

Optimization of threshold discharge for bilinear sediment rating curves using genetic algorithm and Bayesian Approaches (Case study: Tamar and Ramian stations in Golestan Province)

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 approach revealed that the threshold discharge estimated by the Genetic Algorithm was located between the 75th and 97.5th percentiles of the observed discharge distribution at the Tamar station, whereas at the Ramian station it was situated between the 2.5th and 25th percentiles.

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

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 km², 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 approach showed that the threshold discharge estimated by the Genetic Algorithm was located between the 75th and 97.5th percentiles of the discharge distribution at the Tamar station, whereas it was situated between the 2.5th and 25th percentiles at the Ramian station. 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.

Keywords: Suspended sediment; sediment rating curve; Bayesian approach; genetic algorithm; bilinear sediment rating curve.

Funding

Author Contributions

Data Availability Statement

Acknowledgements

Ethical considerations

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

چکیده

با توجه به پراکنش داده های دبی-غلظت رسوب در اغلب رودخانه ها برآزش منحنی سنج رسوب یک خطی مناسب نبوده و برای داده های با بزرگی متفاوت منحنی سنج های متفاوتی برآزش داده می شود. بدین منظور در این تحقیق اقدام به تعیین دبی آستانه با استفاده از روش های 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 داده های دبی-رسوب برای روش بیزی مدل رگرسیون خطی بیزی بخشی 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 (صدک ها ۲۵ و ۷۵) دبی ها 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 داده های آموزش و آزمون الگوریتم ژنتیک با داشتن مقادیر RMSE، ناش سانتکیف و ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۰/۱۶، ۲۴۴۳ و ۰/۴۶ در ایستگاه تمر و مقادیر NSE، RMSE و ضریب همبستگی به ترتیب برابر ۰/۳۵، ۱۷۸۲ و ۰/۷۷ برای ایستگاه رامیان عملکرد بهتری نسبت به روش های دبی میانه و بیزی داشته است. در مقایسه با روش بیزی مشاهده گردید دبی آستانه بدست آمده از روش الگوریتم ژنتیک در ایستگاه تمر بین صدک های ۷۵ و ۹۷/۵ و برای ایستگاه رامیان بین صدک های ۲/۵ و ۲۵ قرار می گیرد.

واژه های کلیدی: رابطه دبی-غلظت، بهینه سازی، توزیع پسین، غلظت رسوب

۱. مقدمه

فرسایش و حمل رسوب فرآیندی طبیعی در رودخانه ها است که با جدایش ذرات از بستر اصلی خود شروع می شود و در ادامه این مواد فرسایش یافته توسط آب حمل می شود. برآورد می شود در حدود ۹۰ درصد از کل رسوب حمل شده توسط رودخانه به صورت معلق انتقال پیدا می کند (Syvitski et al., 2000; Achite and Ouillon, 2007). پیش بینی مناسب مقدار بار رسوب معلق در برآورد حجم مرده سد، طراحی سازه های کنترل سیل و سایر سازه های بستر رودخانه، مدیریت مناطق ساحلی، تصمیم گیری در مورد تخصیص منابع آب، بهینه سازی شبکه آبیاری و محاسبه بودجه رسوب پایین دست اهمیت دارد (Zhan et al., 2017). برآورد نادرست غلظت رسوب معلق (SSC) می تواند به تحلیل های نادرست خطر سیلاب و برآوردهای غلط بار آلاینده ها منجر شود، که این موضوع به طور بالقوه می تواند تصمیم گیری های کنترلی و سرمایه گذاری در زیرساخت ها را به شکل نامطلوب و ناکارآمد تحت تأثیر قرار دهد. در مقابل، برآورد قابل اعتماد غلظت رسوب معلق (SSC) امکان شناسایی رویدادهای رسوبی با شدت بالا و همچنین روندهای بلندمدت را فراهم می سازد؛ موضوعی که برای برنامه ریزی عملیات لایروبی، بهینه سازی سیاست های مدیریت رسوب و کاهش هزینه های نگهداشت سدها و آبراهه ها 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 می باشد. معمولا اندازه گیری مقدار بار رسوب معلق به صورت مستقیم کار هزینه بر و اغلب غیر ممکن است در نتیجه اغلب رودخانه ها فاقد نمونه های زیاد هستند (Peterson et al., 2018; Wackerman et al., 2017). در این حالت محققین برای برآورد بار معلق اقدام به مدل سازی و استفاده از سایر متغیرهای مستقل برای پیش بینی رسوب معلق کرده اند. در رودخانه ها و کانال های طبیعی رسوب معلق در حالت کمتر از ظرفیت حمل انتقال پیدا می کند بنابراین برای برآورد رسوب معلق نمی توان از مدل های فیزیکی استفاده کرد. در این حالت روش های تجربی که به عنوان روش آماری نیز شناخته می شود استفاده گسترده ای در بین هیدرولوژیست ها پیدا کرده است. یکی از متداول ترین مدل های آماری برای برآورد رسوب معلق، منحنی سنج رسوب است که بصورت یک رابطه توانی بیان می شود. 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 سنج رسوب از داده های غلظت رسوب و دبی لگاریتم گیری می شود در این حالت رابطه دبی-غلظت برازش داده شده به داده های لگاریتم گیری شده به صورت خط راست است و پراکنش نقاط اطراف این خط می باشند.

معمولا رسوب معلق در وضعیت بار کمتر از ظرفیت اشباع حمل می شود در این حالت برای یک دبی مشخص بسته به مقدار رسوب در دسترس غلظت مقاوتی از رسوب انتقال پیدا می کند بنابراین جفت نقاط دبی غلظت مورد استفاده در برازش منحنی سنج دارای پراکنش بالایی می باشند. تولید و حمل رسوب در یک حوضه منحصرا تحت تاثیر خصوصیات هیدرولیکی جریان نمی باشد 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 می باشد 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 متفاوت می باشد و در زمان سیلاب بسته به تغییرات مکانی و زمانی بارش منابع رسوب متغیر بوده و این تغییر منبع موجب تغییر در مقدار و غلظت رسوب خروجی حوضه برای دبی های مختلف می شود. 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 تغییرات میزان رسوب و غلظت رسوب در دبی های 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 سنج به کل داده های دبی و رسوب مناسب نمی باشد. از این رو محققین اقدام به برازش منحنی سنج دو خطی به داده های دبی-غلظت رسوب کرده اند. به طوری که برای داده های کمینه یک منحنی سنج و برای داده های بیشینه منحنی سنج دیگر برازش دادند. در این حالت مسئله مهم تعیین نقطه ای است که شیب منحنی سنج رسوب تغییر می کند. 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 سنج رسوب تعیین کرده اند. این در حالی است که برای اغلب رودخانه تغییر رفتار رابطه دبی-رسوب در دبی میانه رخ نمی دهد 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 Ryan et al., 2002 نیز از روش بوت استرپ برای تعیین دبی آستانه استفاده کردند. در تحقیق Jansson (1996) که اقدام به برازش منحنی سنج دو خطی به داده های دبی-بار رسوب رودخانه Reventazdn در کاستاریکا کردند دبی آستانه به صورت بصری و مشاهده تغییر شیب منحنی سنج رسوب تعیین گردید. Benisi Ghadim et al (2020) در ابتدا منحنی سنج رسوب توانی به داده ها برازش دادند و نقطه ای از منحنی سنج توانی که شیب خط برابر با یک بود به عنوان دبی موثر انتخاب کردند. Hoffmann et al (2020) از سه روش حداکثر انحنای منحنی رگرسیون LOWESST، کمینه سازی مقدار میانگین خطای مطلق در مقیاس داده های واقعی و داده های 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 متغیر 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 می شوند.

