



Integrated Flood Control and Management Framework; Case Study: Sarcheshmeh Copper Complex Area

Maryam Azarpira^{1*}, Reza Esmaili², Maryam Moradi Mousavi³, Rasoul Habibi³,
Alireza Badie Neshin⁴, Hamed Rezaeipour Ghanat Nowji⁵

1. PhD. in Hydraulic Structures, Zistab Consulting Engineers Company, Tehran, Iran
(Corresponding Author) Azarpira@zistab.com

2. PhD. in Hydraulic Structures, Zistab Consulting Engineers Company, Tehran, Iran

3. MSc. in Water Resources Management, Zistab Consulting Engineers Company, Tehran, Iran

4. PhD. in Irrigation and Drainage, Dept. of Water and Recycling, Sarcheshmeh Copper Complex, Kerman, Iran

5. Civil Engineer, Dept. of Water and Recycling, Sarcheshmeh Copper Complex, Kerman, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.594870.3570>

Original Paper

Abstract

With the intensification of climate change and the increasing frequency and severity of extreme precipitation events, the risk of flooding and its associated damages has risen significantly; consequently, the development of integrated flood management approaches for vulnerable areas and critical infrastructure has become increasingly essential. The Sarcheshmeh Copper Mine Complex, as one of the country's most important industrial and economic hubs, is located adjacent to the Shur River and along the Torshab Stream. The history of destructive floods in this area underscores the urgent need for a comprehensive flood management plan. This study aims to develop an integrated flood management framework through complementary hydrological and hydraulic investigations. First, critical flood-prone locations were identified through site visits, analysis of historical flood records, and hydraulic modeling using HEC-RAS. The conveyance capacity of the river, streams, and major watercourses was also evaluated. Appropriate structural and management strategies were proposed for each area based on the 500-year return period flood and were checked against the 1000-year return period flood. Subsequently, the current surface stormwater collection system was evaluated in the case study area, and a proposed system for runoff diversion and flood control was designed by Autodesk Storm and Sanitary Analysis. The results demonstrate that integrating protective strategies along the main flow directions with optimization of the surface stormwater collection system significantly enhances runoff conveyance capacity, reduces flood risk, improves the safety of critical infrastructure, and strengthens stormwater management across the complex. The primary contribution of this research is the development of an integrated flood management framework that combines hydraulic analysis of rivers and streams, identification of critical locations, design of protective strategies, and optimization of the surface stormwater collection system into a unified management plan. In addition to enhancing the flood resilience of the Sarcheshmeh Copper Mine Complex, the proposed framework can be used as a practical model for flood planning, design, and management in other mining complexes and industrial areas.

Keywords:

Flood Control,
Hydraulic Modeling,
Surface Stormwater
Collection System,
HEC-RAS,
Sarcheshmeh Copper
Complex.



Received: Feb. 21, 2026

Revised: Mar. 30, 2026

Accepted: Apr. 17, 2026

To cite this article:

Azarpira, M., Esmaili, R., Moradi Mousavi, M., Habibi, R., Badie Neshin, A.,
Rezaeipour Ghanat Nowji, H., 2026. Integrated flood control and management
framework; case study: Sarcheshmeh copper complex area. *Water and Wastewater*,
37(1), 41-63. <https://doi.org/10.22093/wwj.2026.594870.3570>.

Use your device to scan and
read the article online



1. Introduction

Flooding is one of the most important natural hazards affecting infrastructure in mining and industrial areas. The increasing frequency and intensity of extreme precipitation events associated with climate change have increased flood risk, particularly in urban, industrial, and mining areas (Sheidayian et al., 2017; Dharmarathne et al., 2024). Therefore, effective flood risk reduction requires not only the identification of flood-prone areas but also a comprehensive assessment of flow conveyance capacity, hydraulic bottlenecks, and the performance of drainage systems.

Recent studies have emphasized the importance of integrating hydrological and hydraulic analyses with structural and management measures to enhance flood resilience (Awah et al., 2024; Grigg, 2024). Hydraulic models have been widely used to simulate river behavior, estimate water-surface profiles, identify vulnerable areas, and support flood-control planning. Among these models, HEC-RAS¹ has been widely used for the hydraulic analysis of rivers and channels, and flood-risk assessment (Prastica et al., 2018; Rouhollahi et al., 2023; Qian et al., 2024; Zainal and Talib, 2024). At the local scale, the assessment and improvement of surface stormwater collection systems can also play an important role in reducing flood impacts and improving runoff conveyance (Yazdi et al., 2017, 2018).

The Sarcheshmeh Copper Complex is a strategically important mining and industrial complex located in Kerman Province, Iran. Previous flood events, including the damaging flood of 2022, have demonstrated the vulnerability of critical infrastructure and the limitations of the existing flood management system. The complexity of the area and the interactions among natural watercourses, flood-control structures, and the internal surface stormwater collection system highlight the need for an integrated framework for flood management. Accordingly, the main objective of this study was to develop an integrated framework for flood control and management at the Sarcheshmeh Copper Complex by integrating the hydraulic assessment of the main flood conveyance routes with the evaluation and

optimization of the internal surface stormwater collection system.

2. Data and methods

As shown in Fig. 1, the study area is located approximately 50 km southwest of Rafsanjan and 160 km southwest of Kerman. The industrial facilities of the Sarcheshmeh Copper Complex are distributed over an area of more than 500 hectares and are located at an approximate elevation of 2500–2600 m above sea level. The climate of the region is classified as mountainous, semi-arid to arid. A section of the Shur River, approximately 8 km long and with an annual flow volume of approximately 20 million m³, is located adjacent to the complex and, together with its tributaries, plays a major role in runoff drainage. The Torshab Stream is one of the main tributaries of the Shur River and an important runoff conveyance route from the western part of the area. The presence of numerous watercourses and the intersection of some of them with industrial facilities further underscore the need for integrated flood management within the Sarcheshmeh Copper Complex.

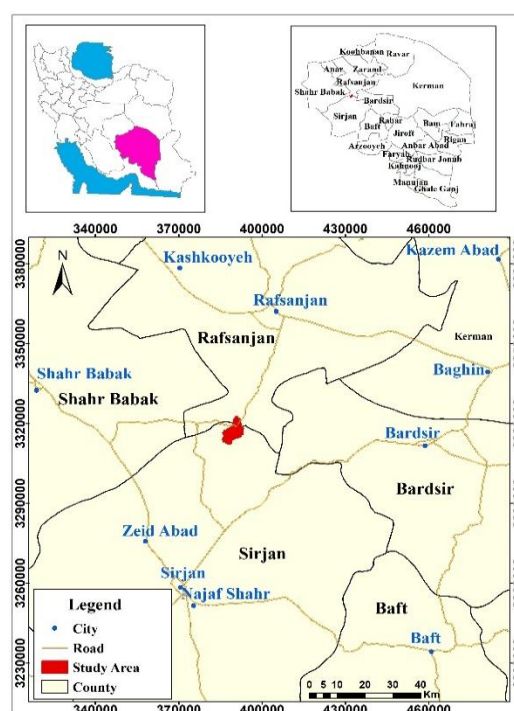


Fig. 1. Geographical location of the study area within the administrative divisions of Iran and its access routes

¹ Hydrologic Engineering Center–River Analysis System (HEC-RAS)

Due to the absence of a meteorological station within the study area, precipitation data were collected and completed using data from 20 surrounding stations. Monthly precipitation data covering approximately 56 years, from 1966 to 2022, were used, and the mean annual precipitation in the Sarcheshmeh area was estimated at approximately 250–300 mm. Based on topographic information and field investigations, the study area was divided into 29 subcatchments, as shown in Fig. 2. Design floods were estimated using rainfall–runoff and empirical methods. Considering the strategic importance of the complex and the experience of the 2022 flood event, protection measures along the main flood conveyance routes were designed based on a 500-year return period flood, and their performance was evaluated against a 1000-year return period flood. In contrast, the surface stormwater collection system was designed for a 25-year return period flood.

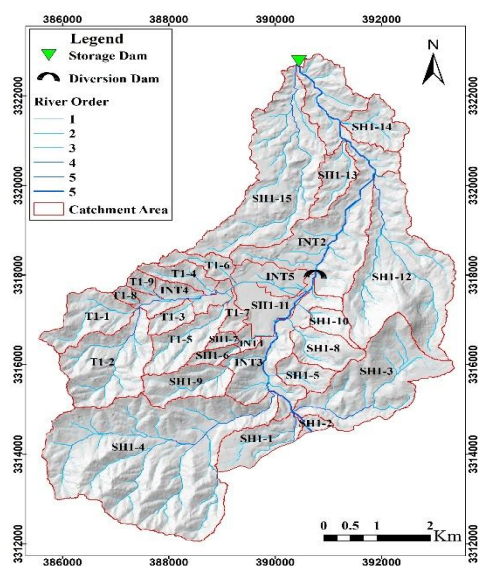


Fig. 2. Location map of the river, stream, and waterways, together with the sub-basins of the study area

The hydraulic assessment of the Shur River, Torshab Stream, and the main channels was conducted using the HEC-RAS model. The total length of the modeled flood conveyance routes was approximately 8990 m, including 4100 m of the Shur River with 82 cross-sections; and 4890 m of the Torshab and Sang-Shekan channels with 71

cross-sections. Existing structures, including three bridges along the Torshab channel, were incorporated into the model.

