Iranian Journal of Soil and Water Research
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir
ISNN: 2423-7833

Optimization of Threshold Discharge for Bilinear Sediment Rating Curves Using Genetic Algorithm and Bayesian Approaches (Case Study: Tamar and Ramian Stations in Golestan Province)

Bahman Jafari Zare [1] | Aboalhasan Fathabadi [2]✉ | Seyed Morteza Seyedian [3] | Ali Heshmatpoor [4]

1. Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran. E-mail: alamon_mht@yahoo.com
2. Corresponding Author, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran. E-mail: fathabadi@gonbad.ac.ir
3. Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran. E-mail: seyedian@gonbad.ac.ir
4. Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran. E-mail: heshmatpoor@gonbad.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 23, 2026

Revised: Sep. 4, 2026

Accepted: Sep. 14, 2026

Published online: Nov. 23, 2026

Keywords:
Discharge–Concentration Relationship,
Optimization,
Posterior Distribution,
Sediment Concentration.

ABSTRACT

Due to the heterogeneous distribution of discharge–sediment concentration data in most rivers, fitting a single linear sediment rating curve is often inadequate. Consequently, different sediment rating curves are commonly fitted to datasets representing different flow magnitudes. Accordingly, this study aimed to determine the threshold discharge using Bayesian and Genetic Algorithm (GA) approaches and to compare their performance with the median discharge method at the Tamar and Ramian hydrometric stations located in Golestan Province, Iran. After preparing the discharge–sediment datasets, a Bayesian segmented linear regression model was developed and implemented in the WinBUGS software environment. For the Genetic Algorithm approach, the search range for the threshold discharge at both study stations was defined as the interquartile range (25th–75th percentiles) of the observed discharge values. The GA parameters were set to an initial population of 20 chromosomes, a crossover rate of 0.70, and a mutation rate of 0.30. The results demonstrated that, for both calibration and validation datasets, the Genetic Algorithm outperformed the Bayesian and median discharge methods. At the Tamar station, the GA achieved RMSE, Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), and correlation coefficient values of 2443, 0.16, and 0.46, respectively. At the Ramian station, the corresponding values were 1782, 0.35, and 0.77, respectively. Comparison with the Bayesian method revealed that the threshold discharge estimated using the Genetic Algorithm was greater than the 97.5th percentile at the Tamar station, whereas at the Ramian station, it fell between the 2.5th and 25th percentiles.

Cite this article: Jafari Zare, B., Fathabadi, A., Seyedian, S.M., & Heshmatpoor, A. (2026) Optimization of Threshold Discharge for Bilinear Sediment Rating Curves Using Genetic Algorithm and Bayesian Approaches (Case Study: Tamar and Ramian Stations in Golestan Province), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (9), 2249-2266. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.417027.670167

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.417027.670167

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In river systems, erosion and sediment transport can result in substantial adverse impacts, including reservoir sedimentation, damage to in-channel hydraulic structures, increased flood susceptibility, and enhanced transport of pollutants. Direct measurement of sediment load is both costly and time-consuming; consequently, continuous sediment monitoring throughout the year is often impractical in most rivers. The most commonly used approach for estimating suspended sediment load during periods without sediment sampling is the sediment rating curve (SRC) method. Due to the considerable scatter typically observed in discharge–sediment relationships, fitting a single linear sediment rating curve is often inadequate. Therefore, separate rating curves are frequently fitted to datasets corresponding to different flow magnitudes. In such cases, the determination of a threshold discharge, by which discharge–sediment observations are divided into distinct groups and separate rating curves are fitted to each group, becomes critically important. Accordingly, the present study aimed to determine the threshold discharge using Bayesian and Genetic Algorithm (GA) approaches and to compare their performance with the median discharge method at the Tamar and Ramian hydrometric stations in Golestan Province, Iran.

Materials and Methods

The study area consisted of the Tamar and Ramian hydrometric stations located in Golestan Province, Iran. The Tamar station, with a watershed area of 1578.77 km^2, is situated in the upper reaches of the Gorganrud watershed upstream of Bustan Dam. The Ramian station, with an upstream drainage area of 24,816 ha, is located on the Ghareh-Chay River near the city of Ramian. After acquiring the discharge–sediment data, an initial screening was conducted and outliers were removed. The remaining data were subsequently divided into calibration (70%) and validation (30%) datasets. Following logarithmic transformation of discharge and sediment concentration data, both linear and bilinear sediment rating curves were fitted. For the Bayesian approach, a Bayesian segmented linear regression model was developed and implemented in the WinBUGS software environment. Posterior distributions were estimated using the Markov Chain Monte Carlo (MCMC) sampling technique. Three independent chains with randomly selected initial values were run for each parameter. A total of one million iterations were generated for each chain, of which the first 50% were discarded as burn-in samples. For the Genetic Algorithm approach, the search range for the threshold discharge at both stations was defined as the interquartile range (25th–75th percentiles) of the observed discharge values. The GA parameters consisted of an initial population of 20 chromosomes, a crossover rate of 0.70, and a mutation rate of 0.30.

Results and Discussion

The scatter plots of discharge versus sediment concentration revealed considerable dispersion in both study stations, indicating a high degree of uncertainty in fitting sediment rating curves. At both stations, observations below the threshold discharge exhibited greater variability, and the fitted regression lines for these data showed lower coefficients of determination (R^2) compared with observations above the threshold discharge. The results demonstrated that the Genetic Algorithm was capable of identifying threshold discharge values with relatively few iterations, while simultaneously minimizing prediction error and maximizing the coefficient of determination of the fitted rating curves. Comparison with the Bayesian method revealed that the threshold discharge estimated using the Genetic Algorithm was greater than the 97.5th percentile at the Tamar station, whereas at the Ramian station, it fell between the 2.5th and 25th percentiles. For the Bayesian model, convergence of the MCMC chains was achieved after a relatively small number of iterations. At both stations, the largest uncertainty range and interquartile range were associated with the threshold discharge parameter (θ) and the intercept parameter. Conversely, the smallest uncertainty range and interquartile range were observed for the slope coefficient of the rating curve fitted to observations below the threshold discharge. Among the three methods evaluated, the Genetic Algorithm produced the best performance. At the Tamar station, RMSE, Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), and correlation coefficient values were 2443, 0.16, and 0.46, respectively. At the Ramian station, the corresponding values were 1782, 0.35, and 0.77, respectively. Following the Genetic Algorithm, the median discharge method ranked second at the Tamar station, whereas the Bayesian method provided the second-best performance at the Ramian station.

Conclusions

The results of this study indicated that the Genetic Algorithm outperformed the Bayesian and median discharge methods for both calibration and validation datasets at the two study stations. Specifically, the GA successfully identified threshold discharge values within the predefined search domain that yielded improved fits of sediment rating curves to the observed data. In contrast, although the Bayesian approach exhibited lower

predictive performance, it provided an important advantage by quantifying uncertainty. The method enabled uncertainty intervals to be estimated for both model parameters and predicted sediment concentrations, thereby offering valuable information for risk-based decision-making and sediment management applications.

Funding

Financial support for this research was provided by the Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, through the first author's thesis research grant as well as research grants awarded to the co-authors.

Authorship contribution

Bahman Jafari Zare(Student): Sample Preparation, Methodology, Investigation, Data Curation, Formal Analysis, Statistical Analysis, Data Analysis and Interpretation, and Writing – Original Draft.

Aboalhasan Fathabadi: Supervision, Conceptualization, Methodology, Research oversight, Validation of results, Critical review, Writing – review and editing, and Final approval of the manuscript.

Seyed Morteza Seyedian: Methodology, Supervision, Research oversight, and Writing – review and editing.

Ali Heshmatpoor: Methodology, Supervision, Research oversight, and Writing – review and editing.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, the author used ChatGPT (OpenAI) in order to edit English abstract. After using this tool, the author reviewed and edited the content as needed and takes full responsibility for the content of the publication.

Data availability statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the Vice-Chancellor for Research of Gonbad Kavous University for the financial support of this study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۷، شماره ۹ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

بهینه سازی دبی آستانه منحنی سنجه رسوب دو خطی با استفاده از روش های الگوریتم ژنتیک و بیزی (مطالعه موردی: ایستگاه های تمر و رامیان استان گلستان)

بهمن جعفری زارع[۱] | ابوالحسن فتح آبادی[۲]✉ | سیدمرتضی سیدیان[۳] | علی حشمت پور[۴]

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران. رایانامه: alamon_mht@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران. رایانامه: fathabadi@gonbad.ac.ir

۳. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران. رایانامه: seyedian@gonbad.ac.ir

۴. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران. رایانامه: heshmatpoor@gonbad.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۶/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۲۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۹/۱

واژه‌های کلیدی:
رابطه دبی-غلظت،
بهینه‌سازی،
توزیع پسین،
غلظت رسوب

چکیده

با توجه به پراکنش داده‌های دبی-غلظت رسوب در اغلب رودخانه‌ها برازش منحنی سنجه رسوب یک خطی مناسب نبوده و برای داده‌های با بزرگی متفاوت منحنی سنجه‌های متفاوتی برازش داده می‌شود. بدین منظور در این تحقیق اقدام به تعیین دبی آستانه منحنی سنجه دو خطی با استفاده از روش‌های بیزی و الگوریتم ژنتیک و مقایسه آن با روش دبی میانه در دو ایستگاه هیدرومتری تمر و رامیان در استان گلستان گردید. پس از تهیه داده‌های دبی-رسوب روش بیزی مدل رگرسیون خطی بیزی قطعه‌ای در محیط نرم افزار WinBugs کد نویسی گردید. برای روش الگوریتم ژنتیک در هر دو ایستگاه مورد مطالعه دامنه نمونه برداری دبی آستانه برابر با دامنه میان چارکی (صدک‌ها ۲۵ و ۷۵) دبی‌ها مشاهداتی در نظر گرفته شد و پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل جمعیت اولیه ۲۰ کروموزم، نرخ تولید مثل ۰/۷۰ درصد و جهش ۰/۳ در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد برای داده‌های آموزش و آزمون الگوریتم ژنتیک با داشتن مقادیر RMSE، ناش ساتکلیف و ضریب همبستگی به ترتیب برابر با . ۲۴۴۳، ۰/۱۶ و ۰/۴۶ در ایستگاه تمر و مقادیر RMSE، NSE و ضریب همبستگی به ترتیب برابر ۱۷۸۲، ۰/۳۵ و ۰/۷۷ برای ایستگاه رامیان عملکرد بهتری نسبت به روش‌های دبی میانه و بیزی داشته است. در مقایسه با روش بیزی مشاهده گردید دبی آستانه بدست آمده از روش الگوریتم ژنتیک در ایستگاه تمر در مقادیر بزرگتر از صدک ۹۷/۵ و برای ایستگاه رامیان بین صدک‌های ۲/۵ و ۲۵ قرار می‌گیرد.

