Advanced Technologies in Water Efficiency
homepage:https://atwe.razi.ac.ir
Online ISSN:2783-4964

Sediment rating curve estimation using robust regression

Meysam Salarijazi[1]✉ ,Khalil Ghorbani[2], Mohammad Abdolhosseini[3], Amir-Ahmad Dehghani[4]

[1] Corresponding Author, Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: meysam.salarijazi@gmail.com
[2] Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ghorbani.khalil@yahoo.com
[3] Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: abdolhosseini@gau.ac.ir
[4] Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: amirahmad.dehghani@yahoo.com

ABSTRACT

Introduction

The sediment rating curve only requires river discharge data to estimate the suspended sediment load of the river; its equation form is simple and understandable. The mentioned characteristics of the sediment rating curve have led to this method being the most widely used model for estimating the suspended sediment load. Application of sediment rating curve often faced with a high error in the estimation of suspended sediment load; therefore, different studies have been done to reduce this limitation. The most common reform in sediment rating curve has been applied in providing correction factors, but in this study, different estimations of sediment rating curve coefficients using robust estimators have been evaluated. In this study, we assumed that the available data had good accuracy and robust regression can improve the precision of estimates of sediment rating curve. This research aims to apply and assess robust least trimmed square and MM estimation for sediment ration curve's coefficients estimations and compare the results against the application of conventional ordinary least square methods.

Methodology

Estimation of the river sediment load has an essential role in the environmental management of watersheds. Different hydraulic and hydrologic methods have been developed to estimate the sediment load in rivers. However, the sediment rating curve method is widespread considered because of its simple calculation and easy understanding. River suspended sediment load estimation is faced with a high level of error. Like other methods of sediment load estimation, the suspended sediment rating curve method has these limitations. Improving the suspended sediment load estimation can lead to higher reliability of the access to information in environmental and hydrological planning. Application of robust estimations can improve sediment rating curve estimation considering the impact of outliers in the conventional application of ordinary least square estimation of sediment rating curve. Four hydrometry data series were used to investigate the effect of conventional ordinary least square error estimation and MM and least trimmed square robust estimations. Different estimations (considering numerical precision criteria) in four data series are compared.

Results and discussion

Comparison of different estimations for investigated hydrometric recorded data is interpreted using numerical goodness of fit criteria, i.e., RMSE and MAE. The best estimates are MM considering coefficient of determination and least trimmed square assessing MAE, while ordinary least square estimation has the best precision of fitness based on RMSE. Investigation of estimated regression lines using different estimators shows that robust estimation results can be similar or different in comparison with ordinary least square estimation. Also, robust estimation improved suspended sediment load for high discharge values in some cases. In other cases, it led to a decrease in estimation precision for high discharge values and an increase in precision for low discharge values.

Conclusions

The robust regressions, i.e., least trimmed square and MM, can improve ordinary least square estimation in sediment rating curve analysis. The estimated sediment rating curve using robust regression can be led to similar results, overestimation, or underestimation in comparison with the ordinary least square application.

Keywords: Sediment Rating Curve, Estimation, Ordinary Least Squares (OLS), Least Trimmed Square (LTS), MM.

Article Type: Research Article
Article history: Received: 06 February 2022 **Revised:** 15 April 2022 **Accepted:** 30 April 2022 **ePublished:** 29 May 2022

Cite this article: Salarijazi, M., Ghorbani, Kh., Abdolhosseini, M & Dehghani, A.A. (2022). Sediment rating curve estimation using robust regression, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 52-66. DOI: 10.22126/atwe.2022.7472.1013

Publisher: Razi University
© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

برآورد منحنی سنجه رسوب با استفاده از رگرسیون استوار

میثم سالاری جزی[۱]✉، خلیل قربانی[۲]، محمد عبدالحسینی[۳]، امیر احمد دهقانی[۴]

[۱] نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب‌وخاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: meysam.salarijazi@gmail.com

[۲] دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب‌وخاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ghorbani.khalil@yahoo.com

[۳] استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب‌وخاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: abd.phd@gmail.com

[۴] استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب‌وخاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: amirahmad.dehghani@yahoo.com

چکیده

تخمین بار رسوب معلق یکی از اقدامات اولیه برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب و محیط‌زیست است. رویکردهای تخمین بار رسوب معلق را می‌توان به دودسته رویکرد هیدرولیکی و هیدرولوژیکی تقسیم‌بندی کرد. رویکرد هیدرولیکی در اغلب موارد دارای دقت بیشتری نسبت به رویکرد هیدرولوژیکی است اما نیازمند داده‌ها و اطلاعات بیشتر است که دسترسی به این اطلاعات و داده‌ها در اکثر فعالیت‌های عملی محدود است. رویکرد هیدرولوژیکی به دلیل آنکه نیاز به داده‌های کمتری دارد و ساده‌تر است بیشتر مورد توجه قرارگرفته است. منحنی سنجه رسوب شناخته‌شده‌ترین روش در رویکرد هیدرولوژیکی برای تخمین بار رسوب معلق است که یک فرم رابطه توانی (یا فرم خطی بر اساس داده‌های تبدیل لگاریتمی شده) است که بار رسوب معلق را به دبی جریان رودخانه مرتبط می‌سازد. روش متداول تعیین منحنی سنجه استفاده از برآورد حداقل مربعات معمولی است که این برآورد به شکل مؤثر تحت تأثیر داده‌های پرت قرار می‌گیرد. روش‌های برآورد نیرومند روش‌های آماری هستند که برای غلبه بر محدودیت‌های برآورد حداقل مربعات معمولی توسعه پیدا کرده‌اند. در این تحقیق کاربرد دو برآورد MM و حداقل مربعات پیراسته برای تعیین منحنی سنجه موردبررسی قرارگرفته و نتایج با روش متداول حداقل مربعات معمولی مقایسه شده است. برای مقایسه این سه برآوردگر از داده‌های چهار ایستگاه هیدرومتری باغو، النگ دره، انجیراب و جفاکنده در استان گلستان استفاده‌شده که دارای ۳۳ تا ۲۷۹ جفت داده ثبت‌شده هستند. از معیارهای ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا به‌عنوان معیارهای آماری در کنار معیار گرافیکی برای مقایسه نتایج استفاده شده است. بررسی معیارهای آماری دقت برازش نشان داد که معادلات تخمین زده‌شده از برآوردهای رگرسیون استوار کارایی مناسبی دارند و دارای این قابلیت هستند که تخمین حاصل از کاربرد برآورد حداقل مربعات معمولی را بهبود دهند. بررسی گرافیکی نتایج نشان می‌دهد که برآوردهای رگرسیون استوار می‌توانند مشابه یا متفاوت با برآورد حداقل مربعات معمولی باشند.

کلمات کلیدی: منحنی سنجه رسوب، برآورد، حداقل مربعات معمولی، حداقل مربعات پیراسته، MM .

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۷ بهمن ۱۴۰۰ **اصلاح:** ۲۶ فروردین ۱۴۰۱ **پذیرش:** ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۱ **چاپ الکترونیکی:** ۰۸ خرداد ۱۴۰۱

استناد: سالاری جزی، م.، قربانی، خ.، عبدالحسینی، م.، و دهقانی، ا.ا. (۱۴۰۱). برآورد منحنی سنجه رسوب با استفاده از رگرسیون استوار، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۲(۱)، ۶۶-۵۲، شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2022.7472.1013

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان.

