

Stochastic Modeling and Long-Term
Forecasting of Suspended River SedimentN. Jannatdoust¹, M. Montaseri^{2*}, and B. Amirataee³

Abstract

In the past years the climate change has altered the behavior of river flow and led to more frequent extreme hydrological events such as flash floods with high sediments. This has made it very important to know the different characteristics of river sediments when planning for and designing water structures. In this study, a new Standardized Sediment Index (SSI) was developed and different characteristics of sediment, including probability density function (PDF), magnitude, intensity, etc., were determined for the western of Lake Urmia basin using a Monte Carlo simulation process. For this purpose, first, the sediment data was determined according to different models of rating curve, and then the synthetic data series of sediment (1000 series) were generated using a suitable stochastic model and were used to determine different characteristics of sediment. The results showed that in most stations, the method of estimating the rating relationship according to the innovative method of this study, i.e. using the flow discharge index method to classify the relationship between flow and sediment, has the higher performance compared to other methods proposed in different studies. Also, the PDF of sediment data completely follows the normal distribution, as expected from a normalized natural process, and has a systematic behavior with skewness data. Finally, the results of this study are a comprehensive guide for accurate and real inference of river sediment phenomenon according to the SSI index and can significantly reduce the damages caused by sediments.

Keywords: Sediment Load, Standard Sediment Index, Monte Carlo Simulation, Synthetic Data Generation.

Received: December 18, 2022

Accepted: February 26, 2023

مدل‌سازی استوکستیک و پیش‌بینی رفتار بلندمدت
خصوصیات مختلف بار رسوبی معلق رودخانهنادر جنت‌دوست^۱، مجید منتصری^{۲*} و بابک امیرعطایی^۳

چکیده

تغییر رفتار جریان رودخانه‌ها به دلیل وقوع پدیده تغییر اقلیم در سال‌های گذشته منجر به افزایش رخداد‌های هیدرولوژیکی شدید از جمله سیل‌های بزرگ به همراه رسوبات زیاد شده است که ضرورت شناخت مشخصات مختلف رسوبات رودخانه‌ای را برای برنامه‌ریزی و طراحی سازه‌های آبی را بسیار پر اهمیت کرده است. در این مطالعه به صورت نوآورانه، با توسعه شاخص جدید رسوب استاندارد (SSI)، مشخصات مختلف داده‌های رسوب از جمله تابع چگالی احتمال، بزرگی، شدت رسوب و غیره به ازای یک فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو در رودخانه‌های غرب حوضه دریاچه ارومیه تعیین گردید. بدین منظور، ابتدا سری داده‌های رسوب جریان رودخانه به ازای مدل‌های مختلف منحنی دبی-رسوب، تعیین و سپس سری داده‌های مصنوعی رسوب (به تعداد ۱۰۰۰ سری) با استفاده از مدل استوکستیک مناسب تولید و برای پایش و تعیین خصوصیات مختلف رسوب استفاده شد. نتایج نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها روش محاسبه و برآورد رابطه دبی-رسوب به ازای روش نوآورانه این مطالعه در اولویت اول دارای عملکرد مناسب نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی در مطالعات مختلف بوده است. ضمناً بر اساس نتایج، تابع چگالی احتمال داده‌های رسوب کاملاً از توزیع نرمال تبعیت نموده است که بیانگر تطابق کامل احتمالات مذکور به عنوان رخداد‌های مورد انتظار از یک فرآیند طبیعی نرمالیزه بوده و دارای رفتار نظام‌مند با ضرایب چولگی داده‌ها است. نهایتاً نتایج این مطالعه به‌عنوان یک راهنمای جامع در استنباط دقیق و واقعی از پدیده رسوب رودخانه به ازای شاخص SSI است و می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش خسارات ناشی از رسوبات داشته باشد.

کلمات کلیدی: بار رسوبی، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، شاخص رسوب

استاندارد، مدل‌های استوکستیک.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۷

1- Ph.D. Candidate in Water Resources Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

2- Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. Email: montaseri@hotmail.com

3- Ph.D. in Water Resources Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1402.19.2.8.5](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1402.19.2.8.5)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه ارومیه.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.

۳- دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه ارومیه.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکان‌پذیر است.



متغیرهای هیدرولوژیکی که در طبیعت به‌عنوان یک نتیجه از عناصر فیزیکی به هم پیوسته رخ می‌دهند، متأثر از عوامل ناشناخته اقلیمی و فیزیوگرافی هستند. از این رو، متغیرهای هیدرولوژیکی مانند بارندگی، جریان رودخانه، بار رسوبی و غیره محصول پدیده‌های پیچیده متغیر با زمان هستند که می‌توانند با تعداد محدودی مشاهدات اندازه‌گیری شوند. این مشاهدات نشان می‌دهد که در نتیجه (الف) فرایندهای زمین‌شناسی متغیر زمانی، فرسایش، رسوب، هوا و غیره، (ب) تغییرات آب و هوایی، (ج) عدم قطعیت حالت در زمان و (د) انتقال انرژی چرخه هیدرولوژیکی، متغیرهای هیدرولوژیکی ماهیت تصادفی و غیرخطی دارند (Amorcho and Orlob, 1961; Yevjevich, 1972). این مشاهدات از طبیعت تصادفی حمل بار رسوبی، انگیزه‌ای برای فرمول‌بندی احتمالی معادلات حمل بار رسوبی و مشخصه اساسی آماری آن ایجاد کرده است و این امر با توجه به تنوع و کاربردهای مختلف پروژه‌های مهندسی آب متأثر از رسوب دارای اهمیت ویژه‌ای است. همچنین، به دلیل ماهیت تصادفی فرآیند تولید رسوب در رودخانه‌ها و عدم وجود داده‌های بلندمدت رسوب، استفاده از یک پروسه شبیه‌سازی یا مدل‌سازی استوکستیک برای تبیین رفتار عمومی بار رسوب در پروژه‌های آبی و ارزیابی عدم قطعیت بالا مقادیر طرح و مشخصه‌های اساسی آن مطلوب یا مناسب به نظر می‌رسد (Shojaeezadeh et al., 2018). چنین پروسه استوکستیک امکان تولید سری‌های جانشین داده‌های بار رسوبی رودخانه که رخداد آن‌ها در آینده محتمل است را فراهم ساخته و شرایط ارزیابی دقیق و واقعی از رفتار بار رسوبی و مشخصه‌های اساسی یا اصلی آن را در پروژه یا طرح‌های مهندسی آب در رودخانه‌ها را فراهم می‌کند (Chow, 1988; Salas, 1993; Amirataee et al., 2013).

Irvine and Drake (1987) مدل‌های رگرسیون و ARIMA را برای داده‌های رسوب معلق در رودخانه Ausable در کانادا توسعه دادند و نشان دادند که مدل ARIMA برای پیش‌بینی غلظت رسوب دقیق است. اگرچه محدودیت‌هایی از نظر تعداد داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی غلظت رسوب معلق وجود داشت، مدل ARIMA توانست با تعداد کمی از داده‌ها کار کند (Anderson, 1977). Chen and Dyke (1998) در منطقه Rifuji تانزانیا از مدل سری زمانی خود همبسته^۱ (AR) برای بیان ارتباط بین رسوب معلق لحظه‌ای و سرعت آب استفاده نموده و نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که مدل AR (5) برای بررسی رسوب معلق مورد تأیید است. Singer and Dunne (2001) از طریق بررسی سری زمانی، ارتباط بین دو پارامتر دبی رودخانه و رسوب معلق را به‌صورت معادله نشان دادند. Meless et

رسوبات رودخانه‌ای به‌عنوان یکی از فرایندهای غالب در حوضه‌های آبریز بوده و از چالش‌های عمده محیط‌زیست محسوب می‌شود. سالانه بین ۲۰ تا ۵۲ میلیارد تن رسوب توسط رودخانه‌ها منتقل شده و در آب‌های ساکن در سراسر جهان ته‌نشین می‌شود (Zhai et al., 2016). رودخانه‌های ایران در مقایسه با رودخانه‌های جهان به دلیل شرایط آب و هوایی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و فشار بیش از حد به اراضی حوضه‌های آبریز، رسوبات بالاتری را حمل می‌کنند که همواره آسیب‌ها و خسارت‌های زیادی را به دنبال دارند (Khalilivandareh et al., 2022). از جمله پیامدهای رسوب‌گذاری و انتقال رسوب، می‌توان به ایجاد جزایر رسوبی در مسیر رودخانه و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال جریان‌های سیلابی، کاهش ظرفیت ذخیره مخازن و عمر مفید سدها، وارد شدن خسارت به ابنیه آبی و مزارع، رسوب‌گذاری در کف کانال و خوردگی تأسیسات سازه‌های رودخانه‌ای و مشکلات بسیار دیگر اشاره نمود (Raeesi et al., 2019). رسوبات رودخانه‌ای متناسب با اندازه ذرات، به‌صورت مواد معلق (بار معلق) یا به‌صورت غلطان در کف بستر (بار بستر) حرکت می‌کنند. برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها در برنامه‌ریزی ذخیره منابع آب مخازن سدها، طراحی سازه‌های هیدرولیکی و سایر تأسیسات آبی، مدیریت آبخیز و پروژه‌های مختلف حفاظت آب و خاک، سواحل رودخانه‌ها و محیط‌زیست، کیفیت آب رودخانه‌ها و تغییرات بستر آن‌ها و به‌طور کلی مدیریت منابع آب حوضه‌های آبریز تأثیر دارد (Sadeghi et al., 2018; Keihani et al., 2021). داده‌های رسوب جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های هیدرومتری عمدتاً ناقص است و میزان رسوب باید بر اساس داده‌های جریان رودخانه برآورد شود (Azadi et al., 2020). روش منحنی سنجه رسوب یکی از روش‌های متداول تخمین رسوب است که در آن یک منحنی توانی بر داده‌های دبی جریان-دبی رسوب برازش داده می‌شود (Ferguson, 1986; Asselman, 2000). این منحنی‌ها در بیشتر مواقع به دلیل اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی، جریان رسوب در دبی‌های مختلف جریان را با کمی خطا برآورد می‌کنند (Kao et al., 2005). لذا برای برآورد دقیق‌تر، در ترسیم منحنی سنجه رسوب، از انواع روش‌های ترسیم منحنی شامل یک خطی، دو خطی، ماهانه، فصلی و حد وسط دسته‌ها و غیره استفاده می‌شود. به علت وجود چنین خطاهایی، در دهه‌های اخیر سعی شده است روش‌هایی به کار گرفته شود تا با مدل‌سازی بهتر شرایط طبیعی، دقت و صحت نتایج حاصل افزایش یابد (Barzegaribanadkoki and Armin, 2016).

al. (2011) برای پیش‌بینی داده‌های رسوب روزانه و هفتگی سه رودخانه در ایالت متحده آمریکا، از شبکه عصبی و مدل $ARIMA^2$ استفاده نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد عملکرد مدل $ARIMA$ در مقیاس زمانی روزانه، رضایت‌بخش است. (Azadi et al. (2020) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی بار رسوب با استفاده از مدل تصادفی و منحنی‌های رتبه‌بندی در یکی از ایستگاه‌های حوضه Abiaca Creek (از شاخه‌های رودخانه Yazoo واقع در شمال غربی Mississippi) طی سال‌های ۲۰۰۳-۱۹۹۱ پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی بار رسوب معلق، مدل‌سازی تصادفی با ضرایب متغیر دقت بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد.

