب در بالادست و پایین‌دست رودخانه نکارود و با ترازهای ارتفاعی ۱۱۰۴، ۶۶۰ و ۱۵ متر قرار دارند، مقدار بار رسوبی محاسبه‌شده به ترتیب ۲۴۲۰۸، ۳۳۳۷۱ و ۳۳۰۱۵۲ تن بر هکتار برآورد شده است.

1 - Alexandrov
2 - Eshtemoa
3 - Vanmaercke *et al.*
4 - Tana
5 - Kitheka *et al.*
6 - Ferguson



شکل ٤- درصد خطای محاسبات تخمین بار رسوبی درازمدت برای ایستگاه‌های مختلف حوضه آبریز مازندران



شکل ۵- نقشه هم‌تراز بار رسوبی تخمین‌زده شده برای حوضه آبریز مازندران

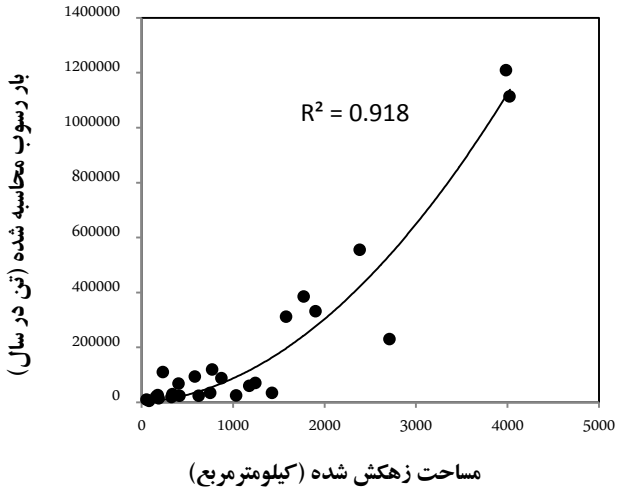
باید توجه داشت که مقدار بار رسوبی برآورد شده تنها به تراز ارتفاعی ایستگاه‌ها بستگی ندارد. نتایج نشان داد که مقدار مساحت تحت پوشش هر ایستگاه تأثیر بیشتری را روی مقدار بار رسوبی محاسبه‌شده داشته است. به عنوان نمونه دو ایستگاه شیرگاه یک و دو در نزدیکی یکدیگر بر روی دو شاخه جداگانه از رودخانه تالار و در تراز ارتفاعی ۲۲۰ و ۲۵۲ متر قرار گرفته‌اند، اما مقدار بار رسوبی تخمینی در این دو ایستگاه به ترتیب ۳۸۳۷۸۹ و ۲۸۱۰۶ تن بر سال بود. بر اساس جدول (۴) مقدار مساحت تحت پوشش ایستگاه‌های شیرگاه یک و دو به ترتیب ۱۷۷۶ و ۳۴۳ کیلومترمربع بوده که این امر تأثیر این پارامتر را روی بارهای رسوبی محاسبه‌شده نشان می‌دهد.

نمودار تغییرات بارهای رسوبی محاسبه‌شده در مقابل مساحت تحت‌پوشش هر ایستگاه در شکل (۶) نشان داده شده است. در این گراف یک رابطه درجه دو بین مساحت تحت پوشش و بار رسوبی هر ایستگاه بر اساس رابطه زیر (R^2= 0.918) مشاهده می‌گردد:

$$Q_s = 0.072\ A^2 + 22.18\ A \qquad (۱۲)$$

که در این رابطه Q_s: بار رسوب به تن در کیلومترمربع و A: مساحت تحت پوشش ایستگاه به کیلومترمربع می‌باشد. ون‌مارک و همکاران[1] (۲۰۱۲) رابطه ضعیفی را بین مساحت تحت پوشش هر ایستگاه هیدرومتری با بار رسوبی آن ایستگاه در اروپا گزارش نمودند که دلیل این امر نیز تغییرات زیاد آب و هوایی و ارتفاعی ایستگاه‌های انتخابی در این تحقیق بوده است. بنابراین مشاهده می‌گردد که در حوضه آبریز مازندران که شرایط اقلیمی ایستگاه-های مختلف تشابه زیادی با یکدیگر داشته و همچنین مساحت کل حوضه به نسبت کوچک می‌باشد بین بار رسوبی هر زیرحوضه با مساحت آن رابطه با همبستگی بالا وجود دارد.