مقدمه

ازآنجاکه خسارات وارده توسط رسوبات رودخانه‌ای به طبیعت، کشاورزی و سازه‌های آبی ساخته‌شده در حریم رودخانه‌ها بسیار گسترده و وسیع و زیان‌آور است، برآورد صحیح کمی آن از اهداف مهم محققین و مهندسان در این رابطه است. فرسایش، انتقال رسوب، و رسوب‌گذاری از مباحث بسیار مهم در مدیریت حوزه‌های آبریز هستند. این مسائل را می‌توان با برقراری و توسعه برنامه‌های اندازه‌گیری مقدار رسوب انتقالی در رودخانه‌ها موردبررسی قرارداد. اخیراً از دیدگاه زیست‌محیطی، نقش رسوبات معلق در انتقال عناصر غذایی، سموم و همچنین نشاء یا بی رسوبات و آلاینده‌های غیر نقطه‌ای موردتوجه بیشتری قرارگرفته و ارزش و اهمیت این داده‌ها را دوچندان کرده است. رسوبات رودخانه‌ای به دو صورت منتقل می‌شوند. یا این مواد درون جریان آب غوطه‌ور هستند و همراه با آب درحرکت هستند که به آن‌ها مواد رسوبی معلق گفته می‌شود و به میزان مواد رسوبی معلق را که در واحد زمان از یک مقطع رودخانه عبور کند، بار معلق می‌نامند، یا اینکه به یکی از صور لغزش، غلتیدن، پرش حرکت می‌نمایند که به آن‌ها بار بستر می‌گویند. روش اندازه‌گیری بار معلق که بر پایه اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق و دبی جریان استوار است، روشی مطمئن ولی مستلزم اندازه‌گیری پیوسته است که معمولاً تنها بر ای رودخانه‌های مهم و دائمی مقدور است. ازآنجائیکه بسیاری از حوزه‌های آبریز در اکثر کشورها ازجمله ایران فاقد ایستگاه‌هایی برای رسوب سنجی پیوسته و منظم هستند، استفاده از مدل‌های تجربی و روش‌های آماری برآورد رسوب معلق انتقالی رودخانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. مدل‌های منحنی سنجه که روشی با قابلیت درون‌یابی و نیز برون‌یابی تلقی می‌شوند از روش‌های آماری برآورد رسوب معلق محسوب می‌شود. در مدل‌های منحنی سنجه ارقام محدود مربوط به اندازه‌گیری‌های غلظت رسوب در طول دوره زمانی مورد دلخواه از طریق ایجاد رابطه مابین دبی رسوب و دبی رودخانه و تعمیم این رابطه به آمار جریان رودخانه موردبررسی قرار می‌گیرد. درعین‌حال برآورد رسوب از طریق این معادله همواره با مقداری خطا همراه است. با توجه به محدودیت‌های روابط تجربی (آماری) بین دبی جریان رودخانه و بار رسوب معلق و نیز خطاهای متداول در این روش ضروری است رویکردهای بهبود این‌گونه از روش‌ها موردبررسی قرار بگیرد.

رسوب و بار رسوبی بخش مهمی از مطالعات منابع آب را تشکیل می‌دهد. انتقال رسوب با تأثیرات مختلف بر رودخانه‌ها، مخازن، سیلاب‌دشت‌ها، محیط‌های اکولوژیکی و فرآیندهای زیست‌محیطی موردبررسی محققین در زمینه‌های مختلف قرارگرفته است. بررسی‌های علمی در مورد انتقال رسوب معلق رودخانه‌ها قدمت زیادی دارد و در طی این مدت تکنیک‌ها و روش‌های اندازه‌گیری رسوب نیز توسعه و تکامل پیدا نمود. در زمینه برآورد بار رسوبی مطالعات زیادی انجام شده است. شاید بتوان در یک دسته‌بندی کلی این مطالعات را در دسته تحلیل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی جای داد. تحلیل‌های هیدرولیکی نیازمند به پارامترهای بیشتری برای محاسبات هستند و به همین دلیل نیازمند صرف زمان و هزینه بیشتر نسبت به روش‌های هیدرولوژیکی هستند. شاید بتوان گفت به دلایل محدودیت‌های روش‌های هیدرولیکی، اهمیت روش‌های هیدرولوژیکی نسبت به روش‌های هیدرولیکی در برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها بیشتر است. دلیل این امر این است که روش‌های هیدرولوژیکی نسبت به روش‌های هیدرولیکی در عمل برای محاسبه ساده‌تر هستند و نیاز به‌صرف هزینه و زمان کمتری دارند و یک برآورد مناسب ارائه می‌کنند. به علت اهمیت روش‌های هیدرولوژیکی تحقیقات زیادی بر این زمینه متمرکز شده است و روش‌های پیشنهادی با در نظر گرفتن ضرایب اصلاحی متنوع منجر به بهبود روش‌های هیدرولوژیکی شده است. با توجه به محدودیت‌های نظری روش‌های متداول هیدرولوژیکی این تحقیق تلاش می‌کند تا در رویکردی متفاوت، روش رگرسیون استوار را در برآورد منحنی سنجه برآورد بار رسوب معلق ارزیابی کند.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در زمینه بکار گیری منحنی سنجه رسوب در برآورد مقدار بار رسوب معلق تحقیقات متفاوتی در نقاط مختلف دنیا انجام‌شده است. فرگوسن[1](۱۹۸۷) در تحقیقات خود نشان داده است که مدل منحنی سنجه توانی بار رسوب معلق را حدود ۵۰ درصد کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌کند. هرویتز[2](۲۰۰۲) با بررسی داده‌های متعلق به رودخانه میسیسیپی به این نتیجه رسید که کاربرد منحنی سنجه برای تخمین بار رسوب منجر به برآورد کمتر از میزان واقعی می‌شود و هرچه طول دوره آماربرداری بیشتر و فواصل بین اندازه‌گیری‌ها

[1] Ferguson
[2] Horowitz

کمتر باشد مقادیر خطا در برآورد بار رسوب کمتر خواهد شد. اویلون و آچیت[1](۲۰۰۷) در مطالعه‌ای دیگر نشان دادند که مقادیر پیش‌بینی‌شده بار رسوب معلق با استفاده از روابط رگرسیونی ۲۰تا۲۵در صد بیشتر از مقادیر واقعی است، نیز طبق داده‌های در دسترس برآورد دقیق‌تر نیاز به دوره‌های طولانی‌مدت ثبت داده دارد و در ادامه پیشنهاد دادند تغییرات آب و هوایی نیز در تخمین بار رسوب معلق در نظر گرفته شود. صادقی و همکاران (۲۰۰۸) در ارزیابی و تفسیر منحنی‌های سنجه رسوب برای یک منطقه جنگل‌کاری شده در ژاپن و با بکار گیری داده‌های ثبت‌شده نشان داده‌اند، استفاده از تبدیل ریشه چهارم داده‌های دبی جریان و بار رسوب معلق در منحنی سنجه رسوب عملکرد مناسبی داشته و استفاده از این مدل برای برآورد رسوب و جریان دبی رودخانه‌ها در مناطق کوچک موفق ارزیابی نمودند. همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که ارتباط بین بار رسوب معلق و دبی جریان به عواملی مانند شرایط فیزیکی منطقه و خصوصیات خاک منطقه جنگل‌کاری شده بستگی داشته است.

اریب منحنی سنجه از دو عامل منشأ می‌گیرد. 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 اریب، ناشی از عمل برون‌یابی برای برآورد رسوب دبی‌های بالاست که در ارتباط با کمیت و کیفیت داده‌ها بوده و باعث می‌شود رسوب برآوردی خطای زیادی داشته باشد (آیدانزا و ناپلیتانو[2] ۲۰۰۶). در این زمینه تحقیقات متمرکز بر ارائه ضرایب اصلاحی بوده است. در تحقیقی روش فائو توسط جونز و همکاران (۱۹۸۱) برای تعدیل ارقام و نزدیک کردن مقادیر محاسباتی به مقادیر مشاهده‌ای برای مناطق خشک و نیمه‌خشک مطرح‌شده است. در این روش ضریب اول منحنی سنجه رسوب اصلاح می‌شود. همچنین روش تخمین گر شبه بیشینه درست نمایی توسط فرگوسن (۱۹۸۷) برای اصلاح اثر تبدیل لگاریتمی با فرض توزیع نرمال خطاهای باقی‌مانده به کار گرفته شده است و بیش‌تر در مورد اریب منفی ذاتی منحنی سنجه به‌کاربرده می‌شود. روش اصلاح‌گر توسط دوآن[3](۱۹۸۳) در مورد برازش جذر مربع و یا جذر مکعب داده‌ها استفاده می‌شود. این روش که به ضریب اصلاحی غیر پارامتری نیز معروف است با رد توزیع نرمال خطاهای باقی‌مانده، برای حذف اریبی داده‌ها ارائه‌شده است. برآوردگر نااریب با حداقل واریانس توسط کوهن و همکاران[4](۱۹۸۹) برای برازش لگاریتم خطی ارائه‌شده است. در این روش برای هر یک از مقادیر دبی رسوب مشاهده‌ای، یک ضریب اصلاحی محاسبه می‌شود و میانگین آن‌ها به‌عنوان ضریب اصلاحی کلی انتخاب می‌گردد. همچنین کائو و همکاران[5](۲۰۰۵) برای تصحیح منحنی‌های سنجه رسوب در رودخانه‌های تایوان از یک ضریب اصلاحی بر مبنای تحلیل باقی‌مانده‌ها استفاده کرده‌اند. تحقیقات اشاره‌شده از تحقیقات پایه و مبنا در این بخش هستند که تأکید بر برآورد منحنی سنجه رسوب دارند و بنابراین لازم است تلاش شود تا نتیجه هر یک از اصلاحات فوق بر ارزیابی بار رسوب سالانه موردبررسی قرار گیرد. سالاری جزی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر کاربرد روش‌های شبه بیشینه درست‌نمایی و ضریب اصلاحی را در بهبود برآورد منحنی سنجه رسوب در سری داده‌های منتخب در استان گلستان موردبررسی قرار داده و بهبود عملکرد منحنی سنجه رسوب تحت تأثیر کاربرد روش‌های بیان‌شده را نتیجه‌گیری نموده‌اند. مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاجی فازی–عصبی تطبیقی در مقایسه با منحنی سنجه رسوب جهت تخمین بار رسوب معلق و با به‌کارگیری داده‌های بلندمدت رودخانه تلار مورد ارزیابی قرار گرفت (امامقلی زاده و کریمی، ۲۰۱۹). نتایج این مطالعه بیانگر برآوردهای قابل‌اطمینان مدل‌های هوش مصنوعی بخصوص برنامه‌ریزی بیان ژن در مقایسه با منحنی سنجه رسوب بوده است.