در ایران نیز برخی مطالعات صورت گرفته به ترتیب زیر ارائه می‌گردد. Barzegaribandkoki and Armin (2016) به پیش‌بینی بار معلق رودخانه گرگان رود با استفاده از مدل‌های سری زمانی و منحنی سنجه اصلاح‌شده پرداختند. بدین منظور از آمار روزانه رسوب ایستگاه قزاقلی طی سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۸۸ استفاده نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که مدل‌های سری زمانی در مقایسه با منحنی سنجه، توانایی بهتری در پیش‌بینی و مدل‌سازی رسوب معلق ماهانه دارند. در مطالعه دیگری، Barzegari and Dastorani (2016) به مقایسه و بررسی توانایی مدل‌های سری زمانی شامل مارکف، $ARIMA$ و شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی رسوب معلق، با استفاده از داده‌های روزانه رسوب ایستگاه قزاقلی واقع روی رودخانه گرگان رود، طی دوره آماری ۱۳۴۹-۱۳۸۸ پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد در بین مدل‌های سری زمانی، مدل مارکف در مقایسه با مدل $ARIMA$ دارای توانایی بهتری در برآورد رسوب معلق می‌باشد. Raeesi et al. (2019)، پدیده‌های زمانی منحنی سنجه رسوب حوضه گاماسیاب را بررسی نموده و آن را با چند روش آماری برای برآورد بار رسوب معلق مقایسه کردند. آن‌ها در مطالعه خود جهت بررسی تغییرات زمانی منحنی سنجه رسوب، منحنی‌های پشتیبان زمانی منحنی سنجه رسوب به‌منظور بررسی تغییرات شیب منحنی و تغییرات سالیانه آن را معرفی نمودند. نتایج نشان داد که مدل سری زمانی تابع انتقال، به دلیل نظر گرفتن پارامتر زمان، در مقایسه با سایر مدل‌های به‌کاررفته در این مطالعه، از عملکرد بالاتری برخوردار است.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که رفع مشکلات ناشی از رسوب و شناسایی خصوصیات بلندمدت این پدیده جهت برنامه‌ریزی، طرح و مدیریت صحیح پروژه‌های آبی حائز اهمیت است. به عبارت دیگر، ارزیابی رفتار عمومی بلندمدت رسوب و تعیین مشخصه‌های مهم و

اصلی آن، درک عمیق و دقیق‌تری از بار رسوب و پارامترهای طراحی یا تصمیم آن در پروژه‌های مهندسی آب در رودخانه‌ها فراهم نموده و نگرش جدیدی در تبیین داده‌های رسوب رودخانه ارائه می‌کند. به‌طوری‌که عدم قطعیت زیاد برآورد بار رسوب در پروژه‌های آبی از جمله تعیین خسارات ناشی از رسوب، رسوب‌گذاری در مخازن سدها، حوضچه‌های رسوب‌گیر (آب شرب و آب کشاورزی)، رسوب در شبکه‌های انتقال (تحت فشار و آبیاری)، میزان فرسایش در حوضه آبریز، بندهای رسوب‌گیر، عملیات اصلاحی کاهش و کنترل رسوب و غیره به میزان قابل توجهی کاهش یابد. با این وجود باید اذعان داشت، ارزیابی رفتار عمومی بار رسوب رودخانه‌ای و تعیین مشخصه اصلی آن با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو امکان‌پذیر بوده و استفاده از روش مذکور در تحقیقات پیشین رسوب نسبت به پدیده‌های دیگر هیدرولوژیکی مانند بارندگی و جریان سطحی بسیار محدود بوده است. درحالی‌که Rice (1982) و Hadley et al. (1985) به‌شدت استفاده از مدل‌های استوکستیک در تحلیل داده‌های رسوب را توصیه نمودند.

از طرف دیگر، بررسی مطالعات پیشین رسوب نشان می‌دهد، اغلب مطالعات مذکور بر اساس داده‌های ثبت‌شده یا تاریخی رسوب رودخانه‌ها و مطالعات محدودی با سری داده‌های مصنوعی تولیدی به ازای مدل‌های تولید داده مستقیم مانند $ARMA$ با هدف پیش‌بینی بار رسوبی بوده است. درحالی‌که اولاً مدل‌های استوکستیک مستقیم مانند $ARMA$ قابلیت حفظ یا دوباره تولید ساختمان همبستگی مابین ماه‌های مختلف سال و وابستگی داده‌های ماهیانه با سالیانه را نداشته و دوماً ارزیابی رفتار عمومی بار رسوب رودخانه‌ها و تعیین مشخصه‌های آماری و احتمالی مهم آن مانند مدت تداوم، بزرگی، فاصله مابین رخدادهای مشابه و غیره در مطالعات مذکور مورد توجه قرار نگرفته است. درحالی‌که استفاده از مدل‌های توزیعی (سالیانه به ماهیانه) مانند مدل توزیعی والنسیا-شاکی توانایی حفظ مشخصات آماری داده‌ها در دو سطح سالیانه و ماهیانه را دارند.

هدف مطالعه حاضر ارائه بهترین روش منحنی دبی-رسوب بر اساس نمونه‌های دبی و رسوب برداشت شده از محل ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه‌های غرب دریاچه ارومیه به ازای روش‌های مختلف بوده و در ادامه بعد از تکمیل سری‌های زمانی داده‌های رسوب رودخانه سری‌های جانشین داده‌های رسوب سالیانه و ماهیانه به تعداد نمونه زیاد (۱۰۰۰ سری) با طول دوره آماری برابر با داده‌های تاریخی به‌طور نوآورانه با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی استوکستیک مناسب تولید و سپس هرکدام از سری داده‌های رسوب تولیدی ایستگاه‌ها برای پایش

احتمالات مختلف رسوب به ازای شاخص توسعه یافته جدید مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

محدوده مورد مطالعه در قسمت غربی دریاچه ارومیه و در مختصات جغرافیایی ۱۸° ۴۴' تا ۱۹° ۴۵' طول شرقی و ۶° ۳۷' تا ۵۹° ۳۷' عرض شمالی قرار گرفته است. از نظر تقسیمات هیدرولوژیک به حوضه آبریز دریاچه ارومیه تعلق داشته و شامل چهار زیر حوضه نازلوچای، روضه چای، شهرچای و باراندوزچای بوده که از شمال به زیر حوضه زولاچای، از جنوب به زیر حوضه گدارچای، از غرب به کشور ترکیه و از شرق به دریاچه ارومیه محصور می‌گردد. این زیر حوضه‌ها از غرب به کوه‌های مرزی و از شرق به دریاچه ارومیه محدوده بوده و از ارتفاع ۳۸۱۷ تا ۱۲۶۵ متری متغیر است. از لحاظ زمین‌شناسی ناحیه‌ای، غربی‌ترین بخش از زمین‌شناسی ایران مرکزی و محل اتصال زون‌های تکتونیکی ایران مرکزی، زون سهند-سیرجان و افیولیت‌های زاگرس است. در این ناحیه رسوبات متشکل از شیل، شیل‌های سیلنی و رسمی و ماسه سنگ میکادار بدون دگرشیمی مشخص بر روی سازند کهر قرار دارند. برای تعیین مشخصات رسوب معلق حوضه‌های آبریز مطالعاتی، از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری بالادست حوضه و ورودی به دشت (دارای رژیم طبیعی جریان) یعنی ایستگاه هیدرومتری تپیک در

زیر حوضه نازلوچای، ایستگاه هیدرومتری کلپور در زیر حوضه روضه‌چای، ایستگاه برده‌سور در زیر حوضه شهرچای و ایستگاه‌های هاشم‌آباد، دیزج، قاسملو در زیر حوضه باراندوزچای استفاده گردید. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی در شکل ۱ و مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز ایستگاه‌های مطالعاتی و نمونه‌های حاصل از اندازه‌گیری مستقیم دبی و رسوب مربوطه در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۱- توسعه رابطه دبی- رسوب

روش‌های درون‌یابی و برون‌یابی دو روش متداول، برای تخمین بار رسوب معلق هستند (Walling and Webb, 1981). در روش درون‌یابی، فرض بر این است که اندازه‌گیری‌های میدانی (دبی یا غلظت رسوب) معرف یک دوره زمانی طولانی‌تر بوده و این امر نیاز به یک برنامه زمانی برای نمونه‌برداری منظم است. روش‌های برون‌یابی بر اساس یک تحلیل رگرسیون و با لحاظ تعداد محدودی از اندازه‌گیری‌های میدانی و ایجاد رابطه رتبه‌بندی بین آن‌ها و داده‌های دبی جریان انجام می‌شود. متداول‌ترین روش توسعه منحنی دبی- رسوب، رابطه توانی به صورت زیر می‌باشد (Campbell and Bauder, 1940; Mimikou, 1982; Asselman, 2000):

$$Q_s = aQ^b \quad (1)$$

Table 1- Statistical characteristics of flow and sediment data at the study stations

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های جریان و رسوب در محل ایستگاه‌های مطالعاتی

Station	Physiographic characteristics				Statistical characteristics of measured sediment discharge							
	Area (km ²)	Perimeter (km)	Elevation (m)	Slope (m/m)	data type	No.	Min	Mean	Max	SD	CV	Skewness
Bardesor	178.3	86.1	2553.6	0.503	Q (m ³ /s)	405	0.1	6.18	339.6	18.23	2.95	15.37
					Qs (ton/day)		0.01	63.08	6436.3	376.16	5.96	13.39
Tapik	1738	303.6	1965.9	0.32	Q (m ³ /s)	315	0.07	11.76	251.5	20.98	1.78	6.13
					Qs (ton/day)		0.06	553.36	32384.3	2797.93	5.06	8.54
Dizaj	645.9	162	1965.9	0.263	Q (m ³ /s)	313	0.07	8.22	123.9	11.61	1.41	4.4
					Qs (ton/day)		0.04	235.37	17597.7	1208.29	5.13	11.2
Gasemlo	331.2	117.9	1954.3	0.302	Q (m ³ /s)	207	0.02	1.66	21.8	2.58	1.56	4.68
					Qs (ton/day)		0.01	53.71	5754.2	418.41	7.79	12.6
Kalhor	179.3	87.6	2046.3	0.283	Q (m ³ /s)	275	0	1.61	36.1	2.86	1.78	8.11
					Qs (ton/day)		0.01	49.21	2872.5	241.17	4.9	8.88
Hashemabad	425.2	110.6	2045.7	0.26	Q (m ³ /s)	283	0.4	7.61	72.3	9.56	1.26	2.98
					Qs (ton/day)		0.04	251.71	15938.6	1422.59	5.65	9.62

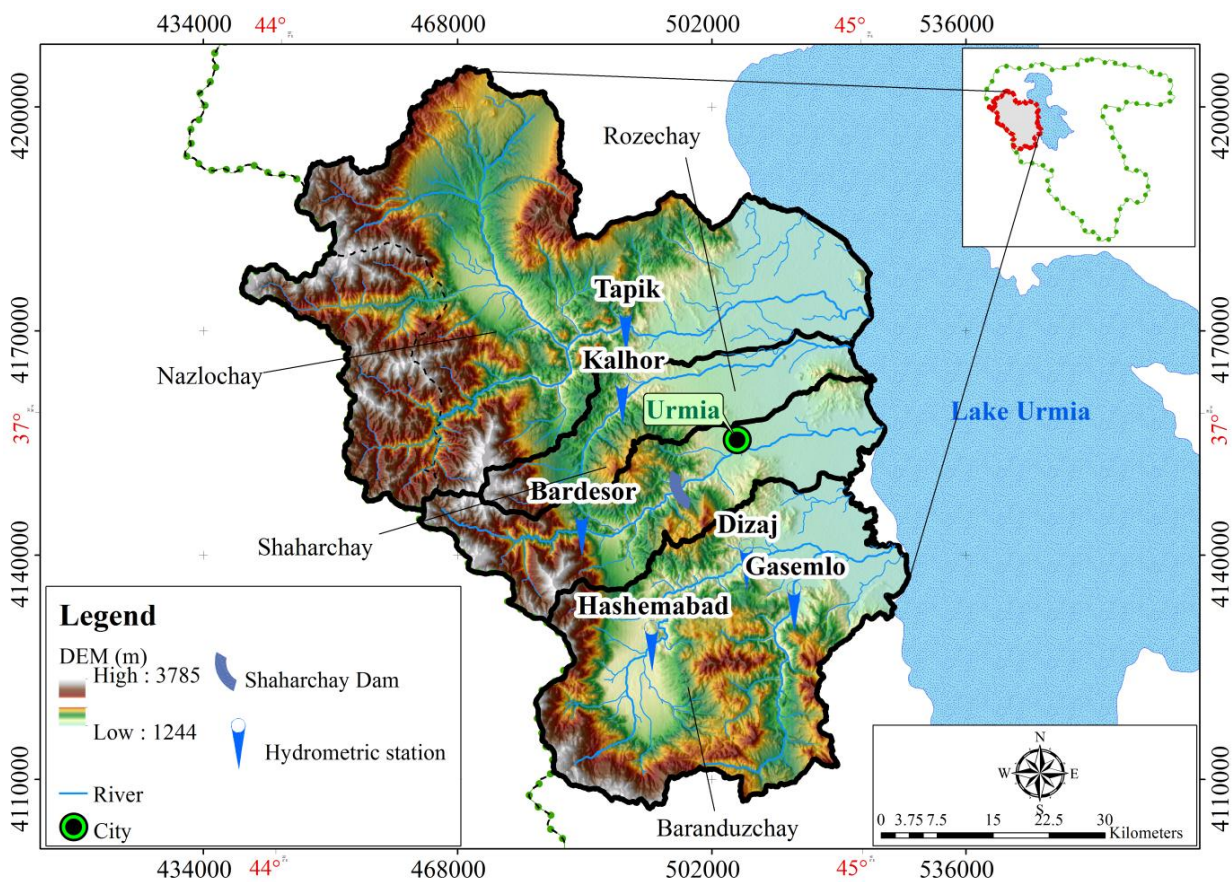


Fig. 1- Location of selected hydrometric stations in the study area
شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب در محدوده مطالعاتی

Rovira and Batalla, 2006; Hu et al., 2011; Mao and Carrillo, 2017; De Girolamo et al., 2015) ریاضی (Cordova and Gonzalez, 1997; Horowitz, 2003) هستند. اما هیچ‌یک از روش‌های موجود به‌صورت یک روش کلی پذیرفته نشدند و بهترین روش بر اساس موقعیت مکانی و مشخصات حوضه می‌تواند متفاوت باشد (Sivakumar and Wallender, 2004). علی‌رغم محدودیت‌های مذکور برای رابطه دبی- رسوب، این روابط می‌توانند مبنای خوبی برای تخمین بار معلق یک حوضه آبریز هیدرولوژیکی مقیاس بزرگ با مجموعه داده‌های محدود حتی تحت ویژگی‌های آب و هوایی مختلف باشند.

