پژوهش‌های آبخیزداری
(پژوهش و سازندگی)
دوره ۳۰، شـماره ۴، شماره پیاپی ۱۱۷، زمستان ۱۳۹۶، صفحات ۸۲-۷۲
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMEJ.2018.117087

تعیین مناسب‌ترین روش براورد بارمعلق در رود سیستان

ناصر رحیمی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی آب و خاک، دانشگاه زابل
فرزاد حسن‌پور*
(نویسنده‌ی مسئول)* دانشیار، دانشکده‌ی آب و خاک، دانشگاه زابل
سلمان شریف‌آذری
مربی، دانشکده‌ی آب و خاک، دانشگاه زابل

تاریخ دریافت: آبان ۱۳۹۵ تاریخ پذیرش: خرداد ۱۳۹۷

* Corresponding Email:Hassanpourir@UOZ.ac.ir

چکیده
رسوب‌گذاری در مسیر رودها از بزرگ‌ترین مشکلات منابع آب سطحی به‌شمار آمده و باعث واردشدن زیان‌هایی به بناها و مزرعه‌ها و تغییر مسیر رودها می‌شود. روش‌های مختلفی برای تخمین بار رسوبی به‌کار برده‌می‌شوند اما به نحوه‌ی استفاده و دقت آن‌ها کم‌تر توجه شده است. در این پژوهش رود رسوب‌گذار سیستان در انتهای حوزه‌ی آب‌خیز رود هیرمند با شیبی ملایم و طول تقریبی ۷۰ کیلومتر انتخاب شد. از آمار داده‌های متناظر آب‌دهی جریان و آب‌دهی بارمعلق رود سیستان در طول دوره‌ی آماری سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۹۴ استفاده شد. برای افزایش دقت کار، داده‌ها به‌صورت ماهانه و فصلی طبقه‌بندی شدند. برآورد بارمعلق رود با ۶ روش آماری یک‌خطی، دوخطی، حد وسط دسته‌ها، فائو، ضریب پارامتری (سی‌اف) و غیرخطی انجام گردید. با توجه به این‌که تعیین نقطه‌ی شکست در روش دوخطی اهمیت ویژه‌یی دارد از روش بهینه‌سازی به‌کمک الگوریتم ژنتیک برای تعیین آن استفاده شد. برای انتخاب روش مناسب براورد بارمعلق دو معیار ارزیابی میانگین خطای نسبی و جذر میانگین مربعات خطا به‌کار رفت. نتایج نشان دادند که روش دوخطی پیشنهادی در همه‌ی روش‌های بی‌تفکیک، تفکیک فصلی و ماهانه به‌ترتیب با میانگین خطای نسبی ۱۵۴/۴۶، ۱۴۲/۷۰ و ۱۱۶/۱۵ بهترین نتیجه را می‌دهد و تفکیک داده‌ها به‌صورت ماهانه باعث افزایش دقت و کاهش جذر میانگین مربعات خطا در رود سیستان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بارمعلق، رسوب، رود سیستان، روش دوخطی

Determination of the Most Appropriate Statistical Method for the Suspended Load Estimation in the Sistan River

Naser Rahimi
M.Sc. Student, Department of Water Eng., University of Zabol
Farzad Hassanpour
Associate Professor, Department of Water Eng., University of Zabol
Salman Sharifazari
Lecturer, Department of Water Eng., University of Zabol

Abstract
Sedimentation on the rivers beds causes many difficulties not only for an orderly and sustainable flow of water, but also by altering the rivers' hydraulics, which in certain cases drastically changes the flow direction by opening new channels that inundate farm fields, municipalities and infrastructures. As various models developed for the suspended load (SL) estimation are often site specific, therefore, it is prudent to test and calibrate them for the intended river. As the Hirmand River is the lifeblood of Sistan, therefore, the 70 km terminal reach, the Sistan River, was selected for this project. The monthly and seasonally discharge of the river and its SL contents for the period 1970–2015 were analyzed statistically using six models, namely: linear, double-linear, mean value, FAO, parametric factor and non-linear. As the determination of the break point is very important in the application of the double linear method, the genetic optimization algorithm was used in this process. Two criteria for choosing the correct method for estimation of the SL were used: relative mean error and root mean square error. It is concluded that the double linear method proposed in this research gives the best result in all forms without any delineation, seasonal and monthly classification with the relative mean error of 154.46, 142.7 and 116.15, respectively. Monthly classification of data increased accuracy and reduced the root mean square error in the Sistan River.

Keywords: Genetic algoritm, sediment, Sistan river, suspended load, two linear method

مقدمه

انتقال بارمعلق در رودها یکی از بزرگ‌ترین مشکلات منابع آب سطحی است (گریک و ونور ۲۰۱۲). رسوب‌گذاری در رودها در هنگام رخدادن سیلاب باعث وارد شدن خسارت به بناها، مزرعه‌ها و در کف رودخانه موجب کم‌عمق شدن آن و دشواری برای کشتی‌رانی در آن می‌شود (شفاعی‌بجستان ۲۰۰۸). روش‌های مختلفی برای برآورد بارمعلق معرفی شده‌اند که اندازه‌گیری بارمعلق از جمله روش‌های معمول است. روش اندازه‌گیری بارمعلق که با اندازه‌گیری غلظت بارمعلق و آب‌دهی جریان روشی مطمئن ولی مستلزم اندازه‌گیری پیوسته است که معمولاً تنها برای رودهای مهم و دائمی مقدور است (دهقانی و همکاران ۲۰۰۹).