1 - Vanmaercke



شکل ٦- رابطه بین بار رسوب و مساحت زهکشی‌شده در هر ایستگاه در حوضه آبریز مازندران

جدول ٥- ارزیابی آماری نتایج حاصل از شبیه‌سازی ایستگاه‌های مختلف حوضه آبریز مازندران

ایستگاه		تعداد داده	ضریب تبیین (درصد)
آبلو	دبی جریان	۱۰۹۶	۵۵
	دبی رسوب	۳۲	۴۵
گلورد	دبی جریان	۱۰۹۶	۳۰
	دبی رسوب	۳۲	۴۵
کیاکلا	دبی جریان	۱۰۹۶	۶۹
	دبی رسوب	۳۲	۴۴
والت	دبی جریان	۱۰۹۶	۴۱
	دبی رسوب	۴۷	۴۳
پل ذغال	دبی جریان	۱۰۹۶	۴۸
	دبی رسوب	۴۷	۴۸
نهالستان	دبی جریان	۱۰۹۶	۴۱
	دبی رسوب	۵۸	۴۰
ریگ چشمه	دبی جریان	۱۰۹۶	۵۶
	دبی رسوب	۴۹	۷۰
قرآن تالار	دبی جریان	۱۰۹۶	۷۸
	دبی رسوب	۳۷	۴۱
رزن	دبی جریان	۱۰۹۶	۵۲
	دبی رسوب	۲۲	۵۲
بلده	دبی جریان	۱۰۹۶	۴۱
	دبی رسوب	۲۲	۴۰
پل سفید	دبی جریان	۱۰۹۶	۵۱
	دبی رسوب	۴۰	۴۰
پنجاب	دبی جریان	۱۰۹۶	۴۰
	دبی رسوب	۲۳	۴۲

نتایج حاصل از شبیه‌سازی دبی جریان و بار رسوبی در نرم‌افزار SWAT در جدول (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این جدول نیز مشاهده می‌گردد میزان دقت مدل شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار SWAT در محاسبه رواناب و بار رسوبی در ایستگاه‌های مختلف متفاوت بوده است. مقدار ضریب تبیین برای رواناب‌های شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۳ در ایستگاه گلورد تا ۰/۷۸ در ایستگاه قرآن تالار متغیر است. مقایسه دبی‌های رواناب شبیه‌سازی‌شده نشان داد که این دبی‌ها نسبت به دبی‌های واقعی کم‌تر بوده است. دلیل این امر وجود منشأ آب‌های زیرزمینی و برفی آبراهه‌های مورد مطالعه است که نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی تأثیر آن در رواناب ایجادشده نبود. هم‌چنین روی تمامی آبراهه‌های مورد نظر سدهای مخزنی مختلفی قرار گرفته‌اند که رژیم طبیعی رودخانه را بر هم زده و سبب بروز اختلاف در داده‌های شبیه‌سازی‌شده رواناب با داده‌های اندازه‌گیری خواهد شد. ایستگاهای آبلو و گلورد بر روی رودخانه‌ی نکا واقع شده‌اند. رودخانه‌ی نکا به دلیل سرچشمه گرفتن از کوه‌های مجاور شهر نکا دارای رژیم جریان برفی- بارانی می‌باشد. ایستگاه ریگ چشمه در مسیر رودخانه‌ی تجن قرار دارد که این رودخانه نیز دارای رژیم برفی- بارانی است. ایستگاه‌های پل سفید و کیاکلا در مسیر رودخانه تالار واقع شده‌اند که رژیم جریان آن ناشی از ذوب برف و آب چشمه‌سارها می‌باشد. آب رودخانه‌ی بابلرود که ایستگاه قرآن تالار در مسیر آن واقع گشته، به میزان ۷۰ درصد از بارندگی حاصل می‌گردد، به همین دلیل مقدار دقت مدل در برآورد دبی رواناب این ایستگاه بیشتر از دیگر ایستگاه‌ها بوده است. آب رودخانه‌ی هراز که در مسیر خود ایستگاه‌های پنجاب، بلده و رزن را دارد به میزان ۸۰ درصد وابسته به ذوب برف و آب چشمه‌سارها می‌باشد. ایستگاه‌های پل‌ذغال، والت و نهالستان نیز در مسیر رودخانه‌های چالوس‌رود و سرداب‌رود واقع گشته‌اند که این رودخانه‌ها نیز دارای رژیم برفی- بارانی هستند. با توجه به اینکه اکثر ایستگاه‌های انتخابی در مسیر رودخانه‌هایی واقع شده‌اند که آب آن‌ها از ذوب برف تأمین می‌شود و هم‌چنین با در نظر گرفتن اینکه دبی‌های سیلابی در ماه‌های فروردین تا مهر اتفاق می‌افتد می‌توان نتیجه گرفت که بخشی از این دبی‌های سیلابی مربوط به آب حاصل از ذوب برف می‌باشد که باعث ایجاد جهش در میزان دبی رودخانه گشته‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده تنها از داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی مانند بارش و دما و شرایط خاک و شیب حوضه نمی‌تواند دقت مناسب را در برآورد رواناب حاصل نماید و باید وضعیت منابع زیرزمینی و هم‌چنین برنامه بهره‌برداری از سدهای موجود در منطقه نیز در دسترس باشد.