۲-۲- شاخص رسوب استاندارد^۳ (SSI)

شاخص رسوب استاندارد (SSI) که با هدف تعیین و پایش میزان رسوب (سطوح مختلف میزان رسوب) برای اولین بار در این مطالعه توسعه یافته است، قادر به تعیین میزان رسوبات سطح کمتر و بیشتر از حالت نرمال

که در آن Q_s : دبی رسوب بر حسب تن در روز، Q : دبی رودخانه بر حسب مترمکعب در ثانیه، a و b نیز ضرایب رابطه توانی (بی‌بعد) هستند که با استفاده از روش رگرسیون به دست می‌آید. بر اساس Morgan (1973) و Peters-Kummerly (1973) ضریب a نشان‌دهنده شاخص شدت فرسایش بوده، به طوری که مقادیر بیشتر این ضریب، بیانگر هوازدگی شدید مواد رسوبی بوده و به راحتی قابل حمل است. بر اساس Peters-Kummerly (1973) ضریب b نشان‌دهنده قدرت فرسایشی رودخانه بوده، به طوری که مقادیر بیشتر این ضریب، بیانگر افزایش شدید قدرت فرسایشی رودخانه به ازای افزایش جزئی در دبی رودخانه است.

اگرچه این رابطه در اکثر مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما ثابت فرض نمودن ضرایب رابطه فوق در برخی موارد سبب بروز عدم قطعیت بالا در برآورد میزان رسوب جریان می‌شود. بدین منظور اصلاحات مختلفی بر روی رابطه فوق صورت گرفته است. این اصلاحات شامل لحاظ نمودن فصول و ماه‌های خشک و تر (Walling, 1974;

۲-۳- تئوری RUN

(1967) Yevjevich پیشنهاد استفاده از تئوری RUN را برای تعیین ویژگی‌های خشکسالی ارائه نمود. تئوری RUN به صورت قسمتی از سری‌های زمانی است که در آن دنباله ممتدی از مقادیر در زیر یا بالای سطح آستانه قرار می‌گیرند. بر اساس این تعریف، منظور از حالت سطح بالای رسوب (پر رسوب)، یک رشته بدون وقفه از متغیرهاست که در بالای سطح آستانه قرار گرفته باشد.

این تئوری کمک خواهد کرد تا در یک سری زمانی، وقایع کمتر و بیشتر را از سایر وقایع هیدرولوژیکی بر اساس یک سطح آستانه مشخص جدا کنیم. سطح آستانه بر اساس نوع فعالیت، توسط مدیران در طراحی سیستم مدیریت منابع آب تعیین می‌شود. بر این اساس، اجزای حالت سطح بالای رسوب (پر رسوب) را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد (شکل ۲): زمان شروع حالت پر رسوب (T_i): شروع دوره سطح بالای رسوب است که آغاز پدیده پر رسوب را نشان می‌دهد؛ زمان پایان حالت پر رسوب (T_e): زمانی که سطح بالای رسوب به اندازه کافی کمتر شده و شرایط آن باقی نمانده است؛ مدت حالت پر رسوب (L_s): مدت حالت سطح بالای رسوب که به صورت سال، ماه، هفته و غیره بیان می‌شود، برابر مدت زمانی است که پارامترهای رسوب به طور ممتد بالای سطح بحرانی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، عبارت است از مدت زمان بین شروع و پایان حالت پر رسوب؛ مقدار حالت سطح بالای رسوب (S_s): برابر با مجموع پارامترهای حالت پر رسوب است که در بالای سطح بحرانی قرار دارند؛ شدت حالت پر رسوب (I_s): متوسط مقادیر پارامترهای سطح بالای رسوب است که در بالای سطح بحرانی قرار دارند (شدت حالت پر رسوب از تقسیم مقدار حالت پر رسوب بر مدت زمان آن به دست می‌آید).

در یک مقیاس زمانی خاص برای هر مکان با دارا بودن داده‌های پیوسته رسوب، می‌باشد. جهت تعیین این شاخص (مشابه شاخص بارش استاندارد^۴)، ابتدا توزیع آماری مناسب، بر آمار بلندمدت داده‌های رسوب برآزش داده شده، سپس تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌شود، که رابطه آن به صورت زیر است:

$$SSI_i = \frac{S_i - \bar{S}}{\delta} \quad (2)$$

که در آن SSI_i و S_i به ترتیب آماره شاخص و رسوب در پیوند i میانگین رسوب و δ انحراف معیار رسوب بوده و سطوح مختلف رسوب (سطح بالای رسوب (پر رسوب)، سطح نرمال رسوب و سطح پایین رسوب (کم رسوب)) پیوند i را به ازای طبقه‌بندی جدول ۲ مشخص می‌کند.

Table 2- Classification SSI index for different levels of high, normal and low sediment

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص SSI برای سطوح مختلف بالا، نرمال و پایین رسوب

Sediment classification and Sign.	SSI
Extremely High Level of Sediment (EHLS)	Higher than 2
Severely High Level of Sediment (SHLS)	1.5 to 1.99
Moderately High Level of Sediment (MHLS)	1 to 1.49
Normal Sediment (NS)	0.99 to -0.99
Moderately Low Level of Sediment (MLLS)	-1 to -1.49
Severely Low Level of Sediment (SLLS)	-1.5 to -1.99
Extremely Low Level of Sediment (ELLS)	Less than -2

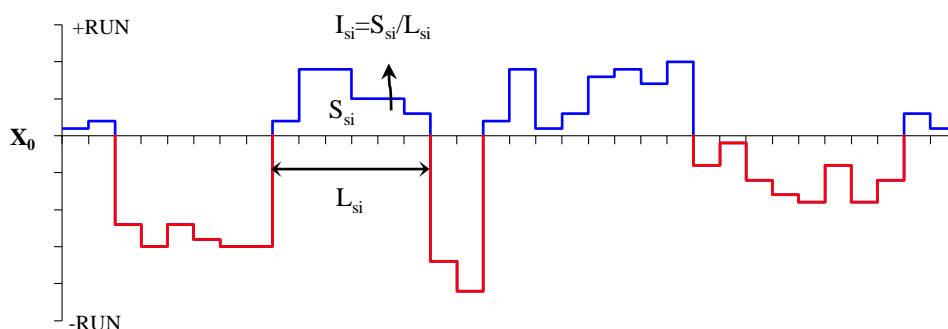


Fig. 2- Graphical representation of main characteristics of different sediment levels based on the Run theory

شکل ۲- نمایش گرافیکی مشخصات اصلی سطوح مختلف رسوب بر اساس تئوری ران

۴-۲- شبیه‌سازی مونت کارلو

$$S_{i+1} = \bar{S} + \rho(S_i - \bar{S}) + \theta_i s \sqrt{1 - \rho^2} \quad (3)$$

که در آن S_i و S_{i+1} به ترتیب داده رسوب سالیانه در i و $i+1$ امین سال، \bar{S} : میانگین رسوب سالیانه، θ_i : متغیر تصادفی از توزیع نرمال استاندارد، ρ : ضریب همبستگی داخلی با تأخیر یک‌ساله، s : انحراف معیار داده‌های رسوب سالیانه هستند.

سپس، داده‌های سالیانه تولیدی با استفاده از مدل والنسیا-شاکلی به داده‌های ماهیانه توزیع می‌شوند. رابطه والنسیا-شاکلی برای توزیع داده‌های رسوب سالیانه به ماهیانه به صورت زیر می‌باشد (McMahon and Adeloey, 2005):

$$X_i = AZ_i + BV_i \quad (4)$$

که در آن X_i : یک بردار (12×1) از داده‌های ماهیانه با میانگین صفر برای سال i ام، Z_i : داده سالیانه تولیدی با میانگین صفر برای سال i ام، V_i : یک بردار (12×1) از متغیرهای تصادفی از توزیع نرمال استاندارد می‌باشند که از Z_i مستقل است. همچنین، A و B ضرایب ثابت مدل به ترتیب با ابعاد (12×1) و (12×12) بوده که مقادیر آن‌ها با استفاده از داده‌های تاریخی برآورد می‌شوند.

در این مطالعه، بعد از انتخاب بهترین روش منحنی دبی-رسوب به ازای معیارهای ارزیابی مختلف شامل ضریب همبستگی (R')، ریشه میانگین مربعات خطا^۷ (RMSE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف^۸ (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی با استفاده از روابط زیر، سری داده‌های رسوب پیوسته برای هر ایستگاه برآورد و سپس ۱۰۰۰ نمونه سری داده‌های رسوب سالیانه و ماهیانه با طول دوره آماری برابر داده‌های تاریخی (۴۳ ساله) با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو تولید شده و در انتها هر کدام از سری داده‌های رسوب تولیدی ایستگاه‌ها برای پایش احتمالات رسوب به ازای شاخص SSI مورد استفاده قرار گرفته است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q})^2} \quad (6)$$

که در آن Q_{obs} و Q_{sim} به ترتیب مقادیر برآوردی و مشاهداتی، \bar{Q} متوسط مقادیر مشاهداتی و n تعداد نمونه‌ها هستند.

ضریب نش نشان‌دهنده میزان انطباق نمودار پراکندگی مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی مدل با خط رگرسیون با عرض از مبدا صفر یعنی خط با شیب ۱ به ۱ است. در انطباق کامل مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی مدل مقدار ضریب نش برابر ۱ بوده و به ازای ضریب نش صفر مقادیر پیش‌بینی مدل برابر میانگین مقادیر مشاهداتی است و در

اکثر مطالعات صورت گرفته در تحلیل و ارزیابی داده‌های رسوب بر اساس مشاهدات ثبت‌شده یا تاریخی بوده است. در این نوع مطالعات فرض بر این است که مقادیر داده‌های رسوب که ممکن است در آینده اتفاق بیافتد، دارای رفتار مشابهی با نمونه‌های تاریخی خواهد بود و رسوبات کمتر و بیشتر از نمونه‌های تاریخی اتفاق نخواهد افتاد. به عبارت دیگر، نمونه‌های تاریخی به صورت تکراری در آینده نیز روی خواهد داد، درحالی‌که این امر دارای احتمال بسیار ضعیفی است. بنابراین در چنین مواقعی که امکان تحلیل دقیق به ازای نمونه‌های تاریخی یا ثبت‌شده وجود ندارد، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو بسیار ضروری و با ارزش خواهد بود و می‌تواند به طور واقع‌تری ویژگی‌های رسوب را که ممکن است در آینده رخ دهد، توصیف کنند (Smith and Hebbert, 1979; Stedinger and Vogel, 1984; Srikanthan and McMahon, 2001; Brissette et al., 2007; Khalili et al., 2009; Kalyanapu et al., 2012; Domínguez-Castro et al., 2019).