اهمیت و نقش پدیده‌ی انتقال بارمعلق در عرصه‌های مختلف مهندسی به‌اندازه‌یی است که متخصصان رود از دیرباز به تعیین کمیت بار رسوبی توجه کرده‌اند (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور ۲۰۰۷). یکی از روش‌های معمول در شناسایی رابطه‌یی مناسب برای رود مقایسه‌ی داده‌های اندازه‌گیری‌شده با نتایج حاصل از روابط متعدد است (شفاعی بجستان ۲۰۰۸). تحقیقات زیادی در زمینه‌ی بارمعلق با استفاده از منحنی سنجه‌ی بارمعلق

انجام گرفته است (بلامورگان ۱۹۸۹؛ آسلمان ۲۰۰۰؛ پیکوت و همکاران ۲۰۰۱؛ رستمی و اردشیر ۲۰۰۱؛ هورویتز ۲۰۰۲؛ محمدی ۲۰۰۲؛ یوسف‌وند و همکاران ۲۰۰۳؛ برزگر ۲۰۰۵؛ صادقی ۲۰۰۵؛ میرزایی و همکاران ۲۰۰۵؛ لطیفی و حسن‌زاده ۲۰۰۶؛ محمدی و همکاران ۲۰۰۷؛ خانچول و همکاران ۲۰۰۹؛ هو و همکاران ۲۰۱۱ و صالحی تالشی ۲۰۱۲).

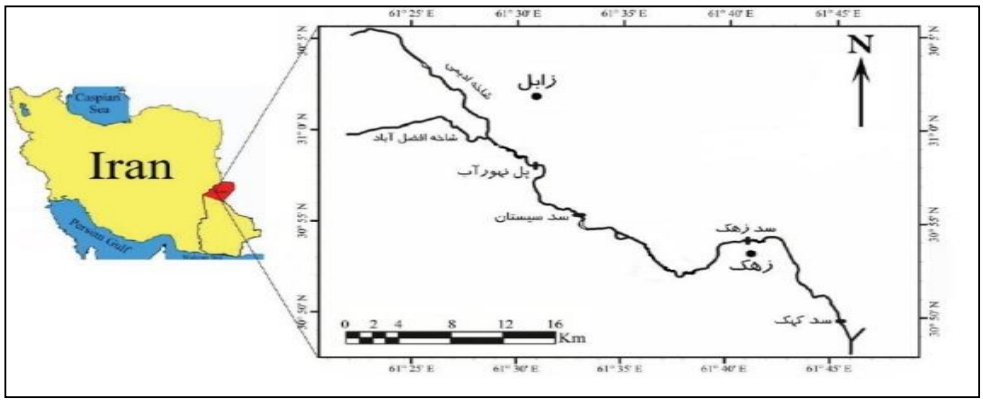
ذرتی‌پور (۲۰۰۷) با طبقه‌بندی داده‌ها برای بالابردن دقت روش‌ها نشان داد که روش حدوسط داده‌ها و فائو برای داده‌ی کلی و فصل‌های خشک، و روش خطی برای طبقه‌ی داده‌ی فصل‌های سیلابی روش‌های مناسبی برای برآورد بارمعلق حوزه‌ی آب‌خیز طالقان است. دسته‌بندی فصلی داده‌های بارمعلق و تجزیه‌ی آب نگار (هیدروگراف) خروجی حوزه برای افزایش دقت منحنی سنجه‌ی بارمعلق و برآورد بارمعلق رود مؤثر است. مساعدی و همکاران (۲۰۰۶) در گرگان‌رود گلستان متوجه شدند که تفکیک داده‌ها باعث افزایش دقت و کاهش خطا می‌شود، و مدلی که براساس تمام داده‌ها و بی‌تفکیک آن‌ها به‌دست می‌آید، بدترین عمل‌کرد را خواهد داشت. پور اغنیایی و همکاران (۲۰۰۸) روش‌های منحنی سنجه‌ی تک‌خطی، دوخطی، فصلی و فائو (روش تعدیل بار رسوبی) را بر رود صیدون در استان خوزستان مقایسه کرده، و نشان دادند که روش فائو برای این رود مناسب است. مساعدی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که معادله‌های منحنی سنجه‌ی بارمعلق در ایستگاه‌های ورودی به آب‌گیر سدهای دز و کرج، مقدار رسوب‌گذاری را برای سد دز درحدود ۷۰ ٪ و برای سد کرج حدود ۹۷ ٪ کم‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. سبهانی و همکاران (۲۰۱۳) نیز روش‌های آماری برآورد بارمعلق رودخانه‌ها را در حوزه‌ی حبله‌رود ارزیابی کرده و به این نتیجه رسیدند که عمل‌کرد روش آماری حدوسط داده‌ها و دوخطی از سایر روش‌ها بهتر است.

دقت روش‌های موجود در برآورد بارمعلق رودها متفاوت است، و عملکرد آن‌ها بستگی به وضعیت داده‌ها و ویژگی‌های هر منطقه دارد. باتوجه به‌این‌که برخی از روش‌های منحنی سنجه میزان بارمعلق را کم‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند، یافتن روش مناسب در رودهایی با بارمعلق زیاد مانند رود سیستان بسیار مهم است، از آن‌جاییکه برآورد بارمعلق در رود سیستان اهمیت بسیاری را برای مدیریت آن دارد، هدف از این پژوهش بررسی روش‌های آماری برآورد بارمعلق و انتخاب مناسب‌ترین روش برای آن است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

دشت سیستان در حاشیه‌ی مرز شرقی ایران و در طول شرقی '۱۰°۶۰ تا '۵۰°۶۱ و عرض شمالی '۱۸°۳۰ تا '۲۰°۳۱ به وسعت ۲۵۰۰۰۰ هکتار در گوشه‌ی شمالی استان سیستان‌وبلوچستان است. منابع آبی سیستان به رود مرزی هیرمند وابسته است. این رودخانه در مرز ایران و افغانستان به دو شاخه‌ی پریان مشترک و رود سیستان منشعب می‌شود، و پس از مسافتی حدود ۷۰ کیلومتر به دو شاخه‌ی ادیمی و افضل‌آباد منشعب می‌شود و در ادامه جریان آن به دریاچه‌ی هامون هیرمند می‌ریزد (شکل ۱). رود سیستان آبیاری ۷۰ ٪ از اراضی کشاورزی دشت سیستان را بر عهده دارد (حسن‌پور ۲۰۰۹). ذرات تشکیل‌دهنده‌ی بستر رود بسیار ریزدانه و عمده‌ی آن در گروه ماسه‌ریز، رس و لای است.



شکل ۱ -موقعیت رودخانه‌ی سیستان و شاخه‌های انتهایی آن.