وجود خطا در برآورد رواناب حوضه سبب بروز خطا در برآورد بار رسوبی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد نظر گردیده است. مقدار ضریب تبیین بار رسوبی برآوردشده در ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۴ در ایستگاه‌های بلده، نهالستان و پل‌سفید تا ۰/۷ در ریگ‌چشمه متفاوت بوده است. یکی دیگر از عوامل خطا در شبیه‌سازی بار رسوبی با استفاده از نرم‌افزار SWAT عدم قطعیت داده‌های ورودی می‌باشد. از جمله داده‌های ورودی در این مدل، نقشه‌ی رقومی ارتفاعی می‌باشد. گریک و نوهرا[1] (۲۰۱۲) بیان می‌کنند که دقت نقشه‌ی رقومی ارتفاعی بوده و دقت تا حدود زیادی در شبیه‌سازی بار رسوب با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک تجربی مؤثر می‌باشد. مقایسه دقیق‌تر نقشه‌ی رقومی ارتفاعی می‌باشد. گریک و نوهرا (۲۰۱۲) بیان می‌کنند که دقت ارائه‌شده با عکس‌های هوایی نشان داد که تخمین محل آبراهه‌ها و شیب ارتفاعی از روی نقشه دارای خطا می‌باشد. در نتیجه می‌توان یکی از دلایل وجود خطا در این تحقیق را دقت پایین نقشه‌ی DEM منطقه بحساب آورد زیرا تمامی مراحل ساخت شبکه‌ی جریان و محاسبات هیدرولوژیک در مدل، از روی نقشه‌ی رقومی ارتفاعی استخراج می‌شود و بدیهی است دقت این نقشه تأثیر بسیاری بر نتایج نهایی مدل خواهد گذاشت. بنابراین می‌توان بیان نمود برای به دست‌آوردن نتایج قابل قبول از مدل‌های شبیه‌سازی، داده‌های ورودی به مدل باید از دقت لازم برخوردار باشند. هم‌چنین برای شبیه‌سازی مناسب بار رسوبی در نرم‌افزار SWAT نیاز است تا رواناب حوضه با توجه به کلیه عوامل هیدرولوژیکی (اعم از آب‌های سطحی، زیرزمینی، مخازن و سدها) و عوامل اقلیمی (بارش، دما، تبخیر و ...) با دقت بالا تخمین زده شود.