پدیده رسوب در رودخانه‌ها دارای اثرات هم‌زمان درون سالی (ماهیانه و فصلی) و برون سالی (سالیانه) بوده و ارزیابی اثرات متقابل آن‌ها دارای اهمیت بالایی بوده که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور لازم است که بررسی و تحلیل داده‌های رسوب و تعیین خصوصیات مختلف آن در دو سطح ماهیانه یا فصلی و سالیانه انجام پذیرد. بنابراین، برای چنین مطالعه‌ای استفاده از یک مدل استوکستیک تولید داده رسوب که توانایی حفظ مشخصات آماری در دو سطح ماهیانه یا فصلی و سالیانه را دارد، ضروری خواهد بود.

برای تولید داده‌های رسوب، به‌جای تولید مستقیم داده‌های ماهیانه، ابتدا داده‌های سالیانه تولید شده و سپس این داده‌ها با استفاده از روش والنسیا-شاکلی^۵ به داده‌های ماهیانه توزیع شده است. مزیت استفاده از مدل‌های توزیع^۶ نسبت به مدل‌های مستقیم مانند ARMA (p,q) این است که این مدل‌ها پارامترها و خصوصیات آماری داده‌های بارندگی را در دو سطح سالیانه و ماهیانه حفظ می‌کنند، درحالی‌که مدل ARMA (p,q) فاقد چنین پتانسیلی بوده و فقط پارامترهای آماری داده‌های بارندگی ماهیانه را حفظ می‌کند (McMahon and Adeloey, 2005). پارامترهای مدل‌های تولید داده رسوب با استفاده از داده‌های ثبت‌شده به دست می‌آیند. برای تولید داده‌های ماهیانه با استفاده از مدل توزیع والنسیا-شاکلی، ابتدا داده‌های رسوب سالیانه با استفاده از مدل AR (1) مطابق رابطه زیر به دست می‌آید (McMahon and Adeloey, 2005):

نهایت اگر تمام مقادیر پیش‌بینی مدل بیش/کم برآورد شود، این ضریب منفی خواهد بود (Lobanova et al., 2018). مقدار ضریب تبیین بین صفر و یک بوده و هرچه این مقدار به ۱ نزدیک باشد، نشان از عملکرد مطلوب‌تر مدل در شبیه‌سازی مقادیر مشاهداتی است و برعکس (McMahon et al., 2015). ضمناً ریشه میانگین مربعات خطا به‌عنوان یک معیار ارزیابی رایج مشتعل بر ویژگی‌های اریب (انحراف) و دقت برآورد مدل‌ها بوده و هرچه میزان ریشه میانگین مربعات خطا کمتر باشد نشان‌دهنده عملکرد یا کارایی بالای مدل در برآورد داده‌های مشاهداتی می‌باشد (McMahon et al., 2015; Lobanova et al., 2018).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رابطه دبی-رسوب در محل ایستگاه‌ها

در این مطالعه جهت کاهش عدم قطعیت در برآورد میزان رسوب در رودخانه‌ها، ابتدا رابطه توانی دبی-رسوب به ازای دو روش رایج بدون و با تفکیک داده‌ها در محل ایستگاه‌های هیدرومتری تعیین و برآورد شد. این روش‌ها شامل: الف) رابطه کلی بدون تفکیک؛ ب) تفکیک ماه‌های با دبی بزرگ‌تر و کمتر از دبی متوسط سالیانه؛ ج) تفکیک ماه‌های با بارندگی بزرگ‌تر و کمتر از بارندگی متوسط سالیانه؛ د) تفکیک دبی بزرگ‌تر و کمتر از دبی متوسط نمونه‌ها و ه) تفکیک روش نوآورانه شاخص خشکسالی دبی جریان^۹ است. در روش شاخص خشکسالی دبی جریان، ابتدا توزیع آماری مناسب بر داده‌های دبی مشاهداتی (متناظر با داده‌های رسوب) برازش داده شده و سپس تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌شود. در ادامه با تعیین سه کلاس سطح بالای رسوب، رسوب نرمال و سطح پایین رسوب، مقادیر داده‌های رسوب متناظر نمونه‌های دبی، طبقه‌بندی شده و رابطه دبی-رسوب برآورد شده است. در جدول ۳ روابط منحنی‌های دبی-رسوب، تعداد نمونه‌ها، مقادیر ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب کارایی نش-ساتکلیف بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی به ازای روش‌های مختلف و در ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی ارائه شده است.

جدول مذکور نشان می‌دهد که: الف) در اکثر ایستگاه‌ها روش محاسبه و برآورد دبی-رسوب به ازای روش نوآورانه این مطالعه یعنی استفاده از روش شاخص خشکسالی دبی جریان برای طبقه‌بندی رابطه بین دبی و رسوب، در اولویت اول دارای عملکرد بهتری (میزان خطای کمتر به ازای معیارهای ارزیابی مختلف) نسبت به سایر روش‌های

پیشنهادی در مطالعات مختلف بوده است؛ ب) روش رابطه کلی بین داده‌های دبی و رسوب (رابطه نمایی) در اولویت دوم به‌عنوان رابطه بهتر به ازای معیارهای ارزیابی در ایستگاه‌های مختلف مطالعاتی ارزیابی شده است؛ ج) نتایج این جدول بیانگر ارزیابی روابط مختلف بین مقادیر دبی و رسوب در ایستگاه‌های مختلف با شرایط فیزیوگرافی مختلف بوده و نمی‌توان یک روش را به‌عنوان روش کلی برای تمامی حوضه‌ها بسط داد.

با توجه به اهداف این مطالعه یعنی تولید سری‌های جانشین داده‌های رسوب و تحلیل خصوصیات احتمالاتی داده‌های رسوب و بررسی تأثیر مشخصه‌های آماری داده‌ها در تعیین رفتار عمومی داده‌های رسوب در ایستگاه‌های مختلف، رابطه کلی منحنی دبی-رسوب به‌عنوان تابع برآورد میزان رسوب در تمام ایستگاه‌ها به جهت سادگی و همگرایی در محاسبات در ایستگاه‌های مختلف انتخاب شد. در شکل ۳ نیز منحنی‌های دبی-رسوب به ازای روش‌های مختلف در ایستگاه برده سور نشان داده شده است.

۳-۲- سری داده‌های رسوب در محل ایستگاه‌ها

به ازای رابطه دبی-رسوب انتخابی، سری داده‌های رسوب در مقیاس زمانی ماهیانه و سالیانه در محل ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی برآورد گردید. مشخصات آماری سری داده‌های رسوب به همراه نتایج آزمون‌های روند (آزمون من-کندال)، تصادفی بودن و ایستایی داده‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس جدول مذکور، میزان رسوب سالیانه در محل ایستگاه‌ها از ۴۴۶/۸۸ تن در سال تا ۳۳۷۵۰/۳۵ تن در سال متغیر بوده و روند تغییرات سالیانه آن‌ها در طول دوره آماری نزولی می‌باشد. با توجه به نتایج آزمون ایستایی داده‌ها^{۱۰} (ADF) سری داده‌های رسوب جهت تولید داده سالیانه به ازای مدل AR(1) ایستا است. یکی دیگر از اصول شبیه‌سازی به ازای مدل‌های استوکستیک، انتخاب توزیع آماری مناسب سری داده‌ها است، که بدین منظور در این مطالعه برای تعیین توزیع آماری مناسب داده‌های رسوب از روش PPCC^{۱۱} به‌عنوان مناسب‌ترین روش تعیین توزیع احتمالی برتر از میان پنج توزیع احتمالی نرمال، لاگ نرمال دو پارامتری، لاگ نرمال سه پارامتری، پیرسون تیپ سوم و لاگ پیرسون تیپ سوم استفاده شده است. نتایج آزمون PPCC نشان داد که توزیع پیرسون تیپ سوم به‌عنوان توزیع احتمالی غالب و برتر داده‌های رسوب ماهیانه و سالیانه در تمامی ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی است که به دلیل محدودیت صفحات مقاله، نتایج ارائه نشده است.

Table 3- Relationships between flow-sediment curves from different methods

جدول ۳- روابط منحنی‌های دبی-رسوب به ازای روش‌های مختلف

Station	Calculation method	Equation	N	R (Q&Qs)	R' (Qs&Qs)	RMSE (ton/day)	NSE	
Bardesor	Simple rating curve	$y = 0.6891x^{1.5389}$	405	0.805	0.336	383.4	-0.041	
	Months with greater or less discharge than annual average discharge	$Q \geq Q_r$ mean	$y = 0.5129x^{1.6515}$	151	0.707	0.326	443.4	-0.393
		$Q < Q_r$ mean	$y = 0.7069x^{1.5575}$	254	0.617			
	Months with more or less rainfall than average annual rainfall	$P \geq P$ mean	$y = 0.5385x^{1.7409}$	244	0.848	0.318	665.7	-2.139
		$P < P$ mean	$y = 0.8748x^{1.2473}$	161	0.730			
	The flow rate greater or less than average flow rate of samples	$Q \geq Q_s$ mean	$y = 0.7007x^{1.5760}$	295	0.633	0.309	785.2	-3.368
$Q < Q_s$ mean		$y = 0.2418x^{1.9091}$	110	0.592				
Standardized Streamflow Index	$SSI \leq -1$	$y = 0.2070x^{0.8005}$	21	0.316	0.313	661.2	-2.097	
	$-1 < SSI < 1$	$y = 0.7446x^{1.4272}$	321	0.655				
	$SSI \geq 1$	$y = 0.3136x^{1.8318}$	63	0.511				
Tapik	Simple rating curve	$y = 1.3631x^{1.5579}$	315	0.791	0.776	2476.6	0.244	
	Months with greater or less discharge than annual average discharge	$Q \geq Q_r$ mean	$y = 2.6381x^{1.5256}$	88	0.659	0.776	2265.9	0.342
		$Q < Q_r$ mean	$y = 1.7254x^{1.1439}$	227	0.608			
	Months with more or less rainfall than average annual rainfall	$P \geq P$ mean	$y = 1.9595x^{1.2475}$	190	0.808	0.768	2064.6	0.454
		$P < P$ mean	$y = 0.7896x^{1.8317}$	125	0.748			
	The flow rate greater or less than average flow rate of samples	$Q \geq Q_s$ mean	$y = 1.8824x^{1.1026}$	232	0.570	0.750	1909.0	0.550
$Q < Q_s$ mean		$y = 0.5732x^{1.9571}$	83	0.614				
Standardized Streamflow Index	$SSI \leq -1$	$y = 1.2027x^{0.7215}$	35	0.342	0.743	1890.5	0.542	
	$-1 < SSI < 1$	$y = 1.3272x^{1.4591}$	235	0.578				
	$SSI \geq 1$	$y = 0.4158x^{2.0454}$	45	0.542				
Dizaj	Simple rating curve	$y = 1.8355x^{1.3500}$	313	0.784	0.636	1166.1	0.066	
	Months with greater or less discharge than annual average discharge	$Q \geq Q_r$ mean	$y = 2.0061x^{1.5089}$	115	0.789	0.636	1101.4	0.166
		$Q < Q_r$ mean	$y = 1.8457x^{1.0000}$	198	0.651			
	Months with more or less rainfall than average annual rainfall	$P \geq P$ mean	$y = 2.1556x^{1.1469}$	188	0.772	0.604	1012.9	0.295
		$P < P$ mean	$y = 0.5104x^{1.9859}$	125	0.810			
	The flow rate greater or less than average flow rate of samples	$Q \geq Q_s$ mean	$y = 1.9364x^{0.8823}$	228	0.608	0.619	1012.6	0.295
$Q < Q_s$ mean		$y = 0.9307x^{1.8386}$	85	0.559				
Standardized Streamflow Index	$SSI \leq -1$	$y = 1.9145x^{0.7567}$	46	0.341	0.632	1043.0	0.252	
	$-1 < SSI < 1$	$y = 0.8140x^{1.6425}$	217	0.630				
	$SSI \geq 1$	$y = 2.0090x^{1.6124}$	50	0.419				
Gasemlo	Simple rating curve	$y = 1.9972x^{1.3528}$	207	0.694	0.568	412.7	0.022	
	Months with greater or less discharge than annual average discharge	$Q \geq Q_r$ mean	$y = 3.8874x^{1.4352}$	77	0.691	0.571	401.6	0.074
		$Q < Q_r$ mean	$y = 1.0000x^{0.8151}$	130	0.507			
	Months with more or less rainfall than average annual rainfall	$P \geq P$ mean	$y = 2.2753x^{1.6031}$	157	0.698	0.582	402.5	0.070
		$P < P$ mean	$y = 0.8668x^{1.8057}$	50	0.672			
	The flow rate greater or less than average flow rate of samples	$Q \geq Q_s$ mean	$y = 1.4555x^{0.9788}$	155	0.495	0.584	396.9	0.096
$Q < Q_s$ mean		$y = 1.5146x^{1.8451}$	52	0.555				
Standardized Streamflow Index	$SSI \leq -1$	$y = 0.4537x^{0.5038}$	18	0.350	0.584	393.3	0.112	
	$-1 < SSI < 1$	$y = 1.7378x^{1.4095}$	164	0.466				
	$SSI \geq 1$	$y = 1.1356x^{1.9980}$	25	0.597				
Kahor	Simple rating curve	$y = 3.9842x^{1.4519}$	275	0.732	0.405	228.1	0.102	
	Months with greater or less discharge than annual average discharge	$Q \geq Q_r$ mean	$y = 4.9280x^{1.5756}$	123	0.755	0.384	224.4	0.131
		$Q < Q_r$ mean	$y = 2.5110x^{1.0637}$	152	0.551			
	Months with more or less rainfall than average annual rainfall	$P \geq P$ mean	$y = 3.7928x^{1.8067}$	193	0.744	0.356	238.9	0.015
		$P < P$ mean	$y = 3.0153x^{1.0624}$	82	0.702			
	The flow rate greater or less than average flow rate of samples	$Q \geq Q_s$ mean	$y = 2.5699x^{1.0294}$	200	0.530	0.378	227.2	0.109
$Q < Q_s$ mean		$y = 5.1880x^{1.6434}$	75	0.541				
Standardized Streamflow Index	$SSI \leq -1$	$y = 2.6360x^{0.9755}$	32	0.629	0.398	222.8	0.144	
	$-1 < SSI < 1$	$y = 3.3474x^{1.7113}$	206	0.558				
	$SSI \geq 1$	$y = 6.7008x^{1.4965}$	37	0.508				
Hashemabad	Simple rating curve	$y = 0.7408x^{1.7722}$	283	0.746	0.506	1370.0	0.069	
	Months with greater or less discharge than annual average discharge	$Q \geq Q_r$ mean	$y = 0.3858x^{2.0209}$	102	0.742	0.464	1355.3	0.089
		$Q < Q_r$ mean	$y = 0.9097x^{1.5590}$	181	0.526			
	Months with more or less rainfall than average annual rainfall	$P \geq P$ mean	$y = 0.4129x^{2.0973}$	175	0.787	0.496	1317.3	0.140
		$P < P$ mean	$y = 1.3187x^{1.2311}$	108	0.595			
	The flow rate greater or less than average flow rate of samples	$Q \geq Q_s$ mean	$y = 1.0623x^{1.3824}$	204	0.448	0.475	1329.0	0.124
$Q < Q_s$ mean		$y = 0.2225x^{2.2310}$	79	0.560				
Standardized Streamflow Index	$SSI \leq -1$	$y = 0.9970x^{1.4416}$	29	0.217	0.407	1311.1	0.148	
	$-1 < SSI < 1$	$y = 0.8294x^{1.6449}$	204	0.552				
	$SSI \geq 1$	$y = 0.0197x^{2.9677}$	50	0.552				

