



Impact of climate change in design discharge and sediment yield in urban streams (Case study: Soulghan hydrometric station)

Mehdi Karami¹ | Mohammad Reza Majdzadeh Tabatabai² | Reza Shams³

1. Department of Civil, Water and Environmental, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: meh.karami@mail.sbu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Civil, Water and Environmental, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_majdzadeh@sbu.ac.ir
3. Department of Civil, Water and Environmental, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: r_shams@sbu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 10 May 2026 Received in revised form 10 June 2026 Accepted 16 June 2026 Published online 22 August 2026 Keywords: <i>Bankfull discharge</i> <i>Downscaling, Effective discharge</i> <i>Machine learning</i> <i>Sediment rating curve</i>	In this study, the impact of climate change on the design discharge and sediment loading in the Kan River was studied using data from the Soulghan hydrometric station. The effective discharge, the full-flow discharge, and the discharges with return periods of 1.58 and 2.33 years were calculated for current and future conditions under three climate scenarios SSP126, SSP245, and SSP585. The results showed that the effective discharge under current conditions is about 5.05 m³ / s, which transports more than 69.4 percent of the sediment, but in the future, with the decrease in the amplitude of the flows, the effective discharge will decrease to about 2.76 to 2.86 m³/s, carrying more than 91 percent of the accumulated sediment. The sensitivity index of sediment transport to discharge also decreased from 1.32 in the past to about 0.45 to 0.49 in the future, indicating a decrease in the sharp jump in sediment with an increase in discharge. The LARS-WG model performed well in generating future climate data (r=0.97), (RMSE=2.57), and the LSTM and SVM machine learning models performed well with a correlation coefficient of about 0.90 and an NSE efficiency coefficient higher than 0.79 were able to predict discharge and sediment with acceptable accuracy. The results indicate increased flow fluctuations, increased frequency of extreme events, and redistribution of sediment load towards flows with lower amplitude due to climate change, which requires a review of the hydraulic design and management of urban waterways.

Cite this article: Karami, M., Majdzadeh Tabatabai, M. R., & Shams, R. (2026). Impact of climate change in design discharge and sediment yield in urban streams (Case study: Soulghan hydrometric station). *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (2), 325-347. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.414072.1302>





بررسی نقش تغییر اقلیم در دبی طراحی و آورد رسوب در آبراهه‌های شهری (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری سولقان)

مهدی کرمی^۱ | محمدرضا مجدزاده طباطبائی^۲ | رضا شمس^۳

۱. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: meh.karami@mail.sbu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_majdzadeh@sbu.ac.ir
۳. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: r_shams@sbu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در این پژوهش، تأثیر تغییر اقلیم بر دبی طراحی و بارگذاری رسوب در رودخانه کن، با استفاده از داده‌های ایستگاه هیدرومتری سولقان، مورد مطالعه قرار گرفت. دبی مؤثر، دبی مقطع‌پر و دبی‌های با دوره بازگشت‌های ۱/۵۸ و ۲/۳۳ سال برای شرایط موجود و آینده تحت سه سناریوی اقلیمی SSP126، SSP245 و SSP585 محاسبه شدند. نتایج نشان داد که دبی مؤثر در شرایط موجود حدود ۵/۰۵ مترمکعب بر ثانیه است که بیش‌تر از ۶۹/۴ درصد رسوب توسط آن منتقل می‌شود، اما در آینده با کاهش دامنه جریان‌ها، دبی مؤثر به حدود ۲/۷۶ تا ۲/۸۶ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته و بیش از ۹۱ درصد رسوب تجمعی را حمل می‌کند. شاخص حساسیت انتقال رسوب به دبی نیز از ۱/۳۲ در گذشته به حدود ۰/۴۵ تا ۰/۴۹ در آینده کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش جهش تند رسوب با افزایش دبی است. مدل LARS-WG عملکرد خوبی در تولید داده‌های اقلیمی آینده ($r=0.97$)، ($RMSE=2.57$) داشت و مدل‌های یادگیری ماشین LSTM و SVM با ضریب همبستگی حدود ۰/۹۰ و ضریب کارایی NSE بالاتر از ۰/۷۹ توانستند دبی و رسوب را با دقت قابل قبول پیش‌بینی کنند. نتایج بیانگر افزایش نوسانات جریان، افزایش فراوانی رخداد‌های حدی و بازتوزیع بار رسوبی به سمت جریان‌های با دامنه کم‌تر در اثر تغییر اقلیم است که نیازمند بازنگری در طراحی هیدرولیکی و مدیریت آبراهه‌های شهری می‌باشد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱ کلیدواژه‌ها: دبی مؤثر دبی مقطع‌پر ریزمقیاس نمایی ماشین لرنینگ منحنی سنج رسوب

استناد: کرمی، مهدی؛ مجدزاده طباطبائی، محمدرضا و شمس، رضا (۱۴۰۵). بررسی نقش تغییر اقلیم در دبی طراحی و آورد رسوب در آبراهه‌های شهری (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری سولقان). نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۶ (۲)، ۳۲۵-۳۴۷.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.414072.1302>



۱. مقدمه

رودخانه‌ها سامانه‌هایی پویا و خودتنظیم‌اند که شکل، ابعاد و ظرفیت عبور جریان آن‌ها در برهم‌کنش پیوسته میان رژیم جریان، عرضه و انتقال رسوب و شرایط مورفولوژیک حوضه شکل می‌گیرد و در بازه‌های زمانی مختلف می‌تواند به سمت تعادل یا ناپایداری حرکت کند (Wang & Xu, 2020). در چنین سامانه‌ای، رخدادهای سیلابی بزرگ می‌توانند تغییرات ماندگار در عرض و هندسه مجرا ایجاد کنند، درحالی‌که جریان‌های کوچک‌تر در بسیاری از رودخانه‌ها به‌ویژه در شرایط مرطوب، در بازسازی تدریجی مقطع و نزدیک‌شدن به وضعیت رژیمی نقش دارند (Braithwaite, 2023). بر این اساس، مفهوم «جریان غالب» یا جریان تشکیل‌دهنده مجرا مطرح شده است؛ یعنی جریانی که در بلندمدت بیش‌ترین نقش را در حفظ یا تغییر مورفولوژی مجرا دارد و لزوماً با بزرگ‌ترین سیلاب رخ داده یکسان نیست (Wolman & Miller, 1960).

در ادبیات مهندسی رودخانه، دبی مقطع‌پر، دبی مؤثر و دبی‌های متناظر با دوره‌های بازگشت کوتاه‌مدت (به‌ویژه حدود ۱/۵۸ و ۲/۳۳ سال) از مهم‌ترین شاخص‌های برآورد جریان غالب محسوب می‌شوند، اما مطالعات نشان داده‌اند که این شاخص‌ها در همه رودخانه‌ها مقدار ثابتی ندارند و به رژیم جریان، نوع بار رسوبی، هندسه مقطع، روش محاسبه و حتی نوع سری آماری (بیشینه سالانه یا سری مقادیر جزئی) وابسته‌اند (Sarker, 2023). دبی مقطع‌پر معمولاً به‌عنوان جریانی تعریف می‌شود که در آستانه ورود آب به سیلاب‌دشت قرار دارد و از نظر ریخت‌شناسی با شاخص‌های هندسی مقطع قابل شناسایی است، اما تعیین آن در عمل به شواهد صحرایی و تفسیر صحیح مرز سیلاب‌دشت فعال وابسته است (Li et al., 2021). در مقابل، دبی مؤثر بر پایه ترکیب منحنی تداوم جریان و منحنی سنج رسوب تعریف می‌شود و به‌صورت دبی‌ای در نظر گرفته می‌شود که بیش‌ترین سهم را در انتقال بلندمدت رسوب دارد، بنابراین به‌شدت به شکل منحنی سنج رسوب، پراکندگی داده‌های رسوب و تغییرپذیری رژیم جریان حساس است (Eaton & Davidson, 2022). به همین دلیل، همگرایی یا واگرایی دبی مؤثر و دبی مقطع‌پر در رودخانه‌های مختلف می‌تواند بازتابی از تفاوت کنترل هیدرولیکی-رسوبی، نوع رسوب غالب (معلق/بستر) و رفتار هیدرومورفولوژیک حوضه باشد (Tranmer et al., 2022).

از سوی دیگر، تغییر اقلیم با تغییر الگوی بارش، دما، شدت و تواتر رخدادهای حدی و هم‌چنین بازآرایی فصلی رواناب، فرض ایستایی در تحلیل‌های هیدرولوژیکی و رسوبی را تضعیف کرده و ضرورت بازنگری در مفاهیم کلاسیکی مانند جریان غالب و دبی طراحی را افزایش داده است (Pirani et al., 2024). در این چارچوب، تکامل سناریوهای اقلیمی از RCPها در گزارش پنجم (AR5/CMIP5) به SSP-RCPها در گزارش ششم (AR6/CMIP6) باعث شده علاوه بر واداشت تابشی، مسیرهای اجتماعی-اقتصادی نیز در تحلیل آینده اقلیم وارد شوند و ارزیابی‌ها واقع‌بینانه‌تر و چندبعدی‌تر شوند (Kikstra et al., 2022). سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 در CMIP5 و سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در CMIP6 اکنون مبنای اصلی بسیاری از تحلیل‌های اقلیمی-هیدرولوژیکی هستند و انتخاب سناریو و مدل اقلیمی می‌تواند نتایج دبی و رسوب را به‌طور معناداری تغییر دهد (Goodarzi et al., 2024). مدل‌های گردش عمومی جو^۱ (GCMs) نیز اگرچه معتبرترین ابزار تولید سناریوهای آینده‌اند، به‌دلیل تفکیک مکانی درشت و خطاهای سیستماتیک، برای کاربردهای حوضه‌ای نیازمند ارزیابی، انتخاب و ریزمقیاس‌نمایی هستند (Di Virgilio et al., 2022).

در این میان، ریزمقیاس‌نمایی آماری و به‌ویژه مدل‌های مولد آب‌وهوا مانند LARS-WG نقش مهمی در تبدیل خروجی‌های بزرگ‌مقیاس GCM به سری‌های زمانی روزانه قابل‌استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی و رسوبی دارند (Tabari et al., 2021). مدل LARS-WG با استفاده از ویژگی‌های آماری داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه و سیگنال تغییر اقلیم استخراج‌شده از GCM/RCM، امکان تولید سری‌های روزانه بارش، دمای کمینه و بیشینه و تابش را برای دوره‌های آینده فراهم می‌کند و به همین دلیل در مطالعات تغییر اقلیم-رواناب-رسوب در ایران و سایر کشورها به‌طور گسترده استفاده

شده است (Hariri et al., 2023). با این حال، انتخاب GCM مناسب، تصحیح اریبی، روش ریزمقیاس‌نمایی و گزارش شفاف عدم قطعیت بین‌مدلی از الزامات اصلی تحلیل معتبر اثر تغییر اقلیم بر دبی و رسوب است (Yousefi et al., 2024). هم‌زمان با گسترش تحلیل‌های اقلیمی، روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق نیز به دلیل توانایی در استخراج روابط غیرخطی و پیچیده میان متغیرهای هیدرولوژیکی و رسوبی، به ابزارهای کلیدی در پیش‌بینی دبی و رسوب تبدیل شده‌اند (Nda et al., 2023). در بین این روش‌ها، LSTM به دلیل ساختار بازگشتی و برخورداری از دروازه‌های ورودی، خروجی و فراموشی، توانایی مناسبی در یادگیری وابستگی‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت دارد و در بسیاری از مطالعات پیش‌بینی دبی روزانه/چندگام جلوتر، عملکرد قوی و پایداری نشان داده است (Heidary et al., 2020). در عین حال، مطالعات جدید نشان می‌دهند که برتری LSTM مطلق نیست و در برخی کاربردها یا افق‌های زمانی، مدل‌های دیگر مانند TDNN، GRU یا حتی جنگل تصادفی و مدل‌های تقویتی می‌توانند عملکرد بهتر یا پایدارتر ارائه دهند، بنابراین انتخاب مدل باید مسئله‌محور و مبتنی بر ارزیابی مقایسه‌ای باشد (Hameed et al., 2025). برای پیش‌بینی رسوب، به‌ویژه رسوب معلق، مدل‌های درخت‌پایه مانند XGBoost به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط غیرخطی، مدیریت اندرکنش متغیرها و کنترل بیش‌برازش، در سال‌های اخیر نتایج بسیار رقابتی و در مواردی برتر نسبت به منحنی سنجه کلاسیک و سایر مدل‌ها ارائه کرده‌اند (Bezak et al., 2025). همچنین SVM/SVR به‌ویژه با کرنل RBF در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی و رسوبی همچنان به‌عنوان یک گزینه قابل‌اعتماد برای داده‌های محدود یا روابط غیرخطی متوسط مطرح است، هرچند عملکرد آن وابسته به تنظیم پارامترها و انتخاب ورودی مناسب است (Hao & Bai, 2023).