استناد: جعفری زارع، بهمن؛ فتح آبادی، ابوالحسن؛ سیدیان، سیدمرتضی؛ حشمت پور، علی (۱۴۰۵). بهینه سازی دبی آستانه منحنی سنجه رسوب دو خطی با استفاده از روش های الگوریتم ژنتیک و بیزی (مطالعه موردی: ایستگاه های تمر و رامیان استان گلستان)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۹)، ۲۲۶۶-۲۲۴۹.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.417027.670167

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.417027.670167

مقدمه

فرسایش و حمل رسوب فرآیندی طبیعی در رودخانه‌ها است که با جدایش ذرات از بستر اصلی خود شروع می‌شود و در ادامه این مواد فرسایش یافته توسط آب حمل می‌شود. برآورد می‌شود در حدود ۹۰ درصد از کل رسوب حمل شده توسط رودخانه به صورت معلق انتقال پیدا می‌کند (Syvitski et al., 2000; Achite and Ouillon, 2007). پیش بینی مناسب مقدار بار رسوب معلق در برآورد حجم مرده سد، طراحی سازه‌های کنترل سیل و سایر سازه‌های بستر رودخانه، مدیریت مناطق ساحلی، تصمیم گیری در مورد تخصیص منابع آب، بهینه‌سازی شبکه آبیاری و محاسبه بودجه رسوب پایین دست اهمیت دارد (Zhan et al., 2017). برآورد نادرست غلظت رسوب معلق (SSC) می‌تواند به تحلیل‌های نادرست خطر سیلاب و برآوردهای غلط بار آلاینده‌ها منجر شود، که این موضوع به‌طور بالقوه می‌تواند تصمیم‌گیری‌های کنترلی و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها را به شکل نامطلوب و ناکارآمد تحت‌تأثیر قرار دهد. در مقابل، برآورد قابل‌اعتماد غلظت رسوب معلق (SSC) امکان شناسایی رویدادهای رسوبی با شدت بالاو همچنین روندهای بلندمدت را فراهم می‌سازد؛ موضوعی که برای برنامه‌ریزی عملیات لایروبی، بهینه‌سازی سیاست‌های مدیریت رسوب و کاهش هزینه‌های نگهداشت سدها و آبراهه‌ها بسیار حیاتی است(Dethier et al., 2020; Peterson et al., 2018; Wang and Lu, 2010).

برای برآورد بار معلق نیاز به نمونه برداری مستقیم از رودخانه و آنالیز آنها در آزمایشگاه به تعداد زیاد می‌باشد. معمولا اندازه گیری مقدار بار رسوب معلق به صورت مستقیم کار هزینه بر و اغلب غیر ممکن است در نتیجه اغلب رودخانه‌ها فاقد نمونه‌های زیاد هستند (Peterson et al., 2018; Wackerman et al., 2017). در این حالت محقیقن برای برآورد بار معلق اقدام به مدل سازی و استفاده از سایر متغیرهای مستقل برای پیش بینی رسوب معلق کرده اند. در رودخانه‌ها و کانال‌های طبیعی رسوب معلق در حالت کمتر از ظرفیت حمل انتقال پیدا می‌کند بنابراین برای برآورد رسوب معلق نمی‌توان از مدل‌های فیزیکی استفاده کرد. در این حالت روش‌های تجربی که به عنوان روش آماری نیز شناخته می‌شود استفاده گسترده ای در بین هیدرولوژیست‌ها پیدا کرده اند. یکی از متداول ترین مدل‌های آماری برای برآورد رسوب معلق، منحنی سنجه رسوب است که بصورت یک رابطه توانی بیان می‌شود. این مدل برای اولین بار توسط Hall (1970,1971) مورد استفاده قرار گرفت و در ادامه این مدل به عنوان یک مدل استاندارد برای بررسی رابطه دبی با خصوصیات شیمیایی و رسوب استفاده شده است. معمولا برای برازش منحنی سنجه رسوب از داده‌های غلظت رسوب و دبی لگاریتم گیری می‌شود در این حالت رابطه دبی–غلظت برازش داده شده به داده‌های لگاریتم گیری شده به صورت خط راست است و پراکنش نقاط اطراف این خط می‌باشند.

معمولا رسوب معلق در وضعیت بار کمتر از ظرفیت اشباع حمل می‌شود در این حالت برای یک دبی مشخص بسته به مقدار رسوب در دسترس غلظت مقاوتی از رسوب انتقال پیدا می‌کند بنابراین جفت نقاط دبی غلظت مورد استفاده در برازش منحنی سنجه دارای پراکنش بالایی می‌باشند. تولید و حمل رسوب در یک حوضه منحصرا تحت تاثیر خصوصیات هیدرولیکی جریان نمی‌باشد بلکه منبع رسوب در حوضه و همچنین تغییرات مکانی بارش نیز بر روی آن موثر است. از سوی دیگر مشاهده شده است مقدار غلظت رسوب برای مقادیر متفاوت دبی دارای تغییراتی می‌باشد و به نوعی دارای اثر آستانه ای است(Zhang et al., 2016; Meybeck and Moatar, 2012). به عنوان مثال توان حمل رسوب در مواقع سیلابی نسبت به دبی پایه متفات می‌باشد و در زمان سیلاب بسته به تغییرات مکانی و زمانی بارش منابع رسوب متغییر بوده و این تغییر منبع موجب تغییر در مقدار و غلظت رسوب خروجی حوضه برای دبی‌های مختلف می‌شود. به علاوه هر گونه ناپیوستگی زمانی و مکانی در تولید و انتقال رسوب در نتیجه عوامل طبیعی (مثل تغییر ناگهانی شیب) یا عوامل انسانی (مثل سدها) ممکن است منجر به تغیرات میزان رسوب و غلظت رسوب در دبی‌های مختلف شود(Toone et al., 2014; Wang et al., 2008). تهی شدن ناگهانی منابع رسوب یا اثر رقیق شدگی نیز ممکن است منجر به این پدیده شود (Meybeck and Moatar, 2012; Shanley et al., 2011). در این حالت برازش یک منحنی سنجه به کل داده‌های دبی و رسوب مناسب نمی‌باشد. از این رو محقیقن اقدام به برازش منحنی سنجه دو خطی به داده‌های دبی–غلظت رسوب کرده اند. به طوری که برای داده‌های کمینه یک منحنی سنجه و برای داده‌های بیشینه منحنی سنجه دیگر برازش دادند. در این حالت مسئله مهم تعیین نقطه ای است که شیب منحنی سنجه رسوب تغییر می‌کند. به طور سنتی در تحقیقات گذشته Moatar et al. (2017); Meybeck and Moatar, 2012 مقدار دبی میانه را به عنوان آستانه تغییر شیب خط منحنی سنجه رسوب تعیین کرده اند. این در حالی است که برای اغلب رودخانه‌ها تغییر رفتار رابطه دبی–رسوب در دبی میانه رخ نمی‌دهد و نیاز است تا با استفاده از روش مناسب برای هر رودخانه این نقطه تغییر شیب را تعیین کرد. در این زمینه رویکرد دیگر استفاده از آمار بیز برای تعیین نقطه آستانه تغییر شیب است. از این روش تحقیقات Alameddine et al., 2011; Qian & Cuffney, 2012;

Underwood et al., 2017; Fathabadi et al., 2022 برای تعیین دبی آستانه استفاده شده است. در تحقیق Ryan et al., 2002 نیز از روش بوت استرپ برای تعیین دبی آستانه استفاده کردند. در تحقیق Jansson (1996) که اقدام به برازش منحنی سنجه دو خطی به داده‌های دبی–بار رسوب رودخانه Reventazdn در کاستاریکا کردند دبی آستانه به صورت بصری و مشاهده تغییر شیب منحنی سنجه رسوب تعیین گردید. Benisi Ghadim et al (2020) در ابتدا منحنی سنجه رسوب توانی به داده‌ها برازش دادند و نقطه ای از منحنی سنجه توانی که شیب خط برابر با یک بود به عنوان دبی موثر انتخاب کردند. Hoffmann et al (2020) از سه روش حداکثر انحنای منحنی رگرسیونLOWESST ، کمینه سازی مقدار میانگین خطای مطلق در مقیاس داده‌های واقعی و داده‌های لگاریتم گرفته شده برای تعیین دبی آستانه استفاده کردند. در تحقیق Bari et al (2026)، که مقادیر رسوب معلق را در بازه زمانی ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۶ به صورت ساعتی برداشت کردند، مشاهده گردید مقادیر غلظت رسوب در فصول مختلف با توجه به نوع فرآیندهای موثر در ایجاد رواناب و همچنین میزان رسوب در دسترس متغییر بوده است. در این تحقیق در نهایت بر اساس غلظت رسوب در دبی‌های مختلف دبی آستانه ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه تعیین گردید که در کمتر از این دبی بار رسوب اغلب متشکل از سیلت و رس است و برای مقادیر بزرگتر از دبی آستانه ذرات ماسه نیز حمل می‌شوند.

تعیین نقطه آستانه تغییر شیب منحنی سنجه رسوب (دبی آستانه) نه تنها باعث بهبود در برازش منحنی سنجه می‌شود بلکه دید بهتری نسبت به عوامل ایجاد کننده این پدیده ارائه می‌دهد و متناسب با سطوح مختلف دبی استراتژی‌های مدیریتی مناسب ارائه می‌دهند. در طی دو دهه گذشته شاهد استفاده گسترده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی (Evolutionary Optimization) مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام پرندگان و غیره در بهینه‌سازی و حل مسائل بهینه‌سازی منابع آب بوده ایم. بدین منظور در این تحقیق اقدام به تعیین دبی آستانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مقایسه آن با روش بیزی در دو ایستگاه هیدرومتری تمر، به عنوان یک حوضه شاخص پوشیده از رسوبات لسی، و رامیان، به عنوان یک حوضه کوهستانی با کاربری غالب جنگل و مرتع، در استان گلستان گردید.