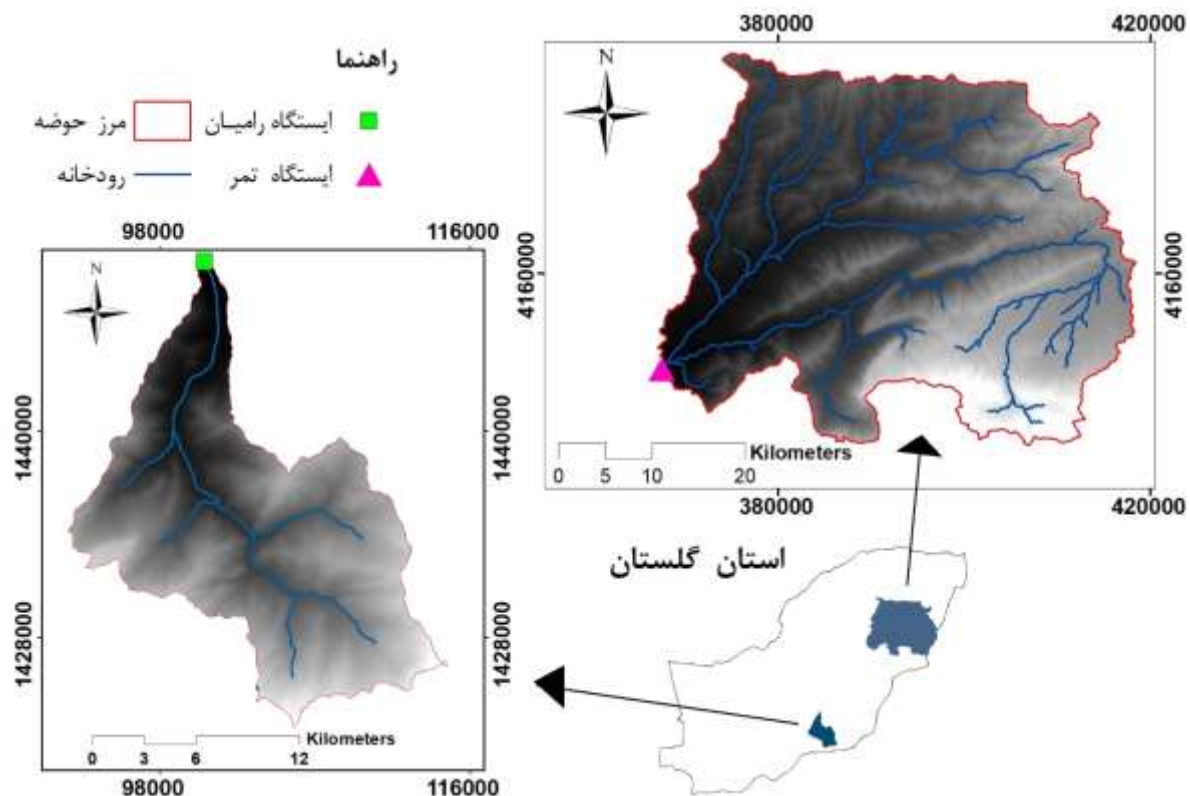
تعیین نقطه آستانه تغییر شیب منحنی سنج رسوب (دبی آستانه) نه تنها باعث بهبود در برازش منحنی سنج می شود بلکه دید بهتری نسبت به عوامل ایجاد کننده این پدیده ارائه می دهد و متناسب با سطوح مختلف دبی استراتژیهای مدیریتی مناسب ارائه می دهند. در طی دو دهه گذشته شاهد استفاده گسترده از الگوریتمهای بهینه سازی تکاملی (Evolutionary Optimization) مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام پرندگان و غیره در بهینه سازی و حل مسائل بهینه سازی 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.

۲. روش تحقیق

۱-۲. منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق اقدام به برازش منحنی سنج 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 $55^{\circ}30'05''$ تا $56^{\circ}03'05''$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ}25'58''$ تا $37^{\circ}46'13''$ قرار دارد. مساحت این حوضه برابر با $1578/77$ کیلومتر مربع، محیط آن برابر با $223/3$ کیلومتر، متوسط بارش سالانه آن حدود 465 میلی متر و دارای اقلیم نیمه خشک تا نیمه مرطوب است. حداقل و حداکثر و متوسط ارتفاع حوضه به ترتیب برابر 108 ، $748/72171$ متر هستند (شیخ و همکاران، ۱۳۹۸؛ محمد پور خویی و همکاران، ۱۴۰۱). کاربری غالب حوضه کشاورزی بصورت دیم می باشد و در قسمت های شرقی حوضه کاربری جنگلی غالب است.