داده‌برداری

در این تحقیق از آمار ۴۵ ساله‌ی داده‌های متناظر آب‌دهی جریان و تخلیه‌ی بارمعلق رود سیستان در سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۹۴ استفاده شد. برای بررسی همگنی داده‌ها در دوره از روش اسمیرنف–کلموگراف مبتنی بر داده‌های دسته‌بندی‌شده در نرم‌افزار (اس‌پی‌اس‌اس) استفاده شد، و داده‌های پرت با محاسبه‌ی شاخص باقی‌مانده‌ی استیودنت (آر استیودنت) حذف شد.

برای برآورد دقیق‌تر رابطه برای بارمعلق رود سیستان، داده‌های آب‌دهی جریان – تخلیه‌ی بارمعلق با دو روش زیر تفکیک شد:

بی‌درنظرگرفتن زمان داده‌ها: در این روش از تمامی داده‌های متناظر آب‌دهی جریان و تخلیه‌ی بارمعلق استفاده شده است.

بادرنظرگرفتن زمان داده‌ها: در این روش داده‌ها باتوجه به زمان به دو روش فصلی و ماهانه تفکیک شد. در روش طبقه‌بندی فصلی، آمار آب‌دهی جریان و

تخلیه‌ی بارمعلق براساس فصل به چهار دسته، و در روش طبقه‌بندی ماهانه، براساس ماه‌های سال به دوازده دسته تقسیم شدند.
برای برآورد بار رسوبی معلق رود از روش منحنی سنجه استفاده شد. منحنی سنجه رابطه‌یی توانی میان آب‌دهی و تخلیه‌ی رسوب (غلظت رسوب) است. به‌طور معمول برای تعیین ضریب‌های این منحنی از روش تبدیل لگاریتمی و سپس برازش خط بر داده‌های تبدیل‌یافته استفاده می‌شود. استفاده از تبدیل لگاریتمی محدودیت‌هایی به‌همراه دارد، بنابراین روش‌های مختلفی برای تعیین ضریب منحنی سنجه و رفع این محدودیت‌ها داده شده است.
برای برآورد بارمعلق رود سیستان براساس منحنی سنجه‌ی رسوب ۶ روش به‌کار گرفته شد:

منحنی سنجه‌ی رسوب یک‌خطی

داده‌های حمل بارمعلق با آب‌دهی جریان متناظر آن‌ها به نمودار تمام‌لگاریتمی منتقل و بهترین خط برازش با استفاده از روش کم‌ترین مربع‌ها از میان نقطه‌ها عبور داده شد؛ بنابراین، در این روش بی‌توجه به نحوه‌ی پراکنش نقطه‌ها فقط یک خط از میان نقطه‌ها عبور داده شد:

$$Qs = aQ^{b}_{w} \quad (۱)$$

در این رابطه a فاصله‌ازمبدأ و b شیب خط است. ضریب a محدوده‌ی خاصی ندارد، اما ضریب b محدوده‌ی نسبتاً کوچکی دارد.

منحنی سنجه‌ی رسوب چندخطی

اگر وضعیت پراکنش نقطه‌ها اجازه دهد، می‌توان به‌جای یک خط، دو یا سه خط از میان آن‌ها عبور داد. بنابراین، دراین‌حالت بیش از یک معادله برای منحنی سنجه‌ی رسوب خواهد بود. روش کار یک‌خطی است، با این تفاوت که با توجه به پراکندگی و توزیع داده‌های آب‌دهی، گذراندن بیش از یک خط (دو یا سه خط) برازش مناسب‌تری را ایجاد می‌کند. برای برازش چند خط بر داده‌ها، ابتدا باید نقطه‌های شکست، یا نقطه‌هایی که محدوده‌ی هر یک از خط‌ها را تعیین می‌کنند مشخص شودند. یکی از راه‌کارهای ترسیم منحنی سنجه‌ی بارمعلق دوخطی استفاده از آب‌دهی پایه به‌جای نقطه‌ی شکست است، ولی قانون خاصی برای آن نیست. نقطه‌ی شکست در این پژوهش طوری با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین شد که منحنی به‌دست‌آمده جذر میانگین مربع‌های خطا در برآورد آب‌دهی رسوبی کم‌ترین باشد. به این منظور، مختصات نقطه‌ی شکست به‌جای متغیر تصمیم و میزان جذر میانگین مربع‌های خطا به‌جای تابع هدف مسئله‌ی بهینه‌سازی گرفته شد.

منحنی سنجه رسوب حد وسط دسته‌ها

از آن‌جاکه در حمل بارمعلق، سیلاب‌ها نقش بیش‌تری از کل جریان رود دارند، روش حدوسط داده‌ها در برآورد منحنی سنجه می‌تواند بسیار کارآ باشد (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۱۷). در این روش، برای هر گذر حجمیِ متوسطِ هر دسته بارمعلق، متوسطِ اندازه‌گیری‌شده‌ی همان دسته را برآورد می‌کند. آب‌دهی‌هایی را که در آن‌ها نمونه‌گیری غلظت انجام شده است انتخاب می‌کنند و آن‌ها را براساس حجم جریان (به‌صورت صعودی) مرتب می‌کنند. این آمارها سپس به دسته‌هایی تقسیم می‌شوند و سعی می‌شود به آب‌دهی‌های زیاد ارزش بیش‌تری داده‌شود. در مرحله‌ی بعد میان این دو گروه غلظت و جریان رابطه‌ی رگرسیونی توانی برقرار می‌شود، که ضریب همبستگی آن (نسبت به ضریب همبستگی معادله‌ی اولیه) زیاد است. از آن‌جاکه در روش همبستگی میان متوسطِ دسته‌ها، تعداد نقطه‌ها به کم‌ترین می‌رسد، خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی تا حدود زیادی کاهش می‌یابد. روش حدوسط دسته‌ها عبارت است از خطی که بر تمام نقطه‌های میانگینِ دسته‌ها برازش یافته باشد، بنابراین، خط رگرسیونی باید از میانگین بارمعلق در هر آب‌دهی معین عبور کند (جانسون ۱۹۹۶).