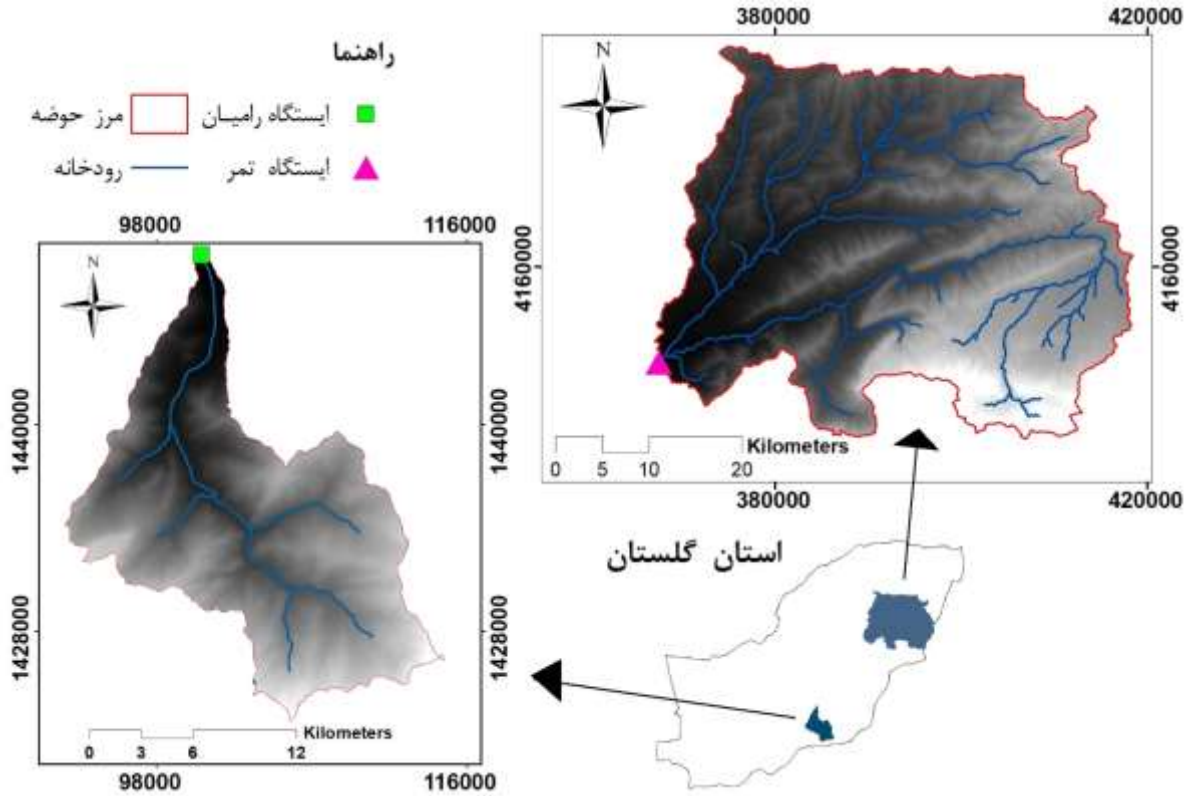
روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق اقدام به برازش منحنی سنجه در دو ایستگاه رامیان و تمر (شکل ۱) استان گلستان گردید. ایستگاه تمر در بالادست حوضه آبخیز گرگان رود قبل از سد بوستان واقع شده است. حوضه بالادست این ایستگاه در محدوده طول جغرافیایی ´´۰۵ ´۳۰ °۵۵ تا ´´۰۵۴ ´۰۳ °۵۶ و عرض جغرافیایی ´´۵۸ ´۲۵ °۳۷ تا ´´۱۳ ´۴۶ °۳۷ قرار دارد. مساحت این حوضه برابر با ۱۵۷۸/۷۷ کیلومتر مربع، محیط آن برابر با ۲۲۳/۳ کیلومتر، متوسط بارش سالانه آن حدود ۴۶۵ میلی متر و دارای اقلیم نیمه خشک تا نیمه مرطوب است. حداقل و حداکثر و متوسط ارتفاع حوضه به ترتیب برابر ۱۰۸، ۲۱۷۱ ۷۴۸/۷ متر هستند (شیخ و همکاران، ۱۳۹۸؛ محمد پور خوئی و همکاران، ۱۴۰۱). کاربری غالب حوضه کشاورزی بصورت دیم می‌باشد و در قسمت‌های شرقی حوضه کاربری جنگلی غالب است.

ایستگاه رامیان با موقعیت طول جغرافیایی ´۰۸ °۵۵ و عرض جغرافیایی ´۰۱ °۳۷ بر روی رودخانه قره چای نزدیک شهر رامیان قرار گرفته است. مساحت حوضه بالادست این ایستگاه برابر با ۲۴۸۱۶ هکتار و طول رودخانه قره چای با روند جنوبی–شمالی برابر با ۳۵/۸ کیلومتر است. کاربرهای این حوضه شامل جنگل، مرتع و کشاورزی به ترتیب با مساحت‌های ۱۸۴۷۷/۵۳، ۸۲۷ و ۳۴۱۸/۴۳ هکتار می‌باشند. متوسط شیب این حوضه برابر با ۳۶/۰۴ درصد است که جزء حوضه‌ها با شیب تند قرار می‌گیرد (فتح آبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

در این تحقیق از داده‌های همزمان دبی–غلظت رسوب برداشت شده توسط شرکت آب منطقه ای استان گلستان در بازه زمانی سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۸ استفاده گردید. با بررسی داده‌ها و حذف داده‌های پرت در نهایت در ایستگاه تمر تعداد ۷۳۴ جفت داده، که تعداد ۵۱۴ جفت داده (۷۰ درصد) برای آموزش و تعداد ۲۲۰ جفت داده (۳۰ درصد) برای ارزیابی، استفاده گردید و در ایستگاه رامیان در مجموع تعداد ۵۱۰ جفت داده دبی–غلظت، که تعداد ۳۵۷ جفت داده (۷۰ درصد) برای آموزش و تعداد ۱۵۳ جفت داده (۳۰ درصد) برای ارزیابی روش‌های مختلف، استفاده گردید. در جدول ۱ برخی شاخص‌های آماری برای داده‌های دبی و غلظت رسوب برای دو ایستگاه تمر و رامیان ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۱. مقادیر شاخص‌های آماری داده‌های دبی-غلظت رسوب در دو ایستگاه مورد مطالعه

ایستگاه		آموزش				آزمون			
		میانگین	میانه	حداکثر	حداقل	میانگین	میانه	حداکثر	حداقل
تمر	دبی (m3/s)	۱/۸۳۸	۱/۲۷۵	۱۵/۳۰۰	۰/۰۰۲	۲/۰۱۲	۱/۴۹۰	۹/۷۶۰	۰/۰۰۵
	غلظت رسوب)	۱۱۸۹/۷۸	۴۶۷/۵۰	۳۸۰۳۴/۶۷	۱۲/۳۳	۱۳۸۹/۰۷	۹۳۹/۹۹۶	۲۴۸۵۳	۳۲/۴۱
رامیان	دبی	۱/۳۹۵	۰/۵۲۰	۱۳/۴۶۰	۰/۰۰۲	۱/۳۶۸	۰/۴۳۰	۱۲/۷۴۰	۰/۰۰۲
	غلظت رسوب	۳۵۵/۹۹	۱۲/۲۵	۲۲۸۲۳/۵۵	۰/۰۰۴	۴۶۱/۷۱۹	۱۰/۷۱۴	۱۴۱۶۶	۰/۰۴۷

منحنی سنجه رسوب

متداول ترین شکل منحنی سنجه رسوب استفاده شده در منابع مختلف به صورت رابطه توانی (رابطه ۱) است((Hoffmann et al. 2020 .

$$C = aQ_w^b$$ رابطهٔ ۱)

در این رابطه C غظلت رسوب، a و b پارامترهای مدل و Q_w دبی آب هستند. با لگاریتم گیری از رابطه (۱) رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$\ln(C) = \ln(a) + bln(Q_w) + \epsilon$$ رابطهٔ ۲)

در این رابطه $\ln(a)$ مقدار عرض از مبدا و b مقدار شیب رابطه رگرسیون است. در این رابطه ترم خطا ϵ منعکس کننده میزان پراکنش از خط برازش داده شده و در برگیرنده تمام عوامل مثل اثر پسماند[1] تغییرات فصلی وغیره است که باعث پراکنش نقاط اطراف خط راست می‌شود. این ترم همچنین نسان دهنده خطای برآورد پارامترها است.

روش بیزی

در برازش منحنی سنجه دو خطی تشخیص دبی آستانه از اهمیت زیادی برخوردار است به طوری که مقادیر پارامترهای منحنی سنجه رسوب برآورد شده برای داده‌های بیشینه و کمینه تحت تاثیر این آستانه انتخابی است. بدین منظور در این بخش از مدل رگرسیون خطی بیزی قطعه ای Bayesian segmented linear regression استفاده گردید (رابطه ۳).

1. Hysteresis

رابطهٔ ۳)
$$where: y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2),$$
$$\mu_y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1(x-\theta), & if\ x < \theta \\ \beta_0 + \beta_2(x-\theta), & if\ x > \theta \end{cases}$$

در این رابطه y لگاریتم میزان غلظت، x لگاریتم دبی، μ_y , میانگین متغیر وابسته (غلظت رسوب)، σ_y^2 واریانس متغیر وابسته، β_0 عرض از مبدا، $\beta_1$and β_2 , به ترتیب شیب خط قبل و بعد از دبی آستانه و θ مقدار دبی آستانه برآوردی است(Fathabadi et al., 2022).

در روش بیزی اطلاعات ما در مورد پارامترهای ناشناخته در غالب توزیع‌های پیشین نمایش داده می‌شوند. با جمع آوری داده‌ها و استفاده آنها در مدل توزیع‌های پیشین به روز می‌شوند تا توزیع‌های پسین برای پارامترها بدست آیند. از آنجا که در این تحقیق اطلاعات پیشین برای پارامترها در دسترس نبود به منظور جلوگیری از خطای قضاوت در برآورد پارامترها از تابع پیشین مبهم و فاقد اطلاعات استفاده گردید تا اجازه داده شود اطلاعات موجود در داده‌های در توزیع پسین غالب شوند. به منظور نمونه برداری از تابع توزیع پسین و برآورد پارامترها در این تحقیق از نمونه بردار مونت کارلو زنجیره مارکف (Markov Chain Monte carlo) استفاده گردید. برای هر پارامتر سه زنجیر با مقادیر اولیه تصادفی اجرا گردید و برای هر زنجیر تعداد یک میلیون نمونه برداری صورت گرفت. به منظور کاهش خودهمبستگی در نمونه‌های برداشت شده از هر ۱۰ نمونه برداشت شده یک نمونه حفظ و باقی نمونه‌ها کنار گذاشته شدند. برای هر پارامتر ۵۰۰۰۰۰ نمونه اولیه به عنوان دوره سوخت در نظر گرفته شد.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی تکاملی است که از فرآیند تگامل بیولوژی مبتی بر سه فرآیند تولید مثل، باز ترکیب و جهش الهام گرفته است (Goldberg, *1989*). در الگوریتم ژنتیک فرآیند بهینه‌سازی با تولید جمعیت اولیه کروموزم‌ها شروع می‌شود. در این حالت با در نظر گرفتن حد بالا و پایین هر پارامتر و در نظر گرفتن توزیع یکنواخت، برای هر پارامتر به صورت تصادفی نمونه برداری می‌شود. تعداد کروزم‌های ایجاد شده در این قسمت متناسب با بزرگی مسئله مورد بررسی و همچنین پیچیدگی مدل مورد بررسی است. پس از تولید جمعیت اولیه برای هر کرموزوم مدل اجرا و تابع هدف محاسبه می‌شود. سپس با توجه به مقادیر بدست آمده تعدادی کروموزوم به صورت تصادفی، با استفاده از چرخ رولت، به عنوان کروموزوم مادر انتخاب می‌شوند و عملگرهای تولید مثل و جهش بر روی آنها صورت می‌گیرد تا جمعیت جدید ایجاد شوند. در فرآیند تولید مثل همانند تولید مثل طبیعی به نوعی کروموزوم‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا فرزندان جدید ایجاد شود و به نوعی خصوصیات کروموزم‌های والد خود را به ارث می‌برند. در فرآیند جهش در برخی از کروموزم‌ها تغییرات تصادفی ایجاد می‌شود که منجر به ایجاد کروموزم‌های جدید می‌شود برخی از این تغییرات مناسب نبود حذف می‌شوند اما ممکن است برخی از این جهش‌ها مناسب بوده و باعث ارتقا جمعیت می‌شود. با استفاده از فرزندان جدید تولید شده توسط عملگرهای تولید مثل و جهش، مدل اجرا می‌شود و تابع هدف محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار تابع هدف محاسبه شده بهترین کرموزوم‌ها برای ایجاد جمعیت جدید به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. این مراحل تکرار می‌شوند تا زمانی که تعداد تکرارها به مقدار معین برسد یا تابع هدف به مقدار مشخصی برسد. در این تحقیق تعداد تکرارها برابر با ۱۰۰، جمعیت اولیه ۲۰ کرموزوم، نرخ تولید مثل ۰/۷۰ درصد و نرخ جهش ۰/۳ درصد در نظر گرفته شدند.