The surface stormwater collection system was assessed using Autodesk Storm and Sanitary Analysis ¹ software. The industrial area was divided into 47 subcatchments, and rainfall was transformed into runoff using the soil conservation service ² method, while rainfall losses were estimated using the Curve Number³ method. The time of water entry into the system was generally assumed to be between 5 and 10 minutes.

3. Results and discussion

Given the interconnected nature of flood management in the study area, the results obtained from the assessment of the main flood conveyance routes and the evaluation of the surface stormwater collection system were integrated within a unified framework. In this framework, following the determination of the design flood and assessment of the hydrological and hydraulic conditions of the area, the performance of the main flood conveyance routes was evaluated using the one-dimensional HEC-RAS model; the condition of the surface stormwater collection system was assessed using the SSA model. The results of these two components, including the identification of critical points along the main flood routes and the identification of deficiencies and capacity limitations in the surface stormwater collection system, were subsequently integrated. Accordingly, flood-control and protection measures for the main flood conveyance routes and the modification and development of the surface stormwater collection system were formulated in a coordinated manner. The conceptual framework of this approach is presented in Fig. 3.

The hydraulic model results, together with the assessment of areas affected by previous flood events, identified critical points along the main flood conveyance routes. Information from the 2022 flood showed that inundation began rapidly at these locations and intensified as runoff from other subcatchments joined the flow. Accordingly, structural and management measures were proposed to increase flow conveyance capacity and improve runoff conveyance at critical locations.

¹ Storm and Sanitary Analysis (SSA)

² Soil Conservation Service (SCS)

³ Curve Number (CN)



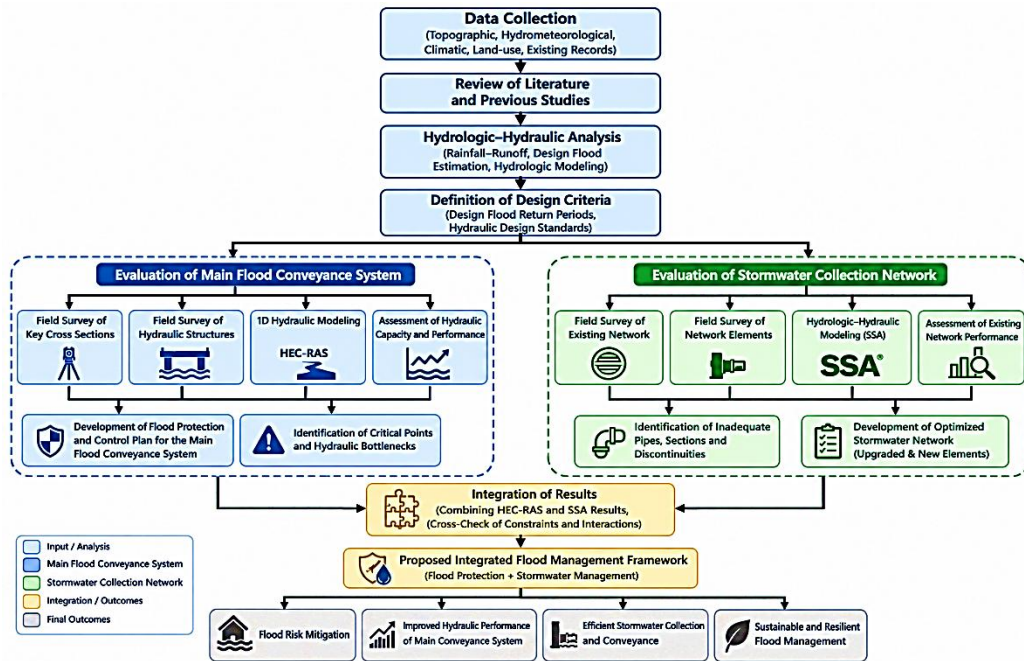


Fig. 3. Conceptual framework of the proposed integrated flood-management approach

The assessment of the existing surface stormwater collection system also showed that discontinuities in drainage routes, the lack of suitable discharge points, interference between infrastructure and channels, and the entry of process wastewater reduced the hydraulic capacity of the system. The design results showed that the existing system, comprising 47 channels with an approximate total length of 8190 m, could be expanded into a system with an approximate length of 15,600 m. In the proposed configuration, 24 existing channels were retained and integrated into the new system. Consequently, the total system length increased by approximately 90.5%, while approximately 51% of the existing channels were retained. The maximum simulated filling ratio in the proposed system was 75%.

The findings showed that the vulnerability of the complex to flooding is not attributable to a single hydraulic factor but results from the interaction between limitations in the main flood conveyance routes and deficiencies in the internal surface stormwater collection system. Therefore, managing each of these components separately cannot provide a comprehensive solution. The proposed framework links flood conveyance at the basin scale, drainage system performance at the local scale, identification of critical points, and structural and management measures within a unified decision-making framework.

4. Conclusions

This study presented an integrated framework for flood management at the Sarcheshmeh Copper Complex, in which the main flood conveyance routes and the internal surface stormwater collection system were assessed simultaneously. The results showed that limitations in flow conveyance capacity, sediment deposition, local blockage, and deficiencies in the surface stormwater collection system can increase flood risk in parts of the complex. Accordingly, corrective measures, protective structures, and management strategies appropriate to the conditions of the area were proposed.

Integrating protective measures along the main flow routes with the design of an optimized surface stormwater collection system provided a coherent system for managing floods and surface runoff within the Sarcheshmeh Copper Complex, which can effectively contribute to reducing flood risk, enhancing the safety of critical infrastructure, and improving the resilience of the complex to extreme events. The novelty of this study lies in presenting an integrated approach in which flood management is simultaneously addressed at two levels: the watershed scale (rivers and streams) and the local scale (surface stormwater collection system). This approach can provide a basis for flood management planning, design, and decision-making in mining complexes and other industrial areas.





ارائه چارچوب یکپارچه کنترل و مدیریت سیلاب؛ مطالعه موردی: محدوده مجتمع معدن مس سرچشمه

مریم آذرپیرا^{۱*}، رضا اسماعیلی^۲، مریم مرادی موسوی^۳، رسول حبیبی^۴، علیرضا بادیه نشین^۵، حامد رضایی پور قنات النوجی^۵

۱- دکترای تخصصی سازه‌های هیدرولیکی، شرکت مهندسين مشاور زیستاب، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) Azarpira@zistab.com

۲- دکترای تخصصی سازه‌های هیدرولیکی، شرکت مهندسين مشاور زیستاب، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد مدیریت منابع آب، شرکت مهندسين مشاور زیستاب، تهران، ایران

۴- دکترای تخصصی آبیاری و زهکشی، امور آب و بازیافت مجتمع مس سرچشمه، کرمان، ایران

۵- مهندس عمران، امور آب و بازیافت مجتمع مس سرچشمه، کرمان، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.594870.3570>

مقاله پژوهشی

چکیده

با تشدید تغییرات اقلیمی و افزایش فراوانی و شدت بارش‌های حدی، خطر وقوع سیلاب و خسارات ناشی از آن به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ از این‌رو، توسعه رویکردهای یکپارچه برای مدیریت سیلاب در مناطق حساس و زیرساخت‌های حیاتی بیش‌ازپیش ضروری است. مجتمع معدن مس سرچشمه، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مراکز صنعتی و اقتصادی کشور، در مجاورت رودخانه شور و در مسیر مسیر سیلاب قرار دارد و سابقه وقوع سیلاب‌های مخرب در این محدوده، ضرورت تدوین یک برنامه جامع برای مدیریت سیلاب را آشکار می‌سازد. در این پژوهش، با هدف توسعه یک چارچوب یکپارچه مدیریت سیلاب، مطالعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در دو بخش مکمل انجام شد. ابتدا با استفاده از بازدیدهای میدانی، بررسی سوابق سیلاب‌های گذشته و مدل‌سازی هیدرولیکی در نرم‌افزار HEC-RAS، نقاط بحرانی، ظرفیت آبگذری رودخانه، مسیرها و آبراهه‌های اصلی ارزیابی شد و راهکارهای سازه‌ای و مدیریتی متناسب با هر محدوده بر اساس سیلاب با دوره بازگشت ۵۰۰ سال ارائه و بر اساس سیلاب با دور بازگشت ۱۰۰۰ سال کنترل شد. سپس شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی موجود مجتمع ارزیابی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار Autodesk Storm and Sanitary Analysis، شبکه‌ای بهینه برای هدایت رواناب‌های سطحی و کنترل سیلاب طراحی شد. نتایج نشان داد که تلفیق اقدامات حفاظتی در مسیرهای اصلی جریان با توسعه و اصلاح شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی، موجب افزایش ظرفیت انتقال رواناب، کاهش خطر سیلاب، ارتقای ایمنی زیرساخت‌های حیاتی و بهبود مدیریت آب‌های سطحی در محدوده مجتمع می‌شود. دستاورد اصلی این پژوهش، ارائه یک چارچوب یکپارچه مدیریت سیلاب در یک مجتمع معدنی بود که تحلیل هیدرولیکی رودخانه و مسیرها، شناسایی نقاط بحرانی، طراحی اقدامات حفاظتی و بهینه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی را در قالب یک برنامه واحد تلفیق می‌کند. چارچوب پیشنهادی، علاوه بر ارتقای تاب‌آوری مجتمع مس سرچشمه در برابر سیلاب، می‌تواند به‌عنوان الگویی کاربردی برای برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت سیلاب در سایر مجتمع‌های معدنی و مناطق صنعتی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی:

کنترل سیلاب، مدل‌سازی

هیدرولیکی، شبکه

جمع‌آوری آب‌های

سطحی، HEC-RAS.