طبق بررسی‌های انجام‌شده توسط محققین این مطالعه کاربرد روش‌های رگرسیون استوار در مطالعات مهندسی آب و محیط‌زیست بسیار محدود بوده است و تاکنون مطالعه‌ای در مورد کارایی این روش در بهبود احتمالی تخمین بار رسوب معلق رودخانه انجام‌نشده است. بنابراین در این مطالعه کاربرد و بررسی دو روش متفاوت از رویکرد رگرسیون استوار در مقایسه با منحنی سنجه متداول، برای تخمین بار رسوب معلق را می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین نوآوری تحقیق در نظر گرفت. با توجه به مطالب بیان‌شده می‌توان به‌طور خلاصه اهداف تحقیق را به‌صورت موارد ذیل برشمرد: مروری بر تحقیقات انجام‌شده در زمینه منحنی سنجه رسوب، بررسی و تخمین منحنی سنجه رسوب با استفاده از تبدیل داده‌ها و برآورد متداول حداقل مربعات معمولی، بررسی و تخمین منحنی سنجه رسوب با استفاده از

[1] Achite & Ouillon
[2] Iadanza & Napolitano
[3] Duan
[4] Cohn et al
[5] Kao et al

تبدیل داده‌ها و برآورد استوار MM، بررسی و تخمین منحنی سنجه رسوب با استفاده از تبدیل داده‌ها و برآورد استوار حداقل مربعات پیراسته و مقایسه نتایج برآورد مدل خطی منحنی سنجه رسوب در برآوردهای مختلف حداقل مربعات معمولی، MM و حداقل مربعات پیراسته بر اساس معیارهای عددی و همچنین گرافیکی دقت برازش.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورداستفاده

مطالعه کارایی روش‌های مختلف برآورد بار رسوب معلق رودخانه نیازمند آن است که نتایج حاصل از اعمال هر یک از این روش‌ها، بر سری‌های مختلف داده‌های ثبت‌شده که دارای ویژگی‌های مختلف هیدرولوژیکی و آماری است، بررسی گردد. بدین منظور در این مطالعه از چهار سری داده ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری باغو، انجیراب، النگ دره و جفاکنده در استان گلستان استفاده‌شده است. مشخصه‌های هر یک از سری‌های مورداستفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱. مشخصه‌های سری‌های داده مورداستفاده

نام ایستگاه	تعداد مشاهدات	میانگین دبی جریان (CMS)	میانگین بار رسوب معلق (Ton/Day)
باغو	۲۷۹	۰/۴۴۵۳	۱۷/۲۴۲۶
انجیراب	۳۳	۰/۴۸۱۹	۴۶/۱۹۱۸
النگ دره	۱۲۲	۰/۱۳۷۷	۰/۷۲۶۶
جفا کنده	۶۲	۰/۵۷۰۵	۵۲۷/۲۶۰۶

برآورد حداقل مربعات معمولی (تک متغیره)

یک مدل رگرسیون خطی معمولی برای متغیر مستقل X و متغیر وابسته Y به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$Y_i = \beta + \alpha x_i + e_i \qquad i=1.2.\ldots.n \qquad (۱)$$

که در آن Y_i متغیر تصادفی وابسته iام، β,α پارامترهای مدل رگرسیون و e_i خطای تصادفی و n تعداد جفت مشاهدات (x, y)است. دو پارامتر α و β را ضرایب رگرسیون می‌نامند که β عرض از مبدأ و α شیب‌خط رگرسیون است. در رگرسیون حداقل مربعات معمولی برای برآورد پارامترهای مدل، مجموع مربعات خطا (باقیمانده‌ها) و یا به عبارتی مجموع مربعات تفاوت بین مقادیر مشاهده‌شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده حداقل می‌گردد. این فرم ریاضی را می‌توان به‌صورت ذیل نمایش داد.

$$\min (Y - \hat{Y})^2 = \min \sum_{i=1}^{n} e_i^2 \qquad (۲)$$

ضرایب رگرسیون با روابط زیر برآورد می‌گردند.

$$\alpha = \frac{\sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \qquad (۳)$$

$$\beta = \bar{y} - \alpha \bar{x} \qquad (۴)$$

که در روابط مذکور $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ و $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$ هستند. بررسی فرضیات مرتبط با باقیمانده‌های مدل معیار مهمی در تعیین صحت مدل خطی است که در اغلب موارد نادیده انگاشته می‌شود. این مفروضات عبارت‌اند از اینکه e_i ها دارای توزیع نرمال، مستقل از یکدیگر و دارای

واریانس یکسان هستند. همچنین در صورت عدم صحت مدل خطی تعدادی مدل‌های غیرخطی ساده نیز وجود دارند که با استفاده از تبدیل‌های ریاضی به مدل خطی تبدیل می‌شوند.

برآورد حداقل مربعات پیراسته[1]

رگرسیون حداقل مربعات پیراسته یکی از روش‌های شناخته‌شده در رویکرد رگرسیون استوار است (مائس و همکاران[2] ۲۰۰۹–چان و همکاران[3] ۲۰۱۰). روش برآورد استوار حداقل مربعات پیراسته توسط روسیوف[4](۱۹۸۴) به فرم ذیل توسعه داده و ارائه گردید (شوماخر و همکاران[5] ۲۰۰۲–وام و ویداکوچ[6] ۲۰۰۷).

$$f = \min \sum_{i=1}^{h} e_i^2 \qquad (۵)$$

که $e_{(1)}^2, e_{(2)}^2, \ldots, e_{(n)}^2$ مربعات باقیمانده‌های (خطاهای) مرتب‌شده از مقادیر کوچک به مقادیر بزرگ هستند و h باید بر اساس پیراستن مقادیر داده‌ها براوردگردد. h ثابت پیرایش است و در بازه $(n/2 \le h \le n)$ قرار دارد و به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که بزرگ‌ترین $n-h$ باقیمانده نتواند برآورد مدل را تحت تأثیر قرار دهد (وام و ویداکوچ، ۲۰۰۷). با توجه به چینش داده‌های پرت و نیز مقدار h رگرسیون حداقل مربعات پیراسته می‌تواند خیلی کارآیی داشته باشد. درواقع اگر مقادیر داده‌های پرت کاملاً پیراسته شوند این روش ازنظر محاسباتی معادل با رگرسیون خطی معمولی است. نیز اگر داده‌های پرت در سری داده‌ها موجود باشد که توسط رگرسیون حداقل مربعات پیراسته نتواند پیرایش شود این روش کارا و مؤثر نخواهد بود. همچنین اگر تعداد بیشتری از داده‌ها نسبت به داده‌های پرت در فرایند محاسبات پیرایش گردند در آن صورت اطلاعات مهمی در محاسبات از دست خواهد رفت (شوماخر و همکاران، ۲۰۰۲).