منحنی سنجه رسوب با کاربرد روش فائو

در این روش تشریح شده است، ابتدا بهترین خط را با معادله‌ی ۲ به‌روش کم‌ترین مربع‌ها به اندازه‌های لگاریتمی (نه اندازه‌های واقعی) برازش می‌دهند (جونز و همکاران ۱۹۸۱):

$$Qs = aQ^{b}_{w} \quad (۲)$$

ولی از معادله‌ی بالا که از نقطه‌های میانگین‌های logQw و logQs عبور می‌کند استفاده نمی‌شود، و به‌جای آن معادله‌ی خطی موازی، که از میانگین‌های Qw و Qs متناظر با آن می‌گذرد، به‌کار می‌رود. بنابراین معادله‌ی جدید به‌شکل زیر در می‌آید:

$$Q_s = \acute{a}Q^{b}_{w} \quad (۳)$$

$$\acute{a} = \overline{Q_s}/\overline{Q_w}^{b}$$

مقدار a ٰاز تقسیم میانگین‌های Qw و Qs متناظر اندازه‌گیری‌شده به‌دست می‌آید.

منحنی سنجه‌ی بارمعلق با کاربرد روش اصلاح خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی

فرگوسن (۱۹۸۶) و کوچ و اسمایلی (۱۹۸۶) تبدیل لگاریتمی را عامل اصلی تخمین کم‌تر از مقدار واقعی دانسته‌اند. اثر پراکندگی داده‌ها و خطای تبدیل لگاریتمی را می‌توان به‌این‌گونه بیان کرد که رابطه‌ی میان آب‌دهی و بارمعلق خطی نیست، ولی می‌توان آن را به مدل خطی تبدیل کرد. فرگوسن (۱۹۸۶) علت عمده‌ی برآورد کم‌تر روش‌های منحنی سنجه‌ی بارمعلق را همین خطای تبدیل لگاریتمی دانسته و برای حذف این خطای آماری ضریبی اصلاحی را پیشنهاد کرده است:

$$CF=EXP[2.65S^{2}] \quad (۴)$$

S_2 خطای استاندارد برآورد منحنی سنجه‌ی رسوب در لگاریتم پایه‌ی ۱۰ است و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\sum\left(\log Qs_{o_i} - \log Qs_{C_i}\right)/(n-2)^2 \quad (۵)$$

که در آن n تعداد نمونه‌های آب‌دهی بارمعلق، $\log Qs_{oi}$ لگاریتم مقدار مشاهده‌ی آب‌دهی بارمعلق، و $\log Qs_{ci}$ لگاریتم مقدار براوردی آب‌دهی بارمعلق است.

منحنی سنجه‌ی بارمعلق غیرخطی

در این روش فرض بر این است که در مدل رابطه‌ی توانی منحنی سنجه بخش خطای تصادفی با توزیع طبیعی با میانگین صفر و واریانس σ^2 است. در این حالت، برآورد ناریب ضریب‌های a و b در منحنی سنجه‌ی بارمعلق با استفاده از روش کم‌ترین مربع‌های غیرخطی به‌دست می‌آید. باتوجه به این‌که در این مدل سعی می‌شود خطای برازش کم‌ترین شود، رابطه‌ی به‌دست‌آمده فقط برای اندازه‌های بزرگ آب‌دهی و تخلیه‌ی رسوب عمل‌کرد مناسب دارد، و در اندازه‌های متوسط و کم زوج‌داده‌ها، میزان آب‌دهی بارمعلق را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند.

ارزیابی و مقایسه‌ی دقت و صحت روش‌های آماری برآورد بارمعلق

برای انتخاب بهترین مدل و تعیین دقت آن، از شاخص جذر میانگین مربع‌های خطا (رابطه‌ی ۶) استفاده شد، به‌این روش که برای هر رابطه‌ی رگرسیونی که از مدل‌ها به‌دست‌آمد، جذر میانگین مربع‌های خطا محاسبه شد. براساس این رابطه، دقت هر مدل که جذر میانگین مربع‌های خطای آن کم‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد، سایر از مدل‌های دیگر بیش‌تری است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Qs_{o_i} - Qs_{c_i}\right)^2}{n}} \quad (۶)$$

برای مقایسه‌ی صحت معادله‌های برآورد بارمعلق با میزان بارمعلق مشاهده‌شده، از معیار آماری میانگین درصد خطای نسبی (آر.ام.ای) استفاده شد (رابطه‌ی ۷). هرچه مقدار این معیار آماری کم‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد، معادله درست‌تر است:

$$RME = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{Qs_{o_i} - Qs_{c_i}}{Qs_{o_i}}\right| * 100}{n} \quad (۷)$$

در این رابطه Qs_{oi} میزان بارمعلق مشاهده‌شده، Qs_{ci} میزان بارمعلق برآوردشده و n تعداد دفعه‌های مقدارهای برآوردشده‌ی بارمعلق است.

در این تحقیق برای تجزیه‌ی آماری داده‌ها از نرم‌افزار اکسل و برای پیداکردن نقطه‌ی بهینه در روش دوخطی از نرم‌افزار متلب[1] ، و برای بررسی همگنی داده‌ها از روش اسمیرنف–کلموگراف در نرم‌افزار اس‌پی‌اس‌اس استفاده شد.