معیارهای ارزیابی

به منظور مقایسه ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف در پیش بینی از معیارهای ضریب همبستگی، RMSE[1] (رابطه ۴) و NSE[2] (رابطه ۵) استفاده شد.

رابطهٔ ۴)
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_{ci} - S_{oi})^2}{\sum_{i=1}^{n}(S_{oi} - \overline{S_{oi}})^2}$$

رابطهٔ ۵)
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(S_{ci} - S_{oi})^2}$$

در این روابط n تعداد داده‌ها، Soi مقدار i–امین غلظت رسوب اندازه‌گیری شده، Sci مقدار i–امین غلظت رسوب پیش‌بینی شده است. مقدار NSE بین منفی بینهایت تا ۱ متغیر است و مقادیر بزرگتر نشان از عملکرد بهتر مدل دارد. مقدار RMSE نیز بین صفر تا

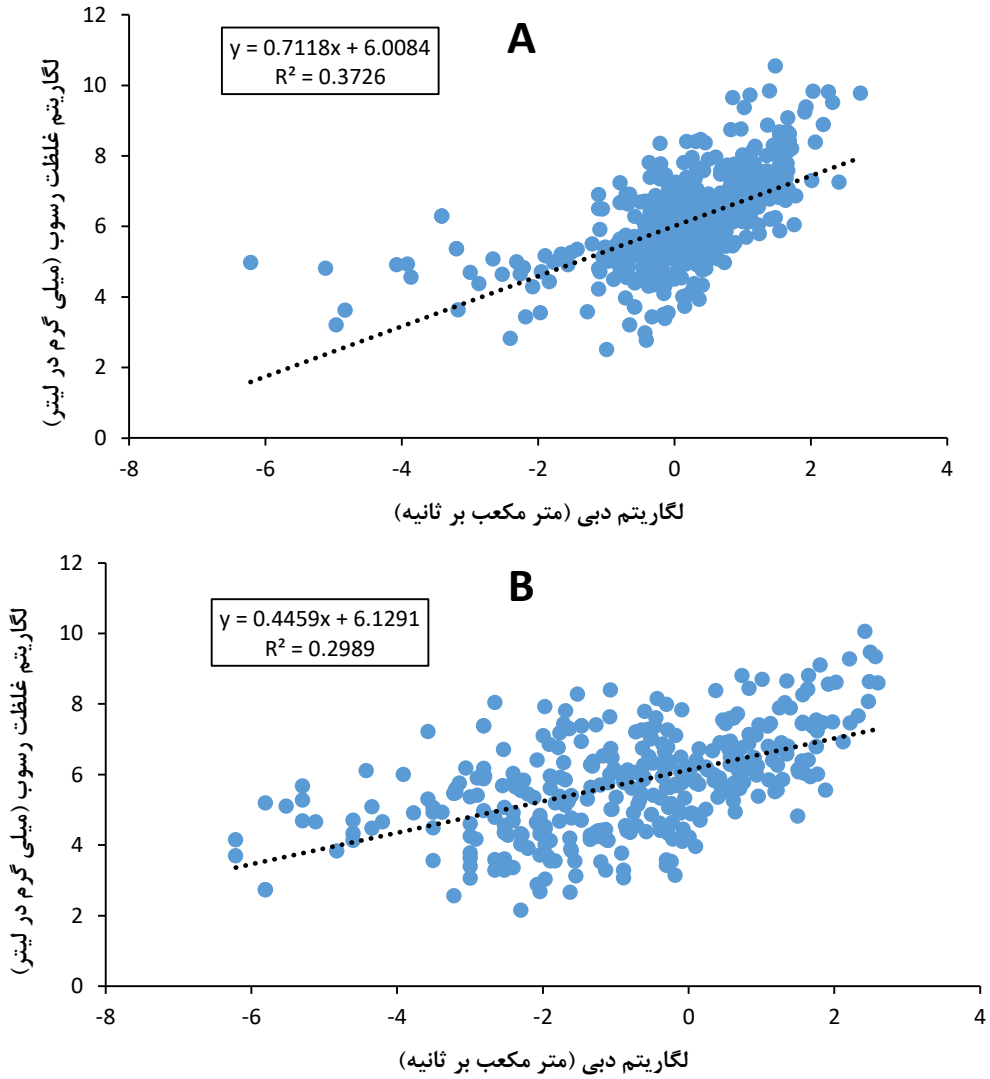
1. Root mean Squer Error
2. Nash–Sutcliffe Efficiency

بیهنایت متغییر بوده که مقادیر کمتر نشان از عملکرد بهتر مدل دارد.

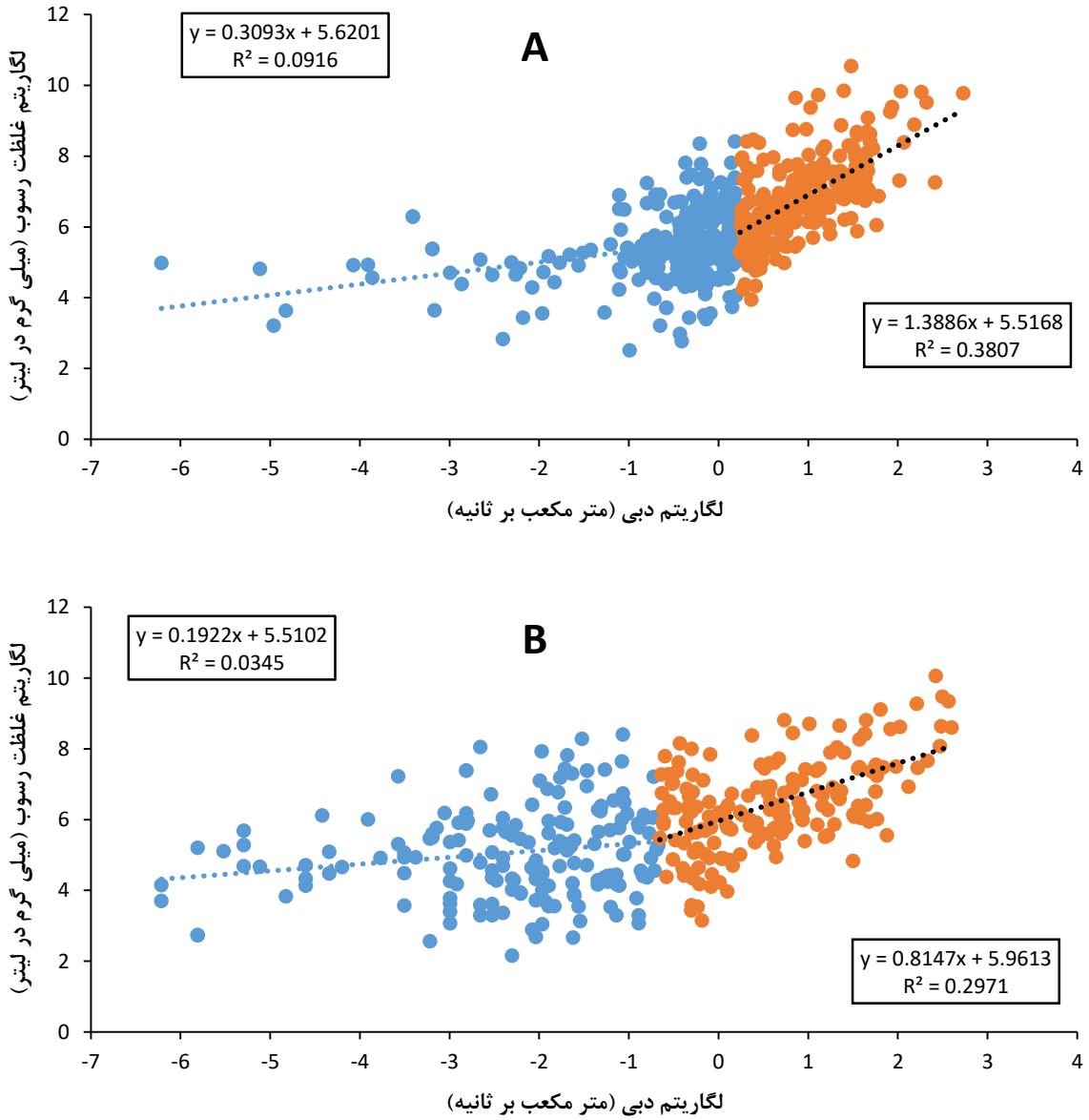
نتایج و بحث

برازش منحنی سنجه یک خطی و دو خطی

پس از بررسی اولیه داده‌ها و حذف داده‌های پرت اقدام به برازش منحنی سنجه‌های رسوب یک خطی و دو خطی به داده‌های دبی–غلظت رسوب دو ایستگاه مورد مطالعه گردید. در نمودارهای شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب منحنی سنجه‌های یک خطی و دو خطی (در این حالت دبی آستانه برابر با دبی میانه بود) برازش داده شده به داده‌های دبی–غلظت دو ایستگاه مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود برای هر دو ایستگاه مورد مطالعه پراکنش ابر نقاط زیاد بوده که این مسئله به نوعی نشان دهنده عدم قطعیت بالا در برازش داده‌های مورد نظر است. برای هر دو ایستگاه مورد مطالعه داده‌های کمتر از دبی آستانه دارای پراکنش بیشتری بوده و خط برازش داده شده به این داده‌ها نسبت به دبی‌ها بیشتر از دبی آستانه ضریب تعیین کوچکتری دارند. در تحقیق Hoffmann et al (2020) نیز مشاهده کردند برای دبی‌های کمتر از آستانه پراکنش نقاط بیشتر بوده و رابطه بین خصوصیات توپوگرافی با مقدار ضریب b ضعیف بوده و تاثیر عواملی غیر از پارامترهای توپوگرافیکی در تولید رسوب بیشتر بوده اند.