برآورد MM

هوبر (۱۹۷۳ و ۱۹۸۱) دسته‌ای از برآوردگرها را بانام برآوردگر M[7] توسعه داد که ایده اصلی آن جابجایی مربعات باقیمانده‌ها با تابعی دیگر از باقیمانده‌ها به‌صورت ذیل است.

$$f = \min \sum_{i=1}^{h} \rho e_i^2 \qquad (۶)$$

که یک تابع متقارن با یک حداقل یکتا در صفر است. برآورد M با استفاده از حداقل مربعات دوباره وزن دهی شده تکراری (IRLS[8]) محاسبه می‌شود. درروش IRLS ابتدا یک برازش اولیه محاسبه می‌شود و سپس یک مجموعه از وزن‌ها بر مبنای برازش اولیه محاسبه می‌گردد. تکرارها ادامه می‌یابد تا اینکه یک تعداد معین از تکرارها پایان پذیرد یا یک معیار همگرایی برآورده شود. برآورد MM یک نوع خاصی از برآورد M است که توسط یوهای[9](۱۹۸۷) توسعه داده شد. در برآورد MM یک برآورد M استوار به‌صورت ذیل است.

$$\sum_{i=1}^{n} \rho \frac{y_i - x_i^T \beta}{\hat{S}}; c \qquad (۷)$$

که S یک برآورد مقیاس استوار برای باقیمانده‌ها است و $\rho(.;c)$ یک تابع وزن محدب باقیمانده‌ها با ثابت میزان‌سازی[10] c است که یک تابع خسارت محدودشده متقارن است. یک انتخاب جایگزین برای برآورد به‌صورت زیر است.

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \psi \frac{y_i - x_i^T \beta}{\hat{S}}; c \qquad (۸)$$

---

[1] Least Trimmed Squares (LTS)
[2] Maes et al
[3] Chun et al
[4] Rousseeuw
[5] Schumacker et al
[6] Kvam & Vidakovic
[7] M-Estimator
[8] Iteratively Reweighted Least Squares
[9] Yohai
[10] Tuning

در این رابطه ψ یک تابع یکنواخت است. برآورد MM شامل فرایند سه مرحله‌ای است. در مرحله اول یک برآوردگر تفکیک بالا استوار محاسبه می‌شود. برآورد S برای گام اول استفاده می‌شود. در گام بعدی یک برآورد M استوار با استفاده از باقیمانده برآورد S گام اول محاسبه می‌شود. در گام سوم پارامترهای نهایی برآورد M رگرسیون محاسبه می‌شود.

معیارهای دقت برازش

برای مقایسه نتایج برآوردهای مختلف نیاز به معیارهایی است تا بتوان نتایج برآوردهای مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود. در این مطالعه برای ارزیابی مقایسه برآوردهای مختلف از معیارهای ذیل استفاده می‌گردد.

$$R^2=\frac{\left[\sum X_i y_i-\frac{(x_i)(y_i)}{n}\right]^2}{\left[\sum x_i^2-\frac{(\sum x_i)^2}{n}\right]\left[\sum y_i^2-\frac{(\sum y_i)^2}{n}\right]} \quad (۹)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{(y_i-\hat{y}_i)^2}{n}} \quad (۱۰)$$

$$MAE=\frac{\sum_{i=1}^{n}|y_i-\hat{y}_i|}{n} \quad (۱۱)$$

ضریب تبیین R^2 معیاری است که قدرت رابطه خطی بین متغیر مستقل x و متغیر وابسته y را نمایش می‌دهد. مقدار این معیار بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد و هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده این است که رابطه خطی به شکل مناسبی می‌تواند رابطه بین متغیر وابسته و مستقل را نمایش بدهد. ریشه میانگین مربعات خطا[1] RMSE یک معیار دقت برازش مقایسه‌ای است که ازنظر عددی دارای حداقل برابر با صفر است اما از سمت مقادیر بالاتر محدودشده نیست. معیار میانگین قدر مطلق خطا یا MAE[2] معیاری است که مانند RMSE از کران پایین به صفر محدود می‌شود اما از کران بالا محدودشده نیست. ویژگی مشخص این معیار آن ست که انتظار خطا را به‌طور متوسط نشان می‌دهد و از این نظر برای پژوهشگران اهمیت زیادی دارد.

یافته‌ها

درک کارایی کاربرد هر یک از روش‌های برآورد حداقل مربعات معمولی ، MM و حداقل مربعات پیراسته نیازمند کاربرد آن در سری داده‌های واقعی و تفسیر نتایج آن‌ها است. در این مطالعه از سری داده‌های چهار ایستگاه هیدرومتری شامل النگ دره، انجیراب، باغو و جفاکنده استفاده‌شده است و نتایج به‌دست‌آمده برحسب معیارهای گرافیکی و عددی دقت برازش تفسیر شده است. در ذیل به تفکیک سری داده‌های موردبررسی نتایج به‌دست‌آمده از اعمال هر یک از برآوردهای حداقل مربعات معمولی ، MM و حداقل مربعات پیراسته ارائه‌شده است.

بررسی نتایج سری داده‌های النگ دره

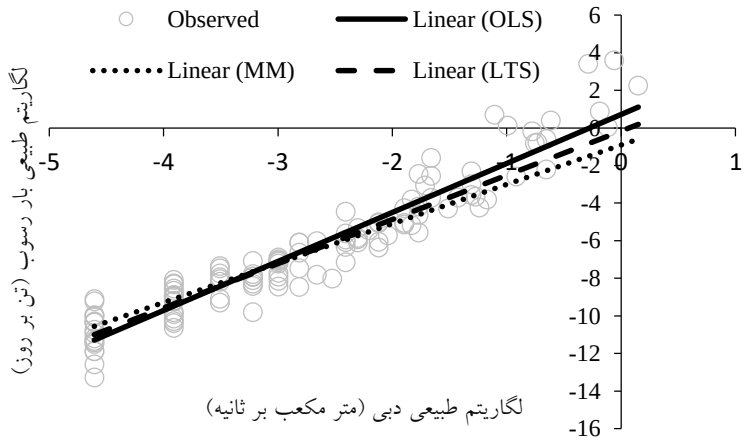
معیارهای عددی دقت برازش و نیز شیب و عرض ا ز مبدأ حاصل از برازش خطوط رگرسیونی با برآوردهای مختلف برای سری داده‌های النگ دره در جدول ۲ ارائه شده است و مدل‌های خطی تخمین زده‌شده از برآوردهای مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مقدار ضرایب نشان می‌دهد برآورد حداقل مربعات معمولی منجر به بیشترین تخمین شیب خط شده است اما دو برآورد MM و حداقل مربعات پیراسته مقدار شیب‌خط را کمتر از برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین زده‌اند که در این میان مقدار شیب‌خط تخمین زده‌شده از برآورد حداقل مربعات پیراسته کمتر از مقدار متناظر در برآورد حداقل مربعات معمولی و بیشتر از مقدار متناظر در برآورد MM است. همچنین برآورد حداقل مربعات معمولی منجر به تخمین بیشترین مقدار عرض از مبدأ شده است. برآوردهای حداقل مربعات پیراسته و MM به ترتیب در رتبه‌های بعدی جای می‌گیرند. از طرفی دیگر تنها مقدار عرض از مبدأ تخمین زده‌شده توسط برآورد حداقل مربعات معمولی دارای علامت مثبت است و مقادیر عرض از مبدأ تخمین زده‌شده توسط برآوردهای رگرسیون استوار برخلاف برآورد حداقل مربعات معمولی دارای علامت

[1] Root Mean Square Error
[2] Mean Absolute Error

منفی هستند. همچنین مشخص است تفاوت تخمین شیب خط بین برآوردهای حداقل مربعات معمولی و MM محسوس است. بررسی ضریب تبیین بیانگر آن ست که بهترین تخمین‌های خطوط رگرسیون به ترتیب به‌صورت MM، حداقل مربعات پیراسته و حداقل مربعات معمولی است در حالیکه معیار ریشه میانگین مربعات خطا بهترین تخمین‌های خطوط رگرسیون را به‌صورت حداقل مربعات معمولی ، حداقل مربعات پیراسته و MM در نظر می‌گیرد. همچنین معیار میانگین قدر مطلق خطا بهترین تخمین‌ها را به‌صورت حداقل مربعات پیراسته ، حداقل مربعات معمولی و MM نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن معیارهای فوق درمجموع می‌توان کاربرد برآوردهای رگرسیون استوار را در این سری منجر به بهبود تخمین مدل خطی دآن است. بررسی شکل ۱ نیز بیانگر آن است که شیب خطوط رگرسیون در برآوردهای مختلف دارای اختلاف محسوس است و برآوردهای رگرسیون استوار در مقادیر بالاتر دبی مقدار رسوب را کمتر و در مقادیر کمتر دبی مقدار دبی رسوب را بیشتر از برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین می‌زنند.