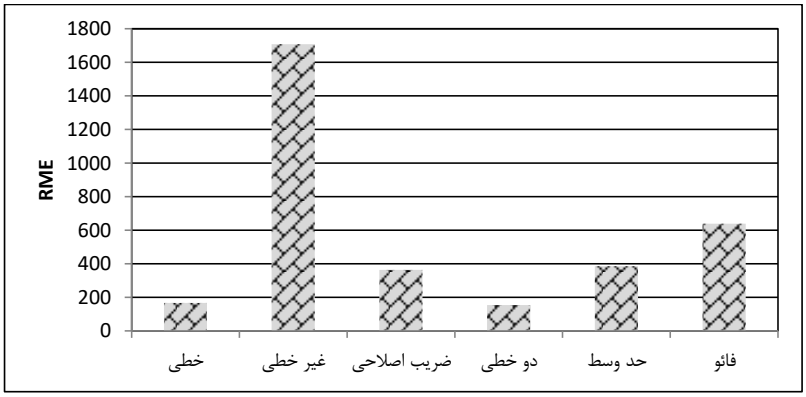
نتایج و بحث

با برازش مدل‌های مختلف معادله‌های منحنی سنجه‌ی بارمعلق برای ۲۳۰۰ داده‌ی متناظر آب‌دهی و تخلیه‌ی رسوب، تغییرات جذر میانگین مربع‌های خطا برای کل داده‌ها محاسبه شد (شکل ۲). در میان روش‌ها خطای روش دوخطی با ۱۵/۴۸۰۰۳ تن در روز کم‌ترین، و خطای روش فائو با ۳۱/۱۹۶۸۲۰ تن در روز بیش‌ترین بود، که با نتایج محمدی (۲۰۰۲)، میرزایی (۲۰۰۲)، عرب‌خدری و همکاران (۲۰۰۴) و حیدرنژاد و همکاران (۲۰۰۶) که روش فائو را با بیش‌ترین میزان جذر میانگین مربع‌ها دانسته‌اند، مطابقت دارد.

شکل۲ –نمودار جذر میانگین مربع‌های خطا (تن بر روز) در روش‌های مختلف.

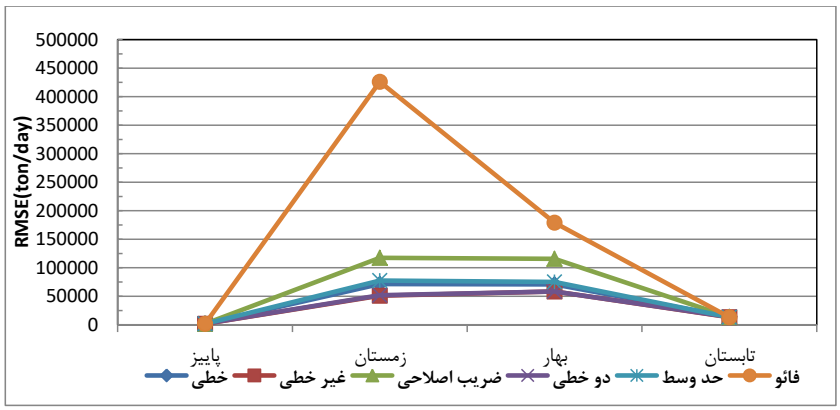
1- Matlab

با توجه به شکل ۳، در حالت کل داده‌ها، روش دوخطی با کم‌ترین درصد خطای نسبی و بیش‌ترین درستی بهترین روش، و روش غیرخطی با کم‌ترین درستی نامناسب‌ترین روش شناخته شد. در نتیجه، روش دوخطی با کم‌ترین مقدار جذر میانگین مربع‌های خطا و درصد خطای نسبی برای حالت کل داده‌ها، مناسب‌ترین روش، و روش فائو با کم‌ترین دقت و درستی نامناسب‌ترین روش در حالت کل داده‌ها شناخته شد.



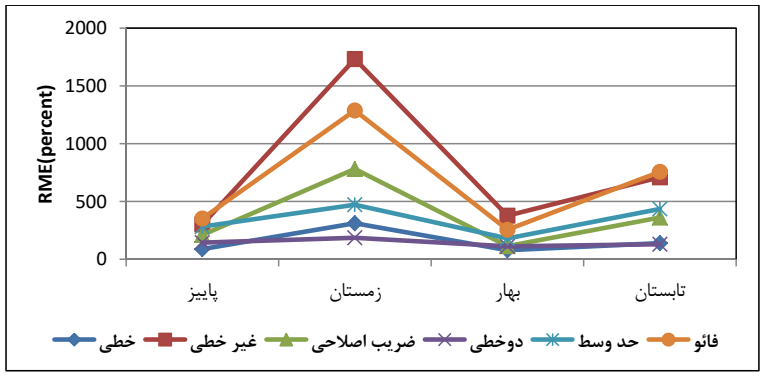
شکل۳ – نمودار درصد خطای نسبی در روش‌های مختلف.

نتایج جذر میانگین مربع‌های خطا در مدل‌های مختلف منحنی سنجه‌ی به‌کاررفته در این تحقیق پس از تفکیک داده‌ها بر حسب فصل وقوع در شکل ۴ آورده شده اند. ازمیان روش‌های برآورد بارمعلق، روش غیرخطی و دوخطی مناسب‌ترین روش‌های برآورد بارمعلق در رود سیستان، و روش فائو با کم‌ترین دقت نامناسب‌ترین روش بود.



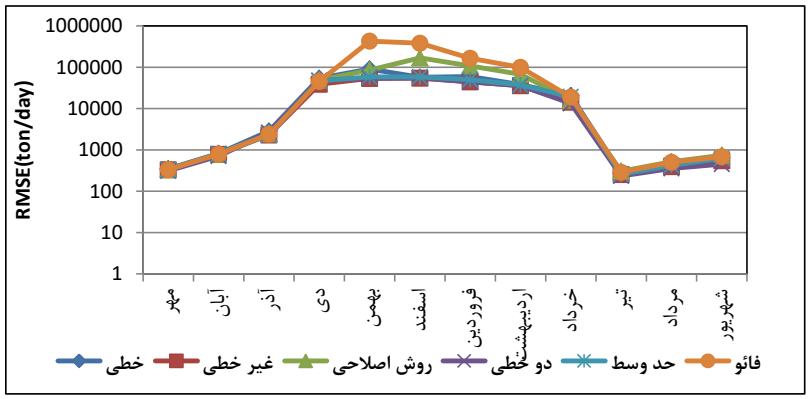
شکل۴ – نمودار مقایسه‌ی جذر میانگین مربع‌های خطا در فصل‌های مختلف.