بر این مبنا، در پژوهش حاضر از ظرفیت مکمل رویکردهای کلاسیک مهندسی رودخانه، سناریوهای تغییر اقلیم و مدل‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود تا رفتار آینده دبی و رسوب در چارچوبی یکپارچه تحلیل شود، به‌گونه‌ای که LSTM برای پیش‌بینی دبی (به‌علت ماهیت زمانی و وابستگی‌های حافظه‌دار جریان) و XGBoost-SVM برای پیش‌بینی رسوب (به‌علت قدرت مناسب در بازنمایی روابط غیرخطی دبی-رسوب و حساسیت به رخدادها) به کار گرفته شوند (Shakya et al., 2023). خلأ اصلی در بخش مهمی از مطالعات پیشین آن است که اثر تغییر اقلیم را غالباً در سطح تغییر میانگین دبی/رسوب یا تغییرات سناریومحور رواناب بررسی کرده‌اند، اما کمتر به پیوند کمی میان تغییرپذیری جریان و تغییر پارامترهای معادله سنجه رسوب در قالب یک چارچوب مقایسه‌ای قبل-بعد پرداخته‌اند (Bezak et al., 2025). بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر سیستم‌های رودخانه‌ای، غالباً به گزارش تغییرات میانگین رواناب یا حجم کل آورد رسوبی سناریومحور بسنده کرده‌اند و از تبیین مکانیسم‌های درونی این تغییرات غافل مانده‌اند. از این‌رو، نوآوری بنیادین پژوهش حاضر در توسعه یک چارچوب تحلیلی یکپارچه و مقایسه‌ای است که ابعاد ناشناخته اثرات اقلیمی را روشن می‌سازد. این پژوهش برای نخستین بار به‌صورت کمی اثبات می‌کند که چگونه فشردن توزیع فراوانی جریان تحت سناریوهای اقلیمی، به‌طور مستقیم به دگرگونی پارامترهای معادله سنجه رسوب منجر می‌شود، به‌طور مشخص، نشان داده شده است که افت محسوس توان b (به‌عنوان شاخص حساسیت نرخ انتقال رسوب) تحت اقلیم آینده، ساختار پاسخ رسوبی رودخانه را از حالت رخدادمحور و سیلابی به یک رژیم با حساسیت ملایم‌تر تغییر می‌دهد. در کنار این تحلیل فیزیکی، پژوهش حاضر با تلفیق هوشمندانه و مکمل الگوریتم‌های داده‌محور شامل شبکه عصبی بازگشتی حافظه‌دار (LSTM) برای درک وابستگی‌های زمانی جریان و مدل‌های رگرسیونی مقاوم (SVM و XGBoost) برای مدیریت عدم قطعیت‌های بار رسوبی، یک نوآوری متدولوژیک را در بستر جدیدترین سناریوهای گزارش ششم^۲ (CMIP6) ارائه می‌دهد. در نهایت، با پیوند دادن این ابزارهای نوین با هندسه هیدرولیکی واقع‌گرایانه مقطع عرضی و آستانه‌های احتمالاتی منحنی‌های رسوب تجمعی، پدیده هیدروژئومورفولوژیک «بازتوزیع بار رسوبی به سمت جریان‌های با دامنه کم‌تر» تبیین شده است. این رویکرد یکپارچه با شفافیت کامل نشان می‌دهد که چگونه مفهوم کلاسیک

«دبی مؤثر»، تحت تأثیر رژیم‌های کم‌آب آینده، دچار جابه‌جایی مقیاسی می‌شود و ضرورت بازنگری در طراحی سازه‌های هیدرولیکی و مدیریت آبراهه‌های شهری را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. محدوده مطالعاتی

حوضه آبریز رودخانه کن، واقع در شمال غربی استان و کلان‌شهر تهران، یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین حوضه‌های آبریز در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی به‌شمار می‌رود. رودخانه اصلی کن با طول تقریبی ۳۳ کیلومتر، از ارتفاعات رشته‌کوه توچال با ارتفاعی بیش از ۳۷۰۰ متر از سطح دریا سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه از به‌هم‌پیوستن سرشاخه‌های کوهستانی متعددی از جمله آبراهه‌های کشار، زندان، سنگان، تالون و امامزاده داوود تشکیل شده و با عبور از محدوده کوهپایه‌ای سولقان، در نهایت به سمت دشت‌های جنوبی و بافت متراکم شهری تهران امتداد می‌یابد (Gholami et al., 2020).

از منظر هیدروژئومورفولوژیک، بخش بالادست حوضه کن (محدوده کوهستانی پیش از ورود به شهر) به‌دلیل دارابودن شیب‌های تند توپوگرافی، ساختار زمین‌شناسی و نوسانات اقلیمی، پتانسیل بالایی در تولید رواناب‌های سریع و بار رسوبی معلق دارد. رودخانه کن در مقطع سولقان یک رودخانه دائمی محسوب می‌شود که تغییرات اقلیمی و ذوب برف‌های بالادست در فصول گرم تأثیر مستقیمی بر رژیم هیدرولوژیک آن می‌گذارد. به همین دلیل، این حوضه همواره مستعد وقوع سیلاب‌های حدی و انتقال حجم عظیمی از رسوبات به سمت مجاری پایین‌دست شهری است که مدیریت سیلاب را در پایتخت با چالش مواجه می‌سازد (Nasiri et al., 2025).

در این پژوهش، جهت مدل‌سازی جریان و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر معادله سنج رسوب، داده‌های ایستگاه هیدرومتری سولقان به‌عنوان نقطه خروجی بخش کوهستانی حوضه، مبنای کار قرار گرفت. این ایستگاه به‌دلیل موقعیت استراتژیک خود، دقیقاً پیش از ورود رودخانه به مناطق متراکم شهری قرار داشته و رژیم جریان و رسوب سرشاخه‌های اصلی را با دقت بالایی ثبت می‌کند. براساس مشخصات ثبت‌شده این ایستگاه، شیب فیزیکی حوضه در این مقطع معادل ۰/۰۲۵۴ برآورد شده است. هم‌چنین جهت درک صحیح از رفتار حافظه‌دار حوضه، پرهیز از خطاهای آماری کوتاه‌مدت و آموزش دقیق مدل‌های یادگیری ماشین، از یک دوره آماری بلندمدت ۵۱ ساله (از سال ۱۹۶۹ تا ۲۰۲۰ میلادی) استفاده شده است که جامعیت و اعتبار تحلیل‌های سناریومحور را در افق‌های آینده تضمین می‌نماید (شکل ۱).

۲.۲. شاخص‌های هیدروژئومورفیک هندسه رودخانه

دبی مؤثر به دبی اطلاق می‌شود که بیش‌ترین بار رسوبی را با خود حمل کند. برای محاسبه این دبی از روش تداوم جریان استفاده شده است. در ابتدا دبی‌های موجود از بزرگ به کوچک مرتب شد و سپس به هر یک از این دبی‌ها رتبه (رنک) مربوطه اختصاص داده شد. براساس روش مورداستفاده، محدوده‌های ثابت در ۳۰ کلاس برای دبی‌ها تعریف و تخصیص داده شد، به‌گونه‌ای که این مقادیر در بازه صفر تا ۱۰۰ درصد قرار گرفت. در مرحله بعد، با توجه به دبی‌های موجود، تعداد آن‌ها و رتبه هر دبی، احتمال وقوع هر دبی محاسبه شد، به این صورت که رتبه هر دبی بر (تعداد کل دبی‌ها + یک) تقسیم و سپس در ۱۰۰ ضرب شد.

$$\frac{Rank}{N+1} \times 100$$

رابطه ۱)

که در آن، Rank ردیف مختص هر دبی و N تعداد کل دبی‌ها می‌باشد.

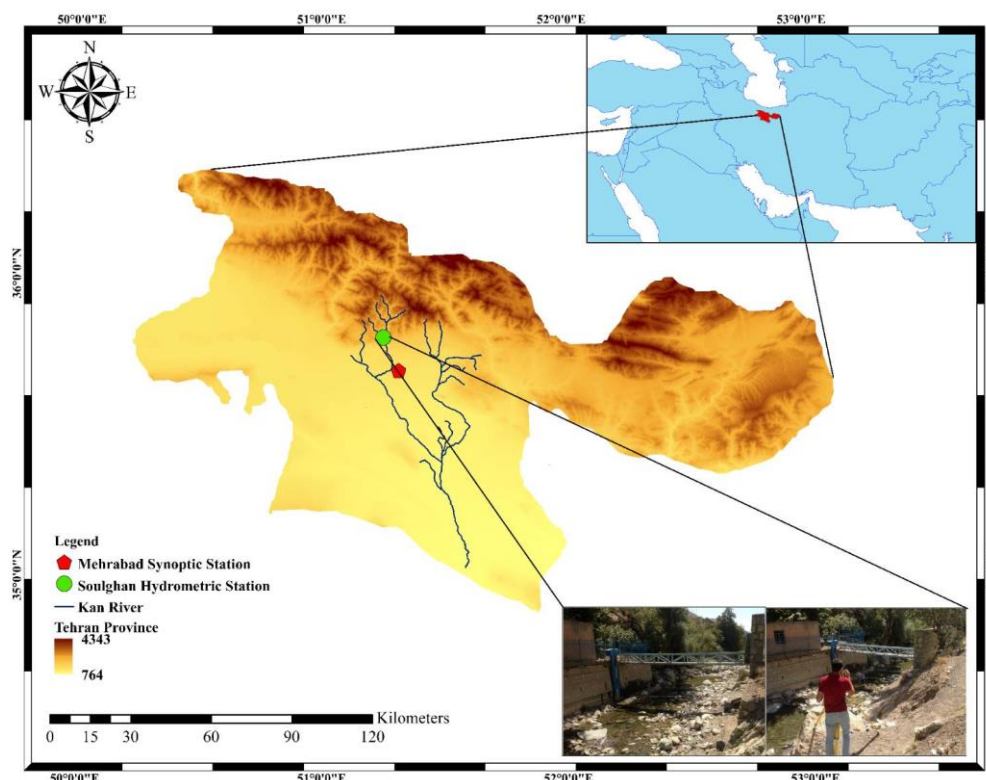


Figure 1. Schematic location of the Synoptic and hydrometric station in the study area

در گام بعدی به ترتیب اختلاف دو رنج متوالی و میانگین دو رنج متوالی را محاسبه شد. حال با توجه به معادله خط و قراردادن احتمال مربوط به هر دبی در کلاس‌ها میزان جریان استخراج شده است. در گام بعدی دبی‌های کلاسه‌بندی شده در فرمول سنج رسوب آن رودخانه قرار گرفت و میزان رسوب متناظر جابه‌جا شده محاسبه شد. در نهایت دبی که بیش‌ترین مقدار رسوب را جابه‌جا کند دبی مؤثر می‌باشد.

$$Q_s = aQ^b \quad \text{(رابطه ۲)}$$

هم‌چنین مقادیر دبی مؤثر برای سه حالت کلی، فصل خشک و فصل تر ترسیم شده است. در این پژوهش فصل خشک از فروردین‌ماه تا مردادماه می‌باشد و فصل تر نیز از مهرماه تا اسفندماه می‌باشد. منحنی‌های تداوم جریان به صورت فصل‌بندی شده برای شرایط موجود و به صورت کلی برای آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم ترسیم شد. در مرحله بعد منحنی سنج رسوب در دو حالت کلی و فصل‌بندی شده برای شرایط موجود و آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم، ترسیم شد. به علاوه با استفاده از منحنی سنج رسوب، میزان رسوب متناظر با هر دبی جریان محاسبه گردیده است که با جمع مقادیر رسوب، مقادیر تجمعی رسوب به دست آمده است. در گام بعدی برای هر کلاس دبی جریان، رسوب تجمعی متناظر با آن دبی بر میزان کل رسوب تجمعی تقسیم شده و در عدد ۱۰۰ ضرب می‌گردد تا درصد رسوب تجمعی منتقل شده به ازای هر کلاس دبی جریان به دست آید. در مرحله بعد، رسوب تجمعی ۵۰ درصد با استفاده از درون‌گرایی محاسبه شده و در گام بعد دبی متناظر با ۵۰ درصد رسوب تجمعی محاسبه گردیده است (با توجه به همین منطق دبی ۹۰ درصد تجمعی رسوب هم محاسبه شده است).