جدول ۲. ضرایب مدل خطی و معیارهای عددی دقت برازش (النگ دره)

	a	b	R^2	RMSE (Ton/Day)	MAE(Ton/Day)
OLS	۲/۶۰۶۳	۰/۷۱۵۹	۰/۹۰۷۱	۱/۰۵۹۲	۰/۸۳۵٤
MM	۲/۰۹۲۹	-۰/۹۱۳۵	۰/۹۱۵۳	۱/۲۵۹۰	۰/۸۷٤۲
LTS	۲/۳۵٤۵	-۰/۱۵۳۹	۰/۹۱۰٦	۱/۱۱۸۹	۰/۸۳۱۳



شکل ۱. مدل‌های خطی تخمین زده‌شده با برآوردهای مختلف (النگ دره)

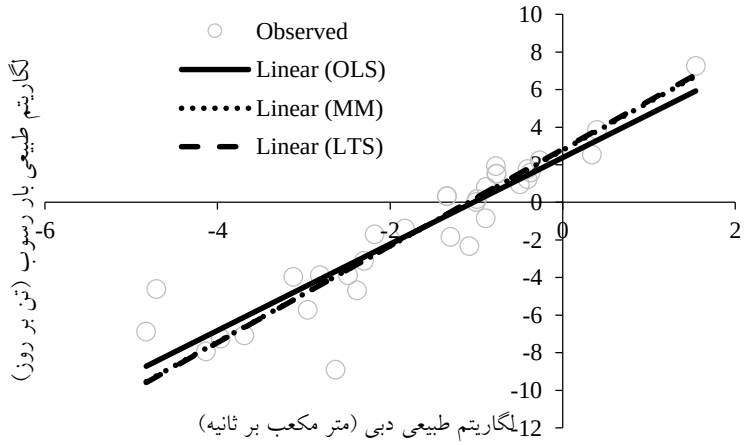
بررسی نتایج سری داده‌های انجیراب

معیارهای عددی دقت برازش به همراه ضرایب مدل خطی برای مدل‌های خطی تخمین زده‌شده توسط برآوردهای حداقل مربعات معمولی ، MM و حداقل مربعات پیراسته اعمال‌شده بر سری داده‌های ایستگاه هیدرومتری انجیراب در جدول ۳ ارائه‌شده است. بررسی شیب خط نشان می‌دهد که به ترتیب برآوردهای حداقل مربعات پیراسته ، MM و حداقل مربعات معمولی دارای بیشترین بزرگی شیب خط تخمین زده‌شده بوده‌اند و همین الگو در تخمین مقدار عرض از مبدأ برای خطوط مختلف رگرسیون نیز برقرار بوده است. بررسی معیار ضریب تبیین نشان می‌دهد هر دو برآورد رگرسیون استوار منجر به بهبود دقت مدل خطی تخمین زده‌شده نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی شده‌اند و برآورد حداقل مربعات پیراسته کمی بهتر از برآورد MM بوده است. بررسی معیار ریشه میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که برآوردهای رگرسیون استوار دارای دقت کمتر از برآورد حداقل مربعات معمولی بوده است. اما معیار میانگین قدر مطلق خطا برخلاف معیار ریشه میانگین مربعات خطا و همسو با معیار ضریب تبیین نشان می‌دهد که برآوردهای رگرسیون استوار منجر به بهبود دقت برازش در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی شده‌اند و در بین روش‌های موردبررسی رگرسیون استوار برآورد حداقل مربعات پیراسته دارای دقت کمی بهتر نسبت به برآورد MM است. نمودارهای خطوط رگرسیون تخمین زده‌شده از برآوردهای مختلف برای سری داده‌های ایستگاه هیدرومتری انجیراب

در شکل ۲ نشان داده‌شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد خط تخمین زده‌شده از برآورد MM دارای وضعیتی بین خطهای تخمین زده‌شده از برآوردهای حداقل مربعات معمولی و حداقل مربعات پیراسته است که البته به برآورد حداقل مربعات پیراسته بسیار نزدیک‌تر است. مطابق شکل مشخص است که در مقادیر بالاتر دبی رودخانه در سری داده انجیراب هر دو برآورد رگرسیون استوار منجر به برآورد بیشتر دبی بار رسوب معلق در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی شده‌اند و به عبارتی می‌توانند به شکل مناسب‌تری به تخمین بار رسوب معلق در شرایط سیلابی نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی بپردازند. البته باید توجه داشت که در مقادیر پایین دبی جریان رودخانه در سری انجیراب برآوردهای MM و حداقل مربعات پیراسته مقدار بار رسوب معلق را کمتر از برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین می‌زنند.

جدول ۳. ضرایب مدل خطی و معیارهای عددی دقت برازش (انجیراب)

	a	B	R^2	RMSE (Ton/Day)	MAE(Ton/Day)
OLS	۲/۲۹۹۱	۲/۳۷۳۱	۰/۸۲۲٤	۱/۴۵۶۸	۱/۰۱٤۳
MM	۲/۵۵۰۳	۲/۷۷۰٦	۰/۸٤۵۹	۱/۵۰۵۱	۰/۹۷۲۵
LTS	۲/۵۷۱۵	۲/۸۲۲۵	۰/۸٤٦۸	۱/۵۱۳۳	۰/۹۷۱۷



شکل ۲. مدل‌های خطی تخمین زده‌شده با برآوردهای مختلف (انجیراب)

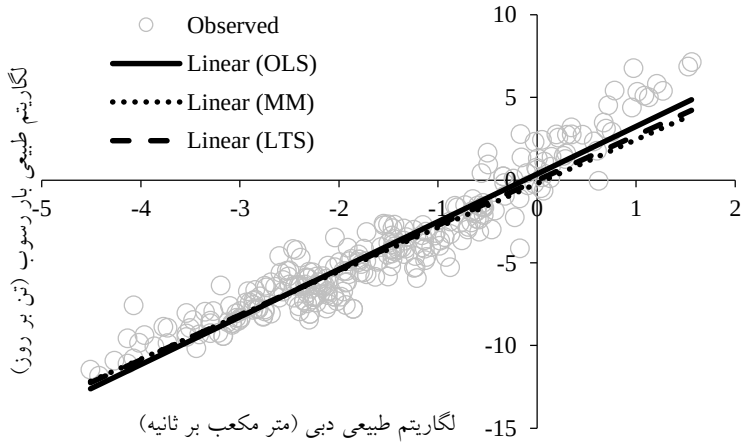
بررسی نتایج سری داده‌های باغو

معیارهای عددی دقت برازش برآوردهای مختلف مدل خطی بکار گرفته‌شده در این تحقیق یعنی برآوردهای حداقل مربعات معمولی، MM و حداقل مربعات پیراسته در جدول ۴ ارائه‌شده است. بررسی مقدار شیب‌خط مدل خطی به‌روشنی نشان می‌دهد که شیب‌خط تخمین زده‌شده توسط برآوردهای رگرسیون استوار کمی کمتر از مقدار تخمین زده‌شده توسط برآورد حداقل مربعات معمولی است. البته باید در نظر داشت که برآورد حداقل مربعات پیراسته منجر به تخمین مقدار بزرگ‌تر شیب در مقایسه با برآورد MM شده است هرچند این تفاوت آن‌چنان محسوس نیست. از طرف دیگر بررسی مقدار عرض از مبدأ تخمین زده‌شده توسط برآوردهای مختلف نشان‌دهنده مقادیر منفی برای برآوردهای رگرسیون استوار و مقدار مثبت برای برآورد حداقل مربعات معمولی است. بررسی معیار ضریب تبیین نشان می‌دهد هر دو برآورد رگرسیون استوار دقت برازش را نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی کاهش داده‌اند که البته این کاهش بسیار جزئی است و در بین برآوردهای رگرسیون استوار دقت برآورد حداقل مربعات پیراسته اندکی بیشتر از برآورد MM بوده است. بررسی معیار ریشه میانگین مربعات خطا نیز منجر به نتایج مشابه با بررسی معیار ضریب تبیین می‌شود اما بررسی معیار میانگین قدر مطلق خطا بیانگر این نکته است که تخمین صورت گرفته بر اساس برآورد حداقل مربعات پیراسته موجب بهبود نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی شده اما برآورد MM نتیجه ضعیف‌تری نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی داشته است. البته تفاوت بین مقادیر مختلف این معیار در برآوردهای مختلف بسیار جزئی است. بررسی شکل ۳ به‌وضوح نشان می‌دهد که برآوردهای صورت گرفته با کاربرد رگرسیون استوار دارای تفاوت با برآورد صورت گرفته از طریق کاربرد

روش حداقل مربعات معمولی است و بین برآوردهای رگرسیون استوار یعنی برآوردهای حداقل مربعات پیراسته و MM تفاوت جزئی وجود دارد. از طرفی برآورد حداقل مربعات پیراسته مدل خطی را بین برآوردهای حداقل مربعات معمولی و MM اما نزدیک‌تر به MM قرار می‌دهد. در مقادیر بالاتر دبی جریان رودخانه مقدار بار رسوب معلق تخمین شده از طریق برآورد حداقل مربعات معمولی به مقادیر مشاهداتی نزدیک‌تر است اما در مقادیر کمتر دبی جریان رودخانه این تخمین‌های زده‌شده از طریق برآورد MM است که نسبت به سایر برآوردها به مقادیر مشاهداتی بار معلق رسوب نزدیک‌تر است.