نتایج خطای نسبی روش‌های مختلف پس از تفکیک فصلی داده‌ها (شکل ۵) نشان می‌دهند که برای برآورد بارمعلق در رود سیستان در میان فصل‌ها روش‌های یک‌خطی و دوخطی مناسب‌ترین روش، اند و روش غیرخطی و روش فائو با کم‌ترین درستی نامناسب‌ترین روش‌ها شناخته شدند، یافته‌یی که با نتایج احمدی و همکاران (۲۰۱۲) مبنی بر این که روش فائو در بیش‌تر فصل‌ها نامناسب‌ترین روش است، مطابقت دارد.



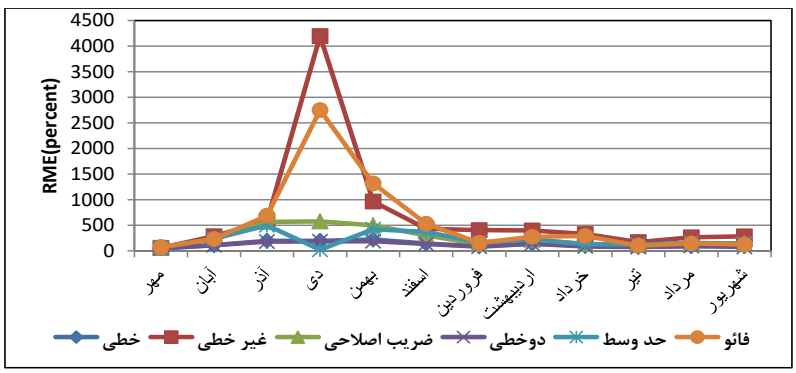
شکل۵ – نمودار مقایسه‌ی میانگین خطای نسبی در فصل‌های مختلف.

براساس نتایج جذر میانگین مربع‌های خطا با دسته‌بندی داده‌ها به‌صورت ماهانه (شکل ۶) برای مهر، آبان، خرداد، تیر، مرداد و شهریور روش دوخطی، و در آذر، دی، بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت روش غیرخطی با کم‌ترین اختلاف جذر میانگین مربع‌های خطا با روش دوخطی در میان روش‌های آماری، بیش‌ترین دقت را دارند و مناسب‌ترین روش‌های برآورد بارمعلق در هرماه اند. نامناسب‌ترین روش‌های برآورد برای خرداد، مهر، آبان، آذر و دی روش خطی، در تیر، مرداد و شهریور روش سی‌اف، و در فروردین، اردیبهشت، بهمن و اسفند روش فائو بود. درمیان تمامی روش‌ها در دسته‌بندی ماهانه، خطای روش فائو در بهمن بیش‌ترین (۴۲۸۰۵۹/۸) بود. دقت روش دوخطی در ماه تیر بیش‌ترین (۲۳۴/۵۰ تن در روز) بود.



شکل ۶ – نمودار ماهانه‌ی جذر میانگین مربع‌های خطا برای روش‌های برآورد.

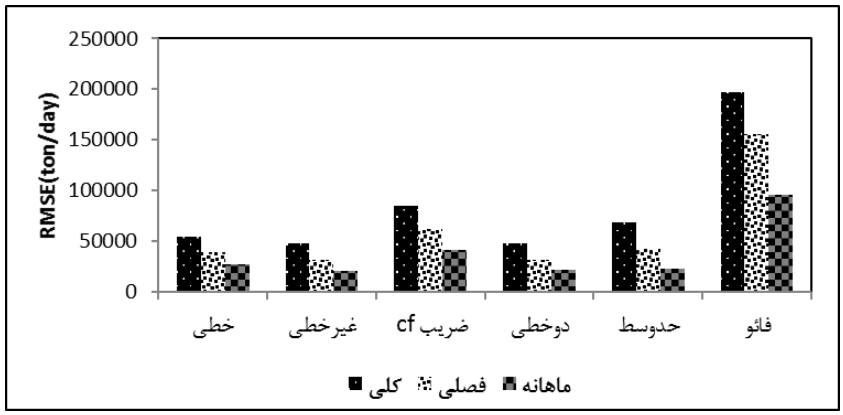
نتایج میانگین خطای نسبی با تفکیک داده‌ها به ماهانه (شکل ۷) بیانگر برتری روش دوخطی به‌دلیل کم‌تر بودن میانگین خطای نسبی در میان روش‌های آماری برآورد بارمعلق است. در دسته‌بندی ماهانه، روش دوخطی با بیش‌ترین فراوانی و درستی روش مناسب دانسته‌شد. این یافته نیز با نتایج احمدی و همکاران (۲۰۱۲) که نشان دادند در دسته‌بندی ماهانه روش دوخطی بیش‌ترین درستی رادارد و برای ماه‌های مختلف مناسب است، هم‌خوانی دارد. روش غیرخطی با کم‌ترین فراوانی و درستی روشی نامناسب است.



شکل ۷ – نمودار ماهانه‌ی میانگین خطای نسبی برای روش‌های برآورد.

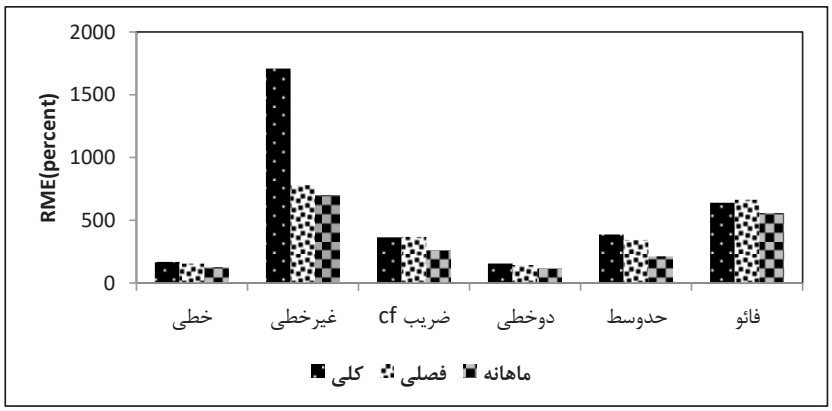
دسته‌بندی داده‌ها به ماهانه و فصلی نسبت به حالت کلی داده‌ها، جذر میانگین مربع‌های خطا را کاهش و دقت مدل‌ها را افزایش می‌دهد (شکل ۸). تفکیک داده‌ها برحسب زمان وقوع تأثیر فراوانی کاهش خطا دارد، و این با نتایج مساعدی و همکاران (۲۰۰۶) در ایستگاه مراوه‌تپه و سبهانی و همکاران (۲۰۱۳) در حوزه‌ی حبله‌رود مطابقت دارد. درصد کاهش میزان جذر میانگین مربع‌های خطا در تفکیک ماهانه بسیار بیش‌تر از تفکیک فصلی است. در حالت بی‌تفکیک داده‌ها، روش دوخطی با جذر میانگین مربع‌های خطای ۴۸۰۰۳/۱۵ مناسب‌ترین روش آماری برآورد بارمعلق است (شکل ۸).