ایستگاه رامیان با موقعیت طول جغرافیایی $55^{\circ}08'$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ}01'$ بر روی رودخانه قره چای نزدیک شهر رامیان قرار گرفته است. مساحت حوضه بالادست این ایستگاه برابر با 24816 هکتار و طول رودخانه قره چای با روند جنوبی-شمالی برابر با $35/8$ کیلومتر است. کاربرهای این حوضه شامل جنگل، مرتع و کشاورزی به ترتیب با مساحت های $18477/53$ ، 827 و $3418/43$ هکتار می باشد. متوسط شیب این حوضه برابر با $36/04$ درصد است که جزء حوضه ها با شیب تند قرار می گیرد (فتح آبادی و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۱. موقعیت ایستگاه های مورد مطالعه

در این تحقیق از داده های همزمان دبی-غلظت رسوب برداشت شده توسط شرکت آب منطقه ای استان گلستان در بازه زمانی سال های ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۸ استفاده گردید. با بررسی داده ها و حذف داده های 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 روش های مختلف، استفاده گردید. در جدول ۱ برخی شاخص های آماری برای داده های دبی و غلظت رسوب برای دو ایستگاه تمر و رامیان ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر شاخص های آماری داده های دبی-غلظت رسوب در دو ایستگاه مورد مطالعه

ایستگاه	آموزش				آزمون			
	حداقل	حداکثر	میان	میانگین	حداقل	حداکثر	میان	میانگین
تمر	۰/۰۰۵	۹/۷۶۰	۱/۴۹۰	۲/۰۱۲	۰/۰۰۲	۱۲/۳۳	۳۸۰۳۴/۶۷	۱/۲۷۵
	۳۲/۴۱	۲۴۸۵۳	۹۳۹/۹۹۶	۱۳۸۹/۰۷	۱۱/۸۲۸	۱۱۸۹/۷۸	۳۵۵/۹۹	۱/۳۹۵
رامیان	۰/۰۰۲	۱۲/۷۴۰	۰/۴۳۰	۱/۳۶۸	۰/۰۰۲	۱۳/۴۶۰	۱۲/۲۵	۰/۵۲۰
	۰/۰۴۷	۱۴۱۶۶	۱۰/۷۱۴	۴۶۱/۷۱۹	۰/۰۰۴	۲۲۸۲۳/۵۵	۳۵۵/۹۹	۱/۳۹۵

۲-۲. منحنی سنج رسوب

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

$$C = aQ_w^b \quad \text{رابطه (۱)}$$

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

$$\ln(C) = \ln(a) + b \ln(Q_w) + \epsilon \quad \text{رابطه (۲)}$$

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، تغییرات فصلی و غیره است که باعث پراکنش نقاط اطراف خط راست می شود. این ترم همچنین نشان دهنده خطای برآورد پارامترها است.

۲-۳. 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 داده های 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).

$$\text{where: } y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2), \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\mu_y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1(x - \theta), & \text{if } x < \theta \\ \beta_0 + \beta_2(x - \theta), & \text{if } x > \theta \end{cases}$$

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، β_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 توزیع های پیشین نمایش داده می شوند. با جمع آوری داده و استفاده آنها در مدل توزیع های پیشین به روز می شوند تا توزیع های پسین برای پارامترها بدست آیند. از آنجا که در این تحقیق اطلاعات پیشین برای پارامترها در دسترس نبوده 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 داده های 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 مارکوف 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 نمونه های برداشت شده از هر ۱۰ نمونه برداشت شده یک نمونه حفظ و باقی نمونه ها کنار گذاشته شدند. برای هر پارامتر ۵۰۰۰۰۰ نمونه اولیه به عنوان دوره سوخت در نظر گرفته شد.

۲-۴. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی تکاملی است که از فرآیند تکامل بیولوژی طبیعت بر سه فرآیند تولید مثل، باز ترکیب و جهش الهام گرفته است (Goldberg, 1989). در الگوریتم ژنتیک فرآیند بهینه سازی با تولید جمعیت اولیه کروموزوم ها شروع می شود. 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 می شود. تعداد کروموزم های 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 کروموزوم مدل اجرا و تابع هدف محاسبه می شود. سپس با توجه به مقادیر بدست آمده تعدادی کروموزوم به صورت تصادفی، با استفاده از چرخ رولت، به عنوان کروموزوم مادر انتخاب می شوند و عملگرهای تولید مثل و جهش بر روی آنها صورت می گیرد تا جمعیت جدید ایجاد شوند. در فرآیند تولید مثل همانند تولید مثل طبیعی به نوعی کروموزوم ها با یکدیگر ترکیب می شوند تا فرزندان جدید ایجاد شود و به نوعی خصوصیات کروموزوم های والد خود را به ارث می برند. در فرآیند جهش در برخی از کروموزوم ها تغییرات تصادفی ایجاد می شود که منجر به ایجاد کروموزوم های جدید می شود برخی از این تغییرات مناسب نبود حذف می شوند اما ممکن است برخی از این جهش ها مناسب بوده و باعث ارتقا جمعیت می شود. با استفاده از فرزندان جدید تولید شده توسط عملگرهای تولید مثل و جهش، مدل اجرا می شود و تابع هدف محاسبه می شود. با در نظر گرفتن مقدار تابع هدف محاسبه شده بهترین کروموزوم ها برای ایجاد جمعیت جدید به صورت تصادفی انتخاب می شوند. این مراحل تکرار می شوند 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.

۲-۵. معیارهای ارزیابی

به منظور مقایسه ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف در پیش بینی از معیارهای ضریب همبستگی^۲، RMSE^۲ (رابطه ۴) و NSE^۳ (رابطه ۵) استفاده شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_{ci} - S_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (S_{oi} - \bar{S_{oi}})^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