هم‌چنین برای محاسبه دبی با دوره بازگشت‌های ۱/۵۸ و ۲/۳۳ سال از توزیع گامبل استفاده شد. برای این کار در ابتدا، مقادیر دبی حداکثر روزانه برای هر سال تعیین گردیده است (به طور مثال ۲۰ سال). در نتیجه تعداد ۲۰ داده وجود

دارد. سپس با استفاده از روابط ریاضی زیر مقادیر میانگین، انحراف از معیار، تابع $F(x)$ و همچنین تابع y یا همان متغیر کوچک‌شده محاسبه گردیده است.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T} = \exp(-e^{-y}) \quad \text{رابطه ۵}$$

$$y = \frac{1}{0.7797\sigma} (x1 - X + 0.45\sigma) \quad \text{رابطه ۶}$$

لازم به ذکر است در معادلات فوق:

$\bar{X}$: میانگین داده‌ها، X_i هر یک از داده‌ها، n تعداد داده‌ها، σ انحراف از معیار، T دوره بازگشت و y متغیر کوچک شده است. لازم به ذکر است که پارامتر $x1$ که در بالا بدان اشاره شد، همان مقدار دبی با دوره بازگشت‌های مشخص است که در اینجا منظور دبی با دوره بازگشت $1/58$ سال است. برای محاسبه دبی با دوره بازگشت $1/58$ سال، کافیهست در رابطه (۵) به جای پارامتر T ، عدد $1/58$ قرار داده شود. در نتیجه مقدار متغیر کوچک‌شده محاسبه و با جایگذاری آن در رابطه (۶)، مقدار پارامتر $x1$ به دست می‌آید. در نهایت مقادیر دبی‌ها برای شرایط موجود و تحت تأثیر تغییر اقلیم محاسبه شد (Wolman & Miller, 1960).

دبی با دوره بازگشت $2/33$ سال، دبی میانگین سیل سالانه نیز نام دارد. برای توضیح دلیل این موضوع نیاز است تا مقدمه‌ای از علم آمار بیان گردد. معادله عمومی برای تحلیل فراوانی به شکل زیر می‌باشد:

$$x = \bar{X} + K * \sigma \quad \text{رابطه ۷}$$

که در معادله فوق همان‌طور که پیش‌تر در بالا گفته شد، پارامتر $\bar{X}$ میانگین داده‌ها و σ ، انحراف از معیار می‌باشد. اما ضریب K ، ضریب فراوانی می‌باشد که برابر است با:

$$K = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} \left[0.57 + \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right] \quad \text{رابطه ۸}$$

در معادله فوق، همان‌طور که گفته شد ضریب K ، ضریب فراوانی و پارامتر T ، همان دوره بازگشت می‌باشد. حال چنانچه در معادله، به جای x ، دبی میانگین برای هر تعداد سال یا همان $(\bar{X})$ قرار داده شود، در نتیجه عبارت $K * \sigma$ برابر صفر خواهد شد. از آنجایی که انحراف از معیار صفر نمی‌باشد در نتیجه ضریب فراوانی برابر صفر قرار داده خواهد شد. در نتیجه آن، مقدار دوره بازگشت برابر $2/33$ سال به دست خواهد آمد. محاسبه دبی با دوره بازگشت $2/33$ سال، مطابق بخش قبل یعنی با استفاده از توزیع گامبل انجام شده است. با این تفاوت که در رابطه (۵)، به جای پارامتر T ، عدد $2/33$ جایگزین شده و مقدار دبی با دوره بازگشت $2/33$ سال برای تمامی ایستگاه‌ها (شرایط موجود و تحت تأثیر تغییر اقلیم) محاسبه گردیده است (Wolman & Miller, 1960).

هم‌چنین در گام بعدی به منظور تبیین هندسه هیدرولیکی پایه در ایستگاه هیدرومتری سولقان، ویژگی‌های مورفولوژیک مجرا با اتکا به داده‌های نقشه‌برداری سازمان مدیریت منابع آب ایران استخراج گردید. در این پژوهش، تعیین آستانه مقطع پر براساس شاخص هندسی «اولین شکستگی ناگهانی در شیب دیواره مجرا» صورت گرفت که نماینده فیزیکی شروع سرریزی جریان به سمت سیلاب‌دشت است. براساس تحلیل چندشاخصه ارائه‌شده در جدول (۳)، هندسه هیدرولیکی مجرا در تراز مقطع پر متناظر با عمق تالوگ 0.75 متر و نسبت عرض به عمق $21/80$ تثبیت می‌گردد. با اعمال این ابعاد هندسی در معادله مقاومت جریان (مانینگ)، دبی مقطع پر محاسباتی حوضه برابر با $8/85$ مترمکعب بر

ثانیه برآورد شد. تمرکز این محاسبات در قالب یک ساختار هندسی منسجم (جدول ۳)، امکان تحلیل دینامیک انتقال رسوب و مقایسه آن با دوره‌های بازگشت هیدرولوژیک را بدون نیاز به توصیفات طولانی کارگاهی فراهم ساخته است. در نهایت، به صورت کلی برای تعیین دبی طراحی، مطالعه سه دبی اهمیت دارد:

۱- دبی مؤثر، ۲- دبی مقطع پر، ۳- دبی با دوره بازگشت‌های مشخص (۱/۵۸ و ۲/۳۳ سال)

لازم به ذکر است که تمامی این محاسبات در محیط زبان برنامه‌نویسی پایتون کدنویسی شده است.

۳.۲. مدل LARS-WG8.0 و تولید داده‌های هواشناسی

در این پژوهش عملکرد مدل‌های اقلیمی و هم‌چنین ریزمقیاس نمایی آن‌ها با استفاده از مدل LARS-WG8.0 در بازه سال‌های ۱۹۵۰-۲۰۱۰ موردبررسی قرار گرفته است. در این ایستگاه از داده‌های بارش ۲۴ ساعته و دمای حداقل و حداکثر استفاده شده است. شش مدل اقلیمی موجود در دیتابیس مدل LARS-WG وجود دارد که این مدل‌ها عبارتند از MRI-5، ACCESS-ESM1-5، CNRM-CM6-1، GFDL-ESM4، HadGEM3-GC31-LL، MPI-ESM1-2-LR و MPI-ESM2-0. در این پژوهش از مدل MPI-ESM1-2LR استفاده شد (Azad & Ahmadi, 2024). سه سناریو اقلیمی SSP126، SSP245 و SSP585 مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا چک شد که درصد داده‌هایی که برداشت نشده‌اند کمتر از ۱۰ الی ۱۵ درصد است. به این منظور داده‌های بارش ۲۴ ساعته و دمای حداقل و حداکثر موردبررسی قرار گرفت و نتیجه این شد که هر سه پارامتر از ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۰ به مقدار ۰/۹۹ درصد داده‌های برداشت نشده دارند که نشان‌دهنده این می‌باشد که می‌توان از این داده‌ها در مدل لارس استفاده کرد. با توجه به ملاحظات موجود در راهنمای مدل لارس برای بخش‌هایی که داده برداشت نشده است عدد ۹۹- قرار داده شد. در ابتدا در بخش Analysis مدل لارس فایل با پسوند st را بارگذاری شد. در مرحله بعد با توجه به ۶۰ سال داده هواشناسی موجود در ایستگاه مهرآباد برای سال‌های ۲۰۶۰-۲۰۲۱ با توجه مدل‌های اقلیمی موجود در مدل لارس و هم‌چنین سناریوهای SSP اقدام به تولید داده‌های مورد نیاز شده است. برای این مهم در بخش Generator مدل لارس، برای هر مدل اقلیمی تحت هر سه سناریو موجود و بازه زمانی ۲۰ سال شبیه‌سازی انجام شد و خروجی‌های ریزمقیاس نمایی‌شده مدل استخراج شد.

در ادامه با استفاده از داده‌های تولیدشده تحت سناریوهای مختلف می‌توان به مقایسه عملکرد مدل‌های GCM پرداخت. به این منظور برای مقادیر T-mean تولیدشده توسط مدل مقادیر متوسط ماهانه دما و برای بارش نیز بارش تجمعی ماهانه را با استفاده از نرم‌افزار اکسل محاسبه شد و نمودارهای لازم برای مشاهده عملکرد این مدل‌های بابت داده‌های تولیدشده و مشاهده‌شده در ایستگاه مهرآباد را ترسیم شد (جدول ۴).

۴.۲. پیش‌بینی آینده و یادگیری ماشین

در این پژوهش، جهت پیش‌بینی روزانه دبی رودخانه (Q) و بار رسوبی (S) در افق آینده تحت سناریوهای اقلیمی، یک چارچوب یادگیری ماشین چندمدلی توسعه داده شد. در ورودی مدل‌های دبی و رسوب، داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری اعم از دبی جریان و دبی رسوب به صورت روزانه و هم‌چنین داده‌های ایستگاه سینوپتیک مهرآباد (۱۹۵۰-۲۰۲۱) اعم از دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش روزانه فراخوانی شد (جدول‌های ۱ و ۲). داده‌های دبی رسوب از کیفیت لازم برخوردار نمی‌باشند، بنابراین با توجه به فرمول سنجه رسوب برای آن بخش از دبی‌های جریان که جمع‌آوری اطلاعات آن‌ها دقیق‌تر می‌باشد، رسوب روزانه متناظر تولید شد. هم‌چنین اطلاعات هیدرومتری و سینوپتیک از لحاظ زمانی یکسان‌سازی شدند. داده‌های تولیدشده توسط مدل MPI-ESM1-2-LR به عنوان ورودی آینده مدل استفاده شد. هم‌چنین تأخیرهای زمانی داده‌های سینوپتیک یا اقلیمی

(یک تا ۳۰ روزه) اختصاص داده شد. برای نمایش چرخه‌های فصلی، ویژگی‌های زمانی شامل سینوس یا کسینوس روز سال (DOY) و ماه (MON) به همراه لگ‌های چندمقیاسی اقلیم (یک، سه، هفت، ۱۴ و ۳۰ روز) تولید شد. تأخیر زمانی ۳۰ روزه در داده‌های اقلیمی می‌تواند ویژگی‌های مانند ذوب برف و رطوبت سطحی را نمایان و به مدل ارائه کند. علاوه بر این، برای مدل‌سازی هیدرولوژیک، لگ‌های دبی و رسوب (تا هفت روز) و نیز آمارهای دبی (میانگین یا انحراف معیار هفت و ۳۰ روزه) به عنوان ورودی به مدل‌های LSTM و XGBoost افزوده شد. داده‌ها به صورت زمانی و بدون درهم‌ریزی به سه بخش آموزش، اعتبارسنجی یا آزمون با نسبت‌های ۷۰، ۱۵ و ۱۵ تقسیم شدند. برای مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی بازگشتی، نرمال‌سازی Min-Max و برای مدل‌های رگرسیونی (XGBoost و SVM) نرمال‌سازی (Standard Scaler) اعمال شد. مدل LSTM برای Q با پنجره زمانی ۳۰ روزه (LOOKBACK=30) آموزش داده شد و به منظور جلوگیری از بیش‌برازش از توقف زودهنگام (Early Stopping) و ذخیره بهترین وزن‌ها استفاده گردید. هم‌زمان، مدل XGBoost برای رسوب با تنظیمات ضد بیش‌برازش و توقف زودهنگام روی مجموعه اعتبارسنجی آموزش داده شد و برای رسوب، علاوه بر XGBoost، مدل SVR نیز به عنوان رقیب توسعه یافت. عملکرد مدل‌ها با معیارهای NSE، ضریب همبستگی (r)، RMSE، KGE، MAE و PBIAS ارزیابی شد. همچنین به منظور کاهش خطای سیستماتیک، یک مرحله تصحیح اریبی ماهانه (Bias-Correction) با تکیه بر سری پایه جریان در دو قالب نسبت ماهانه و تفاضل ماهانه اعمال شد. خروجی‌ها شامل سری‌های زمانی تفکیک‌شده هر مدل، نمودارهای آینده می‌باشند.

Table 1. Inputs and outputs of LSTM model

Input	Output	Time Period
T-min (°C)	Discharge (m ³ /s)	1950-2010 To 2021-2060
T-max (°C)		
T-mean (°C)		
Precipitation (Daily)		

Table 2. Inputs and outputs of XGBoost-SVM model

Input	Output	Time Period
Discharge (m ³ /s)	Sediment (ton/day)	1950-2010 To 2021-2060
T-min (°C)		
T-max (°C)		
T-mean (°C)		
Precipitation (Daily)		

۵.۲. شاخص‌های عملکرد

برای ارزیابی مدل‌ها و مقایسه میزان اثربخشی آن‌ها و همچنین بخش‌های آماری مهندسی رودخانه و مدل LARS-WG8.0، از شاخص‌هایی مانند ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، شاخص کارایی کلینگ-گوپتا (KGE)، خطای میانگین مطلق (MAE) و درصد اریب (PBIAS) استفاده شد. در ادامه، فرمول‌های مربوط به این معیارها ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n O_i P_i - (\sum_{i=1}^n O_i) (\sum_{i=1}^n P_i)}{\sqrt{(n \sum_{i=1}^n O_i^2 - (\sum_{i=1}^n O_i)^2) (n \sum_{i=1}^n P_i^2 - (\sum_{i=1}^n P_i)^2)}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \times 100 \quad \text{رابطه ۱۴}$$

در این روابط، n نشان‌دهنده تعداد داده‌ها و i بیانگر شماره هر مشاهده است. همچنین O_i مقدار مشاهده‌شده، P_i مقدار پیش‌بینی‌شده و $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده‌شده می‌باشد. ضریب همبستگی (r) میزان نزدیکی و هم‌جهتی مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای را نشان داد؛ هرچه مقدار r به عدد یک نزدیک‌تر باشد، دقت برآورد و کیفیت برازش مدل بهتر است. همچنین α و β به ترتیب نسبت انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی‌شده به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و نسبت میانگین داده‌های شبیه‌سازی‌شده به میانگین داده‌های مشاهداتی می‌باشند. ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) در بازه‌ای از منفی بی‌نهایت تا یک تغییر می‌کند. نزدیک‌شدن این شاخص به یک، به معنی برازش قوی‌تر و عملکرد مطلوب‌تر مدل است و مقدار یک بیانگر برازش ایده‌آل محسوب می‌شود. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) میانگین بزرگی خطا بین داده‌های محاسباتی و مشاهده‌ای را به زبان عددی بیان می‌کند؛ بدیهی است هرچه مقدار RMSE کمتر باشد، عملکرد مدل در شبیه‌سازی و بازتولید داده‌ها دقیق‌تر خواهد بود. در سال‌های اخیر، برای شناسایی و ارزیابی تغییرات اقلیمی، تحلیل روند به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی و پرکاربرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. (Bigdeli et al., 2024).

