

## ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف منحنی سنج رسوب

جمال مصفايي<sup>۱\*</sup>، امین صالح پور جم<sup>۲</sup>

۱- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران (jamalmosaffaie@yahoo.com)

### چکیده

در این تحقیق سعی شده با بررسی روش‌های مختلف برون‌یابی، روش مناسب برای ایستگاه درازلات رودخانه پلرود معرفی شود. بدین منظور پس از اخذ آمار ۴۵ ساله رسوب و دبی لحظه‌ای متناظر آن برای ایستگاه مزبور، ابتدا ۳۰ درصد داده‌ها به صورت تصادفی تفکیک شد که از آنها برای اعتبارسنجی مدل‌های مختلف استفاده شد. برای ۷۰ درصد باقیمانده نمونه‌ها، معادلات روش‌های مختلف برون‌یابی شامل یک خطی، چندخطی، حد و واسط دسته‌ها، فصلی و ماهانه محاسبه گردید. جهت ارزیابی کارایی روش‌های مختلف از شاخص RMSE استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان این شاخص در روش ماهانه کمتر از سایر روش‌ها بوده و بخصوص در ماه بهمن از دقت بسیار مناسبی برخوردار است و لذا روش ماهانه به عنوان روش مناسب برای ایستگاه درازلات رودخانه پلرود معرفی گردید. همچنین برای اخذ نتیجه بهتر لازم است که ابتدا داده‌ها را به چند دسته تقسیم نمود و بعد از هر دسته درصدی را برای مرحله آموزش و مابقی را برای اعتبارسنجی مدل استفاده نمود که بکارگیری این فرآیند باعث استفاده همگن داده‌های مربوط به تمامی دسته‌ها در هر دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی خواهد شد.

**واژگان کلیدی:** روش‌های برون‌یابی، دسته‌بندی داده‌ها، دبی آب، بار معلق، درازلات پلرود.

### مقدمه

امروزه دانش آبخیزداری به عنوان ابزاری کارا در مسیر بهره‌گیری از اراضی یک حوزه آبخیز مورد توجه مسئولان امر قرار گرفته است (اعظمی، ۱۳۸۴). مشکل رسوبزایی، انتقال رسوب، فرسایش و رسوبگذاری از بحث‌های مهم در برنامه ریزی راهبردهای خرد و کلان آبخیزداری و مدیریت حوضه‌های آبخیز می‌باشد (فریفته، ۱۳۷۰). گرد آمدن رسوب در منطقه‌های پایین دست موجب بروز خسارت برون منطقه‌ای، تخریب مسیر آبراهه‌ها، گل‌آلودگی آب مصرفی، انباشت نهرها از رسوب و کاهش ظرفیت مخازن سدها و تنگناهای زیست محیطی بسیاری می‌شود. پیشگیری یا حفاظت خاک و بررسی مربوط به رسوب در دستور کار آبخیزداران است (مختاری، ۱۳۷۶). در حوضه‌های بدون آمار برای برآورد میزان رسوب همواره دشواریها و تنگناهایی وجود داشته است (عرب خدری، ۱۳۸۳). با توجه به این امر بررسی‌های مربوط به دبی جریان و ارتباط آن با دبی رسوب و بهره‌گیری از نتایج آن برای بررسی وضعیت رودخانه‌های مختلف در زمینه مدیریت اهمیت بسزایی دارد (فرخ زاده و همکاران، ۱۳۸۷). همواره گروه‌های زیادی اعم از متخصصان، مدیران حوضه‌ها و آبخیزداران نیاز به اطلاعات مرتبط با رسوب‌خیزی حوضه‌ها دارند. به کمک این داده‌ها و اطلاعات، میتوان رابطه فرآیندهای فرسایش حوضه و رسوب را بررسی کرد و از اطلاعات آن برای ارزیابی، اصلاح و بهبود مدل‌های برآورد رسوب و کمک به تصمیم‌گیری‌های درست مدیریتی بهره‌گرفت (میرزایی و همکاران، ۱۳۸۴). یکی از مواردی که به طور تجربی بیانگر رابطه بین دبی آب و دبی رسوب است، معادله سنج رسوب می‌باشد. در بیشتر مواقع هیدرولوژیست‌ها در صورت کمبود داده‌های واقعی غلظت رسوب معلق، از منحنی‌های سنج رسوب که بر اساس رابطه یک تهیه می‌گردد برای پیش‌بینی و برآورد غلظت رسوب معلق استفاده می‌کنند (بهرامی، ۱۳۹۰).