مجتمع معدن مس سرچشمه



دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲

اصلاح: ۱۴۰۵/۱/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۲۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

آذرپیرا، م.، اسماعیلی، ر.، مرادی موسوی، م.، حبیبی، ر.، بادیه نشین، ع.، رضایی پور قنات النوجی، ح.، ۱۴۰۵، ارائه

چارچوب یکپارچه کنترل و مدیریت سیلاب: مطالعه موردی: محدوده مجتمع معدن مس سرچشمه.

آب و فاضلاب. ۳۷ (۱)، ۴۱-۶۳.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.594870.3570>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

سیلاب یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مخاطرات طبیعی است که سالانه خسارات گسترده‌ای به زیرساخت‌ها، فعالیت‌های اقتصادی و ایمنی جوامع وارد می‌کند. در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، افزایش فراوانی و شدت بارش‌های حدی و تغییر الگوهای هیدرولوژیکی، احتمال وقوع سیلاب‌های مخرب را به‌ویژه در مناطق شهری، صنعتی و معدنی به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است (Sheidayian et al., 2017, Dharmarathne et al., 2024). از این‌رو، مدیریت و کنترل سیلاب از طریق شناسایی مناطق بحرانی، افزایش ظرفیت انتقال جریان و توسعه راهکارهای سازه‌ای و مدیریتی، به یکی از مهم‌ترین اولویت‌های مدیریت منابع آب تبدیل شده است.

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که کاهش خسارات ناشی از سیلاب مستلزم شناسایی نواحی با بیشترین سهم در تولید و انتقال رواناب، ارزیابی دقیق رفتار هیدرولوژیکی جریان و طراحی اقدامات کنترلی متناسب با شرایط هر منطقه است (Naulin et al., 2013, Bhatt et al., 2014, Ilyati and Akbari, 2024).

در این میان، مجتمع معدن مس سرچشمه به دلیل قرارگیری در مجاورت رودخانه شور و عبور مسیل ترش‌آب از داخل محدوده مجتمع، یکی از مناطق حساس از نظر خطر سیلاب محسوب می‌شود. وقوع سیلاب‌های مخرب در سال‌های گذشته و خسارات قابل‌توجه وارد شده به زیرساخت‌ها و تأسیسات این مجتمع، ضرورت تدوین یک برنامه جامع برای مدیریت و کنترل سیلاب را بیش‌ازپیش نمایان ساخته است. با توجه به اهمیت اقتصادی این مجموعه و نقش آن در صنعت معدن کشور، اتخاذ راهکارهایی مبتنی بر تحلیل‌های علمی و مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، برای کاهش ریسک سیلاب و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها ضروری است.

پیشرفت روش‌های مدل‌سازی عددی، امکان تحلیل دقیق رفتار جریان، ارزیابی ظرفیت آب‌گذری و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف سیلاب را فراهم کرده است. در این زمینه، مدل هیدرولیکی HEC-RAS به‌عنوان یکی از پرکاربردترین ابزارهای تحلیل جریان‌های رودخانه‌ای، در پژوهش‌های متعددی برای تعیین پهنه‌های سیلابی،

ارزیابی ظرفیت آب‌گذری رودخانه‌ها و مسیل‌ها و طراحی اقدامات حفاظتی استفاده شده است (Prastica et al., 2018, Rouhollahi et al., 2023, Khoshoei et al., 2024, Zainal and Talib, 2024). علاوه بر این، پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تلفیق مدل‌سازی هیدرولیکی با اطلاعات توپوگرافی، کاربری اراضی و بازدیدهای میدانی، نقش مؤثری در شناسایی نقاط بحرانی، اولویت‌بندی اقدامات اجرایی و افزایش دقت تصمیم‌گیری در مدیریت سیلاب دارد (Yazdani et al., 2015, Sasanpour et al., 2021, Roohi Asl et al., 2022, Ghadami and Hosseini, 2025, Khoshoei et al., 2025).

در کنار مدیریت جریان در رودخانه‌ها و مسیل‌ها، کنترل رواناب‌های سطحی در محدوده‌های صنعتی و معدنی نیز از ارکان اصلی کاهش خسارات سیلاب به شمار می‌رود. توسعه و بهینه‌سازی شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی، علاوه بر افزایش ظرفیت انتقال رواناب، موجب کاهش آب‌گرفتگی، حفاظت از تأسیسات و ارتقای ایمنی بهره‌برداری می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های هیدرولیکی نظیر Autodesk Storm and Sanitary Analysis¹ امکان تحلیل عملکرد شبکه‌های زهکشی، ارزیابی ظرفیت انتقال جریان و طراحی شبکه‌های بهینه را فراهم ساخته و در پروژه‌های مختلف شهری و صنعتی نتایج موفقی به همراه داشته است (Yazdi et al., 2017, Mohammadiun et al., 2018, Yazdi et al., 2018). همچنین پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اصلاح و توسعه شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی و تحلیل‌های چندهدفه، می‌تواند به‌طور مؤثری حجم رواناب‌های سطحی را کنترل کرده و خسارات ناشی از سیلاب‌های ناگهانی را کاهش دهد (Agonafir et al., 2023, Wan et al., 2023).

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که پیچیدگی خطر سیلاب و وابستگی متقابل اجزای مختلف سامانه‌های هیدرولوژیکی و زیرساختی، ضرورت حرکت از رویکردهای منفرد به سمت مدیریت یکپارچه سیلاب را افزایش داده است. در این رویکرد، کاهش خطر سیلاب نیازمند تلفیق مطالعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، زیرساخت‌های کنترل جریان و اقدامات مدیریتی در مقیاس‌های مختلف است (Awah et al., 2024, Grigg, 2024).

¹ Autodesk Storm and Sanitary Analysis (SSA)



فرآوری، انبارها و مسیرهای دسترسی، ایجاب می‌کند که سامانه‌ای جامع و کارآمد به‌منظور مدیریت و کنترل سیلاب طراحی و بهره‌برداری شود. به همین دلیل هدف اصلی از اجرای این طرح، کاهش آسیب‌پذیری مناطق کلیدی نسبت به وقوع سیلاب، افزایش ظرفیت عبور جریان‌ها و مدیریت بهینه رواناب‌های سطحی در شرایط بحرانی است.

۲-۲- موقعیت جغرافیایی

مجمع مس سرچشمه در مختصات جغرافیایی ۲۹.۹۷۵ تا ۳۰.۱۵۰ درجه عرض شمالی و ۵۵.۶۵۰ تا ۵۵.۸۵۰ درجه طول شرقی و در فاصله ۵۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان رفسنجان و ۱۶۰ کیلومتری جنوب غرب کرمان در ناحیه مرکزی رشته‌کوه زاگرس قرار دارد. این معدن از طریق جاده آسفالت به رفسنجان، شهر بابک و سیرجان مرتبط است. جانمایی صنایع در مساحتی به وسعت بیش از ۵۰۰ هکتار در محدوده شمالی معدن مس سرچشمه قرار گرفته و ارتفاع عمومی محدوده جانمایی واحدهای فرایندی در حدود ۲۵۰۰ تا ۲۶۰۰ متر از سطح دریا است. در شکل ۱ نقشه موقعیت محدوده مطالعاتی در تقسیمات سیاسی کشور و راه‌های دسترسی ارائه شده است.

۲-۳- اقلیم منطقه

به‌منظور بررسی و تحلیل شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه، ابتدا ایستگاه‌های هواشناسی فعال در اطراف محدوده شناسایی و اطلاعات مربوط به بارندگی آن‌ها جمع‌آوری شد. با توجه به فقدان ایستگاه هواشناسی در داخل حوضه، ناگزیر از داده‌های ایستگاه‌های مجاور با بیشترین طول دوره آماری استفاده شد. پس از گردآوری داده‌ها، صحت و کفایت آماری آن‌ها ارزیابی شد و سپس با اعمال اصلاحات لازم، آمارها بازسازی و تطویل شدند. بر اساس نتایج حاصل اقلیم منطقه را می‌توان به‌عنوان نیمه‌خشک تا خشک کوهستانی طبقه‌بندی کرد.