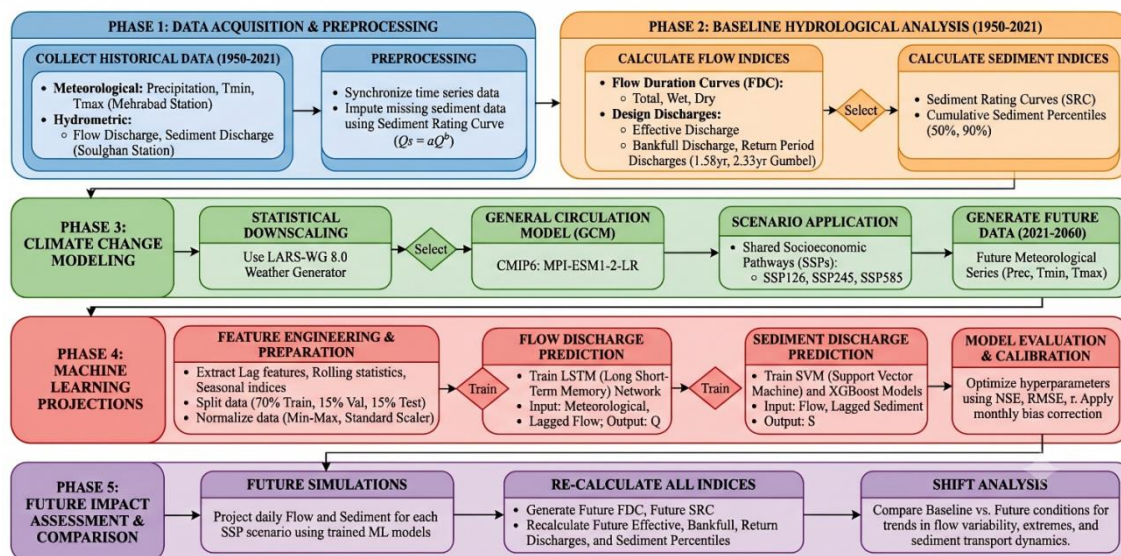


Figure 2. Methodological Schematic

۶.۲. تحلیل عدم قطعیت و توزیع احتمالاتی آورد رسوب

به منظور ارزیابی عدم قطعیت‌های ذاتی و واکاوی حساسیت خروجی‌های مدل در برآورد تقاضای رسوبی سیستم، از رویکرد تحلیل مبتنی بر بازه‌های احتمالاتی استفاده شد. با توجه به پراکندگی بالای داده‌های مشاهداتی و تأثیر متغیرهای پنهان در دینامیک انتقال رسوب، آورد رسوبی به صورت یک عدد قطعی یکپارچه گزارش نگردید، بلکه سری‌های زمانی جریان براساس مقادیر احتمال تجاوز در منحنی تداوم جریان، به بازه‌های ۱۰ درصدی (دهک‌های احتمالاتی) تفکیک شدند. در این چارچوب، آورد بار معلق در هر دهک برای دوره مشاهداتی و افق‌های آینده (تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585) محاسبه گردید تا سهم هر دامنه از جریان در تولید رسوب و توزیع عدم قطعیت پیش‌بینی مشخص شود. در این

تحلیل، تأکید ویژه‌ای بر مقایسه بازه ۱۰ درصد دبی‌های حداکثر (جریان‌های سیلابی با انرژی بالا) و ۱۰ درصد دبی‌های حداقل (جریان‌های پایه) صورت گرفت تا حساسیت ساختار پاسخ رسوبی حوضه به رخداد‌های حدی تحت شرایط تغییر اقلیم به‌طور دقیق‌تر واسنجی گردد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳.۱. شرایط موجود

تحلیل شرایط کنونی امری ضروری برای تعیین دبی طراحی در ایستگاه مورد مطالعه در این پژوهش می‌باشد. تحلیل رفتار حوضه کن در منطقه دامنه‌های جنوبی البرز تحت سناریوهای اقلیمی نشان داد که دگرگونی رژیم جریان و رسوب، بیش از آنکه متاثر از تغییرات حجم خالص بارش سالانه باشد، تابعی از «زنجیره اثرات افزایش دما و تغییر فصل‌مندی» است. در حوضه‌های برف‌گیر کوهستانی نظیر کن، افزایش سیستماتیک دما به‌عنوان محرک اصلی عمل می‌کند، بدین معنا که با تبدیل بارش‌های برفی به باران و تسریع فرایند ذوب زودهنگام برف‌گیرهای بالادست، ساختار فصل‌مندی جریان کاملاً دگرگون می‌شود. از بین رفتن پیک‌های طولانی‌مدت سیلاب‌های بهاره ناشی از ذوب برف، عامل اصلی فشرده‌شدن منحنی تداوم جریان و کاهش شدید دبی مؤثر در این پژوهش است. از سوی دیگر، در کنار تغییر فصل‌مندی، «تشدید فرکانس رخداد‌های حدی» به‌عنوان محرک اصلی مخاطرات فلوویال ظاهر می‌شود. کاهش توان b در معادله سنج رسوب حوضه اثبات کرد که سیستم از حالت پیوسته خارج شده است. در این شرایط، حتی با وجود کاهش دبی‌های پایه، وقوع رگبارهای فرساینده در فصول خشک بر روی خاک‌های بدون رطوبت پیشین، می‌تواند پالس‌های ناگهانی رسوب تولید کند. بنابراین، در مهندسی رودخانه‌های شهری تهران، تمرکز صرف بر تغییرات میانگین بارش گمراه‌کننده است و طراحی سازه‌های هیدرولیکی باید براساس بازتوزیع فصلی رواناب ناشی از افزایش دما و پیک‌های حدی کوتاه‌مدت استوار گردد.

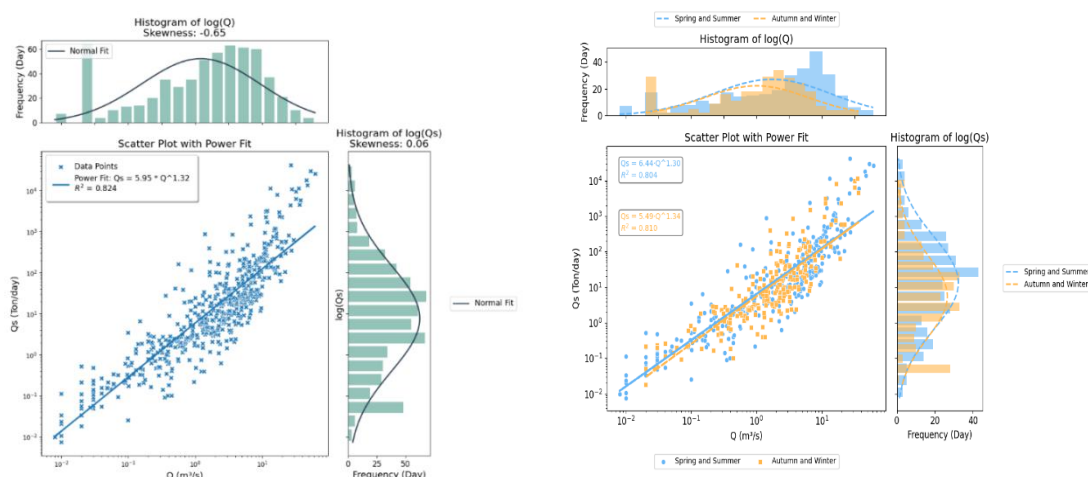


Figure 3. Hydrological curves of soulghan hydrometric station

در این ایستگاه رابطه دبی جریان و رسوب قوی دیده شد و همبستگی بالایی بین آن‌ها مشاهده شده است که نشان‌دهنده توضیح بخش قابل‌توجهی از تغییرات رسوب توسط دبی است. در هیستوگرام دبی، چولگی به چپ گزارش شده؛ یعنی مقادیر خیلی کوچک دبی کم رخ می‌دهند و دنباله توزیع به سمت مقادیر پایین کشیده شده است. در مقابل، هیستوگرام دبی رسوب نشان داد که توزیع رسوب تقریباً نزدیک به نرمال است و نامتقارنی آن زیاد

نیست. همچنین در بازه‌ی حدود $0/01$ تا $0/02$ مترمکعب بر ثانیه چند مقدار تکراری دیده شده و به همین دلیل یک ستون فراوانی بزرگ‌تر از بقیه ظاهر شده است. از طرف دیگر، مقادیر خیلی بالای رسوب فراوانی کمی دارند که به معنی وقوع کم‌تر این رخدادهای شدید است. از نظر فراوانی، بیش‌ترین تعداد داده‌های دبی در بازه یک تا 100 مترمکعب بر ثانیه قرار گرفت و برای رسوب نیز بیش‌ترین فراوانی در بازه حدود یک تا 300 تن در روز مشاهده شده است. همچنین منحنی سنج رسوب فصل‌بندی شده از سه جز اصلی تشکیل شده است که هرکدام یک لایه از رفتار رسوبی سامانه را آشکار کرد. در این ایستگاه، همبستگی بین دبی جریان و دبی رسوب در هر دو فصل تر و خشک بیش‌تر از $0/8$ مشاهده شد و نشان داد که رسوب تا حد زیادی توسط دبی توضیح داده شده است. همچنین در بخش فراوانی دبی، در فصل خشک چولگی به چپ مشاهده شده است؛ یعنی دبی‌های کوچک کم رخ می‌دهند اما در صورت وقوع، خیلی کوچک هستند. در مقابل، توزیع دبی‌ها در فصل تر نزدیک به نرمال دیده شد. همچنین در فصل خشک، مقادیر بالای دبی فراوانی قابل توجهی داشتند که این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده اثرگذاری ذوب برف بر دبی این رودخانه باشد. علاوه بر این، در مقادیر کم‌تر از یک مترمکعب بر ثانیه الگوی فصلی دبی تقریباً یکسان مشاهده شده است، اما در مقادیر بالاتر از این مقدار، الگوهای فصلی متفاوت دیده شد. در بخش رسوب نیز، مقادیر میانی رسوب در بازه‌ی حدود $0/01$ تا 300 تن در روز در فصل خشک فراوانی قابل توجهی داشته‌اند و در فصل تر نیز وضعیت مشابه در بازه‌ی حدود یک تا 200 تن در روز مشاهده شده است. در نهایت، مقادیر بالای رسوب در هر دو فصل فراوانی کم‌تری دارند و وقوع آن‌ها محدود گزارش شده است (شکل ۳).