نتیجه‌گیری

منحنی‌های سنجه رسوب پرکاربردترین روش برای تخمین بار رسوبی در آبراهه‌هایی هستند که داده‌های بلندمدت از شدت جریان و غلظت بار رسوبی معلق در ایستگاه‌های هیدرومتری آن‌ها موجود می‌باشد. در این تحقیق منحنی‌های سنجه رسوب با شش روش مختلف دسته‌بندی داده‌ها برای ۲۶ ایستگاه هیدرومتری موجود روی هشت رودخانه حوضه آبریز مازندران که دارای ۲۹ سال آمار بودند، ایجاد شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. در هر ایستگاه منحنی‌های مختلف سنجه رسوب با استفاده از روش رگرسیون‌گیری خطی از داده‌های لگاریتمی شدت جریان و بار رسوب معلق توسعه داده شد. پس از واسنجی منحنی‌های سنجه، مرحله اعتبارسنجی آن‌ها با استفاده از چهار معیار مختلف آماری ضریب تبیین، ضریب نش- ساتکلیف، میانگین مربعات خطا و میانگین خطای نسبی انجام گرفت تا منحنی‌های با دقت بالاتر برای پیش‌بینی بار رسوب در هر ایستگاه پیشنهاد گردد. آزمون همگنی بر روی داده‌ها نشان داد که کلیه داده‌ها در سطح ۹۵ درصد همگن می‌باشند. واسنجی منحنی‌ها با استفاده از ۸۰ درصد داده‌ها انجام و ۲۰ درصد داده‌ها نیز برای اعتبارسنجی منحنی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها نشان داد که دسته‌بندی داده‌ها اثر معنی‌داری را بر روی دقت منحنی‌های برازش داده‌شده بر داده‌ها دارند، به‌طوری‌که منحنی‌های

1 - Gericke and Venohr

توسعه‌داده‌شده با داده‌های خام برای هیچ ایستگاهی پیشنهاد نشد. منحنی‌های سنجه رسوب که با استفاده از داده‌های کلاسه‌شده و میانگین سالانه داده‌ها تولیدشده بودند بهترین تطبیق را با شرایط واقعی بار رسوبی آبراهه‌های حوضه مازندران از خود نشان دادند، و در طرف مقابل، منحنی‌های فصلی و سیلابی- کم‌آبی سنجه رسوب تنها برای سه ایستگاه قابل استفاده بودند. منحنی‌های سنجه رسوب ماهانه نیز برای ایستگاه‌هایی که دارای تغییرات نسبی شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی بودند مطابقت مناسبی را نشان داد.

نسبت بار بستر به بار معلق برای رودخانه‌های مورد مطالعه بر اساس شیب رودخانه بین ۰/۰۲۵ تا ۱۲ در نظر گرفته شد. با استفاده از ترکیب داده‌های میانگین دبی روزانه، میانگین دبی ماهانه و منحنی تداوم جریان و شش منحنی سنجه رسوب متفاوت، بار رسوبی در هر ایستگاه با ۱۸ روش متفاوت مورد تخمین قرار گرفت و با مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده بهترین روش برای پیش‌بینی بار رسوبی هر ایستگاه پیشنهاد داده شد. هم‌چنین مقدار رسوبدهی ویژه در هر ایستگاه با توجه به مساحت تحت پوشش آن محاسبه شد. نتایج این محاسبات نشان داد که ۲۲ درصد مساحت حوضه آبریز مازندران دارای رسوبدهی ویژه زیر ۱۰۰ تن در کیلومترمربع در سال و ۳۵ درصد نیز بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ تن در کیلومتر مربع در سال هستند که این نتایج مطابقت مطلوبی با حوضه‌های مشابه در نقاط مختلف دنیا داشت. مقایسه بارهای رسوبی محاسبه‌شده با استفاده از منحنی‌های سنجه رسوب و داده-های اندازه‌گیری‌شده نشان داد که متوسط خطای محاسبات بار رسوبی در حوضه آبریز مازندران ۰/۱۶- (بین ۰/۵۴- تا ۰/۳۲) بوده است. هم‌چنین این مطالعات نشان داد که اثر مساحت تحت‌پوشش هر ایستگاه روی بارهای رسوبی محاسبه‌شده در هر ایستگاه، بیشتر از عوامل دیگری مانند شیب آبراهه در ایستگاه مورد نظر خواهد بود.