شکل ۲. منحنی سنجه یک خطی برازش داده شده A: ایستگاه تمر، B: ایستگاه رامیان



شکل ۳. منحنی سنجه دو خطی برازش داده شده با دبی آستانه برابر با دبی میانه A: ایستگاه تمر، B: ایستگاه رامیان

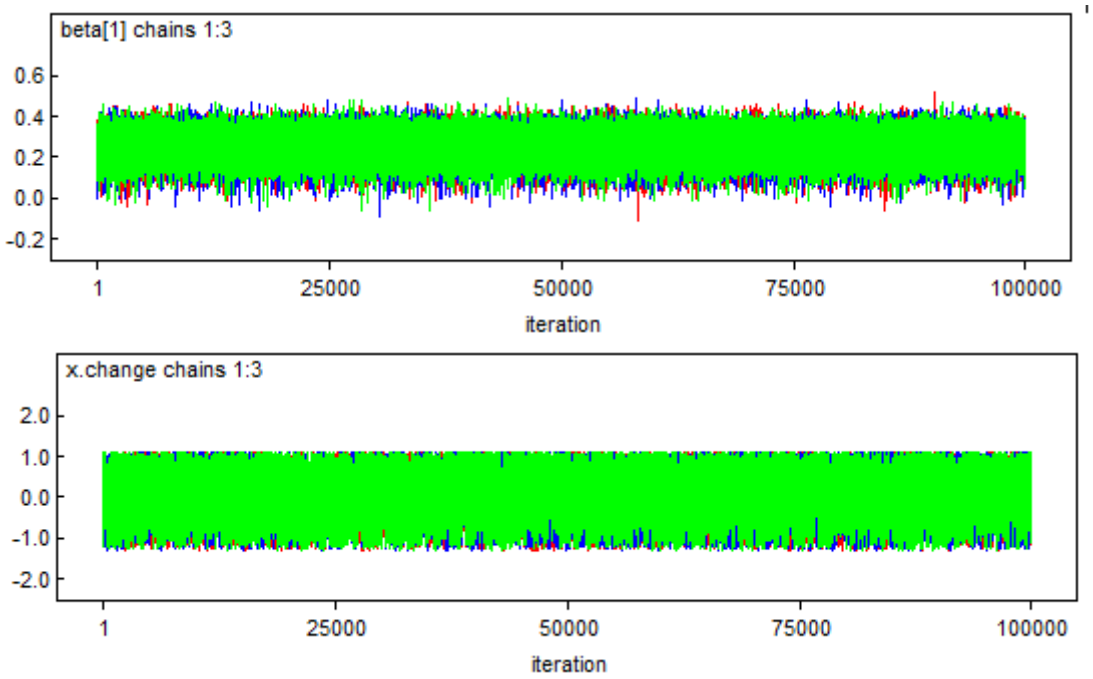
برای هر دو ایستگاه مورد مطالعه شیب خط منحنی سنجه پس از دبی آستانه بزرگتر از شب خط قبل از دبی آستانه است. به علاوه در هر دو ایستگاه مورد مطالعه مقدار شیب منحنی سنجه یک خطی کمتر از شیب منحنی سنجه بعد از دبی آستانه و بیشتر از شیب منحنی سنجه قبل از دبی آستانه می‌باشد. در مقایسه با ایستگاه رامیان در ایستگاه تمر اختلاف شیب خط قبل و بعد از دبی آستانه بیشتر است و برای هر دو ایستگاه مورد مطالعه شیب خطی منحنی سنجه قبل و بعد از دبی آستانه اختلاف معنی داری دارند. در این روش دبی آستانه برای ایستگاه‌های تمر و رامیان به ترتیب برابر با ۱/۲۷۵ و ۰/۵۲ متر معکب بر ثانیه بدست آمدند. یکی از ویژگیهای منحنی سنجه رسوب نسبت به روش‌های دیگر مبتنی بر داده قابل تفسیر بودن ضرایب منحنی سنجه رسوب است. Peters-KuÈmmerly (1973) بیان می‌کند ضریب a نشان دهنده شاخص فرسایش حوضه است و ضریب b شاخصی از قدرت جریان است. در این حالت مقادیر بزرگ a نشان دهنده دسترسی بیشتر به موارد فرسایش پذیر در حوضه بالادست است و مقادیر بزرگ b نشان می‌دهد که افزایش کمی در مقدار دبی منجر به افزایش شدید در قدرت فرسایندگی رودخانه می‌شود. همچنین با افزایش دبی چه مقدار منابع جدید رسوب در دسترس قرار می‌گیرند. بعلاوه Walling (1974) بیان می‌کند مقدار ضریب b تحت تاثیر اندازه ذرات قابل حمل می‌باشد در این حالت با بزرگ تر شدن اندازه ذرات رسوبات منبع قدرت حمل جریان از اهمیت بیشتری نسبت به رسوب قابل دسترس برخوردار است و مقدار ضریب b بزرگتر است. با مقایسه مقادیر ضرایب منحنی سنجه یک خطی بدست آمده برای دو ایستگاه مورد، مطالعه مشاهده می‌شود مقدار ضریب a در دو ایستگاه مورد

مطاله نزدیک هم بوده است در حالی که مقدار ضریب b در ایستگاه تمر نسبت ایستگاه رامیان بزرگتر بوده است که نشان دهنده اهمیت بیشتر قدرت جریان در حمل رسوبات در حوضه بالادست ایستگاه تمر است. حوضه بالادست ایستگاه تمر توسط رسوبات لسی دوره کواترنر که اغلب دارای بافت سیلتی بوده و حساس به فرسایش هستند، پوشیده شده است و بیشتر سطح این حوضه دارای کاربری مرتعی و کشاورزی دیم است. در حالی که حوضه بالادست ایستگاه رامیان اغلب جنگلی و مرتعی است و سازندهای آن حساسیت کمتری به فرسایش در مقایسه با حوضه بالادست ایستگاه تمر دارند. در تحقیق Fan et al(2012) برای برخی از زیرحوضه رودخانه زرد چین مقدار log(a) بین ۱/۱- تا ۲/۳۷ و ضریب b بین ۰/۴۴ تا ۱/۵۴ بدست آمد که مقادیر ضریب b بدست آمده برای منحنی سنجه یک خطی در دو ایستگاه تمر و رامیان در دامنه این مقادیر b قرار می‌گیرد در حالی که مقادیر log(a) برای دو ایستگاه تمر و رامیان بزرگتر از مقادیر مربوطه در زیر حوضه‌های رودخانه زرد چین بوده است. به علاوه مقادیر ضرایب b بدست آمده در ایستگاه در محدوده مقادیر ۰/۲ تا ۲ که توسط Syvitski et al (2000) پیشنهاد شده است قرار می‌گیرند. از سوی دیگر برای منحنی سنجه‌های دو خطی برازش داده شده مقادیر ضریب b برای خط منحنی سنجه رسوب در دبی‌های کمتر از آستانه در دامنه ۰/۷۵- و ۱/۱۵ و برای دبی‌های بیشتر از آستانه در دامنه ۰/۶- تا ۲/۴۵ که توسط Hoffmann et al (2020) برای رودخانه‌های آلمان محاسبه شده اند، قرار گرفته اند. به علاوه در تحقیق Hoffmann et al (2020) مشاهده کردند از ۶۲ ایستگاه در ۳۳ ایستگاه، همانند دو ایستگاه مورد مطالعه در این تحقیق، با افزایش دبی مقدار غلظت رسوب افزایش پیدا می‌کند.

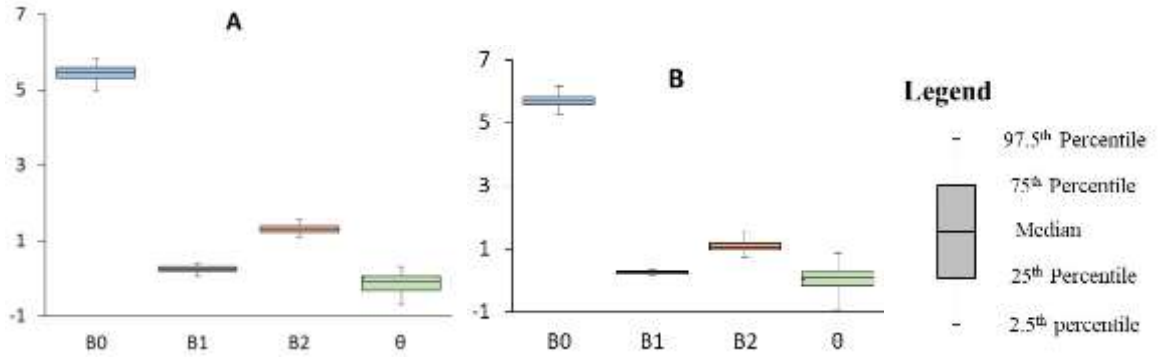
روش بیزی

برای اجرای رویکردی بیزی رابطه ۳ در نرم افزار Winbugs کد نویسی گردید. در این نرم افزار پس از تعیین توابع پیشن، ساختار مدل و معرفی داده‌ها اقدام به نمونه برداری از تابع پسین با استفاده از نمونه بردار مونت کارلو زنجیره مارکف گردید. در این روش نمونه برداری یکی از مسائل مهم تعیین تعداد تکرارهایی است که زنجیره به همگرایی می‌رسد. بدین منظور در این قسمت از نمودار مربوط به مقادیر پارامتر در اجراهای مختلف (Trace Plot) و آماره Gelman-Ruben استفاده گردید. در نمودارهای شکل (۴) نمودار Trace Plot برخی پارامترها ارائه شده است. با توجه به این نمودارها ملاحظه می‌شود برای تمام پارامترها در تعداد اجرای کم زنجیر به همگرایی رسیده است، همچنین مقادیر آماره Gelman-Ruben برای تمام پارامترهای مورد بررسی نزدیک به یک بودند. قابل ذکر است که در روش بیزی مقادیر لگاریتم گیری شده داده‌های دبی و غلظت رسوب استفاده شده اند بنابراین پارامتر دبی آستانه در شکل‌های ۴ و ۵ در مقیاس لگاریتمی است و دارای مقادیر منفی است. در نمودارهای شکل (۵) صدک‌های مختلف پارامترهای برآوردی برای دو ایستگاه مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می شود برای هر دو ایستگاه مورد مطالعه بیشترین دامنه عدم قطعیت و فاصله میان چارکی به تربیت برای پارامترهای θ و عرض از مبدا بدست آمد. کمترین دامنه عدم قطعیت و فاصله میان چارکی نیز در هر دو ایستگاه مورد مطالعه برای ضریب شیب منحنی سنجه برازش داده شده به داده‌های کمتر از دبی آستانه بدست آمده است. حد پایین و بالای دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصدی برای لگاریتم دبی آستانه در ایستگاه تمر به ترتیب برابر با ۰/۶۹۹- و ۰/۳۱۵ و در ایستگاه رامیان به ترتیب برابر با ۰/۸۳۷- و ۰/۸۶۱ بدست آمدند. با مقایسه چارک‌های مختلف بدست آمده برای توزیع پسین دبی آستانه با مقدار دبی میانه مشاهده می‌شود در ایستگاه تمر، دبی میانه بین صدک‌های ۷۵ و ۹۷/۵ درصد قرار گرفته است و به نوعی دبی آستانه میانه توزیع پسین با مقدار ۰/۹۲۴ متر مکعب بر ثانیه کمتر از دبی میانه داده‌های مشاهداتی است. در حالی که برای ایستگاه رامیان دبی میانه بین صدک‌های ۲/۵ و ۲۵ درصد قرار می‌گیرد که به نوعی نشان می‌دهد که دبی آستانه میانه توزیع پسین با مقدار ۱/۰۷ متر مکعب بر ثانیه بزرگتر از دبی میانه داده‌های مشاهداتی است.