۲-۴- الگوی بارش

آمار بارندگی ماهانه برای دوره‌ای ۵۶ ساله (۱۳۴۵ تا ۱۴۰۱) از داده‌های ۲۰ ایستگاه هواشناسی اطراف محدوده مجتمع بررسی بازسازی و تکمیل شده است. بارش‌ها اکثراً به‌صورت باران و در

همچنین، در مدیریت سیلاب‌های ناگهانی، ارتباط میان مدل‌سازی هیدرولوژیکی، پیش‌بینی جریان و تصمیم‌گیری مدیریتی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا سرعت وقوع این رخدادها فرصت واکنش و حفاظت از زیرساخت‌های در معرض خطر را محدود می‌کند (Sadkou et al., 2024).

پژوهش‌های جدیدتر نیز با ترکیب مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، از جمله تلفیق SWMM و HEC-RAS، تلاش کرده‌اند ارزیابی دقیق‌تری از رفتار جریان و خطر سیلاب ارائه دهند (Khatooni et al., 2025). این پژوهش‌ها بر اهمیت تلفیق اطلاعات تولید رواناب، انتقال جریان و ویژگی‌های آسیب‌پذیری در برنامه‌ریزی و مدیریت سیلاب تأکید دارند.

هدف از پژوهش حاضر، ارائه چارچوبی یکپارچه برای مدیریت سیلاب در مقیاس یک مجتمع معدنی - صنعتی بود که در آن، برخلاف اغلب مطالعات پیشین که به‌طور جداگانه به مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه‌ها یا طراحی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی پرداخته‌اند، این دو مؤلفه به‌عنوان اجزای مکمل یک سامانه واحد در نظر گرفته شده‌اند. این چارچوب، متکی بر مدل‌سازی هیدرولیکی مسیرهای اصلی سیلاب، شناسایی نقاط بحرانی بر اساس تلفیقی از بازدیدهای میدانی، خسارت سیلاب‌های پیشین و نتایج شبیه‌سازی عددی، طراحی شبکه بهینه جمع‌آوری آب‌های سطحی و در نهایت ارائه راهکارهای سازه‌ای و مدیریتی است. وجه تمایز اساسی این پژوهش، نگاه سیستمی به مدیریت سیلاب در یک منطقه حساس صنعتی و ارائه الگویی قابل تکرار برای سایر مجتمع‌های معدنی با شرایط مشابه است.

۲- داده‌ها و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مجتمع عظیم صنعتی مس سرچشمه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های استخراج، فرآوری و تولید محصولات مسی در خاورمیانه و حتی در سطح جهانی، در استان کرمان و در محدوده‌ای کوهستانی با اقلیم نیمه‌خشک قرار دارد. این موقعیت جغرافیایی به دلیل بارش‌های شدید فصلی، ناهمواری‌های توپوگرافیک و ساختار زمین‌شناسی خاص، پتانسیل بالایی برای وقوع رواناب سطحی و سیلاب‌های مخرب دارد. وجود تأسیسات حساس نظیر خطوط انتقال، کارخانه‌های

دریای عمان و اقیانوس هند هستند که از مهر تا اردیبهشت منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

درمجموع ویژگی‌های اقلیمی منطقه و بارندگی مجتمع مس سرچشمه نشان می‌دهد که علی‌رغم قرارگیری در منطقه‌ای نسبتاً خشک، وقوع بارش‌های کوتاه‌مدت و شدید به‌ویژه در ماه‌های سرد سال، ریسک سیلاب‌های ناگهانی را افزایش داده است؛ بنابراین در طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های کنترل رواناب و سیلاب، باید تأکید ویژه‌ای بر تحلیل دقیق شدت و مدت بارندگی‌ها، به‌کارگیری اطلاعات به‌روز شده و در نظر گرفتن رگبارهای شدید انجام شود.

۲-۵- توپوگرافی و فیزیوگرافی منطقه

منطقه مورد مطالعه دارای توپوگرافی تند و ارتفاع زیاد است که از عوامل اصلی تسریع حرکت رواناب در منطقه محسوب می‌شود. با انجام مطالعات هیدرولوژی ضمن ارائه فیزیوگرافی محدوده مطالعاتی، شرایط وقوع رواناب و جریان سطحی بررسی شده و تخمین مقدار سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف به انجام رسیده است.

با توجه به اهداف مطالعات مجموعاً ۲۹ زیر حوضه بر اساس نقشه‌های موجود تعیین و سپس با استفاده از بازدیدهای میدانی کنترل و انتخاب شده است. کدگذاری هریک از زیر حوضه‌ها با توجه ورودی هر یک از حوضه‌ها به رودخانه شور و ترشاب نام‌گذاری شده است. در شکل ۲ نقشه موقعیت زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها ارائه شده است. خاطرنشان می‌شود پهنه پیت معدن و حوضه‌های آبریز منتهی به آن به دلیل عدم ارتباط هیدرولوژیکی با حوضه پایین‌دست رودخانه شور از حوضه آبریز این رودخانه حذف شده است.

۲-۶- برآورد سیلاب

یکی از مسائل مهم درباره نوع و موقعیت مکانی، ابعاد و ویژگی‌های هیدرولیکی تأسیسات آبی به منظور مهار و انحراف و همچنین حفاظت تأسیسات جانبی، مطالعه و ارزیابی شدت سیل با احتمال وقوع مشخص است. معمولاً برای بررسی شدت طغیان‌ها از آمار و اطلاعات سیلاب‌های پیشین در حوضه مورد مطالعه استفاده می‌شود. یعنی بر اساس آنچه در گذشته رخ داده، شرایط احتمالی آینده برآورد می‌شود. در کلیه طراحی‌های مربوط به سازه‌های آبی

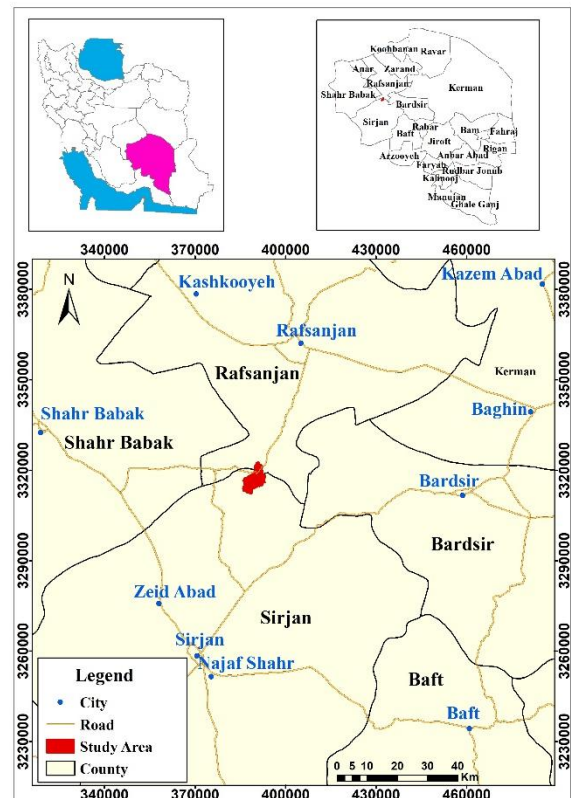


Fig. 1. Geographical location of the study area within the administrative divisions of Iran and its access routes

شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی در تقسیمات سیاسی کشور و راه‌های دسترسی

ارتفاعات بالا به‌ندرت به‌صورت برف گزارش شده است. بر اساس داده‌های ایستگاه‌های منطقه، بارندگی سالیانه در محدوده مجتمع سرچشمه به‌طور میانگین حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر برآورد شده است. میزان بارش از غرب به شرق منطقه کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده نقش ارتفاع در افزایش دریافت رطوبت است. بارش‌ها عمدتاً در بازه زمانی آبان تا اردیبهشت رخ می‌دهد به‌صورتی‌که بیشترین میزان بارندگی در فصل زمستان و ماه دی و کمترین مقدار آن در فصل تابستان و ماه شهریور مشاهده شده است. در برخی سال‌ها وقوع پدیده‌های ترسالی یا خشک‌سالی شدید گزارش شده که بر الگوی رواناب تأثیر مستقیم داشته است. بارش‌های منطقه عمدتاً از نوع کوتاه‌مدت و با شدت بالا هستند. این ویژگی باعث می‌شود که پتانسیل تولید رواناب سریع و ایجاد سیلاب‌های ناگهانی به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. منشأ اصلی بارش‌های منطقه، سامانه‌های بارشی مدیترانه‌ای و توده‌های موسمی

از روش بارش رواناب ارائه شد. برای تعیین رواناب سطحی در محدوده مجتمع معدن مس سرچشمه نیز از تداوم بارش ۶ ساعته استفاده شد.

۷-۲- سیلاب طراحی

با توجه به اهمیت راهبردی مجتمع مس سرچشمه، ارزش بالای تجهیزات و تأسیسات صنعتی، پیامدهای اقتصادی و زیست محیطی ناشی از وقوع سیلاب و همچنین تجربه خسارات گسترده سیلاب مرداد ۱۴۰۱، طراحی سازه‌های حفاظت سیلاب در مسیرهای اصلی جریان بر مبنای سیلاب با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله انجام شد. به منظور اطمینان از کفایت و ایمنی طرح، عملکرد سازه‌های پیشنهادی علاوه بر سیلاب طراحی، تحت سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله نیز ارزیابی و کنترل شد تا میزان تاب‌آوری آن‌ها در برابر رخدادهای حدی بررسی شود. از سوی دیگر، با توجه به ماهیت عملکردی شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی و مطابق با معیارهای متداول طراحی شبکه‌های زهکشی، ارزیابی و طراحی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی محدوده مجتمع بر اساس سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله انجام شد تا ضمن تأمین ظرفیت مناسب برای هدایت رواناب‌های سطحی، سطح قابل قبولی از حفاظت در برابر سیلاب‌های محتمل فراهم شود.