جدول ٤. ضرایب مدل خطی و معیارهای عددی دقت برازش (باغو)

	a	b	R^2	RMSE (Ton/Day)	MAE(Ton/Day)
OLS	۲/۸۷۵۵	۰/۳۶۰۱	۰/۹۰۱۹	۱/۲۰۸۵	۰/۹٤٤۰
MM	۲/٦۵۱۵	-۰/۲۰۵۷	۰/۸۹۱۵	۱/۲۵۷۸	۰/۹٤۸۲
LTS	۲/۷۱۲۳	-۰/۰۱٤۹	۰/۸۹۵٦	۱/۲۳۱۱	۰/۹٤۰۷



شکل ۳. مدل‌های خطی تخمین زده‌شده با برآوردهای مختلف (باغو)

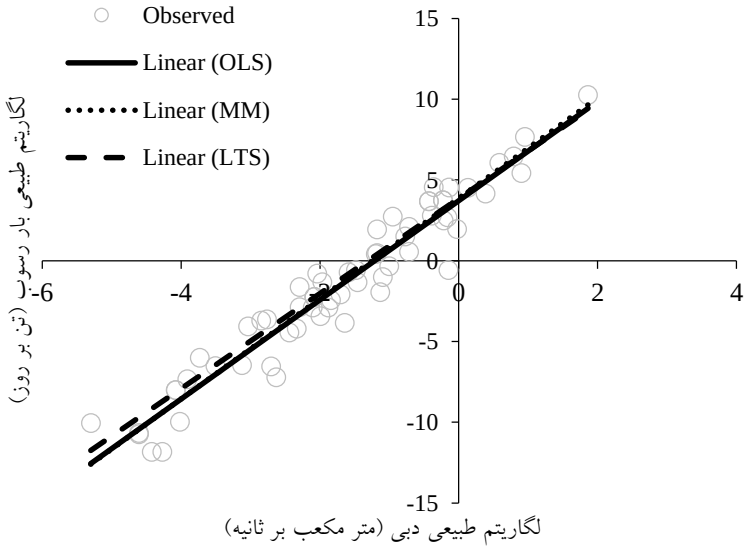
بررسی نتایج سری داده‌های جفاکنده

در این مطالعه برای مورد چهارم داده‌های واقعی مورد بررسی از سری داده‌های ایستگاه هیدرومتری جفاکنده استفاده شد. نتایج عددی حاصل از کاربرد برآوردهای مختلف برای تخمین معادله فرم خطی منحنی سنجه رسوب در جدول ۵ ارائه‌شده است که شامل ضرایب معادله خط و سه معیار عددی دقت برازش است. بر طبق نتایج مقدار بزرگی شیب‌خط تخمین زده‌شده در برآورد MM دارای بیشترین مقدار در این سری داده است و بعد از آن به ترتیب ضرایب تخمین زده‌شده از برآوردهای حداقل مربعات معمولی و حداقل مربعات پیراسته قرار می‌گیرند. به‌وضوح مشخص است که از این حیث این نتایج دارای تفاوت با سری‌های داده‌های قبلی است زیرا در موارد قبلی شیب‌خط تخمین زده‌شده با برآورد حداقل مربعات معمولی از هر دو شیب‌خط تخمین زده‌شده با برآوردهای رگرسیون استوار بیشتر یا کمتر بوده است در حالیکه در این سری داده این موضوع روی نداده است بنابراین می‌شود نتیجه گرفت که لزوماً برآوردهای رگرسیون استوار در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی منجر به شیب خط کاملاً متفاوت و با تغییرات محسوس نمی‌شوند. اگرچه از نظر تئوری این موضوع کاملاً مشخص است اما این تجربه در سری داده‌های جفاکنده نیز درواقع تأییدی ساده بر این موضوع است. بررسی بزرگی مقدار عرض از مبدأ تخمین زده‌شده در برآوردهای مختلف مشخص می‌کند که هر دو برآورد رگرسیون استوار منجر به تخمین مقادیر بزرگ‌تر عرض از مبدأ در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی شده‌اند و نیز از طرف دیگر بزرگی مقدار عرض از مبدأ تخمین زده‌شده توسط برآورد MM به مقدار جزئی از مقدار متناظر تخمین زده‌شده توسط برآورد حداقل مربعات پیراسته بیشتر است. بررسی معیار دقت برازش ضریب تبیین نشان می‌دهد که برآورد

MM از خانواده برآورد رگرسیون استوار منجر به افزایش دقت تخمین مدل خطی نسبت به برآورد متداول حداقل مربعات معمولی شده در حالیکه برآورد حداقل مربعات پیراسته به مقدار جزئی دقت برازش را نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی کاهش داده است. از طرفی بررسی معیار ریشه میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که اگرچه تفاوت دقت برازش برآوردهای حداقل مربعات معمولی و MM کاملاً جزئی است اما این برآورد حداقل مربعات معمولی است که منجر به بهترین دقت برازش شده و برآورد حداقل مربعات پیراسته نتیجه ضعیف‌تری نسبت به دو برآورد دیگر داشته است. اما بررسی معیار دقت برازش میانگین قدر مطلق خطا بیان می‌کند که هر دو برآورد رگرسیون استوار یعنی برآوردهای MM و حداقل مربعات پیراسته منجر به‌دقت بیشتر برازش در مقایسه با حداقل مربعات معمولی در این سری شده‌اند. با در نظر گرفتن معیارهای بیان‌شده می‌توان نتیجه گرفت درمجموع برآوردهای رگرسیون استوار موجب بهبود دقت برازش در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی در برآورد مدل خطی منحنی سنجه رسوب در سری داده‌های ایستگاه جفاکنده شده‌اند. مدل‌های خطی تخمین زده‌شده با استفاده از برآوردهای موردمطالعه در این تحقیق یعنی حداقل مربعات معمولی ، MM و حداقل مربعات پیراسته با کاربرد سری داده‌های ایستگاه هیدرومتری جفا کنده در شکل ۴ به نمایش در آمده است. بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد مقادیر عرض از مبدأ به یکدیگر بسیار نزدیک هستند و تخمین‌های بار رسوب معلق در مقادیر بالاتر دبی جریان توسط سه برآورد موردبررسی در این مطالعه دارای مقادیر نزدیک به یکدیگر هستند اگرچه باید در نظر گرفت تفاوت محدودی که بین تخمین‌های برآوردهای مختلف وجود دارد منجر می‌شود که در دبی‌های بالاتر جریان رودخانه برآورد MM دارای تخمین‌های بالاتر از برآورد حداقل مربعات معمولی و برآورد حداقل مربعات معمولی دارای تخمین‌های بالاتری از برآورد حداقل مربعات پیراسته است هرچند این اختلاف جزئی است. اما اگر مقادیر پایین‌تر دبی جریان رودخانه در نظر گرفته شود مشخص می‌گردد که تخمین‌های حاصل از برآوردهای حداقل مربعات معمولی و MM بسیار به یکدیگر نزدیک و کمی متفاوت از برآورد انجام‌شده توسط حداقل مربعات پیراسته است.