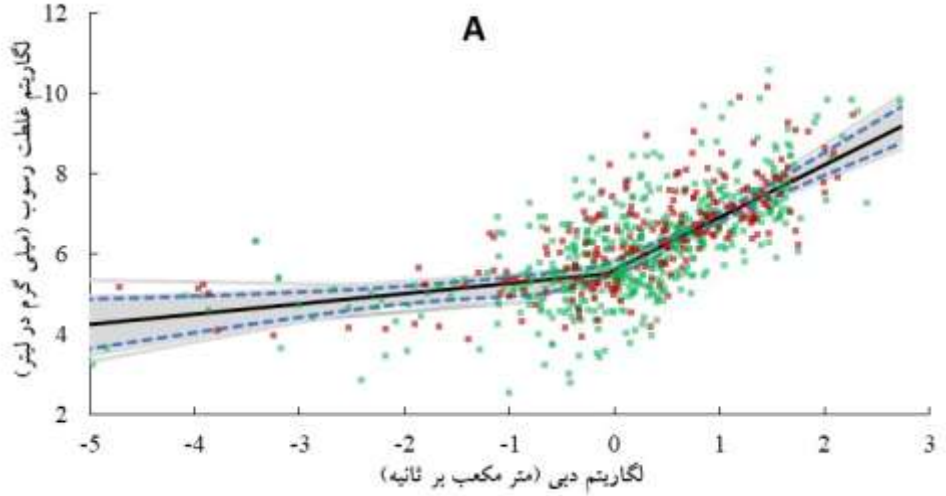
در شکل (۶) تعدادی از منحنی سنجه‌های برازش داده شده به همراه دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصدی خطوط منحنی سنجه برازش داده شده ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود در هر دو ایستگاه مورد مطالعه کمترین دامنه عدم قطعیت در نقطه دبی آستانه و نقاطی که بیشترین تراکم داده‌های مشاهداتی را دارند به دست آمده است. با افزایش و کاهش دبی دامنه عدم قطعیت افزایش پیدا کرده است مسئله ای که در تحقیقات Rustomji and Wilkinson(2008), Shiau and Chen (2015) and Fathabadi et al., (2022) نیز مشاهده کردند. دلیل این مسئله را می‌توان در کاهش تعداد نقاط داده‌های مشاهداتی و همچنین تغییر پذیری فرآیندهای هیدرولوژیکی که بر روی غلظت رسوب تاثیر در مقادیر دبی حدی تاثیر گذارند، نسبت داد.



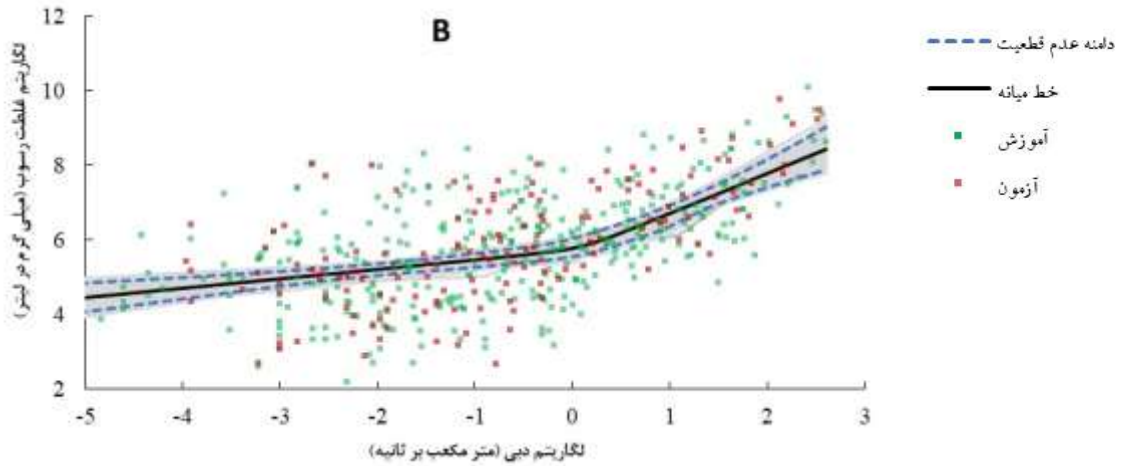
شکل ۴. نمودار Trace Plot پارامترهای شیب منحنی سنجه قبل از دبی آستانه (beta[1]) و دبی آستانه (x.change) برای ایستگاه رامیان



شکل ۵. مقادیر صدک‌های مختلف توزیع پسین پارامترهای مدل رگرسیون خطی بیزی قطعه ای A: ایستگاه تمر، B: ایستگاه رامیان



شکل ۶. دیاگرام پراکنش داده‌های دبی-غلظت به همراه ۲۰۰ خط رگرسیون خطی بیزی قطعه ای برازش داده شده بر اساس پارامترهای تابع توزیع پسین

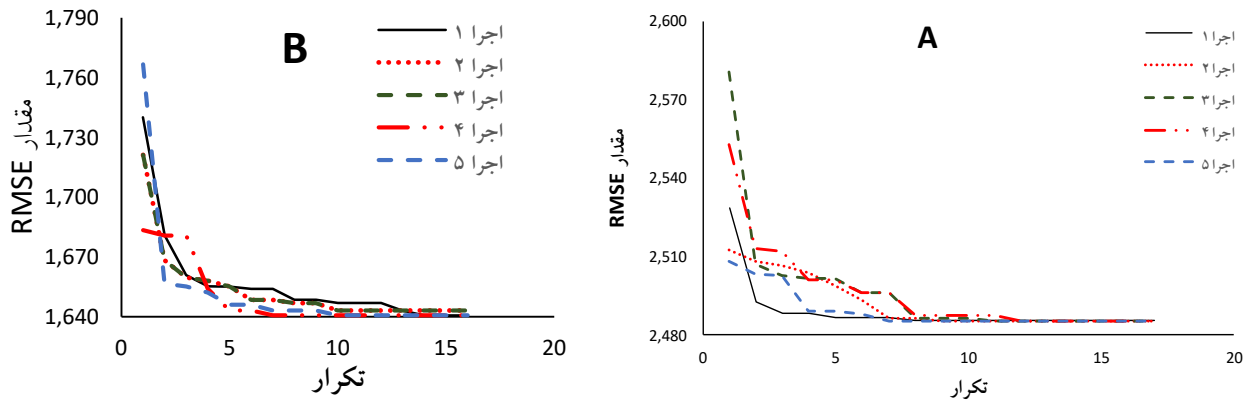


ادامه شکل ۶. دیاگرام پراکنش داده‌های دبی-غلظت به همراه ۲۰۰ خط رگرسیون خطی بیزی قطعه ای برازش داده شده بر اساس پارامترهای تابع توزیع پسین

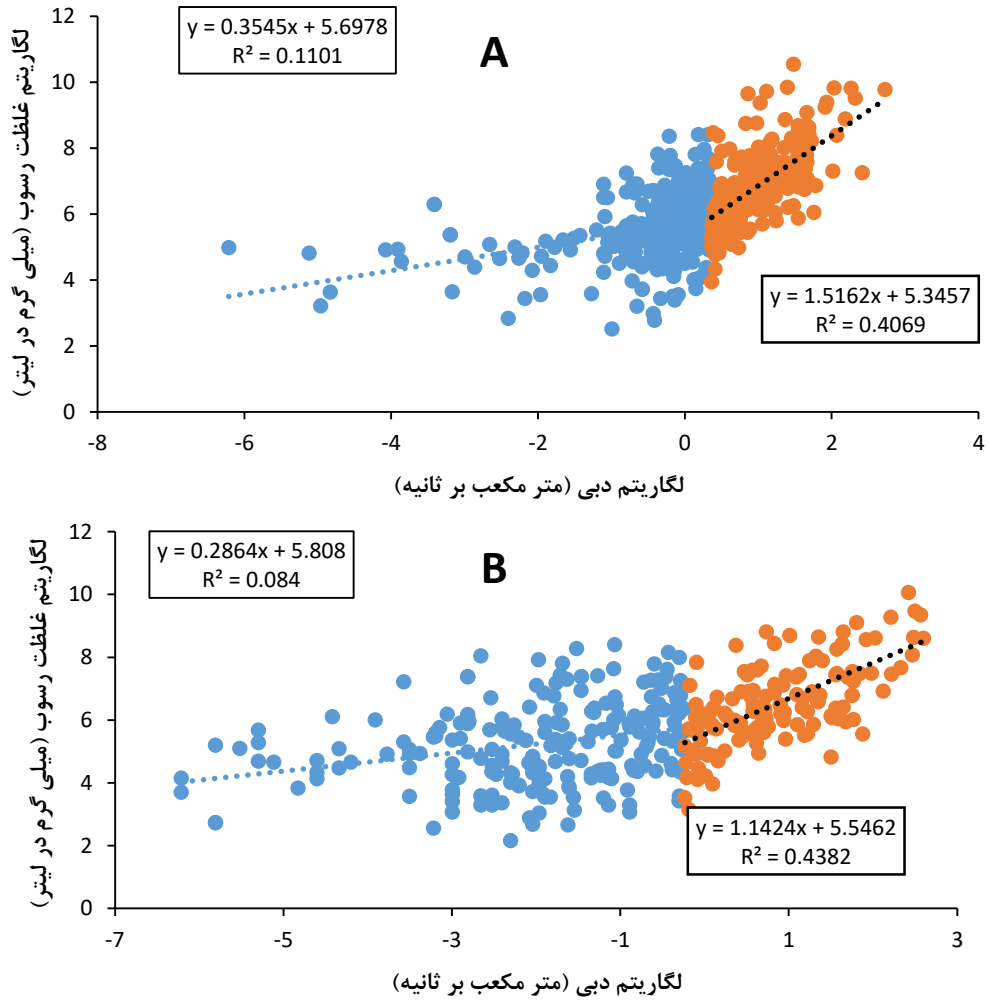
روش الگوریتم ژنتیک

برای اجرای روش الگوریتم ژنتیک در ابتدا دامنه در نظر گرفته شده برای دبی آستانه برابر با دبی حداقل و حداکثر داده‌های مشاهداتی بود. با اجرای الگوریتم ژنتیک برای هر دو ایستگاه دبی آستانه خیلی بزرگی بدست آمده به طوری که در هر دو ایستگاه مورد مطالعه تعداد کمی داده‌های دبی-غلظت برای داده‌های بزرگتر از دبی آستانه باقی مانده بود و به نوعی این روش از کارایی لازم برخوردار نبود. یک دلیل این مسئله را می‌توان در آن دانست که در حالت استفاده از الگوریتم ژنتیک با توجه به آنکه معیار هدف کمینه کردن جذر میانگین مربعات خطا بود دبی‌های بزرگتر که دارای غلظت رسوب بزرگتری هستند وزن بیشتری در تابع هدف داشته و اهمیت بیشتری به این داده‌ها داده می‌شود.