۸-۲- شبکه رودخانه، آبراهه‌ها و مسیل‌ها در محدوده مطالعاتی

رودخانه شور از شمال غرب، سرچشمه گرفته و از بخش‌های مختلف مجتمع عبور می‌کند. حوضه آبریز این رودخانه مساحتی در حدود ۱۸۰ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد و آورد سالانه آن تقریباً ۲۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است. این رودخانه به همراه شاخه‌های فرعی نقش اصلی در تخلیه رواناب دارند. بخشی از رودخانه شور به طول تقریبی ۸ کیلومتر در محدوده پیت معدن سرچشمه، حدفاصل پیت تا سد رودخانه شور واقع شده است (شکل ۳). مسیل ترشاب یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه شور است که از ارتفاعات این محدوده سرچشمه می‌گیرد و نقش کلیدی در هدایت رواناب از محدوده غربی دارد (شکل ۴). مسیل ترشاب به صورت فصلی و در زمان بارندگی‌های شدید فعال می‌شود و منبع تغذیه آن بارش‌های منطقه‌ای و رواناب‌های سطحی حاصل از بارندگی‌ها است. کاربری

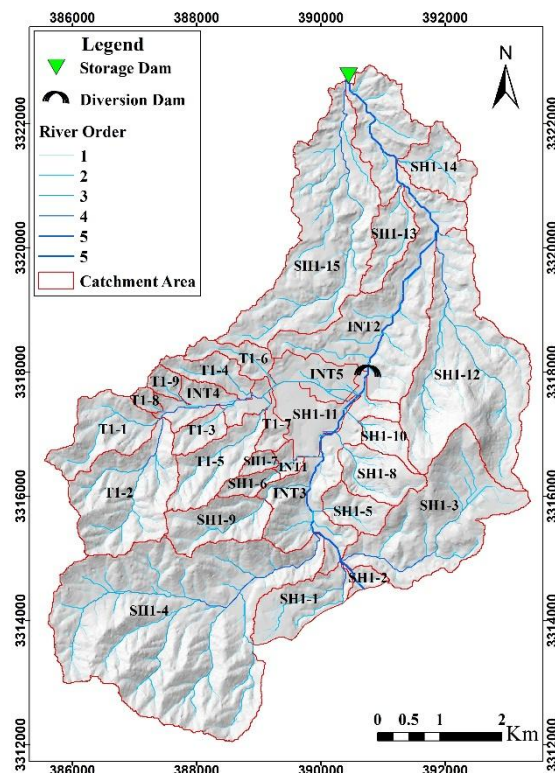


Fig. 2. Location map of the river, stream, and waterways, together with the sub-basins of the study area

شکل ۲- نقشه موقعیت رودخانه، مسیل و آبراهه‌ها به همراه زیر حوضه‌های محدوده مطالعاتی

به‌خصوص سازه‌هایی که بر روی رودخانه احداث می‌شود، برآورد سیلاب طراحی یکی از مهم‌ترین داده‌هایی است که عموماً در مراحل اولیه مطالعات باید با روش مناسب تعیین شود. در محدوده مطالعاتی، به دلیل مرزی بودن ایستگاه‌های آب‌سنجی و فقر آماری زیاد، از کلیه آمار و اطلاعات دبی‌های حداکثر یک‌روزه و لحظه‌ای گزارش شده موجود در ایستگاه‌های هیدرومتری در تجزیه و تحلیل سیلاب طرح استفاده شد.

با توجه به اهمیت مطالعات سیلاب در حوضه مطالعاتی، برای برآورد سیلاب از روش‌های بارش رواناب و تجربی استفاده شد. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از روش‌های مختلف و عنایت به این مطلب که کلیه روش‌های تجربی تابعی از مساحت حوضه هستند و رابطه مستقیم سیلاب با بارش (رگبار) در روش بارش-رواناب وجود دارد و به عبارتی تأثیر برآیند رفتارهای هیدرولوژیکی و مورفولوژیکی حوضه مطالعاتی در این روش حاصل می‌شود. در نهایت نتایج برآورد سیلاب در زیر حوضه‌های مطالعاتی با استفاده



Fig. 4. View of the Torshab stream
شکل ۴- نمایی از مسیل ترشاب



Fig. 3. Upstream view of the Shur River
شکل ۳- نمایی از بالادست رودخانه شور

هدف انتقال ایمن رواناب حاصل از حوضه‌های مجاور کارخانه سنگ‌شکن تعبیه شده است. این کانال از محدوده کارخانه سنگ‌شکن آغاز و در کم‌رکش کوه تا کارخانه اسید جدید امتداد می‌یابد و پس از آن به ترشاب متصل می‌شود.

با توجه به ورود پسماندهای صنعتی در جریان رودخانه شور یک‌بند تنظیمی در مسیر رودخانه، بعد از ورود جریان کانال ترشاب به داخل رودخانه، به‌منظور تنظیم تراز جریان و هدایت جریان به تصفیه‌خانه و تنظیم pH جریان محیا شده است. نقشه مسیر رودخانه شور همراه با موقعیت قرارگیری کانال ترشاب و کانال سنگ‌شکن در محدوده مجتمع مس سرچشمه در شکل ۵ نشان داده شده است.

علاوه بر کانال‌های اصلی انتقال سیلاب، شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی موجود در محدوده مجتمع نیز برداشت و ارزیابی شد. بررسی وضعیت موجود نشان داد که این شبکه با چالش‌های متعددی از جمله ناپیوستگی مسیر انتقال جریان، عبور خطوط و لوله‌های تأسیساتی از داخل کانال‌ها، تخلیه پساب‌های فرایندی به شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی و برخی محدودیت‌های هیدرولیکی در انتقال رواناب مواجه است که موجب کاهش کارایی شبکه در هنگام وقوع سیلاب می‌شود؛ بنابراین، شناسایی و رفع این نواقص به‌عنوان یکی از اهداف اصلی مطالعه، در طراحی و توسعه شبکه بهینه جمع‌آوری آب‌های سطحی لحاظ شده است.

این مسیل هدایت سیلاب‌ها و جلوگیری از تجمع آب در مناطق صنعتی و مسکونی مجتمع مس سرچشمه است. مسیل ترشاب عمدتاً دارای مسیر مستقیم با شیب نسبتاً زیاد است. به دلیل شرایط اقلیمی منطقه، بارش‌های ناگهانی می‌توانند منجر به ایجاد سیلاب‌های شدید در این مسیل شوند؛ بنابراین، طراحی سازه‌های کنترل سیلاب در این منطقه اهمیت ویژه‌ای دارد.

وجود دهه‌ها آبراهه کوچک و بزرگ که در زمان بارندگی فعال می‌شوند، چالش زیادی در طراحی سیستم جامع مدیریت سیلاب در محدوده مطالعاتی ایجاد می‌کند. برخی از این آبراهه‌ها مستقیماً با زیرساخت‌های حیاتی برخورد دارند که بدین منظور کنترل و هدایت سیلاب در این آبراهه‌ها حائز اهمیت است.

۹-۲- زیرساخت‌های کنترل سیلاب در وضع موجود

کانال ترشاب واقع در مسیل ترشاب با طولی در حدود ۱۳۵۰ متر از کنار نیروگاه گازی آغاز و تا رودخانه شور در جهت غرب به شرق امتداد پیدا می‌کند. این کانال برای جمع‌آوری رواناب از محدوده غربی مجتمع طراحی شده است. این کانال بتنی در طی مسیر با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای، بستر صاف و شیب مطلوب امکان انتقال ایمن سیلاب را فراهم کرده است، اما نشست رسوب و انسداد در برخی نقاط ظرفیت آن را کاهش داده است. یکی دیگر از کانال‌های اصلی در محدوده مطالعاتی، کانال سنگ‌شکن است که با

نرم افزار حرفه ای و معتبر مطرح ساخته است؛ بنابراین مدل ریاضی HEC-RAS نرم افزاری بسیار کاربردی و مناسب در مطالعات هیدرولیکی رودخانه بوده و نزدیک ۳۰ سال است که در تحلیل جریان های ماندگار در رودخانه ها و آبراهه های مصنوعی به کار گرفته می شود.

با توجه به وسعت محدوده مطالعاتی و طول رودخانه، آبراهه ها و کانال های مورد بررسی نیاز به استفاده از یک مدل هیدرولیکی یک بعدی است که با توجه به ویژگی و مزایای بیان شده، نرم افزار HEC-RAS به عنوان مدل هیدرولیکی در این پژوهش انتخاب شد.