$$Q_s = a Q_w^b$$

(۱) رابطه USBR'

$Q_s$ : غلظت رسوب (تن در روز یا میلی گرم بر لیتر)  $Q_w$ : دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه)

a و b: ضرایب منطقه ای

تاکنون از منحنی های سنجه رسوب در زمینه برآورد رسوب سالیانه بهره گیری های زیادی صورت گرفته است، گرافورد (۱۹۹۱) به منظور تعیین رسوب سالیانه و عاملهای موثر بر تولید رسوب در ۴۶ ایستگاه آبنجی واقع در اوهایو بین منحنی های سنجه و عامل هایی چون شیب و مساحت حوضه ها روابط رگرسیونی برقرار می کند، نتایج این پژوهش حاکی از تاثیر این عامل ها در تولید رسوب می باشد. داو روسگن (۲۰۰۰) با تعیین منحنی های سنجه رسوب و تقسیم بندی منحنی ها بر پایه فصل، میزان گل آلودگی، بار بسترو محاسبه میزان رسوبدهی و بررسی شماری از عامل های دیگر، فرسایش شدید شونده را به علت تغییر کاربری اراضی و کاهش تنوع شکل بستر رودخانه می داند.

رابطه ۱ به دلیل داشتن اریب در اکثر مواقع نتوانسته غلظت رسوب در دبی های مختلف جریان را به خوبی نشان دهد (وروانی، ۱۳۸۶). اریب در واقع باعث شده تا مقدار باقی مانده ها (اختلاف بین مقادیر مشاهده ای با مقادیر محاسباتی) توزیع نرمالی نداشته و مقدار آن بیشتر از صفر شود (محمدی، ۱۳۸۷؛ اسلمن ۲۰۰۰). اریب منحنی سنجه رسوب از دو عامل نشات می گیرد. عامل اول به علت تغییر شکل معادله از حالت لگاریتمی به حالت طبیعی مدل رگرسیون خطی است که در اصل مربوط به ذات منحنی سنجه است. عامل دوم ناشی از عمل برون یابی برای برآورد رسوب دبی های بالاست (وروانی، ۱۳۸۷؛ وروویتز، ۲۰۰۲) که در ارتباط با کمیت و کیفیت داده ها بوده و باعث میشود رسوب برآوردی دارای خطای زیادی باشد. برای کاهش اریبی و افزایش دقت در برونیابی منحنی سنجه رسوب، روشهای مختلفی برای ترسیم این منحنی ارائه شده است. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی کارایی روشهای مختلف، برای تعیین مناسب ترین روش برونیابی منحنی سنجه رسوب برای ایستگاه درازلات رودخانه پلرود واقع در استان گیلان می باشد.

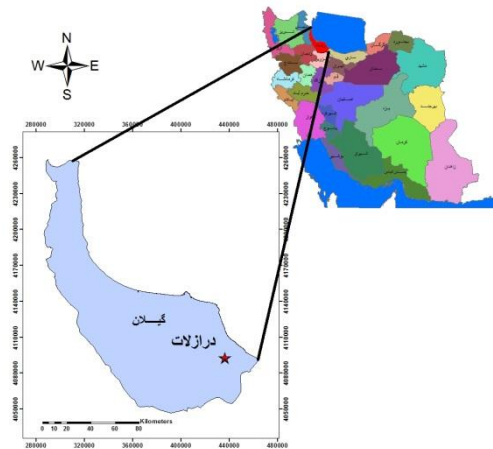
### مواد و روش ها

در این تحقیق ابتدا آمار و اطلاعات دبی و رسوب متناظر آن در ایستگاه درازلات رودخانه دائمی پلرود (کد ۰۵۵-۱۶) واقع در شرق استان گیلان، طی سالهای ۱۳۸۸-۱۳۴۶ از شرکت تحقیقات منابع آب ایران دریافت شد. شکل یک موقعیت ایستگاه درازلات را در استان گیلان نشان می دهد و خلاصه خصوصیات دبی جریان در این ایستگاه در جدول یک ارائه شده است.