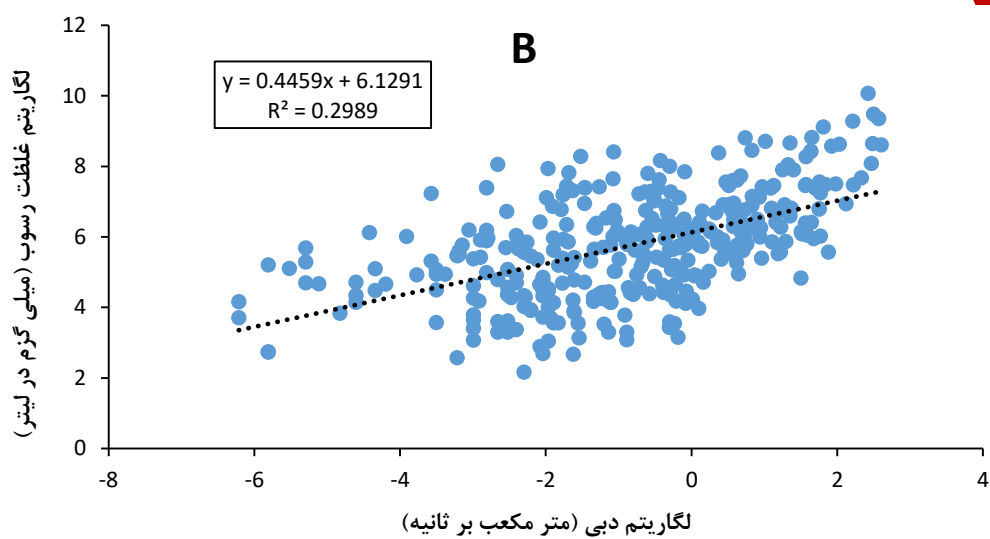
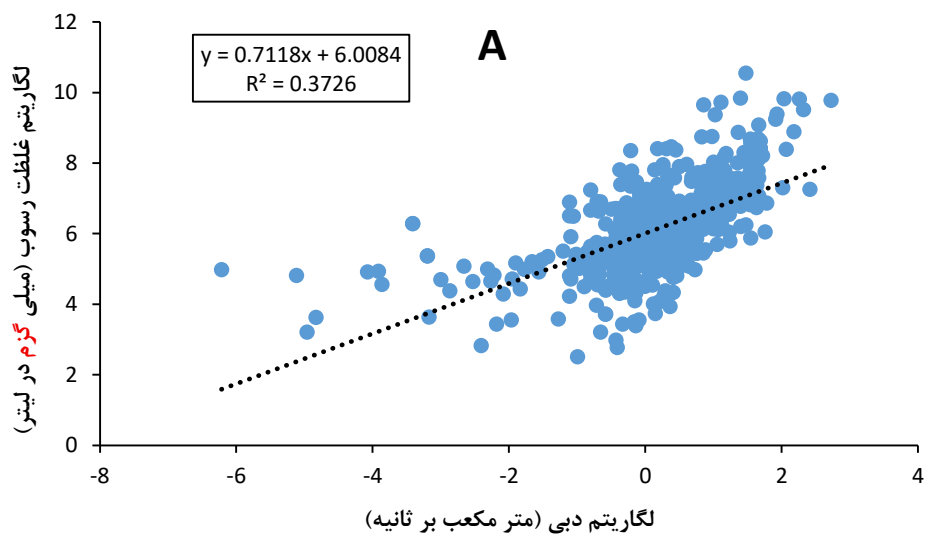
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (S_{ci} - S_{oi})^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این روابط n تعداد داده‌ها، S_{oi} مقدار i-امین غلظت رسوب اندازه‌گیری شده، S_{ci} مقدار i-امین غلظت رسوب پیش‌بینی شده است. مقدار NSE بین منفی بینهایت تا ۱ متغیر و مقادیر بزرگتر نشان از عملکرد بهتر مدل دارد. مقدار RMSE نیز بین صفر تا بینهایت متغیر بوده که مقادیر کمتر نشان از عملکرد بهتر مدل دارد.

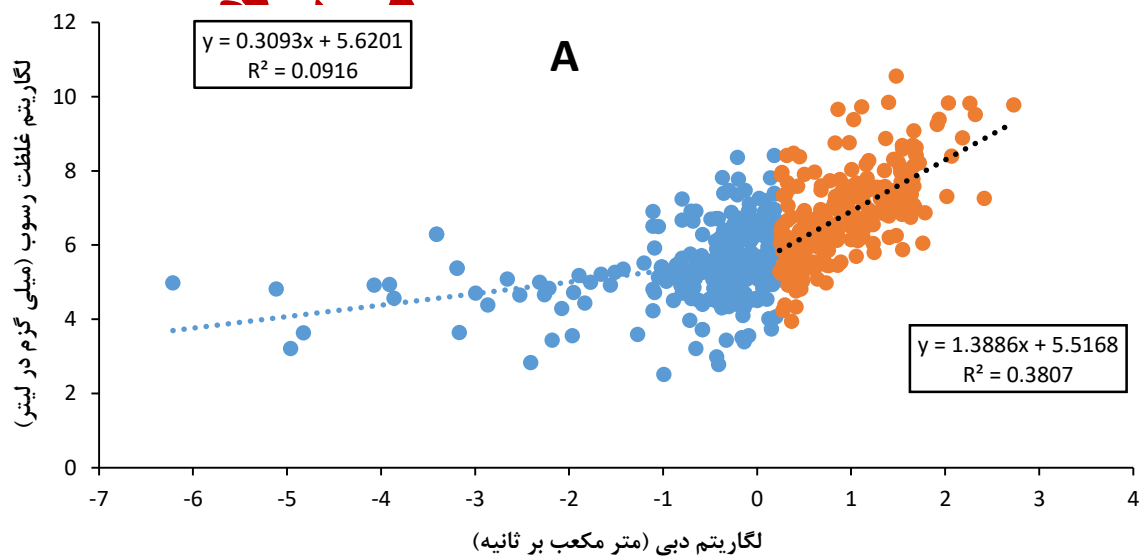
۳. نتایج و بحث

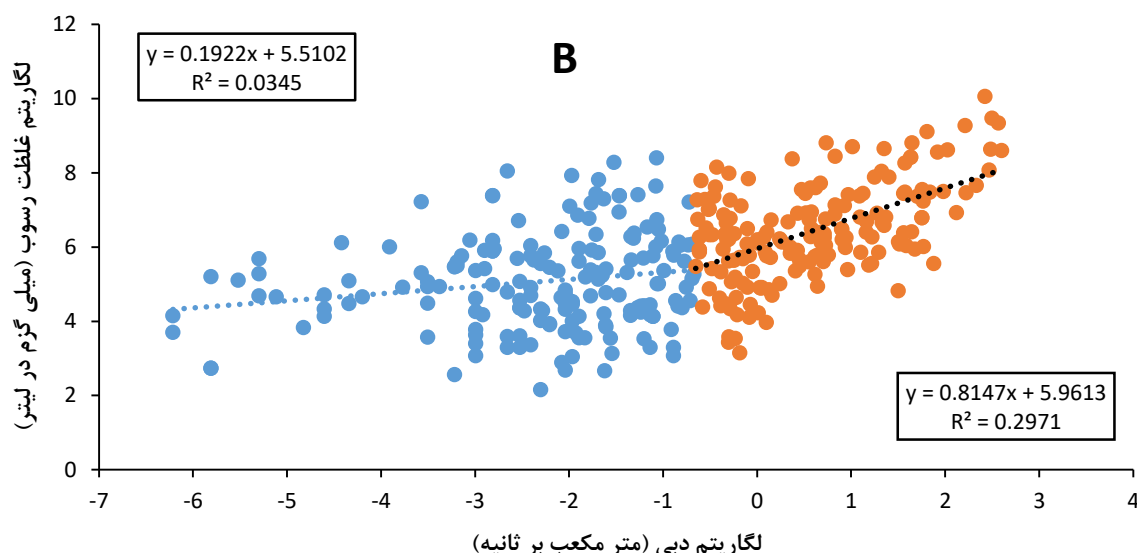
۳-۱. برازش منحنی سنجه یک خطی و دو خطی

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 حالتی که دبی آستانه برابر با دبی میانه بود، برازش داده‌شده 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 داده‌شده 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 بوده‌اند.