N: تعداد نمونه‌ها؛ R: همبستگی بین نمونه‌های دبی جریان و دبی رسوب؛ R': همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و تئوریک؛ RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا بین مقادیر مشاهداتی و تئوریک؛ NSE: ضریب کارایی نش-ساتکلیف بین مقادیر مشاهداتی و تئوریک

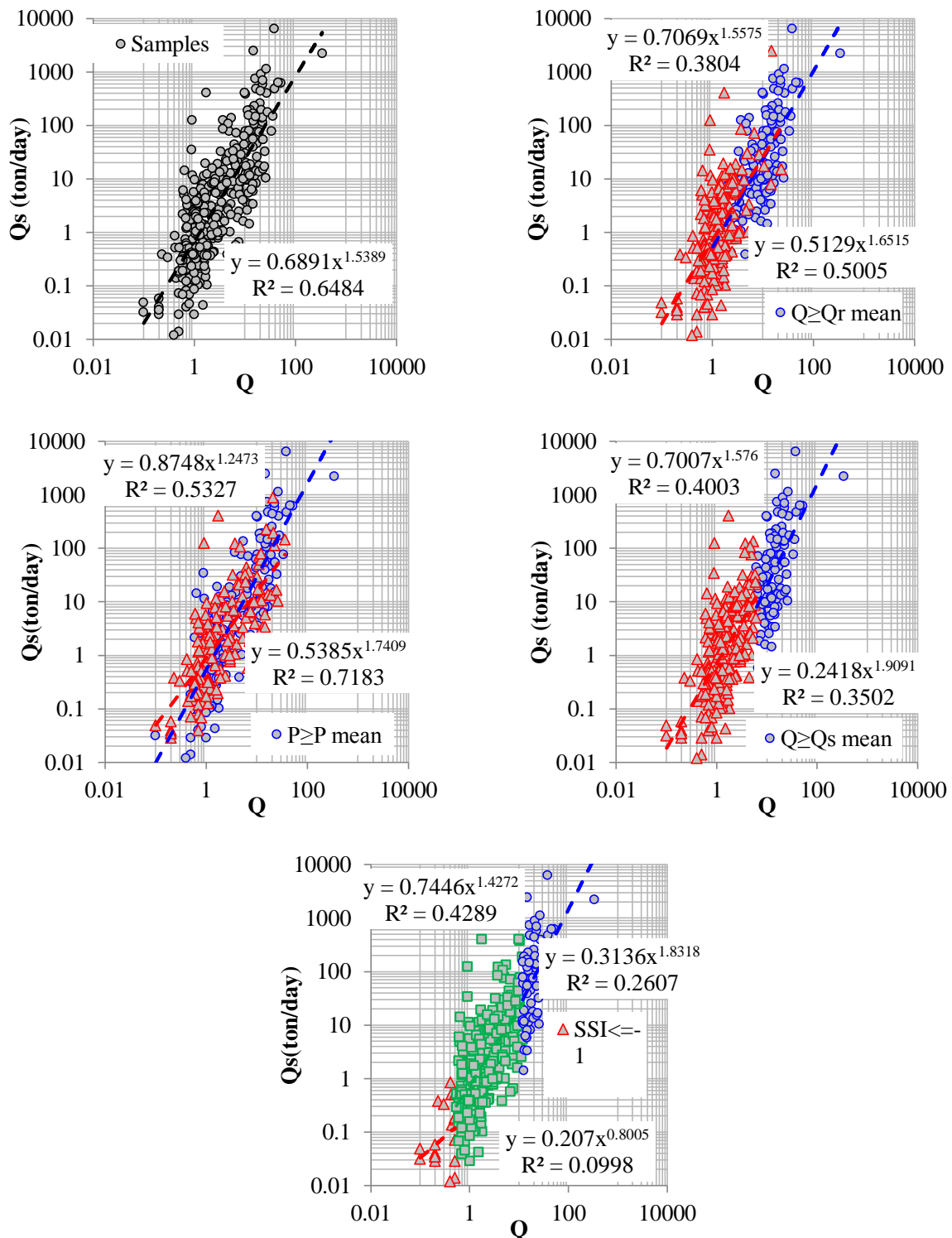


Fig. 3- Discharge-sediment curves for different methods at Bardesor station
 شکل ۳- منحنی‌های دبی- رسوب به ازای روش‌های مختلف در ایستگاه برده سور

۳-۳- عملکرد مدل تولید داده مصنوعی به ازای روش مونت کارلو

مدل‌های استوکستیک تولید داده عموماً بر اساس فرض ایستایی داده‌ها توسعه یافتند (Salas, 1993). بنابراین، مدل‌های مذکور بایستی قادر به دوباره تولید یا حفظ خصوصیات مهم آماری داده‌های تاریخی باشند. به عبارت دیگر، مهم‌ترین فاکتور در انتخاب مدل استوکستیک، توانایی تولید داده‌های مورد نظر و حفظ خصوصیات داده‌های تاریخی در داده‌های تولیدی است.

بطوریکه مدل تولید داده بایستی قادر باشد که به‌طور دقیق خصوصیات آماری داده‌های رسوب را در دو سطح سالیانه و ماهیانه حفظ کند. این معیارها شامل پارامترهای آماری پایه یعنی میانگین، انحراف معیار، ضریب چولگی و همچنین همبستگی بین داده‌های ماهیانه در ماه‌های مختلف با داده‌های سالیانه داده‌های تولیدی و تاریخی است. شکل ۴ مشخصات آماری از قبیل میانگین، انحراف معیار، چولگی داده‌های ماهیانه و همبستگی بین داده‌های ماهیانه در ماه‌های مختلف با داده‌های سالیانه به‌عنوان نمونه برای داده‌های ایستگاه برده سور را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، مدل استوکستیک تولید داده، مشخصات مهم آماری مذکور را در حد مطلوبی حفظ می‌کند.

۳-۴- تابع چگالی احتمال^{۱۲} (PDF) مقادیر شاخص خشکسالی SSI

تابع چگالی احتمال مقادیر شاخص خشکسالی SSI بر اساس کلاس‌های مختلف به ازای داده‌های تولیدی برای تمامی ایستگاه‌ها برآورد شد که به‌عنوان نمونه در شکل ۵ برای سری داده‌های رسوب ایستگاه برده سور به ازای طبقه‌بندی ۷ کلاسه و ۳ کلاسه (مجموع سه حالت پر رسوب، نرمال و کم رسوب) ارائه شده است. بر اساس شکل مذکور،

تابع چگالی احتمال با استفاده از داده‌های تولیدی کاملاً از توزیع نرمال تبعیت نموده، بطوریکه احتمال حالت پر رسوب، نرمال و کم رسوب به ترتیب برابر با ۱۶/۷٪، ۶۶/۷٪ و ۱۶/۶٪ است. این موضوع بیانگر تطابق کامل تابع چگالی احتمال رخدادهای رسوب به‌عنوان رخدادهای مورد انتظار از یک پدیده حاصل از فرآیند طبیعی نرمالیزه، با توزیع نرمال است.

ارزیابی نتایج تابع چگالی احتمال نشان داد که احتمالات حالات مختلف رسوب بیانگر رفتار نظام‌مند با ضرایب چولگی داده‌ها در تمامی ایستگاه‌ها داشته، بطوریکه با افزایش مقادیر چولگی داده‌ها، احتمال حالت سطح بالای رسوب شدید افزایش و احتمال حالت سطح بالای رسوب متوسط و ضعیف کاهش داشته است. در شکل ۶ رابطه بین مقادیر احتمال سه حالت سطح بالای رسوب شدید، متوسط و ضعیف با ضریب چولگی داده‌ها به ازای شاخص SSI ارائه شده است.

۳-۵- احتمال تجمعی دوره‌های پر رسوب یا نرمال بالاتر

با استفاده از سری زمانی داده‌های تولیدی، احتمالات تجمعی دوره‌های پر رسوب یا نرمال بالاتر به ازای گام‌های زمانی مختلف (سالیانه) تعیین و برآورد گردید. در شکل ۷ احتمالات تجمعی دوره‌های پر رسوب یا نرمال بالاتر به ازای گام‌های زمانی مختلف در ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش گام‌های زمانی احتمالات تجمعی دوره‌های پر رسوب یا نرمال بالاتر کاهش یافته است. بررسی نتایج نشان داد که این رفتار در ایستگاه‌های مختلف، متفاوت بوده و تابعی از چولگی داده‌ها می‌باشد. بطوریکه به‌عنوان نمونه، با افزایش ضریب چولگی داده‌ها، احتمالات تجمعی دوره‌های پر رسوب یا نرمال بالاتر یک‌ساله افزایش داشته است (شکل ۸). چنین رابطه‌ای در گام‌های زمانی دیگر نیز به دست آمد.