۳-۲- مقاطع عرضی

اطلاعات هندسی یکی از مهم ترین اجزای مدل سازی هیدرولیکی هستند. در مدل یک بعدی HEC-RAS باید محدوده مورد نظر را در قالب مقاطع عرضی متعدد وارد مدل کرد. به منظور استخراج مقاطع رودخانه، مسیر کانال ها و شیب بستر طبیعی از نقشه توپوگرافی موجود از محدوده مطالعاتی در نرم افزار Civil 3D استفاده شد. لازم به ذکر است طول کل مسیر سیلاب برابر ۸۹۹۰ متر (نزدیک به ۹ کیلومتر) بود.

۳-۳- تعیین ضریب زبری مانینگ

ضرایب هیدرولیکی رودخانه از جمله ضریب مقاومت بستر، دیواره ها و سیلاب دشت رودخانه در طول مسیر مورد مطالعه، جزء داده های پایه با اهمیت محسوب می شود. ضریب زبری مانینگ رودخانه به طور گسترده ای وابسته به جنس جداره های بستر، پوشش گیاهی، تغییر شکل کانال، وجود موانع، رسوب گذاری یا فرسایش پذیری رودخانه و همچنین عمق آب در رودخانه است. یکی از روش های تخمین ضریب زبری مانینگ استفاده از جداول تجربی ارائه شده در کتاب هیدرولیک کانال های باز Chow است. این جداول در راهنمای تعیین ضرایب زبری هیدرولیکی رودخانه ها (ضابطه ۶۸۸) وزارت نیرو نیز ارائه شده است.

بر اساس بازدید میدانی از محدوده مطالعاتی، شرایط رودخانه شور نزدیک به "گروه آبراهه های کوهستانی بدون گیاه، معمولاً عمیق با دیوارهای تند، درخت و درختچه در ساحل و مستغرق در صورت رخداد سیلاب" با "بستر قله سنگ، سنگ ریزه و تخته سنگ" است که ضریب زبری مانینگ برای این گروه حداقل ۰/۰۳، متوسط

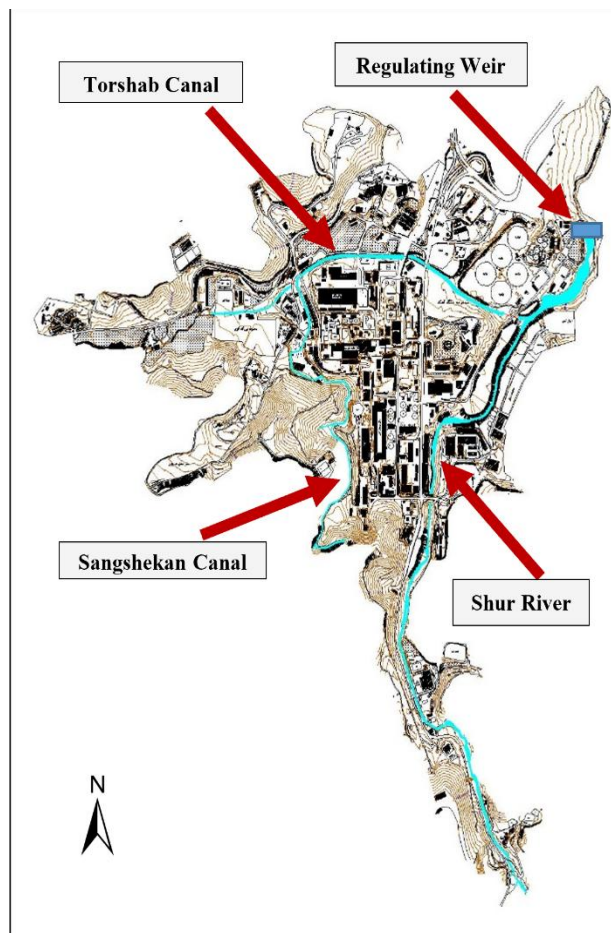


Fig. 5. Location of the Shur River, the Torshab channel, and the Sangshekan channel within the Sarcheshmeh copper complex

شکل ۵- موقعیت رودخانه شور، کانال ترشاب و کانال سنگ شکن در محدوده مجتمع مس سرچشمه

۳- مدل سازی هیدرولیکی مسیرهای اصلی سیلاب (HEC-RAS)

۳-۱- مدل منتخب

مدل HEC-RAS توسط مرکز مطالعات آب شناسی اداره مهندسی ارتش آمریکا توسعه یافته و جزء رایج ترین مدل های موجود برای محاسبه و تعیین نیم رخ طولی تراز رودخانه محسوب می شود. مدل فوق در حقیقت به عنوان نسل جدید مدل HEC2 شناخته می شود که در سال ۱۹۶۸ نخستین نسخه آن توسعه یافته است. این نرم افزار علاوه بر قابلیت حل جریان های ناپایدار (غیردائمی) و محاسبات جریان مختلط، امکان استخراج نتایج به محیط GIS و قابلیت های بسیار دیگر وجود دارد که این نرم افزار را با توانایی های یک

۳-۵- ساخت مدل HEC-RAS

به منظور بررسی ظرفیت آبدگزی رودخانه شور، مسیل‌ها و کانال‌های اصلی ترشاب و سنگ‌شکن در وضع موجود و در شرایط وقوع سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف، از مدل HEC-RAS 6.3.1 به عنوان یک نرم‌افزار معتبر و کاربردی در زمینه تحلیل جریان استفاده شد. این مدل با قابلیت اتصال به نرم‌افزار Civil 3D امکان شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان در بستر رودخانه شور با دقت بالا را فراهم ساخت. پس از وارد کردن داده‌های هندسی و داده‌های جریان، محاسبات هیدرولیکی را می‌توان از طریق تحلیل جریان ماندگار و تحلیل جریان غیر ماندگار انجام داد. در این مطالعات از تحلیل جریان به صورت ماندگار استفاده شده است. همچنین انجام محاسبات برای رژیم جریان زیر بحرانی، فوق بحرانی و مختلط امکان‌پذیر است که در این پژوهش جریان به صورت مختلط در نظر گرفته شد. شرایط حدی یا شرایط هیدرولیکی حاکم بر مرزهای بازه مطالعاتی، از دیگر اطلاعات به کار برده شده در مدل هستند که در مدل حاضر به دو صورت اعمال شد. در حالت نخست شرط مرزی عمق نرمال در مقطع بالادست و مقطع پایین‌دست و در حالت دوم عمق بحرانی در مقطع بالادست و عمق نرمال در مقطع پایین‌دست به عنوان شرایط حدی به مدل ریاضی فوق معرفی شده‌اند.

شرایط رودخانه شور، کانال ترشاب و کانال سنگ‌شکن به عنوان مسیرهای اصلی عبور سیلاب همراه با موقعیت مقاطع عرضی در شکل ۶ نشان داده شده است. رودخانه شور با طول ۴۱۰۰ متر و ۸۲ مقطع عرضی و به صورت مشابه کانال سنگ‌شکن و ترشاب در مجموع با طول ۴۸۹۰ متر و ۷۱ مقطع عرضی در مدل تعریف شدند. علاوه بر مسیرهای اصلی عبور سیلاب، مسیل ترشاب و کانال‌های هدایت رواناب زیرحوضه‌های آبریز نیز در مدل در نظر گرفته شده است.

۳-۶- سازه‌های هیدرولیکی

در مسیر کانال ترشاب سه مقطع پل وجود دارد که به تفکیک در مدل تعریف شده است. پل واحد اکسیژن با کاهش سطح مقطع و شکل کانال از دوزنقه به مستطیل است که تصویر پل و مقطع کالورت در مدل در شکل ۷ نشان داده شده است. پل بعدی در مسیر

۰/۰۴ و بیشینه ۰/۰۵ ارائه شده است که مقدار بیشینه ۰/۰۵ به عنوان تخمین اولیه ضریب زبری مانینگ رودخانه شور انتخاب شده است. به منظور تدقیق تخمین اولیه ضریب زبری مانینگ از روش کاون^۱ نیز استفاده شده است که مقدار محاسبه شده از روش کاون با تخمین اولیه مقدار ضریب زبری یکسان و برابر ۰/۰۵ است که در مدل هیدرولیکی نیز اعمال شد.

با توجه به عدم وجود داده‌های مشاهده‌ای کافی و قابل اتکا از دبی و تراز آب در مقاطع رودخانه و مسیرهای اصلی انتقال سیلاب، امکان کالیبراسیون کمی مدل هیدرولیکی بر اساس مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌ای فراهم نبوده است؛ بنابراین، تدقیق ضریب زبری مانینگ در این پژوهش بر اساس مشخصات فیزیکی و شرایط مسیرهای جریان و با استفاده از دو روش تجربی فوق انجام شد و از کالیبراسیون مبتنی بر داده‌های مشاهده‌ای خودداری شد.