شکل ۲. منحنی سنجی یک خطی برازش داده شده A: ایستگاه تیم، B: ایستگاه رامیان





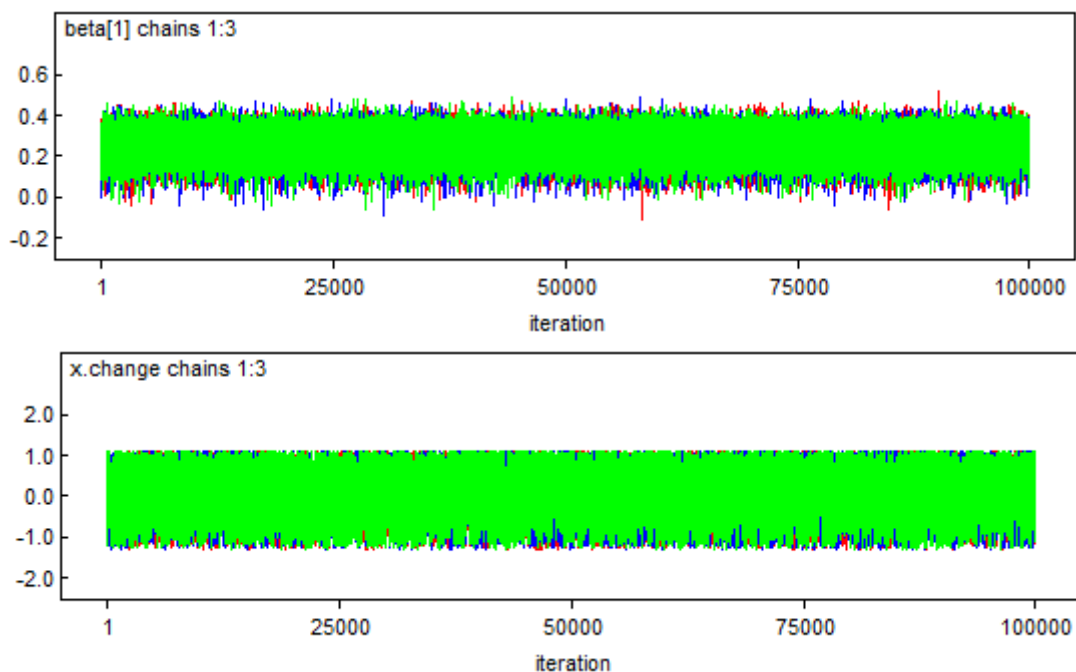
شکل ۳. منحنی سنجه دو خطی برازش داده شده با دبی آستانه برابر با دبی میانه A: ایستگاه تمر، B: ایستگاه رامیان

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 می باشد. 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 ایستگاه های تمر و رامیان به ترتیب برابر با $1/275$ و $0/52$ متر معکب بر ثانیه بدست آمدند. یکی از ویژگیهای منحنی سنجه رسوب نسبت به روش های دیگر مبتنی بر داده قابل تفسیر بودن ضرایب منحنی سنجه رسوب است. Peters-KuEmmerly (1973) بیان می کند 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 می دهد که افزایش کمی در مقدار دبی منجر به افزایش شدید در قدرت فرسایش رودخانه می شود. همچنین با افزایش دبی چه مقدار منابع جدید رسوب در دسترس قرار می گیرند. بعلاوه Walling (1974) بیان می کند مقدار ضریب b تحت تاثیر اندازه ذرات قابل حمل می باشد 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 می شود مقدار ضریب a در دو ایستگاه مورد مطالعه نزدیک هم بوده است در حالی که مقدار ضریب b در ایستگاه تمر نسبت به ایستگاه رامیان بزرگتر بوده است که نشان دهند اهمیت بیشتر قدرت جریان در حمل رسوبات در حوضه بالادست ایستگاه تمر است. حوضه بالادست ایستگاه تمر توسط رسوبات لسی دوره کواترنری 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 می باشد و سازندهای آن حساسیت کمتری نسبت 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 $-1/1$ تا $2/37$ و ضریب b بین $0/44$ تا $1/54$ 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 می گیرد در حالی که مقادیر $\log(a)$ برای دو ایستگاه تمر و رامیان بزرگتر از مقادیر مربوطه در زیر حوضه رودخانه زرد چین بوده است. به علاوه مقادیر ضرایب b بدست آمده در ایستگاه در محدوده مقادیر $0/2$ تا 2 که توسط Syvitski et al (2000) پیشنهاد شده است قرار می گیرد. از سوی دیگر برای منحنی سنجه های دو خطی برازش داده شده مقادیر ضریب b برای خط منحنی سنجه رسوب در دبی های کمتر از آستانه در دامنه $-0/75$ و $1/15$ و برای دبی های بیشتر از آستانه در دامنه $-0/6$ تا $2/45$ که توسط Hoffmann et al (2020) برای رودخانه های آلمان محاسبه شده

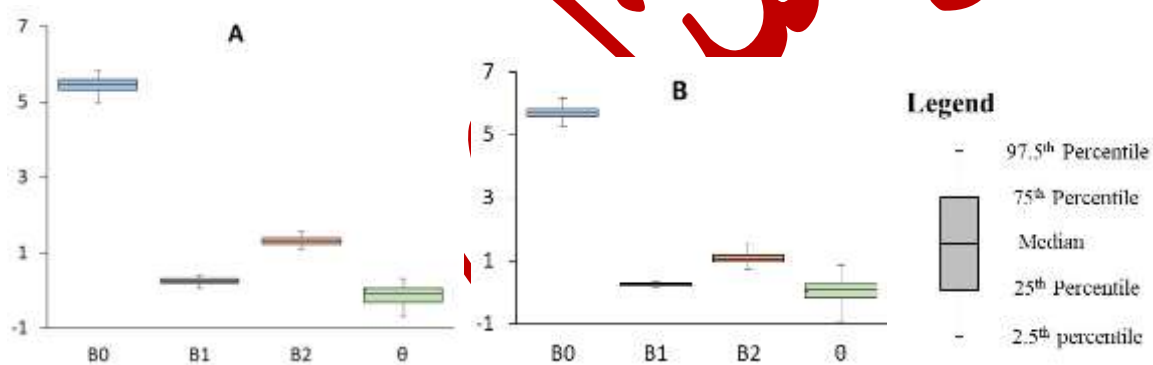
است قرار گرفته است. به علاوه در تحقیق (Hoffmann et al (2020 مشاهده کردند از ۶۲ ایستگاه در ۳۳ ایستگاه، همانند دو ایستگاه مورد مطالعه در این تحقیق، با افزایش دبی مقدار غلظت رسوب افزایش پیدا می کند.