در تفکیک داده‌ها به ماهانه، روش دوخطی و روش غیرخطی خیلی نزدیک به هم، و جذر مربع‌هایشان کم‌ترین بود (به‌ترتیب ۲۱۲۴۷/۸۵ و ۲۰۴۶۸/۷۸)، بنابراین مناسب‌ترین روش برآورد بودند. در تفکیک داده‌ها به فصلی، روش‌های دوخطی و غیرخطی با کم‌ترین خطا روش مناسب دانسته شدند.



شکل ۸ -نمودار تغییرات دقت (جذر میانگین مربع‌های خطا).

بررسی نتایج میانگین خطای نسبی (شکل ۹) که بیانگر درستی روش‌های آماری برآورد بارمعلق است، نشان می‌دهد که دسته‌بندی داده‌ها به ماهانه و فصلی تاثیر زیادی در کاهش خطای نسبی داشته است، که با نتایج احمدی و همکاران (۲۰۱۲) در حوزه‌ی آب‌خیز جاجرود مطابقت دارد. اگر داده‌ها با توجه به یکسان بودن الگوی جریان داده‌های هر دسته (ماه یا فصل) دسته‌بندی شود، درستی روش‌های مختلف منحنی سنجه‌ی رسوب افزایش می‌یابد. با توجه به وضعیت خاص رود سیستان، دسته‌بندی ماهانه‌ی داده‌ها موجب افزایش بیش‌تر درستی در مقایسه با دسته‌بندی فصلی خواهد شد. بهترین روش برآورد بارمعلق بی‌توجه‌به‌زمان وقوع روش دوخطی (میانگین خطای نسبی ۱۵۴/۴۶)، برای تفکیک فصلی داده‌ها روش دوخطی (خطای نسبی ۱۴۲/۷۰)، و برای ماهانه روش دوخطی (خطای نسبی ۱۱۶/۱۴) شناخته شد (با توجه به شکل ۹).



شکل ۹ - نمودار تغییرات صحت (میانگین خطای نسبی).

در روش غیرخطی با جذر میانگین خطای بسیار کم‌تر از دیگر روش‌ها خطای نسبی بیش‌تر، و درستی آن کم‌تر بود، و روشی نامناسب دانسته شد، بنابراین ازمیان روش‌های برآورد بارمعلق، منحنی سنجه‌ی دوخطی با دقت و درستی بیش‌تر هم در تفکیک ماهانه و فصلی داده‌ها و هم بی‌تفکیک داده‌ها برای رودخانه‌ی سیستان انتخاب شد، که با نتایج احمدی و همکاران (۲۰۱۲) در ایستگاه رودک همسو است.

نتیجه‌گیری

استفاده از معادلات منحنی سنجه یکی از روش‌های ساده در برآورد بارمعلق است و این سهولت باعث شده است که کاربرد زیادی را در برآوردهای بارمعلق رودها داشته باشند، اما این معادلات به خاطر بهره‌بردن تنها از یک متغیر، توانایی پیش‌بینی دقیق و صحیح بارمعلق واقعی رودها ندارند؛ بنابراین تلاش شد با اعمال شرایط و تغییراتی در داده‌ها، از جمله دسته‌بندی ماهانه و فصلی داده‌ها ، ضریب‌های اصلاحی، حد وسط دسته‌ها، برازش دو خط به داده‌ها به کمک الگوریتم ژنتیک و سایر روش‌ها، خطای برآورد بارمعلق در رود سیستان کاهش داده شود. براساس نتایج این تحقیق:

– داده‌های آب‌دهی جریان در سال‌های ۱۳۹۴–۱۳۴۹ همگن است.

– دسته‌بندی داده‌ها باعث افزایش دقت همه‌ی روش‌های برآورد بارمعلق بر اساس منحنی سنجه در رود سیستان می‌شود. در روش‌های دسته‌بندی به‌خصوص دسته‌بندی ماهانه خطاها کاهش زیاد و درستی و دقت روش‌ها افزایش می‌یابد.

– روش دوخطی پیشنهادی به‌کمک الگوریتم ژنتیک در همه‌ی روش‌های بی‌تفکیک، تفکیک فصلی و ماهانه به‌ترتیب با میانگین خطای نسبی ۱۵۴/۴۶، ۷۰/۱۴۲ و ۱۱۶/۱۵ بهترین نتیجه را در رود سیستان می‌دهد.

– نامناسب‌ترین روش‌ها در رود سیستان روش فائو و روش غیرخطی است، که کم‌ترین دقت در روش فائو (۱۹۶۸۲۰/۳۰) و کم‌ترین درستی در روش غیرخطی (۱۷۰۸/۲۶) بود.

منابع

Ahmadi H. Malekian A. Abedi R. 2012. The most appropriate statistical method for suspended sediment estimation in rivers (Case study: roodak station of the jajrood basin). Environmental Erosion Researches. 5(2): 78– 88. (In Persian).

Arabkhedri M. Hakimkhani Sh. Varvani J. 2004. The validity of extrapolation methods in estimation of annual mean suspended sediment yield in 17 hydrometric station. Agricultural and Natural Resources Science. 11(3): 123–131. (In Persian).

Arabkhedri M. Sedarati K. Esmaeliauri A. 2017. Trends of suspended load in karaj and jajroud rivers in recent decades. Journal of Watershed Engineering and Management. 9(1): 22–33 (In Persian).

Asselman NEM. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology. 234(4): 228–248.