جدول ۵. ضرایب مدل خطی و معیارهای عددی دقت برازش (جفاکنده)

	a	b	R^2	RMSE (Ton/Day)	MAE(Ton/Day)
OLS	۳/۰۷۴۱	۳/۷۲۷۳	۰/۹۲۸۱	۱/۳۱۴۲	۱/۰۷۵۸
MM	۳/۱۰۸۲	۳/۸۷۱۰	۰/۹۲۹۲	۱/۳۱۸۱	۱/۰۵۸۳
LTS	۲/۹۴۵۵	۳/۸۶۳۸	۰/۹۱۴۱	۱/۳۷۵۹	۱/۰۶۱۳



شکل ٤. مدل‌های خطی تخمین زده‌شده با برآوردهای مختلف (جفاکنده)

بحث

منحنی سنجه رسوب بار معلق به علت سهولت استفاده به شکل وسیعی برای تخمین بار رسوب معلق موردتوجه قرارگرفته است. مهم‌ترین ویژگی این روش این است که صرفاً از داده‌های دبی جریان رودخانه استفاده می‌کند و این موضوع درواقع مهم‌ترین مزیت نسبی این روش است زیرا به حداقل داده متغیر مستقل ثبت‌شده نیازمند است. بدیهی است که همچنان که سادگی و نیاز به حداقل داده مهم‌ترین مزیت تحلیل منحنی سنجه رسوب به‌حساب می‌آید اما هم‌زمان این روش را دارای محدودیت در دقت تخمین نیز می‌کند. به‌هرحال روش‌های زیادی برای بهبود تخمین بار رسوب معلق توسعه‌یافته‌اند اما در کنار بهبود دقت برازش دارای این محدودیت ذاتی هستند که نیاز به متغیرهای مستقل بیشتری برای تخمین بار رسوب معلق دارند و در کاربردهای عملی این یک محدودیت جدی و غیرقابل اغماض است. در این مطالعه سعی شده است تا با در نظر گرفتن داده‌های تبدیل‌شده (تبدیل لگاریتم طبیعی) به بررسی تخمین صورت گرفته با استفاده از برآورد متداول حداقل مربعات معمولی پرداخته‌شده و کاربرد برآوردهای رگرسیون استوار مانند MM و حداقل مربعات پیراسته موردتوجه و ارزیابی قرار گیرد. به‌طور مشخص بهبود اندک در دقت برآورد مدل خطی منحنی سنجه رسوب می‌تواند پس از تبدیل دوباره به داده اصلی موجب بهبود قابل‌ملاحظه در دقت مدل برآورد شده گردد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برآورد منحنی سنجه رسوب با استفاده از داده‌های تبدیل‌شده (لگاریتم طبیعی) صورت گرفت و در ابتدا برآورد متداول حداقل مربعات معمولی بکار گرفته شد و ضرایب مدل تبدیل یافته خطی و نیز معیارهای دقت برازش برآورد گردید و سپس همین روند برای برآوردهای رگرسیون استوار یعنی برآوردهای MM و حداقل مربعات پیراسته تکرار شد. با استفاده از سری داده‌های ثبت‌شده در چهار ایستگاه هیدرومتری یعنی سری داده‌های النگ دره، باغو، انجیراب و جفاکنده محاسبات صورت گرفت و نتایج ذیل به دست آمد.

۱- بررسی شیب‌خط رگرسیون نشان می‌دهد که برآورد MM در دو سری داده (باغو و النگ دره) منجر به کاهش برآورد بزرگی شیب‌خط نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی شده و در دو سری دیگر (انجیراب و جفاکنده) مقدار شیب‌خط را بیشتر از مقدار تخمین زده‌شده از برآورد حداقل مربعات معمولی تعیین کرده است. همچنین برآورد حداقل مربعات پیراسته مقدار شیب را در یک سری داده (انجیراب) کمتر از مقدار تخمین زده‌شده توسط برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین زده و در سه سری داده دیگر مقدار بزرگی بیشتری برای شیب‌خط ارائه کرده است.

۲- بررسی مقایسه‌ای شیب‌خط برآورد شده توسط برآوردهای رگرسیون استوار نشان می‌دهد به‌غیراز سری داده جفاکنده که مقدار شیب تخمین زده‌شده توسط برآورد حداقل مربعات پیراسته کمتر از مقدار متناظر تخمین زده‌شده با برآورد MM است، در سایر سری‌های موردبررسی برآورد حداقل مربعات پیراسته منجر به تخمین مقدار بیشتر شیب‌خط نسبت به مقدار تخمین زده‌شده توسط برآورد MM شده است.

۳- بررسی مقادیر تخمین زده‌شده عرض از مبدأ نشان می‌دهد برآورد MM مقدار این پارامتر را در دو سری داده (النگ دره و باغو) کمتر از برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین زده است و برای دو سری دیگر (انجیراب و جفاکنده) این رفتار بالعکس است. نیز برآورد حداقل مربعات پیراسته مقدار عرض از مبدأ را برای دو سری (انجیراب و جفاکنده) بیشتر از مقدار متناظر در برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین زده اما در دو سری دیگر (باغو و النگ دره) مقدار تخمین زده‌شده از برآورد حداقل مربعات معمولی از مقدار متناظر برآورد حداقل مربعات پیراسته بیشتر است.

۴- بررسی مقایسه‌ای مقادیر عرض از مبدأ تخمین زده‌شده با برآوردهای رگرسیون استوار نشان می‌دهد تنها در سری داده جفاکنده مقدار عرض از مبدأ تخمین زده‌شده از برآورد MM از تخمین صورت گرفته بر اساس برآورد حداقل مربعات پیراسته بزرگ‌تر و در سه سری دیگر کوچک‌تر است.

۵- با در نظر گرفتن ضریب تبیین مشخص می‌شود که در سری داده باغو مقدار ضریب تبیین در برآورد MM نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی کاهش‌یافته و در سه سری دیگر نتایج بهبود ضریب همبستگی را نشان می‌دهد. در برآورد حداقل مربعات پیراسته مقدار ضریب تبیین در دو سری انجیراب و النگ دره نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی افزایش و در دو سری باغو و جفاکنده کاهش را نشان می‌دهد.

۶- با مقایسه ضریب تبیین برآوردهای رگرسیون استوار مشخص می‌شود در سری‌های النگ دره و جفاکنده مقدار ضریب تبیین برآورد MM از برآورد حداقل مربعات پیراسته بیشتر است اما در سری‌های باقیمانده یعنی باغو و انجیراب دقت برازش برآورد حداقل مربعات پیراسته بیشتر از برآورد MM بوده است.

۷- بررسی معیار ریشه میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که در هر چهار سری موردبررسی هر دو برآورد رگرسیون استوار دقت برآورد مدل خطی را نسبت به برآورد متداول حداقل مربعات معمولی کاهش داده‌اند.

۸- مقایسه معیار ریشه میانگین مربعات خطا بین مدل‌های خطی برآورد شده توسط رگرسیون استوار بیان می‌کند که در دو سری داده (النگ دره و باغو) دقت برآورد حداقل مربعات پیراسته از برآورد MM بالاتر است و در دو سری دیگر (انجیراب و جفاکنده) دقت برآورد MM بهتر است.

۹- بررسی معیار میانگین قدر مطلق خطا بیان می‌کند در برآورد MM در سری داده‌های انجیراب و جفا کنده دقت مدل نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی بهتر شده و در دو سری دیگر (باغو و النگ دره) کاربرد برآورد MM منجر به‌دقت پایین‌تری نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی شده است. نیز کاربرد برآورد حداقل مربعات پیراسته در هر چهار سری داده نشان داده که دقت مدل نسبت به کاربرد برآورد حداقل مربعات معمولی افزایش‌یافته است.

۱۰- مقایسه معیار میانگین قدر مطلق خطا بین مدل‌های خطی برآورد شده توسط برآوردهای رگرسیون استوار نشان می‌دهد که به‌جز یک سری داده (جفاکنده) در سایر سری داده‌ها دقت برآورد حداقل مربعات پیراسته بهتر از برآورد MM بوده است.

۱۱-بررسی نمودار مدل‌های خطی برآورد شده نشان می‌دهد برای دو سری داده (باغو و انجیراب) برآوردهای رگرسیون استوار به یکدیگر بسیار نزدیک و دارای تفاوت قابل‌مشاهده با برآورد حداقل مربعات معمولی هستند، برای سری (النگ دره) رفتار سه مدل خطی باهم متفاوت و برای یک سری دیگر باقیمانده (جفاکنده) برآوردهای MM و حداقل مربعات معمولی نزدیک به یکدیگر و با تفاوت قابل‌مشاهده نسبت به حداقل مربعات پیراسته هستند.