۳-۲. روش بیزی

برای اجرای رویکردی بیزی در نرم افزار Winbugs کد نویسی گردید. در این نرم افزار پس از تعیین توابع پیشین، ساختار مدل و معرفی داده ها 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 می رسد. 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 می شود برای تمام پارامترها در تعداد اجرای کم زنجیر به همگرایی رسیده است همچنین مقادیر آماره Gelman-Ruben برای تمام پارامترهای مورد بررسی نزدیک یک بودند. قابل ذکر است که در روش بیزی مقادیر لگاریتم گیری شده داده های دبی و غلظت رسوب استفاده شده اند بنابراین پارامتر دبی آستانه در شکل های ۴ و ۵ در مقیاس لگاریتمی است و دارای مقادیر منفی است. در نمودارهای شکل (۵) صدک های 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 سنج برآزش داده شده به داده های 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 -0.699 و 0.315 و در ایستگاه رامیان به ترتیب برابر با -0.837 و 0.861 بدست آمدند. با مقایسه چارک های مختلف بدست آمده برای توزیع پسین دبی آستانه با مقدار دبی میانه مشاهده می شود در ایستگاه تمر، دبی میانه بین صدک های ۷۵ و ۹۷/۵ درصد قرار گرفته است و به نوعی دبی آستانه میانه توزیع پسین با مقدار 0.924 متر مکعب بر ثانیه کمتر از دبی میانه داده های مشاهداتی است. در حالی که برای ایستگاه رامیان دبی میانه بین صدک های ۲/۵ و ۲۵ درصد قرار می گیرد که به نوعی نشان می دهد که دبی آستانه میانه توزیع پسین با مقدار 1.07 متر مکعب بر ثانیه بزرگتر از دبی میانه داده های مشاهداتی است.

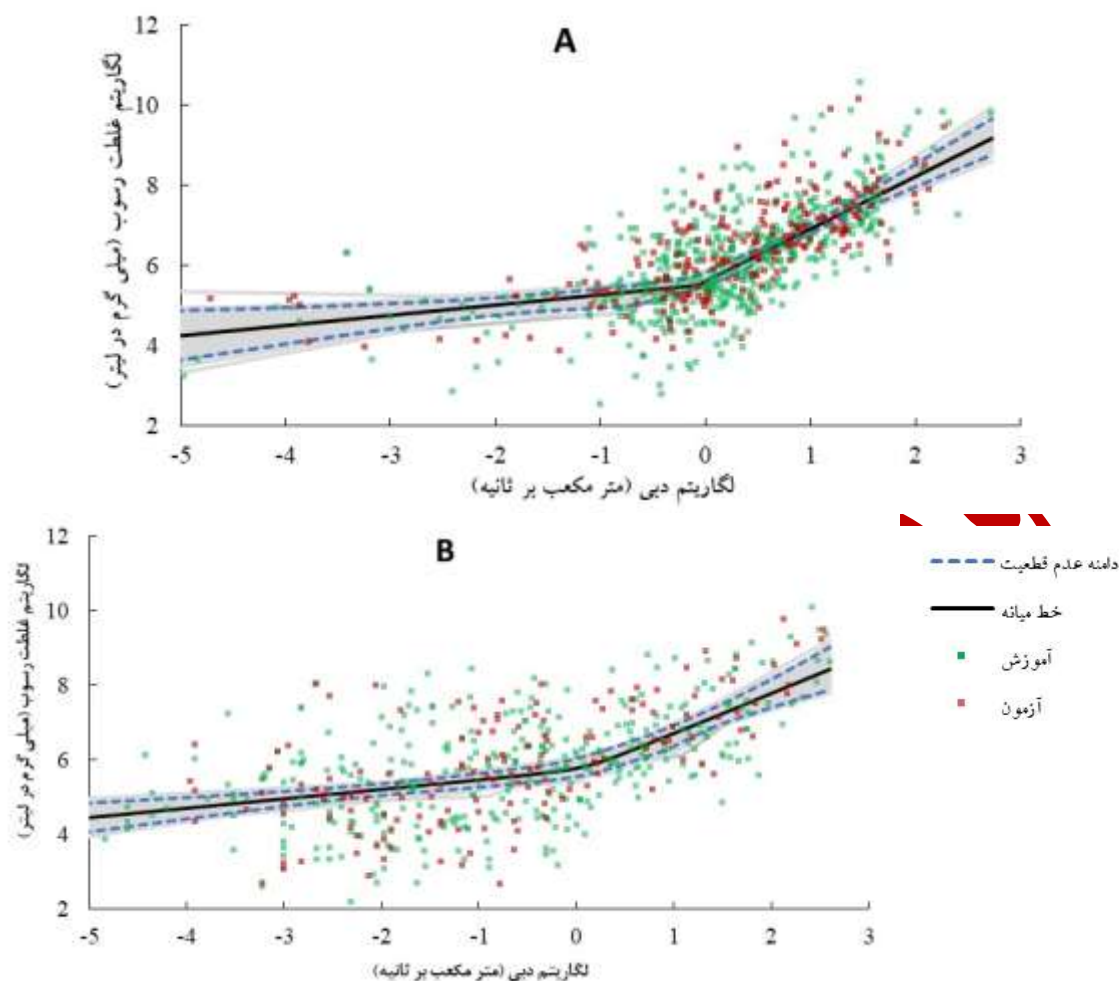


شکل ۴. Trace Plot پارامترهای شیب منحنی سنجه قبل از دبی آستانه ($\beta[1]$) و دبی آستانه ($x.change$) برای ایستگاه رامیان



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

در شکل (۶) تعدادی از منحنی سنجه های 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 می شود در هر دو ایستگاه مورد مطالعه کمترین دامنه عدم قطعیت در نقطه دبی آستانه و نقاطی که بیشترین تراکم داده های 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 می توان در کاهش تعداد نقاط داده های مشاهداتی و همچنین تغییر پذیری فرآیندهای هیدرولوژیکی که بر روی غلظت رسوب تاثیر در مقادیر دبی حدی تاثیر گذارند، نسبت داد.