۳-۴- تعیین شرایط مرزی

پس از تهیه ضرایب زبری منطقه موردنظر، برای پیش‌بینی مشخصه‌های جریان در رودخانه، آبراهه‌ها، مسیل‌ها و کانال‌های موجود در محدوده مطالعاتی نیاز به تعیین شرایط مرزی منطبق با واقعیت بود. شرایط مرزی، معرف ورودی و خروجی جریان در بالادست و پایین‌دست بازه مورد مطالعه بود. با توجه به اطلاعات موجود برای تعیین شرایط مرزی به منظور مدل‌سازی سیلاب در طول بازه مورد مطالعه در بالادست و پایین‌دست از روش عمق نرمال استفاده شد. در این روش، مدل برای محاسبه عمق نرمال جریان از شیب‌خط انرژی استفاده می‌کند. مقدار این شیب با پذیرفتن خطای ناچیز که از یکنواخت فرض کردن جریان وارد محاسبات می‌شود برابر با شیب طبیعی زمین در نظر گرفته می‌شود.

علاوه بر شرایط مرزی عمق نرمال در بالادست و پایین‌دست، به منظور شبیه‌سازی بهتر و دقیق‌تر رژیم مختلط (هر دو شرط مرزی)، مرز فیزیکی بالادست (جریان فوق بحرانی) و مرز فیزیکی پایین‌دست (جریان زیر بحرانی) نیز استفاده شد. با مقایسه نتایج مدل هیدرولیکی تحت هردو شرایط مرزی، شرایط بحرانی به عنوان ملاک کنترل سیلاب در نظر گرفته شد.

¹ Cowan



(Khajeh Nasiri and Saneei, 2020, Abbassi et al., 2021). این نرم افزار یکی از زیرمجموعه های نرم افزار Civil 3D است که توسط شرکت آمریکایی Autodesk توسعه یافته است. شالوده اصلی آن بر پایه نرم افزار EPA-SWMM بنا شده است و علاوه بر داشتن گرافیک فوق العاده بالا و کاربر دوست بودن به راحتی با نرم افزارهای دیگر مانند Autocad، GIS، Excel، PDF و همچنین سایر نسخه های SWMM به راحتی به تبادل اطلاعات می پردازد. نرم افزار به طور هم زمان می تواند مدل پیچیده هیدرولوژی و هیدرولیکی کیفیت آب را بررسی کند.

به منظور طراحی دقیق شبکه جمع آوری آب های سطحی در مناطق شهری، حوضه بندی محدوده مورد مطالعه با توجه به عوامل مختلفی مانند مسیر آبراهه ها، کاربری زمین، شیب و رقوم ارتفاعی و بازدید میدانی انجام شد و در نتیجه، محدوده به ۴۷ زیرحوضه تقسیم شد که بزرگ ترین آن حوضه با مساحت حدود ۲۲/۹۶ هکتار و کوچک ترین آن حوضه با مساحت ۰/۱۳ هکتار بود.

کانال ترشاب در مقابل واحد نظارت است که در شکل ۸ تصویری از نمای پل و شبیه سازی آن در مدل هیدرولیکی نشان داده شده است. پل سوم در محل عبور ریل قطار است که در شکل ۹ نمایی از پل همراه با تصویر پل و کالورت نظیر آن در مدل نشان داده شده است. ابعاد و جزییات تمامی مقاطع در مدل هیدرولیکی وارد شده است.

۴- مدل سازی شبکه جمع آوری آب های سطحی (SSA)

با هدف طراحی الگوی مطلوب شبکه جمع آوری آب های سطحی از مدل سازی سیلاب شهری استفاده شده است. در این مدل ها، بررسی حوضه های آبریز از جنبه های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی ضروری است؛ به طوری که در بخش هیدرولوژیکی میزان تبدیل رگبار به رواناب و در بخش هیدرولیکی نحوه انتقال جریان در مجاری با در نظر گرفتن ویژگی هایی نظیر سطح مقطع، شیب، زبری و روش روندیابی تحلیل می شود. از میان مدل های موجود مدل SSA یکی از مدل های پرکاربرد در مطالعات سیلاب های شهری به شمار می رود

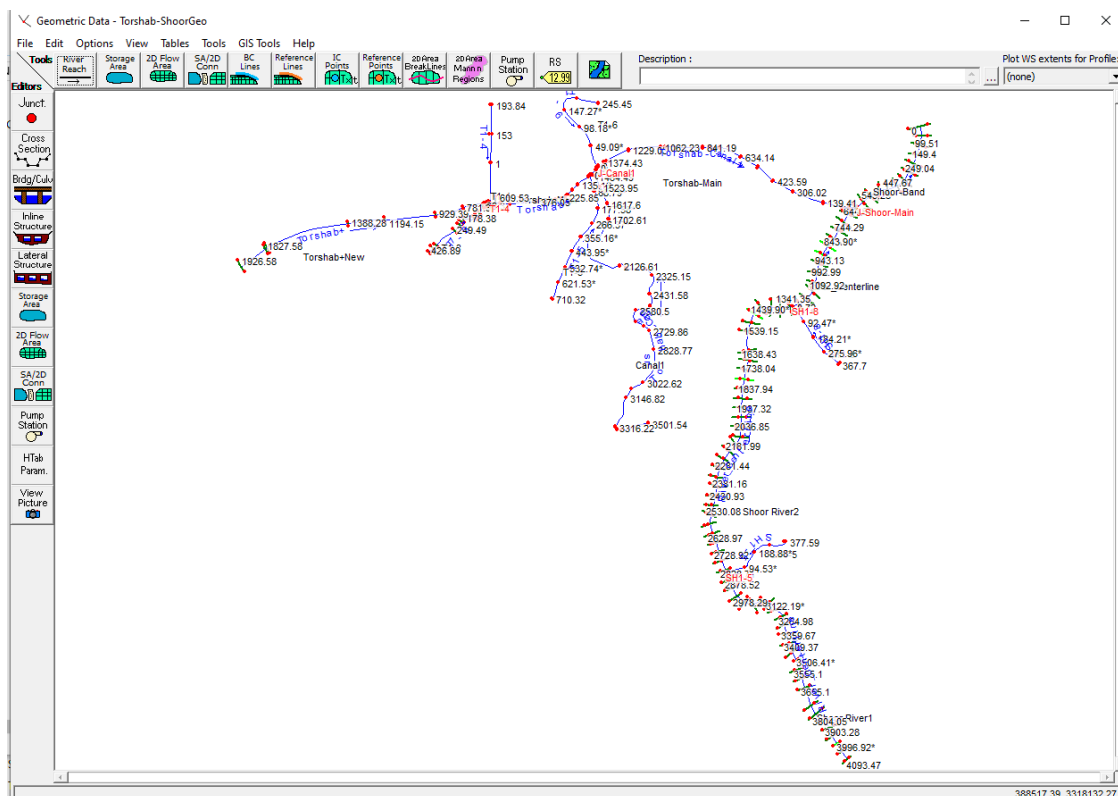


Fig. 6. Layout of the cross-sections of the Shur River, the Torshab channel, and the Sangshekan channel in the HEC-RAS model

شکل ۶- نمایی از مسیر و موقعیت مقاطع عرضی رودخانه شور، کانال ترشاب و کانال سنگشکن در محیط نرم افزار HEC-RAS