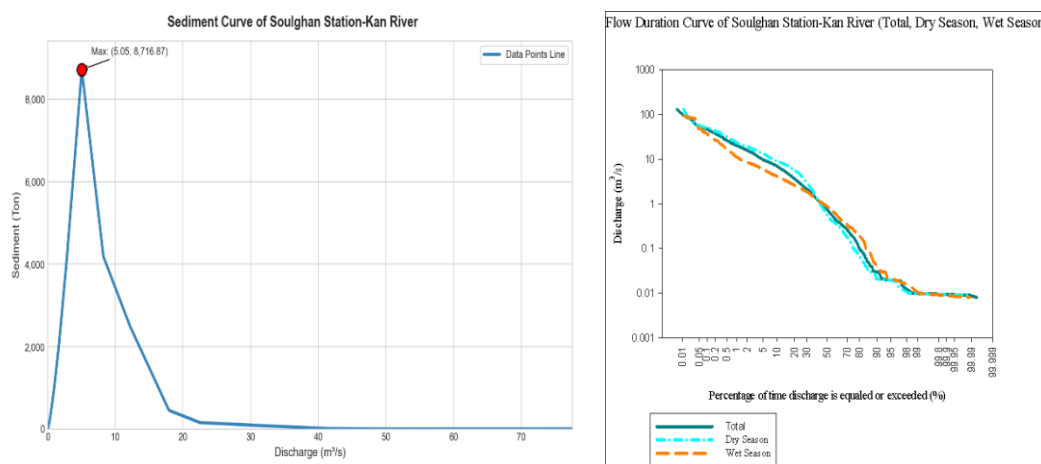


Figure 4. Hydrological curves of soulghan hydrometric station

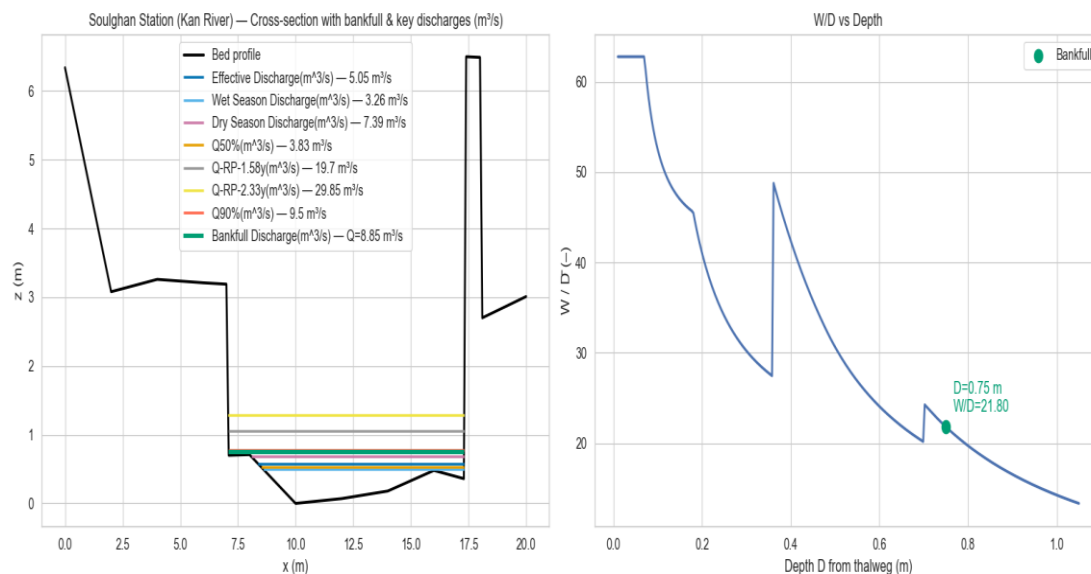
نمودار تداوم جریان نشان داد که رژیم جریان دارای سه ویژگی اصلی است. نخست، رخدادهای پرآب کم‌فراوانی بوده و اختلاف فصلی آن‌ها نسبتاً محدود است. دوم، آشکارترین تمایز فصلی در دبی‌های متوسط دیده شد که احتمالاً تحت تأثیر فرایندهای ذوب برف و پایداری جریان‌های میان‌دوره‌ای قرار دارد. سوم، در کمینه‌جریان‌ها و جریان پایه، همگرایی منحنی‌ها نشان داد که کنترل آبخوانی و ویژگی‌های ذخیره‌ای حوضه نقش غالب دارند و اختلاف خشک و تر در این بخش کاهش یافته است. این نتایج تأکید دارد که برای رودخانه ذوب‌برفی، تفسیر تفاوت‌های فصلی در نمودار تداوم جریان باید با توجه همزمان به بارش، دما و ذوب برف انجام شود و تحلیل صرفاً بارش‌محور ممکن است شدت و زمان‌بندی واقعی جریان‌های شاخص را به‌طور کامل بازنمایی نکند. همچنین با ضرب منحنی سنج رسوب در فراوانی

منحنی‌های زیر که نشان‌دهنده دبی مؤثر و مقدار رسوب جابه‌جا شده هستند، تولید شد (شکل ۴). در این منحنی واحد رسوبات تن می‌باشد، زیرا مقادیر رسوب در فراوانی دبی‌ها جریان ضرب شده است. همچنین مقادیر دبی‌های جابه‌جا کننده رسوبات از اعداد نزدیک به صفر شروع و به دبی‌ها با مقادیر بالا و همچنین فراوانی کمتر ختم شده است.

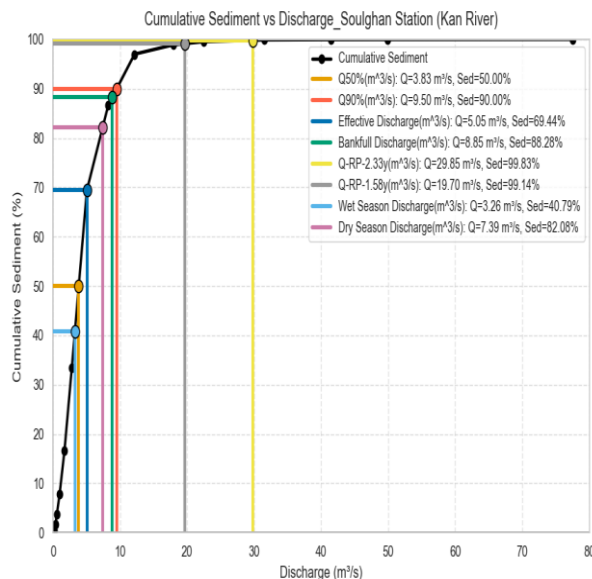
Table 3. Hydrological curves

Cross Section

Soulghan Station (Kan River) — Bankfull selection (visual) & W/D summary



Cumulative Sediment



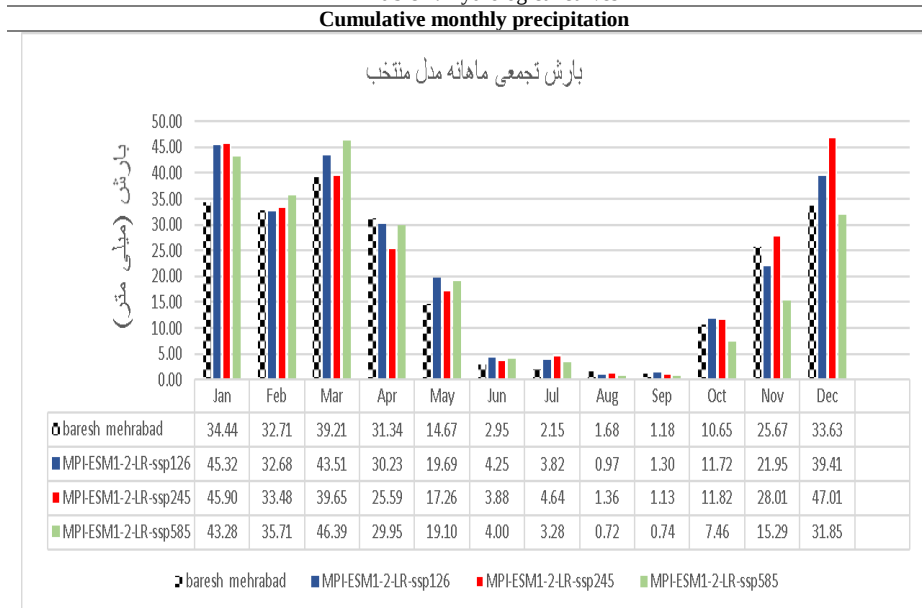
منحنی رسوب تجمعی نشان داد که انتقال رسوب به‌طور عمده در دبی‌های نسبتاً پرتکرار و در بازه‌ای محدود از مقادیر دبی رخ داده است و سهم رخ داده‌های بسیار بزرگ در افزایش درصد نهایی رسوب، پس از عبور از یک آستانه

مشخص، کاهش یافته است. شکل منحنی دارای سه بخش رفتاری است؛ بخش ابتدایی با شیب بسیار تند، بخش میانی با شیب ملایم تر و بخش انتهایی تقریباً تخت. شیب تند در بخش ابتدایی بیانگر آن است که با افزایش دبی از مقادیر پایین، درصد رسوب تجمعی با سرعت زیاد افزایش یافته و بنابراین بخش قابل توجهی از رسوب کل در رخدادهای با دبی پایین تا متوسط جابه‌جا شده است. در ادامه، با ورود به بخش میانی، نرخ افزایش رسوب تجمعی کاهش یافته و منحنی به سمت همگرایی با مقدار نهایی حرکت کرده است. در نهایت، در بخش انتهایی، منحنی تقریباً تخت شده است که نشان‌دهنده محدود شدن سهم افزوده رخدادهای بزرگ‌تر در تکمیل بار رسوبی است. براساس شاخص‌های مشخص شده روی نمودار، در دبی حدود $3/83$ مترمکعب بر ثانیه حدود ۵۰ درصد از رسوب کل منتقل شده است و در دبی حدود $9/50$ مترمکعب بر ثانیه سهم رسوب تجمعی به حدود ۹۰ درصد می‌رسد. دبی مؤثر نیز در حدود $5/05$ مترمکعب بر ثانیه با سهم رسوب تجمعی نزدیک به $69/44$ درصد مشاهده شد که بیانگر آن است که دبی‌های نزدیک به این مقدار بالاترین کارایی را در انتقال رسوب دارند و بخش عمده بار رسوبی در همین بازه کنترل شده است. همچنین دبی متناظر با مقطع پر در حدود $8/85$ مترمکعب بر ثانیه با سهم رسوب تجمعی نزدیک به $88/28$ درصد نشان داد که بخش چشم‌گیری از انتقال رسوب پیش از دستیابی به جریان‌های بزرگ‌تر و نزدیک به آستانه‌های هیدرولیکی بالاتر انجام شده است. در دبی‌های متناظر با دوره‌های بازگشت بالاتر، منحنی عملاً به سقف خود نزدیک است و سهم رسوب تجمعی بیش از ۹۹ درصد گزارش شده است. بنابراین رخدادهای حدی به‌طور عمده نقش تکمیلی در نزدیک کردن منحنی به مقدار نهایی دارند. همچنین آستانه گذار به بخش میانی در دبی $5/05$ مترمکعب بر ثانیه رخ داد که متناظر با دوره بازگشت $1/1$ ساله است و در این نقطه حدود ۷۰ درصد از رسوب کل منتقل شده است. بخش میانی تا دبی $12/16$ مترمکعب بر ثانیه امتداد یافته است که متناظر با دوره بازگشت $1/27$ ساله است و در انتهای این بازه حدود ۹۷ درصد از انتقال رسوب تکمیل شده است. پس از این مقدار، منحنی تقریباً تخت می‌شود و افزایش بیش‌تر دبی سهم افزوده اندکی در رسوب تجمعی ایجاد کرده است. این نتایج نشان داد که در ایستگاه سولقان سهم غالب انتقال رسوب توسط رخدادهای نسبتاً پرتکرار و میان‌مقیاس تعیین شده است و تمرکز تحلیلی و مدیریتی برای برآورد دقیق بار رسوبی باید بر همین بازه دبی و رخدادهای متناظر با آن قرار گیرد، زیرا بخش عمده رسوب پیش از رخدادهای بزرگ و کم‌فراوانی انتقال یافته است (جدول ۳).

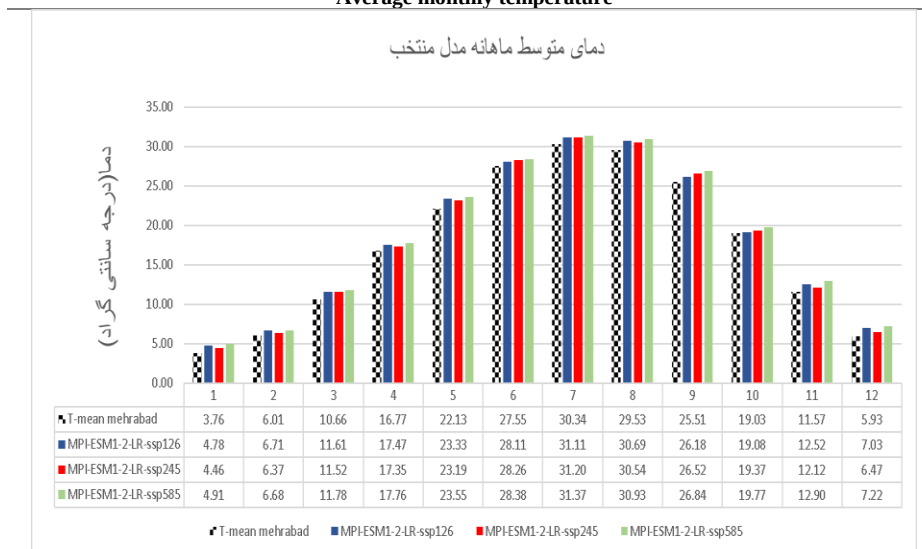
۳.۲. شرایط تحت تأثیر تغییر اقلیم

با توجه به اینکه بارش در آینده با مدل LARS-WG8.0 برای بازه ۲۰۲۱-۲۰۶۰ تولید شده است، در ابتدا عملکرد این مدل سنجیده شد. شاخص‌های عملکرد r و RMSE به‌ترتیب برابر با $0/97$ و $2/57$ که نشان از عملکرد مناسب مدل لارس دارند. می‌توان گفت که مدل لارس با مقادیر متوسط نسبت به مقادیر انحراف معیار بهتر شبیه‌سازی می‌کند. در تمامی سناریوهای آینده، یک روند افزایش دمای یک‌دست و هماهنگ در تمامی ماه‌های سال نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود. این رفتار فیزیکی به‌طور مستقیم پدیده ذوب زود هنگام پوشش برف‌گیر بالادست ایستگاه سولقان را تشدید کرده و به بازآرایی فصلی رواناب منجر می‌گردد. در خصوص پارامتر بارش روزانه و تجمعی، یک روند یک‌دست یا خطی مشخص گزارش نشده است، بلکه نوسانات فصلی، بازتوزیع زمانی رخدادهای بارندگی و افزایش فرکانس فرایندهای حدی اقلیمی (بخش‌های تر و خشک سال) رفتار غالب حوضه در آینده خواهد بود. این تغییر الگو در داده‌های تولیدشده اقلیمی، به‌عنوان محرک فیزیکی اصلی در دگرگونی رژیم جریان‌های سیلابی و ساختار پاسخ رسوبی رودخانه کن عمل می‌کند (جدول ۴).