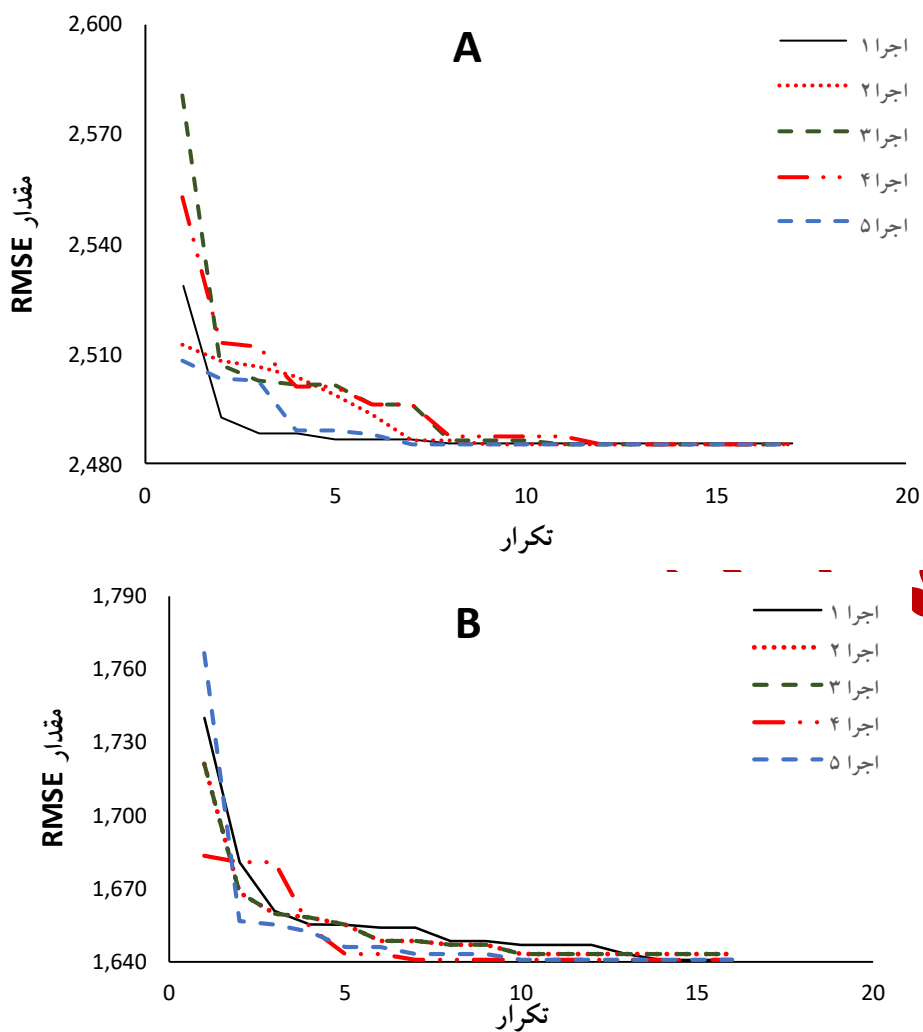
شکل ۶. دیاگرام پراکنش داده های دی-غلظت به همراه ۲۰۰ خط رگرسیون خطی بیزی قطعه ای برازش داده شده بر اساس پارامترهای تابع توزیع پسین

۳-۳. روش الگوریتم ژنتیک

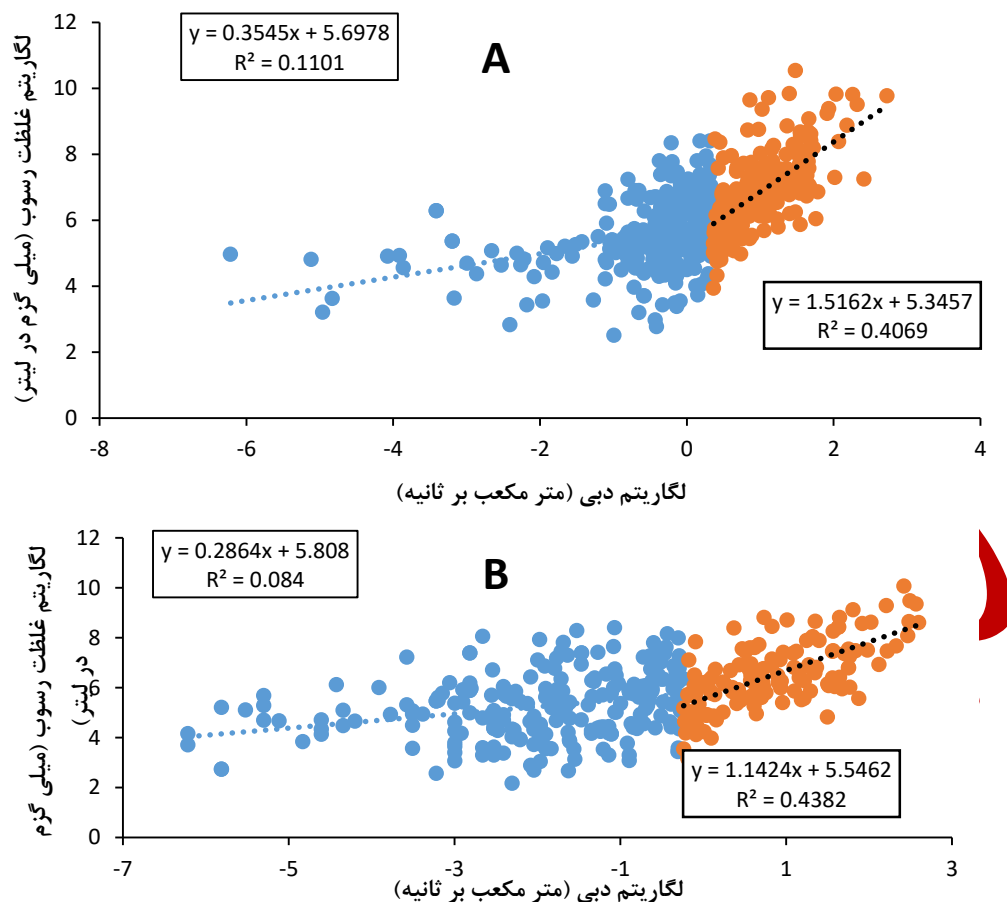
برای اجرای روش الگوریتم ژنتیک در ابتدا دامنه در نظر گرفته شده برای دبی آستانه برابر با دبی حداقل و حداکثر داده های مشاهداتی بود. با اجرای الگوریتم ژنتیک برای هر دو ایستگاه دبی آستانه خیلی بزرگی بدست آمده به طوری که در هر دو ایستگاه مورد مطالعه تعداد کمی داده های دی-غلظت برای داده های بزرگتر از دبی آستانه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