جدول ۱- دبی های متوسط رودخانه پلرود (مترمکعب بر ثانیه)

متوسط ماهانه	متوسط فصلی										متوسط سالانه					
	فروردین	اردیبهشت	مرداد	مهر	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند						
۲۸.۸	۱۳.۸	۹.۸	۱۴.۵	۱۱.۲	۱۶.۸	۷.۱	۶.۲	۸.۶	۱۳.۱	۲۸.۸	۳۰.۵	۱۸.۳	۱۴.۳	۷.۴	۲۴.۴	۱۶.۴

<sup>1</sup> United State Bureau of Reclamation



شکل ۱- موقعیت ایستگاه درازلات پلرود در گیلان و ایران

برای اینکه رابطه سنجه رسوب برآورد دقیق تر و اریب کمتری نشان دهد، روشهای گوناگون برای ترسیم منحنی سنجه از جمله روش یک خطی، چندخطی، تقسیم بندی فصلی یا ماهانه دبی های جریان و یا روش حد وسط دسته ها ارائه شده است. منحنی سنجه یک خطی: در این روش داده های غلظت یا دبی رسوب و دبی جریان متناظر آن ها به یک محور مختصات لگاریتمی منتقل شده و بهترین خط برازش (فقط یک خط) با استفاده از روش حداقل مربعات از میان نقاط عبور داده می شود. منحنی سنجه چند خطی: اگر شرایط داده ها و پراکنش نقاط در منحنی سنجه رسوب اجازه دهد، می توان به جای یک خط، چند خط از بین نقاط رد کرد (وروانی، ۱۳۸۰). بنابراین در این حالت بیش از یک معادله برای منحنی سنجه رسوب وجود خواهد داشت.

روش حد وسط دسته ها: دبی های جریان با یک نمونه معین به تعدادی دسته تقسیم شده و برای دبی متوسط هر دسته، دبی متوسط رسوب اندازه گیری شده همان دسته تعیین می شود و در آخر منحنی سنجه رسوب با استفاده از آنها به دست می آید (ذرتی پور، ۱۳۸۶).

منحنی سنجه فصلی: برآورد دبی رسوب معلق مشابه مدل خطی USBR، بر اساس تفکیک داده ها به صورت فصلی مورد مطالعه قرار می گیرد.

منحنی سنجه ماهانه: برآورد دبی رسوب معلق مشابه مدل خطی USBR، و برای هر یک از ماه های سال منحنی سنجه رسوب تعیین می گردد.

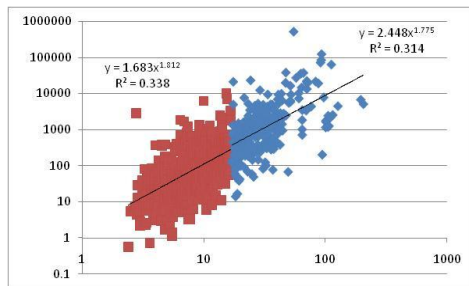
البته روش علمی تر آن است که ابتدا با استفاده از یکی از روش های موجود از جمله تحلیل خوشه ای، تمامی داده ها را به چند دسته تقسیم نمود و بعد از هر دسته درصدی را برای مرحله آموزش و مابقی را برای اعتبارسنجی مدل استفاده نمود. این تکنیک باعث استفاده همگن داده های تمامی دسته ها در هر دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی خواهد شد. اما در این تحقیق ابتدا ۳۰ درصد از کل نمونه های دبی-رسوب، به صورت تصادفی نمونه گیری شده و برای مرحله اعتبارسنجی مدل های مختلف کنار گذاشته شد. برای ۷۰ درصد باقیمانده، معادلات روشهای مختلف برون یابی و مقدار ضرایب اصلاحی مورد نظر برآورد گردید. برای ارزیابی هر یک از روابط سنجه رسوب و انتخاب بهترین روش از شاخص های ارزیابی RMSE استفاده شد. هرچه این ضریب کوچکتر باشد تفاوت داده مشاهده ای با برآوردی کمتر بوده و صحت پیش بینی رابطه بیشتر می شود.