۱۲- بررسی موقعیت مدل‌های خطی برآورد شده با برآوردهای مختلف نشان می‌دهد برای دو سری داده (باغو و النگ دره) موقعیت برآورد حداقل مربعات پیراسته در بین برآوردهای MM و حداقل مربعات معمولی است، برای یک سری (انجیراب) موقعیت برآورد MM بین برآوردهای حداقل مربعات معمولی و حداقل مربعات پیراسته (ولی نزدیک به حداقل مربعات پیراسته)، و برای یکسری داده باقیمانده (جفاکنده) موقعیت برآورد حداقل مربعات معمولی بین برآوردهای MM و حداقل مربعات پیراسته قرار دارد. نیز مشخص است نتایج تخمین‌های برآوردهای مختلف در سری داده‌های جفاکنده در کران بالایی داده‌های دبی و در سری داده‌های باغو در کران پایینی داده‌های دبی به یکدیگر نزدیک هستند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق پیشنهادهای ذیل ارائه می‌گردد. رویکرد کلی پیشنهادهای مندرج مطالعه‌ای گسترده‌تر در مورد کاربرد برآوردهای استوار در مبحث تخمین بار رسوب معلق رودخانه است.

۱- با توجه به اینکه در این مطالعه از چهار سری داده استفاده گردید پیشنهاد می‌شود که در مطالعه‌ای جامع‌تر تعداد بیشتری از سری‌های داده ثبت‌شده موردبررسی قرار گیرد. نیز سری‌های منتخب دارای تنوع بیشتری ازنظر ویژگی‌های آماری باشند.

۲- سری داده‌های مورداستفاده در این تحقیق از سری‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری استان گلستان بوده است. پیشنهاد می‌شود سری‌های حوضه‌های آبریز منتخب در مطالعات تکمیلی دارای ویژگی‌های مختلف اقلیمی، شرایط متنوع‌تر هیدرولوژیکی و با در نظر گرفتن تنوع در مشخصه‌های فیزیوگرافیکی، پوشش خاک و کاربری اراضی موردبررسی واقع شوند.

۳- در این مطالعه از دو برآورد رگرسیون استوار (حداقل مربعات پیراسته و MM) استفاده‌شده است. پیشنهاد می‌شود در کنار این دو برآورد از دیگر برآوردهای رگرسیون استوار در مطالعات بعدی بهره گرفته شود.

تقدیر و تشکر

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی تحت عنوان برآورد منحنی سنجه رسوب با استفاده از رگرسیون نیرومند (شماره شناسه ۴۴-۳۲۴-۹۳) در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. مولفین از این دانشگاه بابت حمایت جهت انجام پژوهش سپاسگزاری می نمایند.

References

Achite, M., & Ouillon, S. (2007). Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). Journal of Hydrology, 343(3), 187-202. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.026

Alp, M., & Cigizoglu, H.K. (2007). Suspended sediment load simulation by two artificial neural network methods using hydrometeorological data. Environmental Modelling & Software, 22(1), 2-13. http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.09.009

Arabkhedri, M., Lai, F.S., Ibrahim, N.A., & Mohamad-Kasim, M.R. (2009). Effect of Adaptive Cluster Sampling Design on Accuracy of Sediment Rating Curve Estimation. Journal of Hydrologic Engineering, 15(2), 142-151. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000171

Bowlby, H.D., & Gibson, A.J.F. (2015). Environmental effects on survival rates: robust regression, recovery planning and endangered Atlantic salmon. Ecology and evolution, 5(16), 3450-3461. https://doi.org/10.1002/ece3.1614

Chun, J.A., Cooke, R.A., Kang, M.S., Choi, M., Timlin, D., & Park, S.W. (2010). Runoff losses of suspended sediment, nitrogen, and phosphorus from a small watershed in Korea. Journal of environmental quality, 39(3), 981-990. https://doi.org/10.2134/jeq2009.0226

Cohn, T.A., Delong, L.L., Gilroy, E.J., Hirsch, R.M., & Wells, D.K. (1989). Estimating constituent loads. Water resources research, 25(5), 937-942. https://doi.org/ 10.1029/WR025i005p00937

Duan, N. (1983). Smearing estimate: a nonparametric retransformation method. Journal of the American Statistical Association,78(383), 605-610. https://doi.org/10.2307/2288126

Emamgholizadeh, S., & Demneh, R.K. (2019). A comparison of artificial intelligence models for the estimation of daily suspended sediment load: a case study on the Telar and Kasilian rivers in Iran. Water Supply, 19(1), 165-178. https://doi.org/10.2166/WS.2018.062

Ferguson, R.I. (1987). Accuracy and precision of methods for estimating river loads. Earth surface processes and landforms, 12(1), 95-104. https://www.doi.org/10.1002/ESP.3290120111

Horowitz, A.J. (2002). The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment concentration: a matter of temporal resolution. InTurbidity and other Sediment Surrogates Workshop. April.

Hu, B., Wang, H., Yang, Z., & Sun, X. (2011). Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. Quaternary International, 230(1), 34-43. http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.quaint.2009.08.018

Huber, P.J. (1973). Robust regression: asymptotics, conjectures and Monte Carlo. The Annals of Statistics, 799-821. https://www.jstor.org/stable/2958283

Huber, P.J. (1981). Robust Statistics. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. https://www.wiley.com/en-us/Robust+Statistics%2C+2nd+Edition-p-9780470129906

Iadanza, C., & Napolitano, F. (2006). Sediment transport time series in the Tiber River. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 31(18), 1212-1227. http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2006.05.005

Kao, S., Lee, T., & Milliman, J. D. (2005). Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 16(3), 653. https://doi.org/10.3319/TAO.2005.16.3.653(T)

Kisi, O. (2005). Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches/Estimation des matières en suspension par des approches neurofloues et à base de réseau de neurones. Hydrological Sciences Journal, 50(4). https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.4.683

Kisi, O., Haktanir, T., Ardiclioglu, M., Ozturk, O., Yalcin, E., & Uludag, S. (2009). Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation. Advances in Engineering Software, 40(6), 438-444. http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.advengsoft.2008.06.004

Kisi, O., Karahan, M. E., & Şen, Z. (2006). River suspended sediment modelling using a fuzzy logic approach. Hydrological Processes, 20(20), 4351-4362. https://doi.org/10.1002/hyp.6166

Kvam, P. H., & Vidakovic, B. (2007). Nonparametric statistics with applications to science and engineering (Vol. 653). John Wiley & Sons.

Maes, J., Vliegen, J., Van de Vel, K., Janssen, S., Deutsch, F., De Ridder, K., & Mensink, C. (2009). Spatial surrogates for the disaggregation of CORINAIR emission inventories. Atmospheric Environment, 43(6), 1246-1254. http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.11.040

Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Palleiro, L., & Taboada-Castro, M.T. (2010). Temporal changes in suspended sediment transport in an Atlantic catchment, NW Spain. Geomorphology, 123(1), 181-188. http:// doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.015

Rousseeuw, P.J. (1984). Least median of squares regression. Journal of the American statistical association, 79(388), 871-880. http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1984.10477105

Sadeghi, S. H. R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Fukushima, T., & Onda, Y. (2008). Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. Geoderma, 144(1), 198-211. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.008

Salarijazi, M., Abdolhosseini, M., Ghorbani, K., & Eslamian, S. (2016). Evaluation of quasi-maximum likelihood and smearing estimator to improve sediment rating curve estimation. International Journal of Hydrology Science and Technology, 6(4), 359-370. https://doi.org/10.1504/IJHST.2016.079352

Schumacker, R. E., Monahan, M. P., & Mount, R. E. (2002). A comparison of OLS and robust regression using S-PLUS. Multiple Linear Regression Viewpoints, 28(2), 10-13. https://citeseerx.ist.psu.edu › viewdoc

Smoliński, A., Walczak, B., & Einax, J.W. (2003). Robust multivariate calibration in environmental studies. Analytical letters, 36(10), 2317-2336. http://dx.doi.org/10.1081/AL-120023722

Sokol, Z. (2003). The use of radar and gauge measurements to estimate areal precipitation for several Czech river basins. Studia Geophysica et Geodaetica, 47(3), 587-604. https://doi.org/10.1023/A:1024715702575

Yohai, V.J. (1987). High breakdown-point and high efficiency robust estimates for regression. The Annals of Statistics, 642-656. https://doi.org/10.1214/aos/1176350366

Zhang, S., Lu, X.X., Higgitt, D.L., Chen, C.T.A., Han, J., & Sun, H. (2008). Recent changes of water discharge and sediment load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China. Global and Planetary Change, 60(3), 365-380. http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.04.003