در ادامه شدت جریان و بار رسوبی در ۱۲ ایستگاه از ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه مازندران با استفاده از نرم‌افزار SWAT شبیه‌سازی گردید تا دقت این نرم‌افزار در تخمین این دو پارامتر مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان داد که دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی شدت رواناب بستگی به رژیم آبراهه و تأثیر آب‌های زیرزمینی و مخازن احداث‌شده روی آن دارد. مدل SWAT تنها قادر است رواناب حاصل از بارش باران را مورد شبیه‌سازی قرار دهد بنابراین دقت این مدل در مورد آبراهه‌هایی که دارای رژیم بارانی-برفی بوده و یا منشأ آب‌های زیرزمینی داشته باشند و یا رواناب موجود در آن‌ها تحت‌تأثیر برنامه بهره‌برداری از مخازن و سدها باشد چندان زیاد نیست. وجود خطا در محاسبات رواناب در این مدل سبب خواهد شد تا بار رسوبی محاسباتی آن نیز با خطای قابل توجه همراه گردد.

منابع

1- Alexandrov, Y., Cohen, H., Laronne, J. B. and I.Reid. 2009. Suspended sediment load, bed load, and dissolved load yields from a semiarid drainage basin: A 15-year study. Water Resources Research, 45(W08408): 1-13.

2- Asselman, N. E. M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology, 234: 228–248.

3- Crawford, C. G. 1991. Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended-sediment loads. Journal of Hydrology, 129: 331-348.

4- Crowder, D.W., Demissie, M. and M. Markus. 2007. The accuracy of sediment loads when log-transformation produces nonlinear sediment load–discharge relationships. Journal of Hydrology, 336: 250– 268.

5- De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., Arabkhedri, M. and C. Boix-Fayos. 2013. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? Earth-Science Reviews, 127: 16–29.

6- Ferguson R. I. 1986. River loads underestimated by rating curves. Water Resources Research, 22(1): 74-76.

7- Georgiev, B. V. 1990. Reliability of bed load measurements in mountain rivers. International Association of Hydrological sciences (IAHS), Published. No. 193.

8- Gericke, A. and M. Venohr. 2012. Improving the estimation of erosion- related suspended solid yields in mountainous, non- alpine river catchments. Environmental Modeling and Software, 37: 30-40

9- Harrington, S.T. and J.R. Harrington. 2013. An assessment of the suspended sediment rating curve approach for load estimation on the rivers bandon and owenabue, Ireland. Geomorphology, 185: 27–38.

10- Heidarnejad, M., Gholamee, S.H., Mosaedi, A. and M.Z. Ahmadi. 2006. Estimation of sediment volume in Karaj dam reservoir (Iran) by hydrometry method and a comparison with hydrograph method. Lake and Resevoir Management, 22(3): 233- 239.

11- Heidarnejad, M., and A. Gholami. 2012. Modeling suspended sediments in Dez basin (Case study: The Tale Zang hydrometric station). International Research Journal of Applied and Basic Sciences, 3(2): 402-407.

12- Horowitz A. J. 2002. The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment concentration: A matter of temporal resolution. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, Reno, NV .

13- Horowitz A. J. 2003. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. Hydrological Processes, 17: 3387- 3409.

14- Horowitz A. J. 2008. Determining annual suspended sediment and sediment-associated trace element and nutrient fluxes. Science of the Total Environment, 400: 315 – 343.

15- Hu, B., Wang, H., Yang, Z. and X. Sun. 2011. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. Quaternary International, 230: 34–43.

16- Isik, S. 2013. Regional rating curve models of suspended sediment transport for Turkey. Earth Science Information, 6: 87–98.

17- Jansson, M. B. 1996. Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. Journal of Hydrology, 183: 227-241.

18- Kazemi, Y., Salajegheh, A., Mahdavi, M., Rostami, N., and M. Abbassi. 2012. The relation of bed and suspended loads in central Alborz rivers, Iran. Elixir Agriculture, 42: 6120-6123.

19- Kitheka, J.U., Obiero, M. and P. Nthenge. 2005. River discharge, sediment transport and exchange in the Tana Estuary, Kenya. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 63: 455–468.

20- Krause, P., Boyle, D.P. and F. Bäse. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model Assessment. Advances in Geosciences, 5: 89–97.

21- Mohamad Reza Pour, O., Shui, L.T. and A.A. Dehghani. 2012. Comparison of ant colony optimization and genetic algorithm models for identifying the relation between flow discharge and suspended sediment load (Gorgan River - Iran). Scientific Research and Essays, 7(42): 3584-3604.

22- Nash, I. E and I.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282- 290.

23- Oeurng, C., Sauvage, S. and J.M. Sanchez-Pérez. 2011. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. Journal of Hydrology, 401 (3-4): 145-153.