در ادامه دامنه بین صدک‌های ۲۵ و ۷۵ دبی مشاهداتی برای دامنه جستجوی دبی آستانه در نظر گرفته شد و سپس الگوریتم ژنتیک برای تعداد تکرار برابر با ۱۰۰ و ۵ مرتبه اجرا گردید (شکل ۷). با توجه به نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌شود برای هر دو ایستگاه مورد مطالعه این الگوریتم قادر بوده مقادیر بهینه دبی آستانه را در تعداد تکرار کم پیدا کند و الگوریتم به کمترین مقادیر تابع هدف همگرا شود. در ایستگاه تمر مقدار دبی آستانه بهینه در بین دو مقدار لگاریتم دبی‌های ۰/۳۶۱ و ۰/۳۶۴ متر مکعب بر ثانیه و برای ایستگاه رامیان بین دو مقدار لگاریتم دبی‌های ۰/۲۴۵- و ۰/۲۳۶- متر مکعب بر ثانیه قرار گرفته است. با مقایسه مقادیر بدست آمده با نتایج بیزی (شکل ۵) مشاهده می‌شود در ایستگاه تمر دبی آستانه بزرگتر از صدک ۹۷/۵ و برای ایستگاه رامیان بین صدک‌های ۲/۵ و ۲۵ بدست آمده است. بعلاوه در ایستگاه تمر مقدار دبی بهینه بیشتر شبیه دبی میانه داده‌های مشاهداتی بوده است و در ایستگاه رامیان بیشتر شبیه دبی آستانه میانه بدست آمده از تابع توزیع پسین بوده است. در نمودارهای شکل (۸) منحنی سنجه رسوب بدست آمده با این روش برای دو ایستگاه مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود در هر دو ایستگاه مورد مطالعه ضریب تعیین خطوط منحنی سنجه برازش داده شده به داده‌های بزرگتر و کوچک تر از دبی آستانه نسبت به حالت دبی میانه و دبی آستانه بدست آمده با روش بیزی بزرگتر بوده است.



شکل ۷. مقادیر تابع هدف در تکرار مختلف اجرای الگوریتم ژنتیک A: ایستگاه تمر، B: ایستگاه رامیان



شکل ۸. منحنی سنجه دو خطی برازش داده شده با دبی آستانه برابر بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک A: ایستگاه تمر، B: ایستگاه رامیان

مقایسه عملکرد روش‌های مختلف

به منظور مقایسه کمی نتایج بدست آمده از سه روش مختلف، مقادیر معیارهای ارزیابی ضریب تعیین، NSE و RMSE در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود در هر دو ایستگاه مورد مطالعه برای داده‌های آموزش بهترین مقادیر هر سه معیار ارزیابی برای حالتی بدست آمده که از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی دبی آستانه استفاده گردید. به نوعی این مسئله موید آن است که الگوریتم ژنتیک قادر بوده است مقادیر بهینه را طوری پیدا که کمترین مقدار RMSE و بیشترین مقدار NSE و ضریب همبستگی بدست آید. برای داده‌های اعتبار سنجی نیز روش الگوریتم ژنتیک با مقادیر RMSE، NSE و ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۲۴۴۳، ۰/۱۶ و ۰/۴۶ در ایستگاه تمر و مقادیر RMSE، NSE و ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۱۷۸۲، ۰/۳۵ و ۰/۷۷ برای ایستگاه رامیان، بهترین عملکرد نسبی را در میان روش‌های مورد مقایسه به خود اختصاص داده است. به نوعی این نتایج بیان گر آن است که روش الگوریتم ژنتیک قادر بوده است در دامنه در نظر گرفته شده بهترین مقادیر دبی میانه که به ازای آن عملکرد منحنی سنجه رسوب بهتر باشد را پیدا کند. در ایستگاه تمر هم برای داده‌های آموزش و هم برای داده‌های آزمون روش دبی میانه عملکرد بهتری نسبت به روش بیزی داشته است. در حالی که برای ایستگاه رامیان روش بیزی عملکرد بهتری در برآورد غلظت رسوب معلق داشته است. اگر چه روش بیزی در ایستگاه تمر عملکرد بهتری نسبت به روش دبی میانه نداشته است اما با استفاده از این روش می‌توان دامنه عدم قطعیت برای مقادیر پارامترها و رسوب برآوردی تخمین زد و به لحاظ آماری می‌توان اطلاعات بیشتری را استخراج کرد، مسئله ای که با دو روش دیگر قادر به ارائه آنها نمی‌باشیم. در مجموع در هر دو ایستگاه مورد مطالعه مقادیر معیارهای ناش ساتکلیف و ضریب همبستگی پایین بدست آمده است که این مسئله بر می‌گردد به پراکندگی بالای داده‌های دبی و غلظت رسوب در ایستگاه مورد مطالعه است و این امر را می‌توان در نمودارهای شکل‌های ۲، ۳ و ۸ ملاحظه کرد. این پراکندگی بالا در داده‌های دبی غظت را می‌توان در نتیجه عواملی از قبیل خطای اندازه گیری دبی و غلظت رسوب،

اثر هسترتیک و تغییر منابع رسوب در داخل حوضه برای بارش‌های مختلف دانست.

جدول ۲. مقادیر معیارهای ارزیابی روش‌های مختلف در دو ایستگاه تمر و رامیان

		آموزش				آزمون			
	معیار	الگوریتم ژنتیک	دبی میانه	بیزی	یک خطی	الگوریتم ژنتیک	دبی میانه	بیزی	یک خطی
ایستگاه تمر	RMSE	۲۴۸۵	۲۵۰۷	۲۵۳۴	۲۷۴۸	۲۴۴۳	۲۴۴۸	۲۴۶۳	۲۶۲۱
	NSE	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۰۷	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۳
	R	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷
ایستگاه رامیان	RMSE	۱۶۴۱	۱۷۴۷	۱۶۶۸	۱۹۰۵	۱۷۸۲	۱۹۲۷	۱۸۲۰	۲۱۳۶
	NSE	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۲۹	۰/۰۸	۰/۳۵	۰/۲۴	۰/۳۲	۰/۰۷
	R	۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۵۴	۰/۷۷	۰/۷۴	۰/۷۷	۰/۶۶

نتیجه گیری

در این تحقیق اقدام به برازش منحنی سنجه دو خطی با استفاده از روش‌های دبی میانه، بیزی و الگوریتم ژنتیک به داده‌های دبی و غلظت رسوب دو ایستگاه هیدرومتری رامیان و تمر در استان گلستان گردید. پس از بررسی اولیه داده‌ها اقدام به تعیین دبی آستانه و برازش منحنی سنجه گردید. نتایج نشان داد بر اساس معیارهای ارزیابی RMSE، NAE و ضریب تعیین، برای داده‌های آموزش و آزمون روش الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به روش‌های دبی میانه و بیزی داشته است. برای هر دو ایستگاه مورد مطالعه روش الگوریتم ژنتیک قادر بوده در دامنه در نظر گرفته شده مقادیر دبی آستانه را طوری تعیین کند که منحنی سنجه بهترین برازش را به داده‌های مشاهداتی داشته و ضریب تعیین منحنی سنجه‌های برازش داده شده نسبت به دو روش دیگر بزرگتر باشد. معمولا ساده ترین روش برای برازش منحنی سنجه دوخطی روش دبی میانه است که کاربر به راحتی می‌تواند مقدار دبی میانه را تعیین کند. در تحقیق Hoffmann et al (2020) نیز مشاهده کردند برای اغلب رودخانه‌های مطالعه شده در آلمان دبی آستانه کمی بزرگتر از میانگین هندسی داده‌های دبی بوده است. مزیت روش بیزی نسبت به دو روش دیگر تصادفی فرض کردن دبی آستانه و سایر پارامترهای منحنی سنجه رسوب است که در این حالت با استفاده از این رویکرد، برای هر کدام از آنها یک تابع توزیع پسین داریم که ما را قادر می‌سازد برخی استنباط‌های آماری مثل برآورد دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصدی برای هر یک از پارامترها و غلظت رسوب برآوردی را انجام دهیم. مشکل این روش نیاز به کد نویسی در نرم افزار WinBugs است. در مقابل اجرای روش الگوریتم ژنتیک نسبت به روش بیزی راحت است و قادر است برای دامنه در نظر گرفته شده بهترین مقادیر دبی آستانه را پیدا کند. اما همانند روش دبی میانه با استفاده از این روش نیز ن‌می‌توان تحلیل‌ها آماری و دامنه عدم قطعیت را ارائه کرد.

با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده گردید در هر دو رودخانه مورد مطالعه برای رابطه دبی–غظلت رسوب اثر آستانه ای قابل مشاهده است، بدین مفهوم که برای مقادیر دبی بزرگتر از دبی آستانه با افزایش مقدار دبی تغییر در مقدار غلظت رسوب نسبت به دبی‌های کمتر از دبی آستانه بیشتر بوده است. این افزایش در نتیجه عدم یکنواختی در فرآیندهای تولید رواناب و رسوب در دبی‌های مختلف و تغییر فرآیندهای تولید و حمل رسوب در دبی‌های بالا است که می‌تواند در اثر عواملی از قبیل تغییر منابع رسوب مثل اضافه شدن فرسایش کناره رودخانه در دبی‌های بالا، افزایش در قدرت حمل جریان که منجر به حمل رسوبات درشت دانه تر مثل ماسه می‌شود و تغییرات فصلی منابع رسوب باشد. در تحقیق Hoffmann et al (2020) نیز از ۶۲ ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه در آلمان تعداد ۵۲ ایستگاه دارای اثر آستانه ای بودند و در تحقیق Poulier et al (2019) برای رودخانه Rhone اثر آستانه ای مشاهده گردید. Bari et al (2026) گزارش دادند در دبی‌های پایین مقدار ذرات ماسه رسوب معلق بسیار پایین است و با افزایش مقدار دبی مقدار حمل ذرات ماسه به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. از سوی دیگر نتایج روش بیزی نشان داد در بین پارامترهای منحنی سنجه رسوب دو خطی در هر دو ایستگاه مورد مطالعه بیشترین عدم قطعیت برای دبی آستانه بدست آمده است در این حالت استفاده از روشی که قادر باشد مقدار بهینه این دبی را بدست آورد از اهمیت زیادی برخوردار است و می‌تواند منجر به کاهش عدم قطعیت در برآورد غلظت رسوب با استفاده از منحنی سنجه رسوب گردد.