Table 4- Statistical characteristics of sediment data series and results of Mann-Kendall, randomness and stationarity tests

جدول ۴- مقادیر مشخصات آماری سری داده‌های رسوب و نتایج آزمون‌های من- کندال، تصادفی بودن و ایستایی

Parameters	Bardesor	Tapik	Dizaj	Gasemlo	Kalhor	Hashemabad
Average annual sediment (tons/year)	4503.43	32750.35	7621.09	456.16	446.88	6999.61
Coefficient of variation	0.53	0.84	0.59	1.13	0.95	0.52
Skewness	1.23	2.03	1.35	2.47	2.19	1.21
Correlation coefficient with a one-year lag	0.2	0.41	0.38	0.42	0.31	0.43
Man-Kendall test statistic	-1.44	-1.99	-2.18	-2.6	-1.55	-1.28
Randomness test statistic	0.31	-0.62	-0.94	-1.94	-0.94	-0.31
ADF test (Critical value=-2.87)	-4.81	-3.31	-3.95	-3.98	-3.57	-3.48

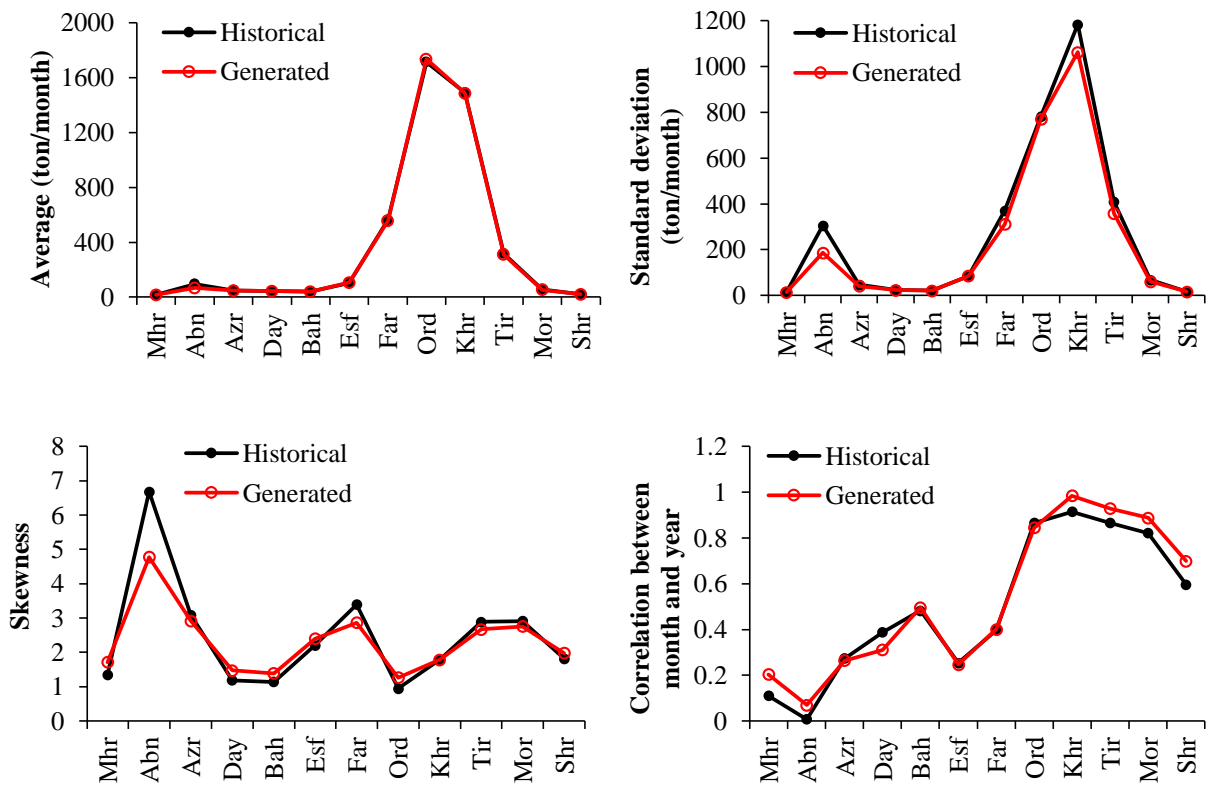


Fig. 4- Comparison of statistical characteristics (mean, standard deviation, skewness and correlation coefficients between month and year) of monthly generated data with historical data at Bardesor station
 شکل ۴- مقایسه مشخصات آماری (میانگین، انحراف معیار، چولگی و ضرایب همبستگی بین ماه با سال) داده‌های ماهیانه تولیدشده با داده‌های تاریخی در ایستگاه برده سور

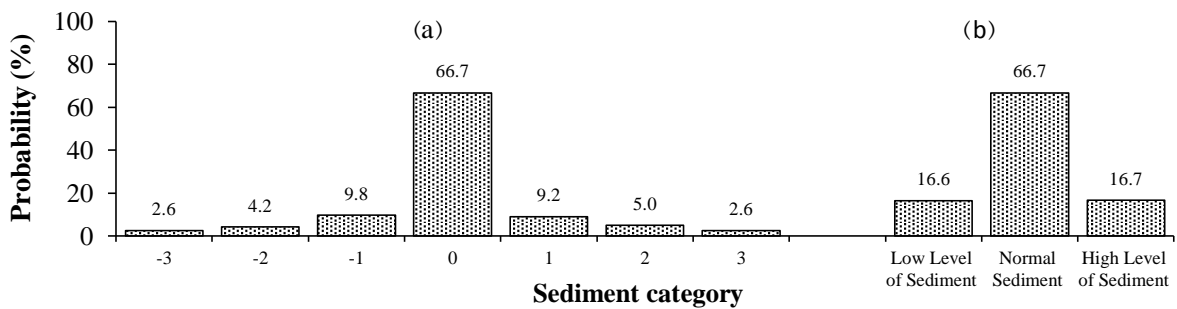


Fig. 5- Probability density function of the standard sediment index for (a) seven classes and (b) three classes at Bardesor station

شکل ۵- تابع چگالی احتمال یا احتمال دوره‌های مختلف شاخص رسوب استاندارد (a- طبقه‌بندی هفت کلاسه رسوب، b- طبقه‌بندی سه کلاسه رسوب) در ایستگاه برده سور

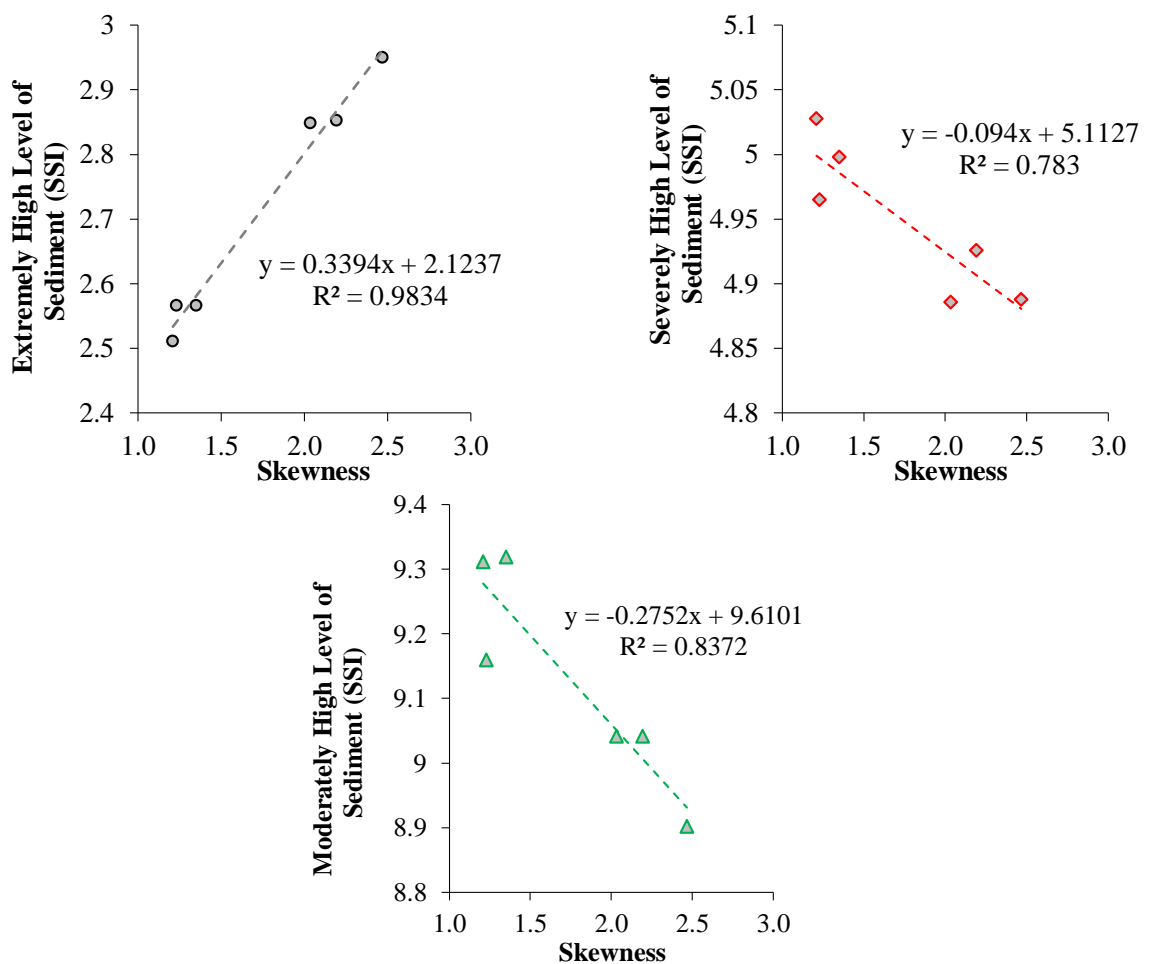


Fig. 6- Relationship between probabilities of three extremely, severely and moderately high level of sediment versus skewness

شکل ۶- رابطه بین مقادیر احتمال سه حالت سطح بالای رسوب شدید، متوسط و ضعیف با ضریب چولگی داده‌ها

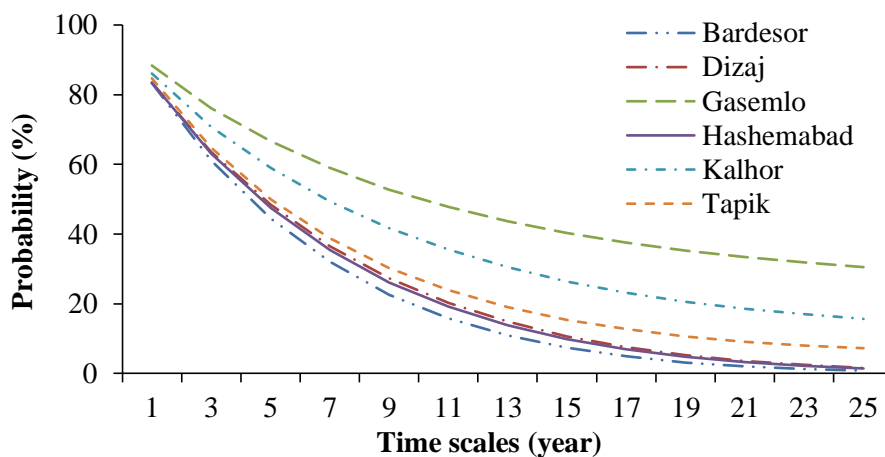


Fig. 7- Cumulative probability for periods of higher or normal sediment for different time steps

شکل ۷- احتمال تجمعی دوره‌های پر رسوب یا نرمال بالاتر به ازای گام‌های زمانی مختلف

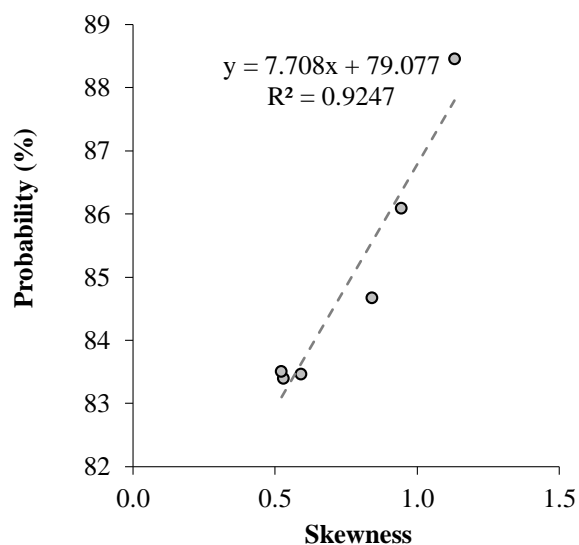


Fig. 8- Relationship between cumulative probabilities of 1-year high sediment periods with skewness
 شکل ۸- رابطه بین مقادیر احتمال تجمعی دوره‌های پر رسوب یا نرمال بالاتر یک‌ساله با ضریب چولگی داده‌ها