Table 4. Hydrological curves
Cumulative monthly precipitation



Average monthly temperature

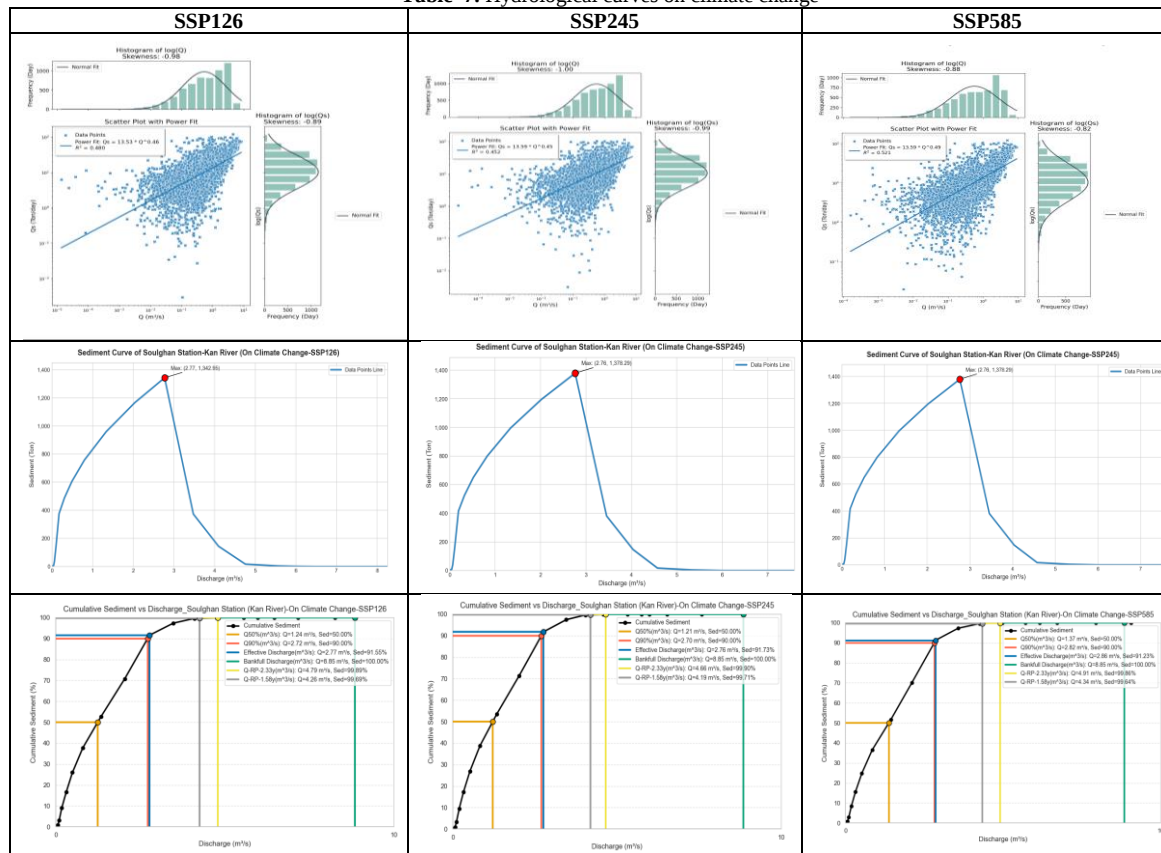


به‌علاوه در یک تحقیق که در سال ۲۰۲۴ توسط آزاد و احمدی صورت گرفت نشان داده شد که از بین ۴۰ مدل GCM، مدل‌های برتر برای بارش عبارتند از NorESM2-MM، MPI-ESM1-2-LR و AWI-ESM-1-1-LR (Azad & Ahmadi, 2024). همچنین در پژوهشی دیگر که توسط حسینی و همکاران (۱۴۰۱) صورت گرفت نشان داده‌شد که مدل‌های KACE-1-0-G، MPI-ESM1-2-LR، MPI-ESM1-2-HR، HADGEM3-GC31-LL و GMCC-ESM عملکرد بهتری در برآورد بارش دوره پایه ایستگاه مهرآباد داشته‌اند. بر این اساس مدل منتخب برای این پژوهش، MPI-ESM1-2-LR می‌باشد (Hassani *et al.*, 2023). همچنین عملکرد مدل LSTM و SVM به‌ترتیب برای دبی جریان و دبی رسوب مناسب ارزیابی شد (جدول‌های ۵ و ۶ و شکل‌های ۵ و ۶).

ارزیابی عملکرد مدل‌ها در حوضه آبریز نشان داد که شبکه عصبی LSTM در شبیه‌سازی دبی جریان، درک مطلوبی از دینامیک هیدروگراف و زمان‌بندی پیک‌ها دارد ($NSE=0.83$ و $r=0.9$). با این وجود، مقادیر منفی شاخص PBIAS (حدود ۱۹- تا ۲۱- درصد) حاکی از یک کم‌برآوردی سیستماتیک در برآورد حجم رواناب است. این رفتار ناشی از تمایل ذاتی توابع هزینه در مدل‌های یادگیری عمیق برای همگرایی به سمت مقادیر میانگین در رخدادهای فرین (سیلاب‌ها) است، هرچند این میزان از سوگیری براساس معیارهای استاندارد هیدرولوژیکی همچنان در بازه «قابل قبول» ارزیابی می‌شود (Moriassi et al., 2015). از سوی دیگر، نتایج شبیه‌سازی رسوب معلق توسط الگوریتم SVM دقت بسیار بالایی (NSE و $KGE>0.82$) را به ثبت رساند. مهم‌ترین نقطه قوت SVM در این پژوهش، ثبت مقادیر ناچیز PBIAS (بین ۱/۹- تا ۲/۳ درصد) بود که نشان‌دهنده توانمندی چشم‌گیر این مدل در حفظ توازن جرم و شبیه‌سازی بدون سوگیری الگوهای به شدت غیرخطی تولید و انتقال رسوب است (Yaseen et al., 2015). بررسی نتایج حاکی از وجود یک اختلاف و افت عملکرد نسبی میان فاز آموزش و آزمون، به‌ویژه در خروجی‌های مدل SVM برای پیش‌بینی بار رسوبی است. این افت عملکرد لزوماً به معنای وقوع پدیده بیش‌برازش الگوریتمی و حفظ کورکورانه نوبزهای سیستم نیست، بلکه ریشه در توزیع آماری به‌شدت چوله و ماهیت رخدادمحور پالس‌های رسوبی در حوضه کوهستانی کن دارد. در مدل‌سازی رسوب، مقادیر حدی و سیلاب‌های فرساینده که حامل بخش عمده‌ای از بار معلق هستند، دارای فراوانی وقوع بسیار پایینی می‌باشند. حضور نامتوازن این رخدادهای نادر در مجموعه داده‌های آموزش و آزمون، منجر به بروز عدم قطعیت ذاتی می‌گردد که خود را به شکل افت شاخص‌های عملکردی در فاز تعمیم نشان می‌دهد. با این وجود، به‌کارگیری تکنیک اعتبارسنجی متقاطع و تنظیم بهینه فرآیندهای جریمه در الگوریتم SVM، پایداری ساختار ریاضی مدل را در برابر این نوسانات تضمین کرده است. از سوی دیگر، تحلیل گرافیکی باقیمانده‌های پیش‌بینی^۳ اثبات می‌کند که خطای شبیه‌سازی دارای یک ساختار همگن نیست، در دبی‌های پایه و متوسط، توزیع باقیمانده‌ها به‌صورت تصادفی و حول میانگین صفر قرار دارد، اما با عبور جریان از آستانه سیلابی، پدیده ناهمگنی واریانس^۴ به‌وضوح رخ می‌دهد. رشد دامنه خطا در جریان‌های پرنرژی، نشان‌دهنده غلبه تدریجی عدم قطعیت ساختاری یا شناختی است، چراکه در دبی‌های بالا، مکانیزم حمل رسوب از حالت انتقال پیوسته خارج شده و فرایندهای پیچیده‌ای نظیر فرسایش کناره‌ای، زمین‌لغزش‌های محلی و تخریب دیواره‌های مجرا فعال می‌شوند که شبیه‌سازی آن‌ها صرفاً با اتکا به متغیرهای هیدرواکولوژیک و اقلیمی در مدل‌های یادگیری ماشین، با محدودیت‌های ذاتی همراه است (جدول‌های ۵ و ۶).

در ایستگاه سولقان (جدول ۷)، منحنی تداوم جریان دوره مشاهده‌ای تصویری از یک رژیم بسیار متغیر و رخدادمحور ارائه داده است؛ در سمت چپ منحنی مقادیر دبی تا مرتبه‌های بزرگی بالاتر رفته و سپس با افزایش درصد تداوم، منحنی به‌صورت پیوسته افت کرده است و در انتهای راست به یک کف نسبتاً مشخص رسیده است. این شکل یعنی بخش مهمی از حجم جریان و دینامیک هیدرولوژیک ایستگاه توسط رخدادهای پرآب کنترل شده است، اما در عین حال، یک جریان پایه هرچند کوچک وجود دارد که مانع از افت به مقادیر بسیار نزدیک صفر در بخش عمده زمان شده است. زمانی که همین منحنی‌ها با سناریوهای آینده مقایسه شد، جابه‌جایی کلی منحنی‌ها به سمت پایین کاملاً آشکار است. تفاوت میان SSPها در مقیاس کلی خیلی بزرگ نیست، اما در انتهای منحنی‌ها دیده شد که برخی سناریوها افت تندرتری به سمت مقادیر بسیار کوچک نشان داده‌اند. این همان جایی است که اثر تغییرات کم‌آبی و روزهای با جریان بسیار ناچیز خودش را پررنگ‌تر نشان داده است و پیام مدیریتی آن افزایش حساسیت سامانه به خشک‌سالی است. همین تغییر رژیم جریان، منطق تغییرات سنج رسوب را توضیح داده است. در سنج رسوب، توان b در عمل نشان‌دهنده میزان حساسیت رسوب به تغییرات دبی است؛ بزرگ‌تر بودن b به این معناست که با افزایش دبی، رسوب با شتاب بیش‌تری رشد کرده است و نقش رخدادهای پرآب در حمل رسوب بسیار پررنگ شده است.