24- Van Griensven, A., Popescu, I., Abdelhamid, M.R., Ndomba, P.M., Beevers, L. and G.D. Betrie. 2013. Comparison of sediment transport computations using hydrodynamic versus hydrologic models in the Simiyu River in Tanzania. Physics and Chemistry of the Earth, 61–62: 12–21.

25- Vanmaercke, M., Poesen, J., Verstraeten, G., de Vente, J. and F. Ocakoglu. 2011. Sediment yield in Europe: Spatial patterns and scale dependency. Geomorphology, 130: 142–161.

26- Walling, D.E. 1977. The accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. Water Resources Research, 13(3): 531-538.

27- Wang, H., Yang, Z., Wang, Y., Saito, Y. and J.P. Liu. 2008. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the sea since the 1860. Journal of Hydrology, 349: 318– 332.

Shahid Chamran University of Ahvaz
Irrigation Sciences and Engineeri **Vol.40, No. 3, Fall 2017, p. 151-166**

EXTENDED ABSTRACT

An Evaluation of various developing methods for sediment rating curve and computer simulationmodels for sediment load estimation in Mazandaran basin, Iran

M. Heidarpour[1], F. Fatahi[2], A. Haghshenas Adarmanabadi[3*]and N. Kia[4]

1- Prof., Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2- Graduate student, Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology.
3*- Corresponding Author, Ph. D of Water Resources, Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. haghshenasamir@yahoo.com.
4- Graduate student, Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology.

Received: Accepted:

Keywords: Sediment rating curve , Mazandaran basin, Statistical efficiency criteria, Simulating, SWAT.

.

Introduction

A sediment curving rate is a method to describe the relationship between river discharge and suspended sediment load for a particular location. The rating curves have been used to predict sediment load by hydrologists for more than sixty years (Horowitz, 2002). Obtaining more accuracy in determination of sediment load needs to long-term continuous data with a sufficient frequency. Mostly, a power function regression is used for sediment rating curves (Asselman, 2000):

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

The other form of this equation is linear log-transformation:

$$\text{Log}(Q_s) = \log(a) + b \log(Q) \quad (2)$$

Where Q is river discharge (m^3/s), Q_s is suspended load discharge (ton/year), and a and b are regression coefficients . The back transformation of the sediment load to the arithmetic domain creates a bias which can lead to load underestimation (Crowder et al. 2007). The main objective of this study is to determine the sediment rating curve for different 26 hydrometric stations in the Mazandaran basin, Iran, with various data separation methods (daily, monthly, seasonal, annually, classified, and high discharge and low discharge flow months). The efficiency of each rating curve was evaluated using different statistical characteristics. Another objective is to evaluate the sediment load and sediment yield of Mazandaran basin.

Methodology

The 26 stations in Mazandaran basin were used for analysis in this paper. For each station six separate rating curves were produced as follows: a) general sediment rating curve for all of the data without separation, b) rating curve by mean loads within flow discharge classes, c) monthly rating curves (twelve curves), d) seasonal rating curves (spring, summer, fall, and winter curves), e) low discharge and high discharge rating curves (months with the mean flow greater than annual mean flow were considered as high discharge months and the remaining were considered as low discharge months) and f) the annual rating curve. For each station, various rating curves were created by employing linear regression to the logarithmic data of flow and sediment discharges. These stations had a 29-year period of (1982- 2011) continuous sediment and flow discharges data. Calculation of different efficiency criteria for sediment rating curves validation in different stations indicated that using a single efficiency criterion is not sufficient for judgment on the prediction capability of curves. Therefore, a combination of the different statistical

efficiency criteria, including determination coefficient (R^2), Nash-Sutcliffe coefficient (ME), mean squared error (MSE), and mean relative error (RME) were used.
The homogeneity test at a sufficient level of 95% revealed that the data are randomized and homogenous. The rating curves were fitted on 80% of data and the other 20% were used for the validation phase.