در تمام ایستگاه‌ها کاهش می‌یابند. این امر به دلیل وابستگی و همبستگی بالای شدت حالت پر رسوب با ضریب چولگی داده‌ها در گام‌های زمانی مختلف بوده، بطوریکه تا گام زمانی ۶ و ۷ ساله، با افزایش ضریب چولگی داده‌ها، شدت حالت پر رسوب کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، ضرایب همبستگی مابین شدت حالت پر رسوب با ضریب چولگی داده‌ها با افزایش گام‌های زمانی، از مقدار -0.72 تا $+0.89$ افزایش پیدا می‌کند. رابطه بین ضرایب همبستگی مابین شدت حالت پر رسوب با ضریب چولگی داده‌ها به ازای گام‌های زمانی مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۳-۶- شدت حالت پر رسوب

بر اساس تئوری ران، شدت حالت پر رسوب از تقسیم بزرگی حالت پر رسوب بر مدت زمانی که پارامتر رسوب در بالای سطح آستانه قرار می‌گیرد، به دست می‌آید. شکل ۹ متوسط شدت حالت پر رسوب در گام‌های زمانی مختلف را برای تمام ایستگاه‌های مطالعاتی به ازای دوره‌های ۱، ۲، ۳، ... تا ۱۰ سال بر اساس مقادیر شاخص SSI نشان می‌دهند. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، متوسط شدت حالت پر رسوب یک‌ساله در کلیه ایستگاه‌ها نزدیک 0.32 بوده و با افزایش گام زمانی، افزایش پیدا کرده و بعد از گام زمانی ۶ و ۷ ساله، با شیب کمتری

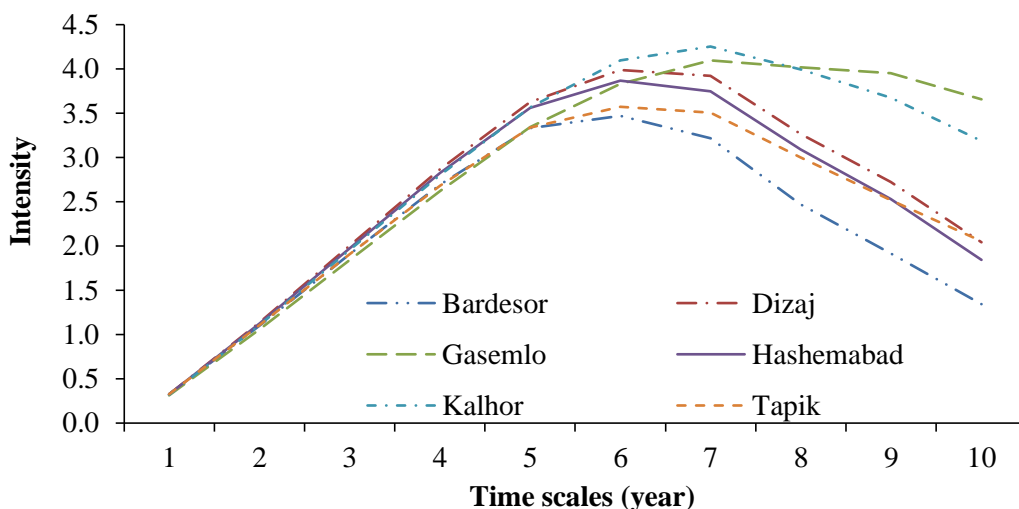


Fig. 9- Mean intensity of high sediment state in different time scales
 شکل ۹- متوسط شدت حالت پر رسوب در گام‌های زمانی مختلف

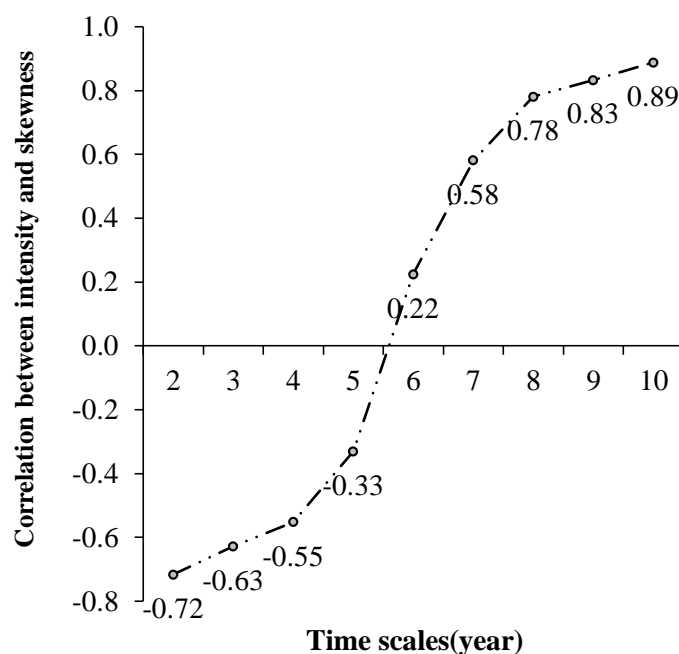


Fig. 10- The relationship between the correlation coefficients between the intensity of the high sediment state and the skewness for different time steps

شکل ۱۰- رابطه بین ضرایب همبستگی مابین شدت حالت پر رسوب با ضریب چولگی داده‌ها به ازای گام‌های زمانی مختلف

و با حالت سطح بالای رسوب شدید به نرمال (EHLSto NS) و نرمال به سطح بالای رسوب شدید (NS to EHLS) دارای رابطه عکس (به ترتیب $R=0.94$ و $R=0.94$) بوده است (شکل ۱۲).

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه یک فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌طور نوآورانه جهت ارزیابی رفتار عمومی و جامع سری داده‌های رسوب با توسعه شاخص رسوب استاندارد (SSI) در رودخانه‌های غرب حوضه دریاچه ارومیه انجام پذیرفت. بدین منظور، ابتدا سری داده‌های رسوب جریان رودخانه به ازای مدل‌های مختلف منحنی دی-رسوب، تعیین و سپس سری زمانی داده‌ای رسوب برآورد شد. در ادامه سری داده‌های مصنوعی رسوب (به تعداد ۱۰۰۰ سری) با استفاده از مدل استوکستیک و رگرسیون مرتبه اول و مدل توزیعی والنسیا-شاکی تولید و سپس برای پایش و تعیین خصوصیات مختلف رسوب به ازای شاخص رسوب استاندارد (SSI) استفاده شد.

۳-۷- ماتریس احتمال انتقال

ماتریس احتمال انتقال به‌عنوان یک ابزار برای برنامه‌ریزی و مدیریت‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت پدیده‌های هیدرولوژیکی از جمله رسوب رودخانه و ویژگی‌های احتمالاتی آن بکار می‌رود. به‌عنوان مثال، با دسترسی به چنین ماتریسی پیش‌بینی شرایط حالات مختلف رسوب سال آتی به ازای وضعیت سال جاری امکان‌پذیر شده که کمک قابل توجهی برای تصمیم‌گیری‌های مناسب کاهش اثرات میزان رسوبات رودخانه خواهد بود. در شکل ۱۱ احتمال انتقال حالت نرمال به طبقات مختلف سطح بالای رسوب به ازای داده‌های تولیدی ایستگاه برده سور ارائه شده است. نتایج مذکور نشان می‌دهد که احتمال رسیدن به حالت نرمال بعد از حالت نرمال (N to N) بیشتر و نزدیک به ۷۸٪ است. این احتمال برای حالات مختلف سطح بالای رسوب ضعیف، متوسط و شدید به ترتیب کمتر شده است. ضمناً ارزیابی نتایج برای ایستگاه‌های مختلف محدوده مطالعاتی دارای نتایج متفاوتی بوده که این مسئله به ضریب چولگی داده‌ها وابسته بوده، بطوریکه به‌عنوان نمونه، احتمال انتقال سطح بالای رسوب شدید به سطح بالای رسوب شدید (EHLS to EHLS) با ضریب چولگی داده‌ها دارای رابطه مستقیم ($R=0.86$)

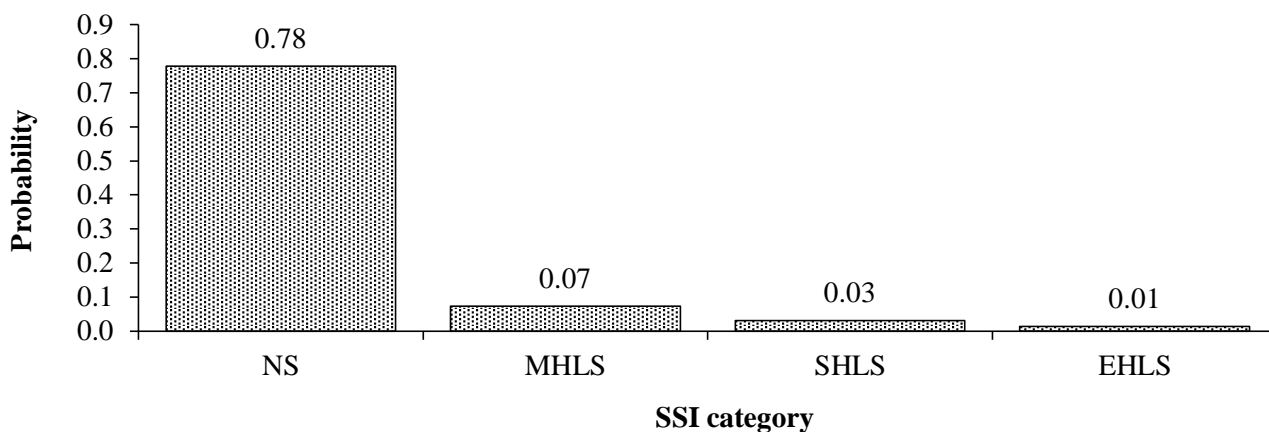


Fig. 11- Transition probability of normal state to different sediment classes based on generated data at Bardesor station

شکل ۱۱- احتمال انتقال حالت نرمال به طبقات مختلف رسوب به ازای داده‌های تولیدی ایستگاه برده سور

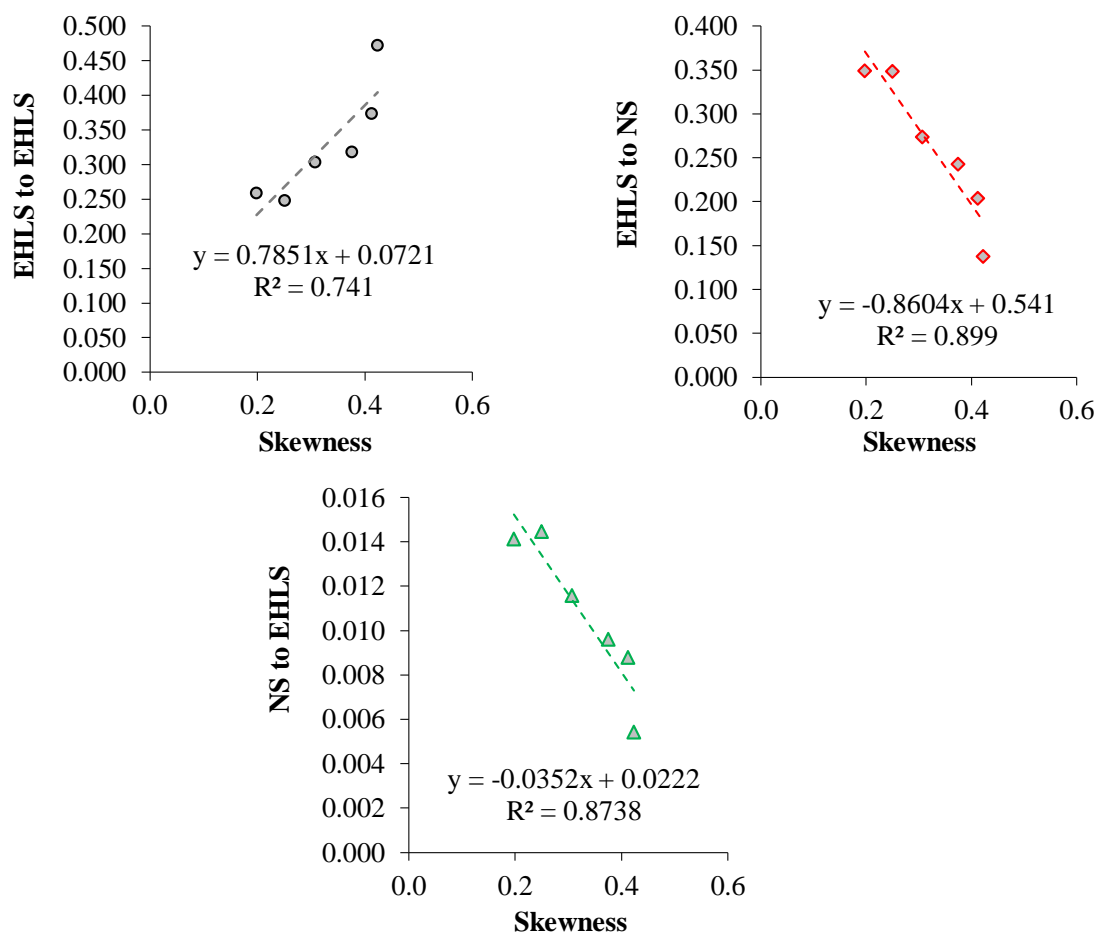


Fig. 12- Relationship between transition probability of EHLS to EHLS and with the state of EHLS to NS and NS to EHLS