در این تحقیق با توجه به داده‌های در دسترس و سایر محدودیت‌ها از مدل‌هایی برای تعیین دبی آستانه استفاده گردید که فرآیندهای رخ داده در حوضه مثل سیلابی یا غیر سیلابی بودن، تغییرات فصلی، اثر پسماند، اندازه ذرات رسوب، تغییرات پوشش گیاهی و غیره را در

نظر نمی‌گرفت. لذا برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود دبی آستانه با توجه به این فرآیندها تعیین گردد و با نتایج روش‌های استفاده شده در این تحقیق مقایسه شود. همچنین برای شناخت و فهم بهتر دبی آستانه در رودخانه‌های مختلف نیاز است تا داده‌های برداری به صورت ساعتی در طی چند سال صورت گیرد تا بتوان شرایطی که در ایجاد دبی آستانه موثر هستند را بهتر شناسایی کرد. به علاوه با ادغام داده برداری زیاد با روش انگشت نگاری و اندازه گیری اندازه ذرات رسوب می‌توان منابع رسوبی و فرآیندهایی را که در ایجاد این اثر آستانه ای نقش دارند را بهتر شناسایی کرد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه دانشگاه گنبد کاووس، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی در قالب پژوهانهٔ پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانهٔ برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در نگارش این مقاله، از ChatGPT برای ویرایش چکیده انگلیسی استفاده شده است. مسئولیت کامل محتوای نهایی مقاله بر عهده نویسنده گان است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه گنبد کاووس به خاطر حمایت مالی/ حمایت معنوی / همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تایید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

شیخ، واحدبردی؛ سقر، سلیمه؛ بهره‌مند، عبدالرضا؛ و کمکی، چوقی بایرام (۱۳۹۸). روندیابی جریان سطحی با استفاده از روش‌های موج سینماتیک و زمان–مساحت در حوزه آبخیز بالادست سد بوستان استان گلستان .*پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۰(۲۰)*، ۲۱۲.

محمدپور خوئی، محمد. مسعود؛ ناصری، محسن؛ و بنی هاشمی، سید محمد علی (۱۴۰۱). ارزیابی میزان سهم انسان و اقلیم در بروز تغییر رژیم هیدرولوژیکی به صورت قطعی و فازی: مطالعه موردی حوضه آبریز گرگانرود منتهی به ایستگاه هیدرومتری تمر .*فیزیک زمین و فضا، ۴۸(۲)*، ۴۲۰-۴۰۳. http://doi.org/10.22059/JESPHYS.2022.329382.1007352

فتح آبادی، ابوالجسن؛ کوهنشین، مهناز؛ حشمت پور، علی؛ و فراستی، معصومه (۱۳۹۹). مقایسه کارایی الگوریتم DDS با الگوریتم ژنتیک و تکامل

تصادفی جوامع در بهینهسازی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی یکپارچه .HyMod *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲(۱)، ۱۳۲-۱۵۷ .
http://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.122140.1492

REFERENCES

Achite, M., & Ouillon, S. (2007). Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). Journal of Hydrology Volume 343, Issues 3–4,187-202.

Alameddine, I., Qian, S. S., & Reckhow, K. H. (2011). A Bayesian change point-threshold model to examine the effect of TMDL implementation on the flow-nitrogen concentration relationship in the Neuse River basin. Water Research, 45, 51–62. https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.003 .

Bari, S. H., Yokoo, Y., & Leong, C. (2026). Temporal dynamics and threshold behaviors of suspended sediment transport in the Abukuma River, Japan. *Hydrological Research Letters*, *20*(1), 60–66. https://doi.org/10.3178/hrl.25-00049.

Benisi Ghadim, H., Salarijazi, M., Ahmadianfar, I., Heydari, M., & Zhang, T. (2020). Developing a Sediment Rating Curve Model using the Curve Slope. Pol. J. Environ. Stud. 29 (2), 1151–1159. https://doi.org/10.15244/pjoes/103470.

Dethier E.N., Renshaw, C. E., & Magilligan, F. J. (2020). Toward Improved Accuracy of Remote Sensing Approaches for Quantifying Suspended Sediment: Implications for Suspended? Sediment Monitoring. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 125(7). 10.1029/2019JF005033.

Fathabadi, A., Kouhneshin, M., Heshmatpour, A., & Farasati, M. (2020). Comparison of DDS algorithm efficiency with genetic algorithm and shuffled complex evolution in optimizing parameters of HyMod integrated hydrological model. *Journal of Watershed Engineering and Management*, *12*(1), 132-157. DOI: 10.22092/ijwmse.2018.122140.1492. (In Persian).

Fathabadi, A., Seyedian, S.M., & Malekian, A. 2022. Comparison of Bayesian, k-Nearest Neighbor and Gaussian process regression methods for quantifying uncertainty of suspended sediment concentration prediction. Science of the Total Environment, 818, 151760. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151760.

Fan, X., Shi, C., Zhou, Y., & Shao, W. (2012). Sediment rating curves in the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the upper Yellow River and their implications. Quat. Int. 282, 152–162.

Goldberg, D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading.

Hall, F. R. (1970). Dissolved solids-discharge relationships: 1. Mixing models. Water Resources Research, 6(3), 845–850. https://doi.org/10.1029/WR006i003p00845

Hall, F. R. (1971). Dissolved solids-discharge relationships: 2. Applications to field data. Water Resources Research, 7(3), 591–601. https://doi.org/10.1029/WR007i003p00591

Hoffmann, T. O., Baulig, Y., Fischer, H., & Blöthe, J. (2020). Scale breaks of suspended sediment rating in large rivers in Germany induced by organic matter, Earth Surf. Dynam., 8, 661–678, https://doi.org/10.5194/esurf-8-661-2020.

Jansson,M. B. (1996). Estimating a sediment rating curves of the Reventzon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. Journal of Hydrology ,183:4, 227-241.

Meybeck, M., & Moatar, F. (2012). Daily variability of river concentrations and fluxes: indicators based on the segmentation of the rating curve.Hydrological Processes, 26, 1188–1207.

Moatar, F., Abbott, B., Minaudo, C., Curie, F., & Pinay, G. (2017). Elemental properties, hydrology, and biology interact to shape concentration?discharge curves for carbon, nutrients, sediment, and major ions. Water ResourcesResearch, 53(2), 1270–1287.

Mohammadpour Khoie, M. M., Nasseri, M., & Banihashemi, S. M. A. (2022). Deterministic and fuzzy evaluation of human and climate contributions in changing hydrologic regime: A case study of the Gorganroud watershed at Tamar River hydrometric station. *Journal of the Earth and Space Physics*, *48*(2), 10. DOI: 10.22059/JESPHYS.2022.329382.1007352. (In Persian).

Peters-Ku¨mmerly, B.E. (1973). Untersuchungen u¨ber Zusammensetzung und Transport von Schwebstoffen in einigen Schweizer Flu¨ssen. Geographica Helvetica 28, 137–151.

Peterson, K. T., Sagan, V., Sidike, P., Cox, A. L., & Martinez, M. (2018). Suspended Sediment Concentration Estimation from Landsat Imagery along the Lower Missouri and Middle Mississippi Rivers Using an Extreme Learning Machine. Remote Sensing, 10(10), 1503. https://doi.org/10.3390/rs10101503.

Qian, S. S., & Cuffney, T. F. (2012). To threshold or not to threshold? That's the question. Ecological Indicators, 15, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.08.019

Rustomji, P., & Wilkinson, S. (2008). Applying bootstrap resampling to quantify uncertainty in *fl*uvial suspended sediment loads estimated using rating curves. Water Resour.Res. 44, W09435. https://doi.org/10.1029/2007WR006088

Ryan, S. E., Porth, L. S., & Troendle, C. A. (2002). Defining phases of bedload transport using piecewise regression. Earth Surface Processes and Landforms, 27, 971–990. https://doi.org/10.1002/esp.387

Shanley, J. B., McDowell, W. H., & Stallard, R. F. (2011). Long-term patterns and short-term dynamics of stream solutes and suspended sediment in a rapidly weathering tropical watershed. Water Resources Research, 47, W07515. https://doi.org/10.1029/2010WR009788

Shiau, J.T., & Chen, T.J. (2015). Quantile regression-based probabilistic estimation scheme for daily and annual suspended sediment loads. Water Resour. Manag. 29, 2805–2818.

Sheykh, V., Saghari, S., Bahremand, A., & Komaki, C. B. (2019). Surface flow routing using kinematic wave and time-area methods in the upstream watershed of Bustan Dam, Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research, 10*(20), 212. (In Persian).

Syvitski, J.P.M., Morehead, M.D., Bahr, D.B., & Mulder, T. (2000). Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters. Water Resour. Res. 36:2747–2760. https://doi.org/10.1029/2000WR900133.

Toone, J., Rice, S., & Piegay, H. (2014). Spatial discontinuity and temporal evolution of channel morphology along a mixed bedrock-alluvial river, upper Drome River, southeast France: Contingent responses to external and internal controls. Geomorphology, 205, 5–16. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.033

Underwood, K. L., Rizzo, D. M., Schroth, A. W., & Dewoolkar, M. M. (2017). Evaluating spatial variability in sediment and phosphorus concentration-discharge relationships using Bayesian inference and self-organizing maps. Water Resources Research, 53, 10,293–10,316. https://doi.org/10.1002/2017WR021353

Wang, H., Yang, Z., Wang, Y., Saito, Y., & Liu, J. P. (2008). Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the seasince the 1860s. Journal of Hydrology, 349, 318–332. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.005

Walling, D.E. (1974). Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization. ppIn: Gregory, K.J., Walling, D.E. (Eds.), Fluvial Processes in Instrumented Watersheds. 6. Institute of British Geographers Special Publication

Wang, J., & Lu, X.X. (2010). Estimation of suspended sediment concentrations using Terra MODIS: An example from the Lower Yangtze River, China, The Science of The Total Environment 408(5):1131-8.

Zhan, C., Yu, J., Wang, Q., & Chu, X. (2017). Remote sensing retrieval of surface suspended sediment concentration in the Yellow River Estuary. Chin. Geogr. Sci. 27, 934–947 (2017). https://doi.org/10.1007/s11769-017-0921-7

Zhang, Q., Harman, C. J., & Ball, W. P. (2016). An improved method for interpretation of riverine concentration-discharge relationships indicates long-term shifts in reservoir sediment trapping. An improved method forinterpretation of riverine concentration-discharge relationships indicateslong-term shifts in reservoir sedimenttrapping, Geophys. Res. Lett., 43,10,215–10,224, doi:10.1002/2016GL069945.