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (SSC_o - SSC_e)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (2)$$

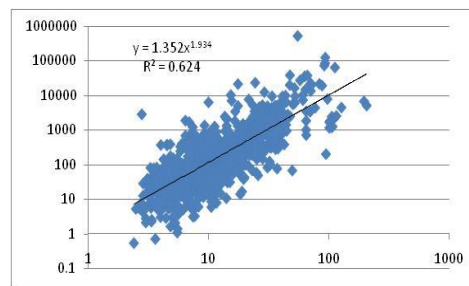
$SSC_o$ : غلظت رسوب مشاهده ای  
 $SSC_e$ : غلظت رسوب برآوردی  
 $N$ : تعداد نمونه های مشاهداتی  
 $RMSE$ : میانگین مجذور مربعات خطا

## نتایج

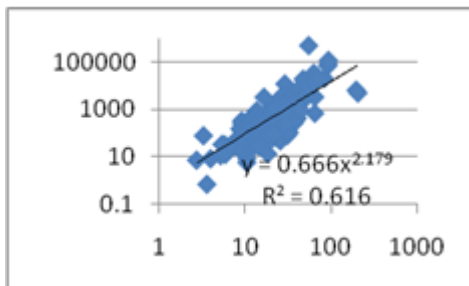
با استفاده از روش‌های مختلف بطور کلی ۱۹ منحنی سنجه رسم گردید که شامل ۱۲ منحنی ماهانه، ۴ منحنی فصلی و برای روش‌های یک خطی، دو خطی و حدواسط دسته‌ها نیز هر کدام یک منحنی است که در اشکال ۲ تا ۵ نمونه‌هایی از آنها ارائه شده است. در جدول یک، معادله رگرسیونی به همراه ضریب تعیین برای هر روش ترسیم منحنی سنجه رسوب به همراه مقدار RMSE که بیانگر دقت هر روش می‌باشد، آورده شده است.



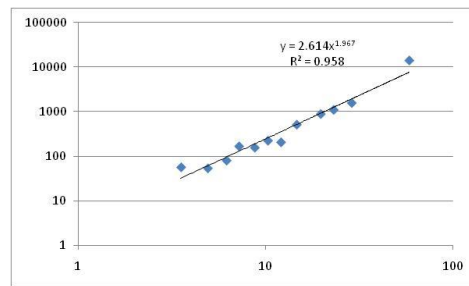
شکل ۳- منحنی سنجه رسوب دوخطی



شکل ۲- منحنی سنجه رسوب یک خطی



شکل ۵- منحنی سنجه رسوب فصلی (بهار)



شکل ۴- منحنی سنجه رسوب حدواسط دسته‌ها

از بین منحنی‌های مختلف سنجه رسوب روش ماهانه دارای RMSE کل کمتر نسبت به سایر روش‌هاست و لذا برآورد این روش در ایستگاه درازلات رودخانه پلرود به مقدار واقعی نزدیکتر است. ضمن اینکه در بین ماه‌های مختلف نیز، در ماه بهمن با کمترین میزان RMSE (معادل ۱۰۸.۱) می‌توانیم دقیقترین برآوردهای رسوب را با استفاده از معادله سنجه رسوب ماهانه داشته باشیم.

رتبه دوم از لحاظ دقت برآورد، به روش دوخطی برای دبی‌های کمتر از ۱۷ متر مکعب بر ثانیه تعلق می‌گیرد که از خطای قابل قبولی برخوردار بوده و می‌تواند میزان حمل رسوب معلق را با دقت مناسبی برآورد نماید ولی برای دبی‌های بالاتر از ۱۷ متر مکعب بر ثانیه مقدار بسیار بالای خطا حاکمی از آنست که دقت برآورد به مقدار بسیار زیادی کاهش می‌یابد. در روش فصلی نیز مشاهده می‌شود که فصل بهار دارای بیشترین مقدار خطا می‌باشد در حالیکه فصل تابستان مقدار خطا کم و قابل قبولی را دارد. با بررسی دبی متوسط فصلی نسبت به متوسط سالیانه (۱۶.۴ متر مکعب بر ثانیه) نیز مشاهده گردید که فصل بهار دارای بیشترین دبی متوسط فصلی (۲۴.۴ متر مکعب بر ثانیه)، و فصل تابستان دارای کمترین دبی متوسط فصلی (۷.۴ متر مکعب بر ثانیه) می‌باشد و بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بطور کلی با افزایش دبی جریان مقدار خطای برآورد نرخ حمل رسوبات معلق با استفاده از روش منحنی سنجه رسوب افزایش می‌یابد.