Table 7. Hydrological curves on climate change



توان b در دوره گذشته بزرگتر است (حدود ۱/۳۲) اما در هر سه سناریوی آینده به مقدار بسیار کوچکتری رسیده است (حدود ۰/۴۵ تا ۰/۴۹). این افت محسوس، با منحنی تداوم جریان آینده کاملاً سازگار است: وقتی دامنه دبی‌های بزرگ محدودتر است و بخش قابل‌توجهی از زمان در مقادیر خیلی کوچک سپری شده است، سیستم حمل رسوب کم‌تر وارد فاز جهش رسوب با افزایش دبی می‌شود و رابطه دبی-رسوب از حالت به‌شدت رخدادمحور به سمت رفتاری ملایم‌تر (از نظر حساسیت) حرکت کرده است. به بیان دیگر، در آینده برآورده‌شده، افزایش دبی همچنان رسوب را بالا برده است، اما شدت پاسخ رسوب به افزایش دبی نسبت به گذشته کاهش یافته است. ضریب a بیش‌تر سطح کلی رسوب‌دهی را در یک دبی معین بازتاب داده است؛ افزایش a معمولاً یعنی برای دبی‌های هم‌مرتبه، مقدار رسوب برآوردی روی تراز بالاتری قرار گرفته است. ضریب a از حدود ۵/۹۵ در گذشته به حدود ۱۳/۵۹ در آینده افزایش یافته است. با این حال، یک نکته مهم این است که کیفیت برازش سنجه در آینده نسبت به گذشته کاهش یافته است (مقدار توضیح‌دهندگی رابطه در گذشته حدود ۰/۶۵ و در آینده حدود ۰/۳۲ تا ۰/۳۸ است) و پراکندگی نقاط در نمودارهای آینده بیش‌تر دیده شده است. این کاهش انسجام، به این معناست که در داده‌های آینده تولیدشده، تنها با اتکا به دبی نمی‌توان رسوب را به اندازه گذشته خوب توضیح داد و سهم عوامل دیگر یا عدم قطعیت‌ها (از جمله خطای انتقال یافته از شبیه‌سازی دبی، بارزتر شدن نویز در جریان‌های خیلی کوچک و حساسیت مدل رسوب در دامنه کم‌دبی‌ها) پررنگ‌تر شده است. بنابراین، جمع‌بندی نهایی برای سولقان این است که منحنی تداوم جریان آینده به سمت رژیم کم‌آب‌تر شدن حرکت کرده است و همین موضوع در سنجه رسوب به‌صورت کاهش محسوس حساسیت رسوب به دبی (کاهش b) و هم‌زمان افزایش سطح مقیاس

رسوب‌دهی (افزایش a) ظاهر شده است، اما به دلیل افت انسجام رابطه در آینده، تفسیر تغییرات رسوب باید با تأکید بر عدم قطعیت زنجیره مدل‌سازی و نقش تقویت‌شده جریان‌های بسیار کم در پراکندگی داده‌ها انجام شود. زمانی که سنج رسوب در کنار منحنی‌های تجمعی رسوب و همچنین مقطع عرضی قرار گرفت، یک تصویر منسجم از تغییر منطق حمل رسوب بین گذشته و آینده به‌دست آمد (جدول ۷). در سنج رسوب دوره گذشته، مقدار توان b در حد نسبتاً بالا قرار گرفت (حدود ۱/۳۱) و این یعنی با افزایش دبی، رسوب با شتاب قابل‌توجهی رشد کرده است و بخش مهمی از تغییرپذیری رسوب توسط رخدادهای پرآب کنترل شده است. همین موضوع با پراکندگی نسبتاً قابل‌توجه نقاط هم‌خوان است، چون در شرایط واقعی حوضه، برای یک دبی مشابه، رسوب می‌تواند بسته به وضعیت پیشین حوضه، شدت بارش، دسترسی منبع رسوب و ... بسیار متفاوت باشد. در آینده اما b به‌طور معنی‌دار کوچک‌تر شد و این کاهش واضح از نظر فیزیکی به این معناست که حساسیت رسوب نسبت به افزایش دبی ملایم‌تر شده و رسوب دیگر مانند گذشته با افزایش دبی جهش تند ندارد، بنابراین سیستم کم‌تر وارد فازهای بسیار پرانرژی حمل رسوب شده است. هم‌زمان، ضریب a در آینده بزرگ‌تر گزارش شده که اگر بدون زمینه تفسیر شود ممکن است این سوء برداشت را ایجاد کند که رسوب‌زایی پایه زیاد شده، اما در اینجا باید آن را در کنار افت b و تغییر دامنه دبی‌ها خواند، وقتی دامنه دبی در آینده کوچک‌تر و متمرکزتر شود و شیب هم کاهش یابد، برازش آماری معمولاً برای اینکه بتواند سطح کلی داده‌ها را در همان بازه‌های رایج دبی توضیح دهد، به سمت بزرگ‌تر شدن ضریب مقیاس (a) متمایل شده است. بنابراین پیام مفهوم در سولقان بیش‌تر این است که بار رسوبی در آینده در دبی‌های پایین‌تر و در یک دامنه محدودتر بازتوزیع شده است، نه اینکه الزاماً ظرفیت واقعی تولید رسوب در همه شرایط افزایش یافته باشد. این برداشت با این واقعیت هم تقویت شد که کیفیت توضیح‌دهندگی سنج در آینده نسبت به گذشته افت کرده است؛ یعنی در داده‌های آینده تولیدشده، رسوب با اتکا به دبی به‌تنهایی کم‌تر قابل توضیح است. از طرف دیگر، منحنی رسوب نیز همین تغییر را به زبان دیگری نشان می‌دهد؛ در گذشته بیشینه رسوب در حوالی یک دبی میانی رخ داده است و مقدار بیشینه هم بزرگ است (حدود دبی نزدیک ۶ و رسوب در حد چند هزار)، اما در آینده پیک رسوب به دبی‌های کوچک‌تر (حدود ۲ تا ۳) منتقل شده است و اندازه پیک هم بسیار کم‌تر گردیده است (حدود نزدیک ۱۳۰۰-۱۴۰۰). این یعنی رخدادهای کنترل‌کننده رسوب در آینده کم‌دبی‌تر شده‌اند. نمودارهای تجمعی رسوب دقیقاً همین منطق را به‌صورت کمی و بسیار قانع‌کننده تأیید کرده‌اند. در دوره گذشته، برای رسیدن به ۵۰ درصد رسوب تجمعی به دبی حدود ۳/۸۳ نیاز بود و برای رسیدن به ۹۰ درصد رسوب تجمعی دبی حدود ۹/۵۰ لازم بوده است؛ دبی مؤثر هم حدود ۵/۰۵ است و در این نقطه تنها حدود ۶۹/۴۴ درصد رسوب تجمعی پوشش داده شده است، یعنی در گذشته سهم رسوب روی یک دامنه نسبتاً پهن از دبی‌ها توزیع شده و دبی مؤثر همه بار رسوبی را در یک پنجره باریک جمع نکرده است. همچنین دبی مقطع‌پر حدود ۸/۸۵ است و تا این سطح حدود ۸۸/۲۸ درصد رسوب تجمعی جابه‌جا شده است. پس در گذشته، رخدادهای نزدیک به مقطع‌پر و کمی پایین‌تر از آن، سهم عمده‌ای در حمل رسوب داشته و رسیدن به تقریباً کل رسوب تجمعی با دبی‌های خیلی بزرگ‌تر (دوره بازگشت‌های بالاتر مثل حدود ۱۹/۷۰ و ۲۹/۸۵) تکمیل شده است. در آینده اما شکل منحنی تجمعی فشرده شد: دبی متناظر با ۵۰ درصد رسوب به حدود ۱/۲۱ تا ۱/۳۷ کاهش سافته است و دبی متناظر با ۹۰ درصد رسوب نیز به حدود ۲/۷۰ تا ۲/۸۲ رسیده است؛ مهم‌تر از همه این‌که دبی مؤثر در آینده حدود ۲/۷۶ تا ۲/۸۶ است، اما در همین نقطه بیش از ۹۱ درصد رسوب تجمعی پوشش داده شد. این یک پیام بسیار روشن دارد. در آینده برآوردشده، بخش اعظم بار رسوبی در یک بازه کوچک و مشخص از دبی‌های پایین تا میانی اتفاق افتاد. حتی دبی‌های متناظر با دوره بازگشت‌ها نیز در آینده به حدود ۴/۱۹ تا ۴/۹۱ سقوط کرده‌اند و تقریباً کل رسوب تجمعی را پوشش داده‌اند، که نشان‌دهنده کوچک‌شدن چشم‌گیر دامنه

جریان‌های حدی در خروجی سناریوهاست. نکته کلیدی دیگر این است که در آینده، مقطع‌پر همان ۸/۸۵ باقی مانده اما به‌عنوان یک آستانه تقریباً دست‌نیافتنی عمل کرده است و در نمودار تجمعی عملاً با ۱۰۰ درصد رسوب همراه شده است؛ این یعنی طبق داده‌های آینده، تقریباً تمام حمل رسوب قبل از رسیدن به مقطع پر رخ داده است و رخدادهای نزدیک به مقطع پر یا فراتر از آن بسیار نادر (یا در سری آینده کم‌حضور) می‌باشد. تبیین مکانیسمی پیوند تغییرپذیری رژیم جریان و دگرگونی فیزیکی پارامترهای سنج رسوب همان‌طور که در مقدمه این پژوهش به‌عنوان خلأ مطالعات پیشین مطرح گردید، ارزیابی صرف تغییرات میانگین آورد رسوب سالانه بدون درنظرگرفتن پیوند متقابل تغییرپذیری هیدرولوژیک و پارامترهای معادله سنج رسوب، ارزیابی ناقصی از رفتار سیلابی حوضه تحت تغییر اقلیم ارائه داده است. تحلیل مقایسه‌ای شرایط قبل و بعد در ایستگاه سولقان، وجود این پیوند کمی فیزیکی و آماری را به‌وضوح اثبات کرده است. در شرایط مبنا، رودخانه کن در این ایستگاه رفتاری به‌شدت متغیر و رخدادمحور نشان داد که نمود کلی آن در توان حساسیت رسوبی بالایی ($b=1/32$) پدیدار شده است. در این حالت، به‌دلیل وجود جریان‌های پرانرژی سیلابی، پاسخ سیستم حمل رسوب به افزایش دبی شتابان است و بار رسوبی روی پنجره پهنی از توزیع فرکانسی جریان توزیع شده است، به‌طوری‌که دبی مؤثر ۵/۰۵ تنها وظیفه حمل ۶۹/۴۴ رسوب تجمعی را بر عهده دارد و مابقی بار رسوبی توسط دبی‌های بزرگ‌تر نهایی جابه‌جا شده است. در افق آینده، تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی، دامنه جریان‌های پر آب محدود شده و منحنی تداوم جریان دچار فشردگی به سمت جریان‌های کم‌دامنه شده است. این افت نوسانات و پیک‌های هیدرولوژیک، به‌طور مستقیم بر ساختار معادله سنج رسوب اثرگذار بوده و منجر به سقوط محسوس توان b به محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۴۹ در تمامی سناریوها شده است. کاهش توان b از نظر فیزیکی بدین معناست که سیستم حمل رسوب مجرا تعدیل شده و دیگر مانند گذشته با افزایش دبی، جهش‌های تند بار رسوبی رخ نداده است. تحت این رژیم جدید کم‌آب، منحنی رسوب تجمعی دچار فشردگی شدید آماری شده است، به‌گونه‌ای که دبی مؤثر آینده با وجود افت عددی به محدوده ۲/۷۶ تا ۲/۸۶ مترمکعب بر ثانیه، به‌دلیل تمرکز فیزیکی جریان، بیش از ۹۱ درصد بار رسوبی تجمعی را در یک پنجره بسیار باریک جابه‌جا کرده است. از سوی دیگر، افزایش ضریب مقیاس a از ۵/۹۵ به ۱۳/۵۹ در سناریوهای آتی، در صورت عدم تحلیل این پیوند متقابل، می‌توانست به‌عنوان افزایش ظرفیت رسوب‌زایی پایه حوضه تفسیر شود، اما تحلیل مکانیسمی فوق اثبات ساخت که این تغییر صرفاً یک آرتیفکت آماری حاصل از کاهش توان b و فشردشدن دبی‌ها در دامنه‌های پایین است تا خط برازش ریاضی بتواند تراز داده‌ها را حفظ کند. این دستاورد کمی، صحت ادعای اولیه پژوهش مبنی بر ضرورت اتکا به چارچوب مقایسه‌ای ساختار قبل-بعد پارامترهای هیدروژئومورفیک در مطالعات تغییر اقلیم را کاملاً اثبات کرده است.

هم‌چنین واکاوی آورد رسوبات در قالب بازه‌های احتمالاتی ۱۰ درصدی، ابعاد پنهانی از ساختار عدم‌قطعیت مدل‌ها را آشکار ساخته است. بررسی‌ها نشان داد که توزیع عدم‌قطعیت در طول منحنی تداوم جریان به‌هیچ‌وجه یکنواخت نیست. براساس تحلیل‌های صورت‌گرفته، بیش‌ترین پهنای باند عدم‌قطعیت و حساسیت سیستم، دقیقاً در بازه ۱۰ درصد دبی‌های حداکثر (دهک صفر-۱۰ درصد معرف سیلاب‌های حدی) متمرکز شده است، جایی که در دوره مشاهداتی به‌تنهایی مسئول جابه‌جایی بیش از ۵۷ درصد از کل رسوب حوضه بوده و در سناریوهای آینده نیز سهمی بالغ بر ۴۰ تا ۴۳ درصد را به خود اختصاص داده است. در این بازه سیلابی، به‌دلیل فعال‌شدن مکانیزم‌های آستانه‌ای نظیر فرسایش کناره‌ای و ناپایداری‌های مورفولوژیک که خارج از ظرفیت پیش‌بینی قطعی مدل‌های رگرسیونی است، فاصله میان کران بالا و پایین پیش‌بینی به حداکثر خود رسیده و ماهیت عدم‌قطعیت از نوع آماری به ساختاری تغییر یافته است. در نقطه مقابل، در بازه ۱۰ درصد دبی‌های حداقل (جریان‌های پایه)، مدل‌ها کم‌ترین میزان خطا و واریانس را نشان داده است، اما به‌دلیل فقدان

تنش برشی کافی، آورد رسوبی در این دهک عملاً به صفر میل کرده و تأثیر معناداری در بیلان کل حوضه ندارد. این رفتار دوگانه اثبات کرد که در شرایط عدم‌ایستایی اقلیم، ارزیابی ریسک انسداد مجاری و طراحی سازه‌های هیدرولیکی پایین‌دست نباید بر مبنای میانگین‌های قطعی صورت گیرد، بلکه طراحی‌ها باید براساس کران بالای عدم‌قطعیت در بازه ۱۰ درصدی جریان‌های حداکثر استوار گردند (شکل ۷).