شکل ۱۲- رابطه بین احتمال انتقال سطح بالای رسوب شدید به سطح بالای رسوب شدید (EHLS to EHLS) و با حالت سطح بالای رسوب شدید به نرمال (EHLS to NS) و نرمال به سطح بالای رسوب شدید (NS to EHLS)

پی‌نوشت‌ها

- 1- Autoregressive
- 2- Autoregressive Integrated Moving Average
- 3- Standard Sediment Index
- 4- Standard Precipitation Index
- 5- Valencia and Schaake
- 6- Disaggregation Models
- 7- Root Mean Square Error
- 8- Nash-Sutcliffe
- 9- Standardized Streamflow Index
- 10- Augmented Dickey-Fuller
- 11- Probability Plot Correlation Coefficient
- 12- Probability Density Function

در این تحقیق، تعیین بهترین رابطه توانی داده‌های دبی-رسوب در محل ایستگاه‌ها، تعیین رفتار عمومی سری داده‌های رسوب به ازای استفاده از یک مدل استوکستیک با حفظ مشخصات آماری داده‌های در دو سطح ماهیانه و سالیانه، توسعه شاخص رسوب استاندارد، تعیین تابع چگالی احتمال مقادیر SSI، تحلیل احتمالات تجمعی دوره‌های پر رسوب یا نرمال بالاتر، تحلیل شدت رسوب و تعیین ماتریس احتمال انتقال داده‌های رسوب در محل ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مورد نظر قرار گرفته و نتایج حاصل آن را می‌توان به‌قرار زیر خلاصه نمود:

- در اکثر ایستگاه‌ها روش محاسبه و برآورد دبی-رسوب به ازای روش نوآورانه این مطالعه یعنی استفاده از روش شاخص خشکسالی دبی جریان برای طبقه‌بندی رابطه بین دبی و رسوب، در اولویت اول دارای عملکرد بهتری (میزان خطای کمتر به ازای معیارهای ارزیابی مختلف) نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی در مطالعات مختلف از جمله Asselman (2000) و Efthimiou (2019) بوده است؛

- نتایج نشان داد که ارزیابی روابط مختلف بین مقادیر دبی و رسوب در ایستگاه‌های مختلف با شرایط فیزیوگرافی متفاوت بوده و نمی‌توان یک روش را به‌عنوان روش کلی برای تمامی حوضه‌ها بسط داد؛

- مدل استوکستیک مورد استفاده در حد مطلوبی مشخصات آماری سری داده‌های تاریخی را حفظ و دوباره تولید نموده که استنتاج‌های دقیق و واقعی از پدیده رسوب در رودخانه را مورد تأیید قرار می‌دهد؛

- تابع چگالی احتمال داده‌های رسوب کاملاً از توزیع نرمال تبعیت نموده، که بیانگر تطابق کامل تابع چگالی احتمال رخدادهای رسوب به‌عنوان رخدادهای مورد انتظار از یک پدیده حاصل از فرآیند طبیعی نرمالیزه، از توزیع نرمال مورد انتظار است. ضمناً دارای رفتار نظام‌مند با ضرایب چولگی داده‌ها در تمامی ایستگاه‌ها بوده، بطوریکه با افزایش مقادیر چولگی داده‌ها، احتمال حالت رسوب شدید افزایش و احتمال حالت رسوب متوسط و ضعیف کاهش داشته است؛

- احتمالات تجمعی دوره‌های پر رسوب یا نرمال بالاتر با افزایش گام‌های زمانی کاهش یافته و دارای ارتباط مستقیمی با ضریب چولگی داده‌ها است؛

- شدت میزان رسوب با افزایش گام‌های زمانی، افزایش یافته و بعد از گام‌های زمانی ۶ و ۷ ساله با شیب کمتری در تمام ایستگاه‌ها کاهش می‌یابند. این امر به دلیل وابستگی و همبستگی بالای شدت حالت پر رسوب با ضریب چولگی داده‌ها در گام‌های زمانی مختلف بوده است؛

- نهایتاً نتایج این مطالعه به‌عنوان یک راهنمای جامع در استنباط دقیق و واقعی از پدیده رسوب رودخانه به ازای شاخص SSI بوده و می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش حداکثری خسارات ناشی از رسوبات داشته باشد.

۵- مراجع

- Amirataee B, Montaseri M, Yasi M (2013) Comparison of inherent performance of seven drought indices in drought mitigation using a Monte Carlo simulation approach. *Journal of civil and environmental engineering* 43(1):67-82 (In Persian)
- Amorocho J, Orlob G T (1961) Non-linear analysis of hydrologic systems. *Water Resources Center, University of California, Contribution* 40:147pp.
- Anderson O D (1977) Time series analysis and forecasting: Another look at the Box-Jenkins Approach. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)* 26(4):285-303
- Asselman N E M (2000) Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology* 234(3-4):228-248
- Azadi S, Nozari H, Godarzi E (2020) Predicting sediment load using stochastic model and rating curves in a hydrological station. *Journal of Hydrologic Engineering* 25(8):05020017
- Barzegari F, Dastorani M T (2016) Suspended sediment prediction using time series and artificial neural networks models (Case Study: Ghazaghly Station in Gorganroud River). *Journal of Watershed Management Research* 6(12):216-225 (In Persian)
- Barzegaribanadkoki F, Armin M (2016) Suspended sediment prediction using time Series and sediment rating curve (Case study: Ghazaghly station in Gorganroud River). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 9(31):77-88 (In Persian)
- Campbell F B, Bauder H A (1940) A rating-curve method for determining silt-discharge of streams. *Transactions American Geophysical Union* 21(2):603-607
- Chen H, Dyke P P G (1998) Multivariate time-series model for suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research* 18(2-4):123-150
- Chow V T, Maidment D R, Mays LW (1988) *Applied hydrology*. McGraw-Hill Book Co, New York
- Cordova J R, Gonzalez M (1997) Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements. *Soil Technology* 11:57-69
- De Girolamo A M, Pappagallo G, Lo Porto A (2015) Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). *Catena* 128:135-143
- Domínguez-Castro F, Vicente-Serrano SM, Tomás-Burguera M, Peña-Gallardo M, Beguería S, El Kenawy A, Luna Y, Morata A (2019) High spatial resolution climatology of drought events for Spain: 1961-2014. *International Journal of Climatology* 39(13):5046-5062
- Efthimiou N (2019) The role of sediment rating curve development methodology on river load modeling. *Environmental Monitoring and Assessment* 191:108
- Ferguson R I (1986) River loads underestimated by rating curves. *Water Resources Research* 22(1):74-76
- Hadley R F (1985) Recent developments in erosion and sediment yield studies. *International Hydrological Programme, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*
- Horowitz A J (2003) An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes* 17:3387-3409
- Hu B, Wang H, Yang Z, Sun X (2011) Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. *Quaternary International* 230:34-43
- Irvine K N, Drake J J (1987) Process-oriented estimation of suspended sediment concentration 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 23(6):1017-1025
- Kalyanapu A J, Judi D R, McPherson T N, Burian S J (2012) Monte Carlo-based flood modelling framework for estimating probability weighted flood risk. *Journal of Flood Risk Management* 5(1):37-48
- Kao S J, Lee T Y, Milliman J D (2005) Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences* 16(3):653
- Keihani A, Akhondali A M, Fathian H (2021) Multivariate frequency analysis of peak discharge and suspended and bed sediment load in Karaj Basin, Iran-*Water Resources Research* 17(1):47-67 (In Persian)
- Khalilivandareh S, Shahnazari A, Sarraf A (2022) Spatio-temporal variations of discharge and sediment in rivers flowing into the Anzali Lagoon. *Sustainability* 14(1): 507
- Lobanova A, Liersch S, Nunes JP, Didovets I, Stagl J, Huang Sh, Koch H, López MR, Maule CF, Hattermann F, and Krysanova V (2018) Hydrological impacts of moderate and high-end

- climate change across European river basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 18:15-30
- Mao L, Carrillo R (2017) Temporal dynamics of suspended sediment transport in a glacierized Andean basin. *Geomorphology* 287:116-125
- McMahon T A, Adeloje A J (2005) Water resources yield. Water Resources Publications, Littleton
- McMahon T, Peel M, Karoly D (2015) Assessment of precipitation and temperature data from CMIP3 global climate models for hydrologic simulation. *Hydrology and Earth System Sciences* 19:361-377
- Melesse A M, Ahmad S, McClain M E, Wang X, Lim Y H (2011) Suspended sediment load prediction of river systems: An artificial neural network approach. *Agricultural Water Management* 98(5):855-866
- Mimikou M (1982) An investigation of suspended sediment rating curves in western and northern Greece. *Hydrological Sciences Journal* 27(3):369-383
- Morgan R P C (1985) Assessment of soil erosion risk in England and Wales. *Soil Use and Management* 1:127-131
- Nash J E, Sutcliffe J V (1970) River flow forecasting through conceptual models, part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10 (3): 282-290.
- Peters-Kummerly B E (1973) Studies on composition and transport of suspended solids in some Swiss rivers. *Geographica Helvetica* 28:137-151 (in German)
- Raeesi M, Najafinejad A, Azim Mohseni M (2019) Investigation of temporal phenomena of sediment rating curve and comparison of it with some statistical methods for estimating suspended sediment load (Case study: Gamasiab Watershed). *Journal of Watershed Management Research* 10(20):83-96 (In Persian)
- Rice R M (1982) Sedimentation in the chaparral: How do you handle unusual events. *Sediment Budgets and Routing in Forested Drainage Basins* 39-49
- Rovira A, Batalla R J (2006) Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: the Lower Tordera (NE Spain). *Geomorphology* 79:58-71
- Sadeghi S H, Saeidi P, Telvari A (2018) Contribution of wash and channel sediment sources in supplying storm suspended sediment load in the Galazchai Watershed. *Water Engineering* 10(35):17-26 (In Persian)
- Salas J D (1993) Analysis and modeling of hydrologic time series. In the *McGraw Hill Handbook of Hydrology*, edited by D. Maidment, Chapter 19
- Shojaeezadeh S A, Nikoo M R, McNamara J P, AghaKouchak A, Sadegh M (2018) Stochastic modeling of suspended sediment load in alluvial rivers. *Advances in Water Resources* 119:188-196
- Singer M B, Dunne T (2001) Identifying eroding and depositional reaches of valley by analysis of suspended sediment transport in the Sacramento River, California. *Water Resources Research* 37(12):3371-3381
- Sivakumar B, Wallender W W (2004) Deriving high-resolution sediment load data using a nonlinear deterministic approach. *Water Resources Research* 40:W05403
- Smith R E, Hebert R H B (1979) A Monte Carlo analysis of the hydrologic effects of spatial variability of infiltration. *Water Resources Research* 15(2):419-429
- Srikanthan R, McMahon T A (2001) Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union* 5(4):653-670
- Stedinger J R, Vogel R M (1984) Disaggregation procedures for generating serially correlated flow vectors. *Water Resources Research* 20(1):47-56
- Walling D E (1974) Suspended sediment and solid yields from a small catchment prior to urbanization. *Fluvial Processes in Instrumented Watersheds* 6:169-192
- Walling D E, Webb B W (1981) The reliability of suspended sediment load data. *IAHS Publication* 133:177-194
- Yevjevich V M (1972) Structural analysis of hydrologic time series. Doctoral Dissertation, Colorado State University Libraries
- Zhai H J, Hu B, Luo X Y, Qiu L, Tang W J, Jiang M (2016) Spatial and temporal changes in runoff and sediment loads of the Lancang River over the last 50 years. *Agricultural Water Management* 174:74-81