جدول ۱- مقدار RMSE برای مدل‌های مختلف منحنی سنجه رسوب

مدل	معادله	R <sup>2</sup>	RMSE	کل RMSE
-----	--------	----------------	------	---------

رگرسیون				
7144.1	7144.1	0.624	$y=1.352x^{1.934}$	یک خطی
7179.9	206.3	0.338	$y = 1.683x^{1.812}$	$Q < 17$
6749.6	6749.6	0.314	$y = 2.448x^{1.775}$	$Q > 17$
6749.6	6749.6	0.958	$y = 2.614x^{1.967}$	حدواسط دسته ها
6981.6	12842.5	0.616	$y = 0.666x^{2.179}$	بهار
	593.1	0.382	$y = 1.591x^{1.997}$	تابستان
	1126.1	0.582	$y = 0.941x^{2.044}$	پاییز
	494.4	0.662	$y = 0.827x^{1.996}$	زمستان
6607.6	2664.7	0.251	$y = 1.747x^{1.804}$	فروردین
	14915.2	0.634	$y = 0.286x^{2.488}$	اردیبهشت
	12861.6	0.422	$y = 1.345x^{1.894}$	خرداد
	251.3	0.339	$y = 1.722x^{1.794}$	تیر
	474.1	0.491	$y = 0.318x^{2.951}$	مرداد
	1348.3	0.436	$y = 2.396x^{2.008}$	شهریور
	1019.7	0.693	$y = 0.992x^{2.084}$	مهر
	600.6	0.498	$y = 1.310x^{2.006}$	آبان
	1776.8	0.534	$y = 0.45x^{2.206}$	آذر
	752.7	0.532	$y = 0.418x^{2.230}$	دی
	108.1	0.596	$y = 0.308x^{2.441}$	بهمن
	235.5	0.635	$y = 1.729x^{1.759}$	اسفند

### بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شد با بررسی روش های مختلف برون یابی، روش مناسب برای ایستگاه درازلات رودخانه پلرود معرفی شود. نتایج نشان داد که شاخص RMSE در روش ماهانه کمتر از سایر روش ها بوده و روش ماهانه به عنوان بهترین روش برای ایستگاه درازلات رودخانه پلرود معرفی گردید. همچنین ذکر این نکته ضروری است که برای اخذ نتیجه بهتر لازم است که ابتدا با استفاده از یکی از روش های موجود از جمله تحلیل خوشه ای، تمامی داده ها را به چند دسته تقسیم نمود و بعد از هر دسته درصدی را برای مرحله آموزش و مابقی را برای اعتبارسنجی مدل استفاده نمود که بکارگیری این فرآیند باعث استفاده همگن داده های مربوط به تمامی دسته ها در هر دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی خواهد شد.

### منابع

۱. اعظمی، ا.، نجفی نژاد، ع. و عرب خدری، م. ۱۳۸۴. ارزیابی مدل های هیدرولوژیکی در برآورد بار معلق رسوبی جریان پایه و سیلابی در حوضه سد ایلام. سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۵ ص.
۲. ذرتی پور، ا.، خلیقی سیگارودی، ش. و شمس المعالی، ن. ۱۳۸۶. کارایی روش هیدرولوژیکی حدواسط دسته ها نسبت به منحنی سنجه یک خطی و دوخطی در برآورد بار معلق رودخانه ها. چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران مدیریت حوزه های آبخیز، تهران، ۱۱ ص.
۳. عرب خدری، م.، حکیم خانی، ش. و وروانی، ج. ۱۳۸۳. اعتبار روش های برون یابی در برآورد میانگین رسوبدهی معلق سالانه (۱۷ ایستگاه هیدرومتری کشور). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۱: ۳، ص ۱۳۱-۱۲۳.
۴. وروانی، ج.، فیض نیا، س.، مهدوی، م. و عرب خدری، م. ۱۳۸۰. بررسی وضعیت رسوبدهی سرشاخه های اصلی سد وشمگیر رودخانه گرگانرود. مجموعه مقالات همایش ملی مدیریت اراضی فرسایش خاک و توسعه پایدار. اراک. ص ۲۱۹ تا ۲۳۳.