Balamurugan G. 1989. The use of suspended sediment rating curves in Malaysia: some preliminary considerations. Pertanika. 12(3): 367–376.

Barzegar F. 2005. Comparison of the methods used to estimate suspended sediment load, M.Sc. Thesis of Department of Natural Resources, University of Tehran. 120 p. (In Persian).

Dehghani A. Zanganeh MA. Mosaedi A. Kuhestani N. 2009. Comparison of suspended load estimation with two methods of sediment rating curve and artificial neural network in Dough River of Golestan Province. Agriculture and Natural Resources Science. 16(1): 276–266. (In Persian).

Ferguson RI. 1986. River loads underestimated by rating curves, Water Resources Research. 22: 74–76.

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

Hassanpour F. 2009. The sedimentation effect of hydraulic structures of kohak, Zahak and Sistan on Sistan River bed. First International Conference on Water Crisis, 3 March, 2009, Zabol. 113–122. (In Persian).

Heydarnezhad M. Golmaei SH. Mosaedi A. Ziatabar ahmadi M. 2006. Correction of sediment rating curve and estimating of suspended load in telezang stationIn. The 7th Civil Engineering National Conference. Tehran. 243–252. (In Persian).

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, April, 30 – May 2, Reno, NV.

Hu B. Wang TH. Yang Z. Sun X. 2011.Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) Basin and their Implications. Quaternary International. 230: 34–43.

Jansson MB. 1996. Estimating sediment rating curves of the Reventazon River at palomo using logged mean loads within discharge classes. Journal of Hydrology. 183(4): 227 –241.

Jones KR. Berney O. Carr DP. Barrett EC. 1981. Arid zone hydrology for agricultural development. FAO Irrigation and Drainage. 271 p.

Khanchoul K. Altschul R. Assassi F. 2009. Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Northern Algeria. Arabian Journal of Geosciences. 2(3): 257–271.

Koch RW. Smillie GM. 1986. Comment on "river loads underestimated by rating curves" by R.I. Ferguson. Water Resources Research. 22(13):2121 –2122.

Latifi A. Hassanzadeh Y. 2006. Comparison of different methods of estimating the suspended sediment load and choosing the best method (Case study: Gamasiab River). The Seventh International Seminar on River Engineering, Ahvaz, Khuzestan Water and Power Authority, Chamran University. (In Persian).

Mirzaei M. 2002. Comparison of statistical method of suspended load estimation in rivers (Case study: Gorganrood River). M.Sc. Thesis. University of Tehran. 130 p. (In Persian).

Mirzaei M. Arabkhedri M. Feyzenia S. Ahmadi H. 2005. Comparison of statistical methods to estimate suspended sediment. Journal of Natural Resources. 58 (2): 301–313. (in Persian).

Mohammadi A. Moseadi A. Heshmatpur A. 2007. Determine the best method for estimating the suspended sediment in the river gauging stations Qazzaqli in Gorgan. Agricultural Sciences and Natural Resources. 14 (4): 232–246.

Mohammadi A. 2002. Optimaization of water discharge and suspended load discharge terms in hydrometric station of Gorganrood river. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 90 p. (In Persian).

Mosaedi A. Hashemi Najafi SF. Heydarnezhad M. Nabizade M. Meshkati ME. 2009. Estimation of sediment volume in karaj and Dez reservoir and comparison with hydrographic surveying. Journal of Agriculture Sciences and Natural Resources. 16 (2): 261–272. (In Persian).

Mosaedi A. Mohammadi A. Najafinejad A. Yaghmaiee F. 2006. Optimization of the relation between flow discharge and suspended sediment discharge in selected hydrometric station of Gorgan River. Journal of Natural Resources. 59(2): 331–343.(In Persian).

Office of the Vice President of Strategic Planning and Monitoring. 2007. Erosion and sediment studies in river training guide. Publication. 173p. (In Persian).

Picouet C. Hingray B. Olivery JC. 2001. Empirical and conceptual modeling of the suspended sediment dynamics in large tropical African river: The Upper Niger River Basin. Journal of Hydrology. 250: 19–39.

Piri A. 2003. Optimization of flow and sediment discharge relation in Moarref Emame Basin. M.Sc. Thesis. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. 120 p. (In Persian)

Pour Aghniaei MJ. Domiri Ganji M. Yousef Pour A. Ghermezcheshmeh B. 2008. A review on estimation methods for suspended load (Case study: Seydon Basin). Water Resources Research. 3(3): 73–85. (In Persian)

Rostami M. Ardeshir A. 2001. A suggestion method to improve suspended sediment load estimation in rivers. 3th Conference on Hydraulic of Sediment, Tehran University. 8 p. (In Persian).

Sadeghi SHR. 2005. Equations developed in branches sediment hydrograph rising and falling with the concept of regression. Journal of Research in Water Resources. 1(1): 101–103. (In Persian).

Salehi Taleshi R. 2012. Comparison of the efficiency of sediment rating curves to determine suspended sediment load of Siahrood Mazandaran and estimation of suspended sediment load using a combination of average daily flow, monthly average discharge duration curve. The Second National Conference on Sustainable Agricultural Development and a Healthy Environment. 6 p. (In Persian).

Shafai Bajestan M. 2008. Theoretical and practical principles of hydraulics and sediment transport.

Chamran University Press. 438 P. (In Persian)
Sobhani H. Malekian A. Khodaian S. Gharechelo S. 2013. The comparison of different methods of estimating the suspended sediment load in order to choose the most appropriate method (Case study: Hablehrood Basin). Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi). 100(3): 95–106. (In Persian).
Yousefvand F. Golmaee SH. Ghamarnya H. Ahmadi MZ Vahidi Majd A. 2003. Comparison of different methods to estimate suspended sediment load (Case study: Gharehsou River, Kermanshah). Agricultural Sciences and Natural Resources of the Caspian. 2(4): 52–64. (In Persian).
Zoratipour A. 2007. Comparison of hydrological methods of (statistical) estimation of suspended loads (Case study: Taleghan). M.Sc. Thesis. Department of Natural Resources, University of Tehran. 147p. (In Persian).