در ادامه دامنه بین صدک های 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 می شود برای هر دو ایستگاه مورد مطالعه این الگوریتم قادر بوده مقادیر بهینه 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 دبی های ۰/۳۶۱ و ۰/۳۶۴ متر مکعب بر ثانیه و برای ایستگاه رامیان بین دو مقدار لگاریتم دبی های ۰/۲۴۵ و ۰/۲۳۶ متر مکعب بر ثانیه قرار گرفته است. با مقایسه مقادیر بدست آمده با نتایج بیزی (شکل ۵) مشاهده می شود در ایستگاه تمر دبی آستانه بزرگتر از صدک ۹۷/۵ و برای ایستگاه رامیان بین صدک های ۲/۵ و ۲۵ بدست آمده است. بعلاوه در ایستگاه تمر مقدار دبی بهینه بیشتر شبیه دبی میانه داده های 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 سنج رسوب بدست آمده با این روش برای دو ایستگاه مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می شود در

هر دو ایستگاه مورد مطالعه ضریب تعیین خطوط منحنی سنج برآزش داده شده به داده های 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

۳-۴. مقایسه عملکرد روش های 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 می شود در هر دو ایستگاه مورد مطالعه برای داده های آموزش بهترین مقادیر هر سه معیار ارزیابی برای حالتی بدست آمده که از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی دبی آستانه استفاده گردید. به نوعی این مسئله موید آن است که الگوریتم ژنتیک قادر بوده است مقادیر بهینه را طوری پیدا کند که کمترین مقدار RMSE و بیشترین مقدار NSE و ضریب همبستگی بدست آید. برای داده های اعتبار سنجی نیز روش الگوریتم ژنتیک با مقادیر NSE، RMSE و ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۰/۱۶، ۲۴۴۳ و ۰/۴۶ در ایستگاه تمر و مقادیر NSE، RMSE و ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۱۷۸۲ و ۰/۷۷ برای ایستگاه رامیان، بهترین عملکرد نسبی را در میان روش های 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 داده های آموزش و هم برای داده های 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 می توان دامنه عدم قطعیت برای مقادیر پارامترها و رسوب برآوردی تخمین زد و به لحاظ آماری می توان اطلاعات بیشتری را استخراج کرد مسئله ای که با دو روش دیگر قادر به ارائه آنها نمی باشیم. در مجموع در هر دو ایستگاه مورد مطالعه مقادیر معیارهای ناش ساتکیف و ضریب همبستگی پایین بدست آمده است که این مسئله بر می گردد به پراکندگی بالای داده های دبی و غلظت رسوب در ایستگاه مورد مطالعه است و این امر را می توان در نمودارهای شکل های ۲، ۳ و ۸ ملاحظه کرد. این پراکندگی بالا در داده های دبی غلظت را می توان در نتیجه عواملی از قبیل خطای اندازه گیری دبی و غلظت رسوب، اثر هسترتیک و تغییر منابع رسوب در داخل حوضه برای بارش های مختلف دانست.

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

	معیار	آموزش					آزمون		
		الگوریتم ژنتیک	دبی میان	بیزی	یک خطی	الگوریتم ژنتیک	دبی میان	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	۰/۲۴	۰/۷۷	۰/۶۶

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق اقدام به برآزش منحنی سنجه دو خطی با استفاده از روش های دبی میانه، بیزی و الگوریتم ژنتیک به داده های دبی و غلظت رسوب دو ایستگاه هیدرومتری رامیان و تمر در استان گلستان گردید. پس از بررسی اولیه داده ها اقدام به تعیین دبی آستانه و برآزش منحنی سنجه گردید. نتایج نشان دهنده براساس معیارهای ارزیابی RMSE، NAE و ضریب تعیین، برای داده های آموزش و آزمون روش الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به روش های 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 برآزش را به داده های مشاهداتی داشته و ضریب تعیین منحنی سنجه های برآزش داده شده نسبت به دو روش دیگر بزرگتر باشد. معمولاً ساده ترین روش برای بارش منحنی سنجه دوطرفی روش دبی میانه است که کاربر به راحتی می تواند مقدار دبی میانه را تعیین کند. در تحقیق (Hoffmann et al (2020 نیز مشاهده کردند برای اغلب رودخانه های مطالعه شده در آلمان دبی آستانه کمی بزرگتر از میانگین هندسی داده های 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 می سازد برخی استنباط آماری مثل دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصدی برای هر پارامتر و 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 نمی توان تحلیل ها 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-غلظت 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 دبی های کمتر از دبی آستانه بیشتر بوده است. این افزایش در نتیجه عدم یکنواختی در فرآیندهای تولید رواناب و رسوب در دبی های مختلف و تغییر فرآیندهای تولید و حمل رسوب در دبی های بالا است که می تواند در اثر عواملی از قبیل تغییر منابع رسوب مثل اضافه شدن فرسایش کناره رودخانه در دبی های بالا، افزایش در قدرت حمل جریان که منجر به حمل رسوبات درشت دانه تر مثل ماسه می شود 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 دبی های پایین مقدار ذرات ماسه رسوب معلق بسیار پایین است و با افزایش مقدار دبی مقدار حمل ذرات ماسه به صورت خطی افزایش پیدا می کند. 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 می تواند منجر به کاهش عدم قطعیت در برآورد غلظت رسوب با استفاده از منحنی سنج رسوب گردد.

در این تحقیق با توجه به داده های در دسترس و سایر محدودیت ها از مدل هایی 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 نمی گرفت. لذا برای تحقیقات آینده پیشنهاد می شود دبی آستانه با توجه به این فرآیندها تعیین گردد و با نتایج روش های استفاده شده در این تحقیق مقایسه شود. همچنین برای شناخت و فهم بهتر دبی آستانه در رودخانه های مختلف نیاز است تا داده های 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 انداز ذرات رسوب می توان منابع رسوبی و فرآیندهایی را که در ایجاد این اثر آستانه ای نقش دارند را بهتر شناسایی کرد.

منابع

شیخ، واحدبردی؛ سقر، سلیمه؛ بهره مند، عبدالرضا؛ و کمکی، چوقی بایرام (۱۳۹۸). روندیابی جریان سطحی با استفاده از روش های 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. DOI: 10.22059/JESPHYS.2022.329382.1007352

فتح آبادی، ابوالحسن؛ کوهنشین، مهناز؛ حشمت پور، علی؛ و فراستی، معصومه (۱۳۹۹). مقایسه کارایی الگوریتم DDS با الگوریتم ژنتیک و تکامل تصادفی جوامع در بهینه سازی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی یکپارچه HyMod. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲(۱)، ۱۳۲-۱۵۷. DOI: 10.22092/ijwmse.2018.122140.1492

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., Kouthneshin, 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 Resources Research*, 53(2), 1270–1287.
- Mohammadpour Khoie, M. M., Nasser, 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 fluvial 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 sea since 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 for interpretation of riverine concentration-discharge relationships indicates long-term shifts in reservoir sediment trapping, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10,215–10,224, doi:10.1002/2016GL069945.