۵. وروانی، ج.، نجفی نژاد، ع. و میرمعینی کهرودی، آ. ۱۳۸۷. اصلاح منحنی سنجه رسوب بلباستفاده از روش حداقل واریانس ناریب. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱:۱۵، ص ۱۶۱-۱۵۰.
۶. محمدی، ا.، مساعدی، ا. و حشمت پور، ع. ۱۳۸۶. تعیین مناسبترین روش برآورد رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری قزاقلی رودخانه گرگان رود. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی.
۷. وروانی، ج.، خلیقی سیگارودی، ش. ۱۳۸۶. بررسی میزان خطای منحنی های سنجه رسوب برای برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی در رودخانه قره چای. مجله یافته های نوین کشاورزی. ۱(۳) ۲۰۱-۲۱۴.
۸. بهرامی، ع.، طالبی، ع. ۱۳۹۰. بهینه سازی روابط دبی- رسوب با استفاده از روش های منحنی سنجه و فاکتورهای اصلاح اریب (مطالعه موردی: حوزه آبخیز پل دوآب شازند- استان مرکزی). پایان نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری.
۹. فریفته، جمشید، (۱۳۷۰). ترجمه، تحلیل های کمیدر ژئومرفولوژی، دانشگاه تهران، ۳۶۸ ص.
۱۰. مختاری، احمد، (۱۳۷۶). بررسی امکان برازش مدل تجربی PSIAC در برآورد فرسایش رسوب در حوضه های آبخیز فاقد آمار با بهره گیری از GIS و سنجش از دور، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۱۱. میرزایی، محمد رضا، عرب خدری، محمود، فیض نیا، سادات و حسن احمدی، (۱۳۸۴). مقایسه روشهای آماری برآورد رسوب معلق رودخانه ها، مجله منابع طبیعی ایران ۵۸ (۲) ۳۱۳-۳۰۱.
۱۲. فرخزاده، بهنوش، آذرخشی، مریم، مهدوی، محمد و علی سلاجقه. (۱۳۸۷). بررسی منطقه ای منحنی سنجه رسوب در اقالیم مختلفایران، مجله منابع طبیعی ایران ۶۱ (۱) ۱۲-۱.
13. Asselman, N. E. M., 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves, Journal of Hydrology, 234:228-248.
14. Dave Rosgen, P.H., 2000. Review comments of the evaluation of sediment transport data for clean sediment TMDL, S. Report NO.17 of November 2000.
15. Gravford, C.G., 1991. Estimating of suspended – sediment rating curves and mean suspended – sediment loads, Journal of Hydrology, 12(1-4): 331-348.
16. Horowitz, A. J., 2002. The use of sediment rating curves for monitoring suspended sediment concentrations and fluxes: Issues of temporal resolution, estimation errors, and sampling frequency, proceedings MTM-IV, U.S. Geological Survey, Peachtree Business Center, Suite 130, 3039 Amwiler Road, Atlanta, Ga 30360, USA.

## Evaluation of the various sediment rating curve models

J. Mosaffaie<sup>1</sup>, A. Saleh Pourjam<sup>2</sup>

1. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. (jamalmosaffaie@yahoo.com)

### Abstract

One of the most relevant methods for estimating sediment is using sediment data of hydrometric stations and establishment of a relation between flow discharge and sediment discharge as sediment rating curves. There are several forms of sediment rating curves. This research attempts to study various forms of sediment rating curves and select the best one for Derazlat hydrometric station of Polrud river located in Gilan province of Iran. So first, discharge and sediment data of Derazlat station were provided for a 45-year period. 30% of data was separated and using 70% remained data, various models of sediment rating curves including single line, multiple line, and mean of categories, seasonal and monthly were fitted. RMSE statistic was used for evaluation of the efficiency of different models. Results showed that the value of this statistic for monthly method is lower than other methods and especially for the month of bahman this method is so accurate. Therefore this method was selected as superior model for Derazlat station of Polrud River.

Keywords: Extrapolation methods, sediment rating curve, water discharge, suspended load, Polrud.