Results and Discussion

The result of different sediment rating curved showed that:

- The general sediment rating curve without data separation has the highest error in sediment loads estimation which agrees with Tale Zang station in Dez basin, Iran (Heidarnejad and Gholami, 2012). This model was suggested for no station.
- Baladeh, Goran Talar, Kordkhil, Doab, Pol-Zoghal, Razan and Harijan are the stations which the sediment rating curve with classified flow discharge was the optimum model for sediment load estimation.
- The monthly sediment rating curve was found to be the best model for Vali Abad, Zwat, Kelardasht, Valt and Glurt stations.
- In Kiakala stations on the Talar river the rating curve with seasonal separation was the model with lowest error.
- The high flow and low flow discharge sediment rating curves were the best models for sediment load prediction in Abshar station at the Chalous river and Sefidchah station at the Nekarood river.
- The annual rating curve was the optimum model for sediment load prediction in most of the stations. These stations were as follows: Rig Cheshmeh, Soleiman-Tangeh and Garmrood at the Tajan river, Panjab and Karsang at the Haraz river, Haratbar and Ghale Gordan at the Cheshmehkilleh river, Abloo at the Nekarood river, Pol-Margan at the Chalous river, and Shirgah 1 and 2 at the Talar river. Harrington & Harrington (2013) stated that the uncertainties at the annual rating curve is much lower than those at the monthly curves. They also found that the data separation either seasonally or by stage does not improve the sediment load estimation profoundly.

Conclusions

The sediment rating curve is the most common method for sediment load estimation in the basin where sufficient data of water discharge and suspended sediment concentration are available. In this paper, the sediment rating curves with different data separation methods were developed for 26 hydrometric stations in 8 rivers of Mazandaran basin, Iran. For each station, various rating curves were created by employing linear regression to the logarithmic data of flow and sediment discharges. These stations had a 29-year period of (1982- 2011) continuous sediment and flow discharges data. Calculation of different efficiency criteria of sediment rating curves validation in different stations indicated that using a single efficiency criterion is not sufficient for judgment on the prediction capability of curves. Therefore, a combination of different statistical efficiency criteria, including determination coefficient (R^2), Nash-Sutcliffe coefficient (ME), mean squared error (MSE) and the mean relative error (RME) were used.
The rating curves were fitted on 80% of data and the other 20% were used for the validation phase. The obtained modeling results indicated that the separation of data had a significant impact on sediment load estimation. So, the models with no separation data were not offered. The annual separation and the classified water discharge methods were the best models for developing rating curves in Mazandaran basin stations. The seasonal separation and high flow-low flow models were respectively suggested for only 1 and 2 stations. The monthly rating curve was the best model in stations with relative climate and hydrological condition variations.
The ratio of bed load to suspended load in the basin was estimated between 0.025 to 12 for different stations. By combining the flow duration curves, daily mean discharges, monthly mean discharges, and six different sediment rating curves, the sediment yield in each station was computed with 18 models and the results compared with the actual yield. The computed sediment yield in the basins ranges from 27.6 to1852 ton km^{-2} $year^{-1}$. 22% of the basin area has sediment

yield less than 100-ton km^{-2} $year^{-1}$ and 35% between 200 to 400-ton km^{-2} $year^{-1}$. This agrees well with other findings in the semiarid catchments. Comparison of estimated and actual sediment load in the basin indicated that the average percentage error in sediment load estimation in the basin was -16% with a range from -54% to +32%.
The sediment load plot of the Mazandaran basin created by using the ArcGIS 10 software. This plot indicated that the effect of river area on sediment loads was more than the effects of river elevation and steep.

References

28- Asselman, N. E. M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology, 234: 228–248.

29- Crowder, D.W., Demissie, M. and M. Markus. 2007. The accuracy of sediment loads when log-transformation produces nonlinear sediment load–discharge relationships. Journal of Hydrology, 336: 250– 268.

30- Harrington, S.T. and J.R. Harrington. 2013. An assessment of the suspended sediment rating curve approach for load estimation on the rivers bandon and owenabue, Ireland. Geomorphology, 185: 27–38.

31- Heidarnejad, M., Gholamee, S.H., Mosaedi, A. and M.Z. Ahmadi. 2006. Estimation of sediment volume in Karaj dam reservoir (Iran) by hydrometry method and a comparison with hydrograph method. Lake and Resevoir Management, 22(3): 233- 239.

32- Horowitz A. J. 2002. The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment concentration: A matter of temporal resolution. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, Reno, NV.