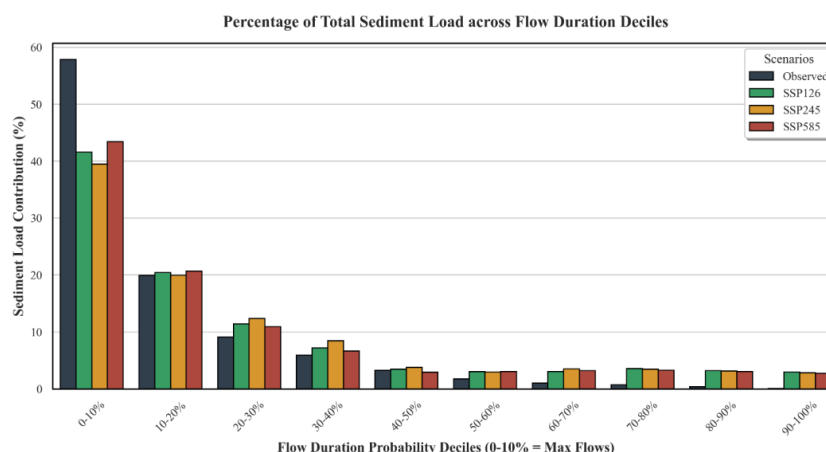


Figure 7. Sediment load contribution in extreme flow deciles: observed baseline versus future SSP scenarios

۴. نتیجه‌گیری

در ایستگاه سولقان که تحت سناریوهای تغییر اقلیم بررسی شد، افزایش ضریب تغییرات جریان مشاهده شده است. پراکندگی و نوسان دبی‌ها در دوره‌های آینده بیش‌تر برآورد شده و نقش رخداد‌های نامنظم و حدی در رژیم جریان پررنگ‌تر تفسیر شده است. افزایش عدم‌قطعیت در برآورد دبی‌های شاخص و حساس‌تر شدن سامانه‌های شهری نسبت به نوسانات جریان محتمل دانسته شده است. اثرگذاری تغییر اقلیم بر منحنی سنج رسوب تأیید شده است، اما شدت تغییرات آن نسبت به تغییرات رژیم جریان کم‌تر برآورد شده است. کاهش نرخ انتقال رسوب b گزارش شده و ملایم‌تر شدن شیب منحنی سنج رسوب در شرایط آینده استنباط شده است. دگرگونی رابطه سنج رسوب محتمل دانسته شده، اما تغییرات اصلی از مسیر تغییر در رژیم جریان تبیین شده است. اثر تغییر اقلیم بر شاخص‌های مرتبط با دبی پررنگ‌تر ارزیابی شده است. کاهش حجم آب‌دهی در منحنی‌های تداوم جریان همراه با افزایش فراوانی مقادیر حدی مشاهده شد. افزایش احتمال کاهش جریان‌های میانی و افزایش احتمال رخداد‌های حدی نتیجه‌گیری شده است. افزایش دبی مؤثر در منحنی‌های رسوب مشاهده شده و جابه‌جایی بازه دبی مؤثر به سمت مقادیر بزرگ‌تر محتمل دانسته شده است. با توجه به ثابت‌بودن دیواره‌ها و مسلح‌بودن کف در آبراهه‌های شهری، امکان تعدیل مورفولوژیک محدود در نظر گرفته شده است. تعیین‌کنندگی تغییرات دبی نسبت به تغییرات رسوب در طراحی هیدرولیکی و ارزیابی ظرفیت عبور جریان برجسته‌تر تفسیر شده است. بازنگری دبی طراحی با لحاظ تغییرات توزیع فراوانی جریان و افزایش نوسانات پیشنهاد شده است. تغییر شکل منحنی‌های فراوانی جریان و رسوب در شرایط آینده تأیید شده است. افزایش فراوانی مقادیر حدی و تغییر در چولگی منحنی‌ها مشاهده و عموماً چولگی به چپ مشاهده شده است. تعداد دبی‌های کوچک کم‌تر برآورد شده، اما همان دبی‌های کوچک به سمت مقادیر بسیار کوچک‌تر تمایل دانسته شده‌اند. سهم رخداد‌های حدی در شکل‌دهی منحنی‌ها افزایش یافته و تغییر اقلیم بر الگو و توزیع فراوانی رخداد‌های جریان و رسوب اثرگذار تلقی شده است. در شرایط موجود، منحنی‌های تداوم جریان فصل‌بندی شده و مشاهده شد که منحنی تداوم جریان کلی در ایستگاه

موردنظر بین منحنی فصل خشک و فصل تر قرار گرفت. در منحنی‌های رسوب ایستگاه هیدرومتری مشاهده شد که دبی مؤثر کلی معمولاً بین دبی مؤثر فصل خشک و فصل تر برآورد شده است. منحنی‌های رسوب تجمع‌ی غالباً سه‌بخشی مشاهده شده‌اند و بخش‌های با شیب تند، شیب ملایم و تقریباً تخت گزارش شده است. در بخش شیب تند، اختلاف زیاد در رسوب جابه‌جاشده با تغییر دبی در بازه‌های کوتاه مشاهده نشده و رخدادمحور بودن انتقال رسوب استنباط شده است. در بخش تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی با مدل LARS-WG8.0 انجام شده و عملکرد آن مناسب ارزیابی شده است. برای شبیه‌سازی بارش آینده، شاخص‌های r و RMSE به ترتیب ۰/۹۷ و ۲/۵۷ گزارش شده است. همچنین شبیه‌سازی با مقادیر متوسط نسبت به مقادیر انحراف معیار بهتر انجام شده است. مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-LR به عنوان مدل منتخب برای تولید سری‌های آتی به کار گرفته شده است. افزایش دما در دوره‌های آینده نمایش داده شده و برای بارش روند یک‌دست و مشخصی گزارش نشده است. در ایستگاه سولقان دارای تحلیل اقلیمی، عملکرد مدل LSTM در پیش‌بینی دبی آینده قابل‌اتکا ارزیابی شده است. نتایج مدل داده‌محور برای برآورد رسوب آینده قانع‌کننده گزارش شده است. همچنین محدودیت‌های این پژوهش شامل فرض ثبات کاربری اراضی، عدم وجود داده‌های فیزیکی مستقیم رطوبت خاک و ذوب برف و همچنین اتکا به آمار یک ایستگاه هیدرومتری مبنا بود. همچنین پیشنهاد شد که بررسی هم‌زمان اثر تغییر اقلیم و تغییرات کاربری اراضی (توسعه شهری، افزایش سطوح نفوذناپذیر، تغییر پوشش گیاهی) در سناریوسازی آینده و ورود آن به زنجیره مدل‌سازی دبی و رسوب بررسی شود و در گام بعدی بررسی پدیده هیستریزیس در رخدادهای سیلابی از طریق استخراج حلقه‌های صعودی و نزولی و تفکیک رخدادها برای تبیین نقش تاخیر زمانی و منابع رسوب پیشنهاد شده است.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. General circulation models
2. Coupled model intercomparison project phase 6
3. Residual
4. Heteroscedasticity

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Wang, B., & Xu, Y. J. (2020). Estimating bed material fluxes upstream and downstream of a controlled large bifurcation-the Mississippi-Atchafalaya River diversion. *Hydrological Processes*, 34(13), 2864-2877.
- Braithwaite, N. S. (2023). Regime Channel Bedload Transport Equation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(3), 06022020.
- Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *The Journal of Geology*, 68(1), 54-74.
- Sarker, S. (2023). Separation of Floodplain Flow and Bankfull Discharge: Application of 1D Momentum Equation Solver and MIKE 21C. *CivilEng 2023*, 4, 933-948.
- Li, D., Wang, G., Qin, C., & Wu, B. (2021). River extraction under bankfull discharge conditions based on sentinel-2 imagery and DEM data. *Remote Sensing*, 13(14), 2650.
- Eaton, B. C., & Davidson, S. L. (2022). *Hydraulic geometry: Empirical investigations and theoretical approaches*.
- Tranmer, A. W., Caamaño, D., Clayton, S. R., Giglou, A. N., Goodwin, P., Buffington, J. M., & Tonina, D. (2022). Testing the effective-discharge paradigm in gravel-bed river restoration. *Geomorphology*, 403, 108139.

- Pirani, A., Fuglestedt, J. S., Byers, E., O'Neill, B., Riahi, K., Lee, J. Y., ... & Tebaldi, C. (2024). Scenarios in IPCC assessments: lessons from AR6 and opportunities for AR7. *npj Climate Action*, 3(1), 1.
- Kikstra, J. S., Nicholls, Z. R., Smith, C. J., Lewis, J., Lamboll, R. D., Byers, E., ... & Riahi, K. (2022). The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures. *Geoscientific Model Development*, 15(24), 9075-9109.
- Goodarzi, M. R., Abedi, M. J., & Niazkar, M. (2024). Effects of climate change on streamflow in the Dez Basin of Iran using the IHACRES model based on the CMIP6 model. *Journal of Water and Climate Change*, jwc2024571.
- Di Virgilio, G., Ji, F., Tam, E., Nishant, N., Evans, J. P., Thomas, C., ... & Delage, F. (2022). Selecting CMIP6 GCMs for CORDEX dynamical downscaling: Model performance, independence, and climate change signals. *Earth's Future*, 10(4), e2021EF002625.
- Tabari, H., Paz, S. M., Buekenhout, D., & Willems, P. (2021). Comparison of statistical downscaling methods for climate change impact analysis on precipitation-driven drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 3493-3517.
- Hariri, H., Hosseini, S. A., & Khosrojerdy, A. (2023). [Title in Persian: The effect of climate change and gabion check dams on sediment yield; case study: Dehbar]. *Watershed Engineering and Management*, 15(4), 535-553. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2023.357033.1939>. (In Persian).
- Yousefi, H., Ahani, A., Moridi, A., & Razavi, S. (2024). The future of droughts in Iran according to CMIP6 projections. *Hydrological Sciences Journal*, 69(7), 951-970.
- Nda, M., Adnan, M. S., Yusoff, M. A. B. M., & Nda, R. M. (2023). An overview of machine learning techniques for sediment prediction. *Engineering Proceedings*, 56(1), 204.
- Heidary, H., Musavi Baygi, M., Esmaili, K., & Golkarian, A. (2020). The impact of climate change on watershed runoff and sedimentation using SWAT and WEPP models (Case study: Dehbar Basin). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(4), 1027-1040. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.287152.668293>. (In Persian).
- Hameed, M. M., Masood, A., Hamid, A., Elbeltagi, A., Razali, S. F. M., & Salem, A. (2025). Forecasting monthly runoff in a glacierized catchment: A comparison of extreme gradient boosting (XGBoost) and deep learning models. *PLoS One*, 20(5), e0321008.
- Bezak, N., Lebar, K., Bai, Y., & Rusjan, S. (2025). Using machine learning to predict suspended sediment transport under climate change. *Water Resources Management*, 1-16.
- Hao, R., & Bai, Z. (2023). Comparative study for daily streamflow simulation with different machine learning methods. *Water*, 15, 1179.
- Shakya, D., Deshpande, V., Kumar, B., & Agarwal, M. (2023). Predicting total sediment load transport in rivers using regression techniques, extreme learning and deep learning models. *Artificial intelligence review*, 56(9), 10067-10098.
- Azad, N., & Ahmadi, A. (2024). Assessment of CMIP6 models and multi-model averaging for temperature and precipitation over Iran. *Scientific Reports*, 14(1), 24165.
- Hassani, M.R., Niksokhan, M.H., Ardestani, M., & Mousavi Janbehsarayi, S.F. (2023). Evaluating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (case study: district 10 of Tehran municipality). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 269-285. (In Persian).
- Bigdeli, Z., Majnooni-Heris, A., Delearhasannia, R., & Karimi, S. (2024). Rainfall-runoff modeling of khormazard and bonab hydrometric stations using support vector machine and random forest algorithms. *Water and Soil*, 37(6), 971-989. (In Persian).
- Nasiri, A., Salimi, E., Delfan Azari, M., Yazdi, J., & Shahsawandi, M. (2025). Urban Flood Zoning Using an Integrated Hydrological-Hydraulic Watershed Modeling Approach, Case Study: Districts 21 and 22 of Tehran. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, 14(4), 392-405.
- Gholami, M., Ganavati, E., & Ahmadabadi, A. (2020). Simulation of floodplain zones in Tehran's metropolitan watershed (case study: Kaan basin). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6 (4), 95-108. (In Persian).
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
- Yaseen, Z. M., El-Shafie, A., Jaafar, O., Afan, H. A., & Sayl, K. N. (2015). Artificial intelligence based models for stream-flow forecasting: 2000–2015. *Journal of Hydrology*, 530, 829-844.