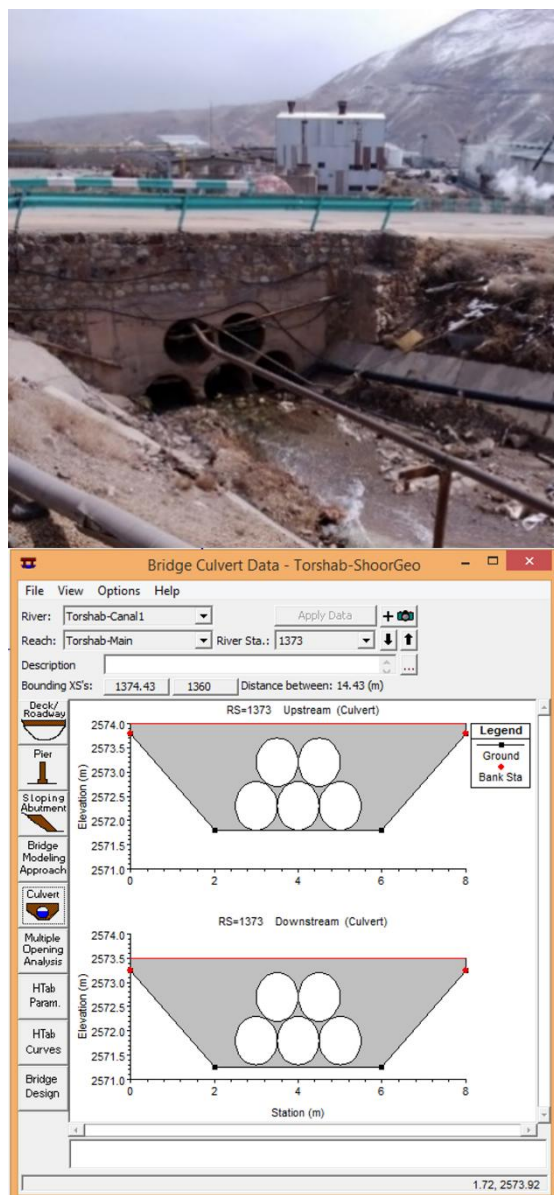


Fig. 8. Field view and HEC-RAS model representation of the Nezarat Bridge

شکل ۸- نمایی از پل مقابل نظارت در بازدید میدانی و در محیط نرم افزار HEC-RAS

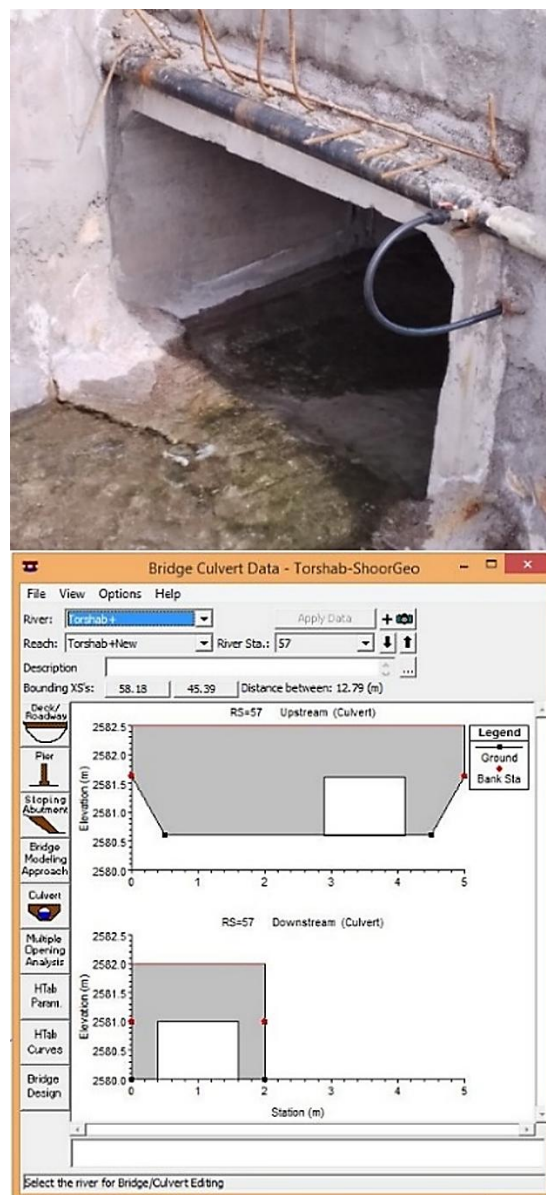


Fig. 7. Field view and HEC-RAS model representation of the Oxygen Bridge

شکل ۷- نمایی از پل اکسیژن در بازدید میدانی و در محیط نرم افزار HEC-RAS

وابسته به شیب زمین و میزان ناصافی و عوارض روی آن بین ۵ تا ۳۰ دقیقه انتخاب می کنند. در منطقه مس سرچشمه با توجه به ویژگی های منطقه مورد مطالعه زمان ورود آب به شبکه بین ۵ تا ۱۰ دقیقه و متناسب با طول آبراهه منظور شد. برای محاسبه زمان حرکت آب در کانال اصلی (Tf) با در نظر گرفتن شیب طولی ۱ درصد سرعت متوسط معادل ۴/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

به منظور محاسبات هیدرولوژیکی، روش های محاسباتی متعددی در مدل SSA لحاظ شده که در این پژوهش از روش HEC-1 و همچنین از روش بی بعد SCS به منظور تبدیل بارش به رواناب استفاده شد. میزان تلفات بارش نیز با توجه به شماره منحنی CN محاسبه شد. زمان تمرکز برای حوضه های درون مجتمع از روش حفاظت خاک آمریکا استفاده شد. این مدت زمان را به طور کلی

۰/۰۱۲ و ۰/۰۳۳ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که به دلیل عدم وجود داده‌های مشاهده‌ای با جزئیات مکانی و زمانی کافی از جریان، تراز آب و عملکرد هیدرولیکی کانال‌ها و اجزای شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی در محدوده صنعتی، امکان کالیبراسیون کمی مدل SSA بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده فراهم نبود. از این رو، مدل بر اساس اطلاعات موجود شامل هندسه و مشخصات کانال‌ها و سازه‌ها، شرایط مرزی و داده‌های هیدرولوژیکی طراحی تنظیم شده و به منظور ارزیابی عملکرد شبکه موجود و بررسی کفایت و عملکرد الگوی پیشنهادی استفاده شد. این محدودیت در تفسیر نتایج مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفته است.

۵- یافته‌ها و بحث

با توجه به ماهیت به هم پیوسته مسئله مدیریت سیلاب در محدوده مورد مطالعه، نتایج حاصل از ارزیابی مسیرهای اصلی انتقال سیلاب و بررسی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی در قالب یک چارچوب یکپارچه استفاده شدند. در این چارچوب، پس از تعیین سیلاب طراحی و بررسی شرایط هیدرولوژیکی و هیدرولیکی محدوده، عملکرد مسیرهای اصلی انتقال سیلاب با استفاده از مدل یک بعدی HEC-RAS و وضعیت شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی با استفاده از مدل SSA ارزیابی شد. نتایج این دو بخش، شامل شناسایی نقاط بحرانی و گلوگاه‌های هیدرولیکی در مسیرهای اصلی سیلاب و شناسایی نواقص و محدودیت‌های ظرفیت شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی، در ادامه با یکدیگر تلفیق شدند. بر این اساس، راهکارهای کنترل و حفاظت در مسیرهای اصلی سیلاب و اصلاح و توسعه شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به صورت هماهنگ تدوین شدند. چارچوب کلی این رویکرد در شکل ۱۰ ارائه شده است.

۵-۱- نتایج ارزیابی هیدرولیکی، شناسایی نقاط بحرانی و ارائه راهکارهای کنترل سیلاب

تجارب مطالعاتی و مدیریتی کشورهای مختلف نشان می‌دهد که اولین گام برای کاهش آثار زیان بار سیل، شناخت مناطق سیل‌خیز و دسته‌بندی این مناطق از لحاظ میزان خطر سیل‌گیری است تا بتوان بر اساس مطالعات مربوطه، تصمیم‌گیری اصولی و بهینه کرد و آثار زیان بار سیل را تا حد ممکن به حداقل رسانید. در همین راستا با استفاده از نتایج مدل هیدرولیکی و استخراج ظرفیت آبگذری

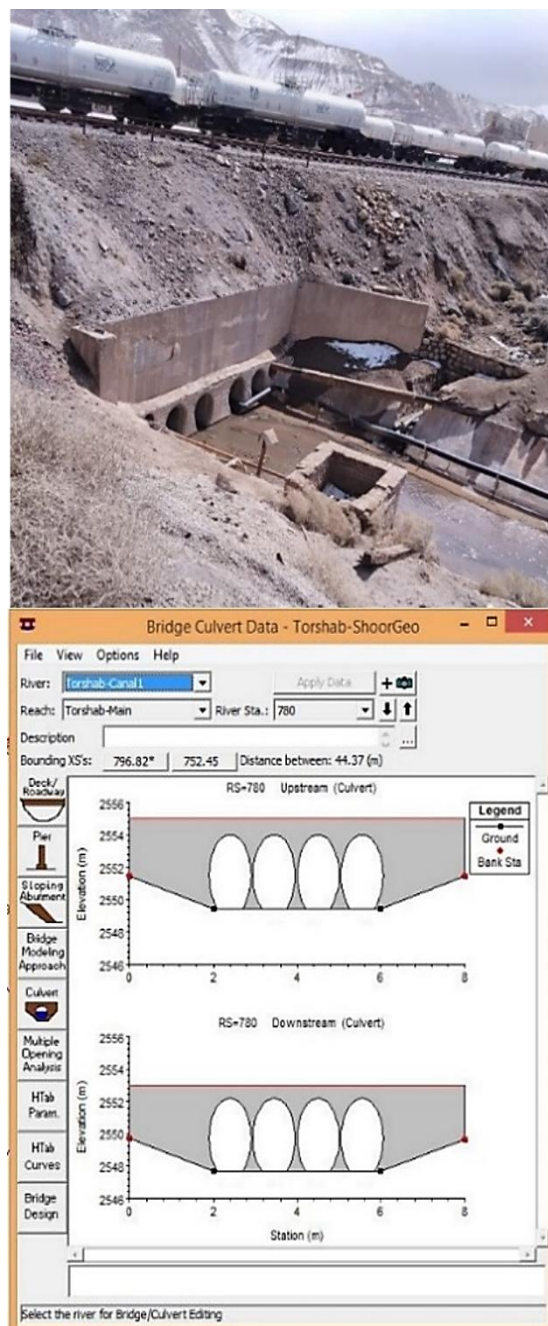


Fig. 9. Field view and HEC-RAS model representation of the Railway Bridge

شکل ۹- نمایشی از پل راه‌آهن در بازدید میدانی و در محیط نرم‌افزار HEC-RAS

همچنین مجراهای وضعیت موجود شبکه آب‌های سطحی برای کانال‌ها از نوع بتنی و برای لوله‌ها از جنس پلی‌اتیلن بود. در برخی قسمت‌ها کف کانال از جنس بتنی و دیواره‌های کانال از قلوه‌سنگ تشکیل شده که ضریب زبری مانینگ به ترتیب مقدار ۰/۰۱۳،

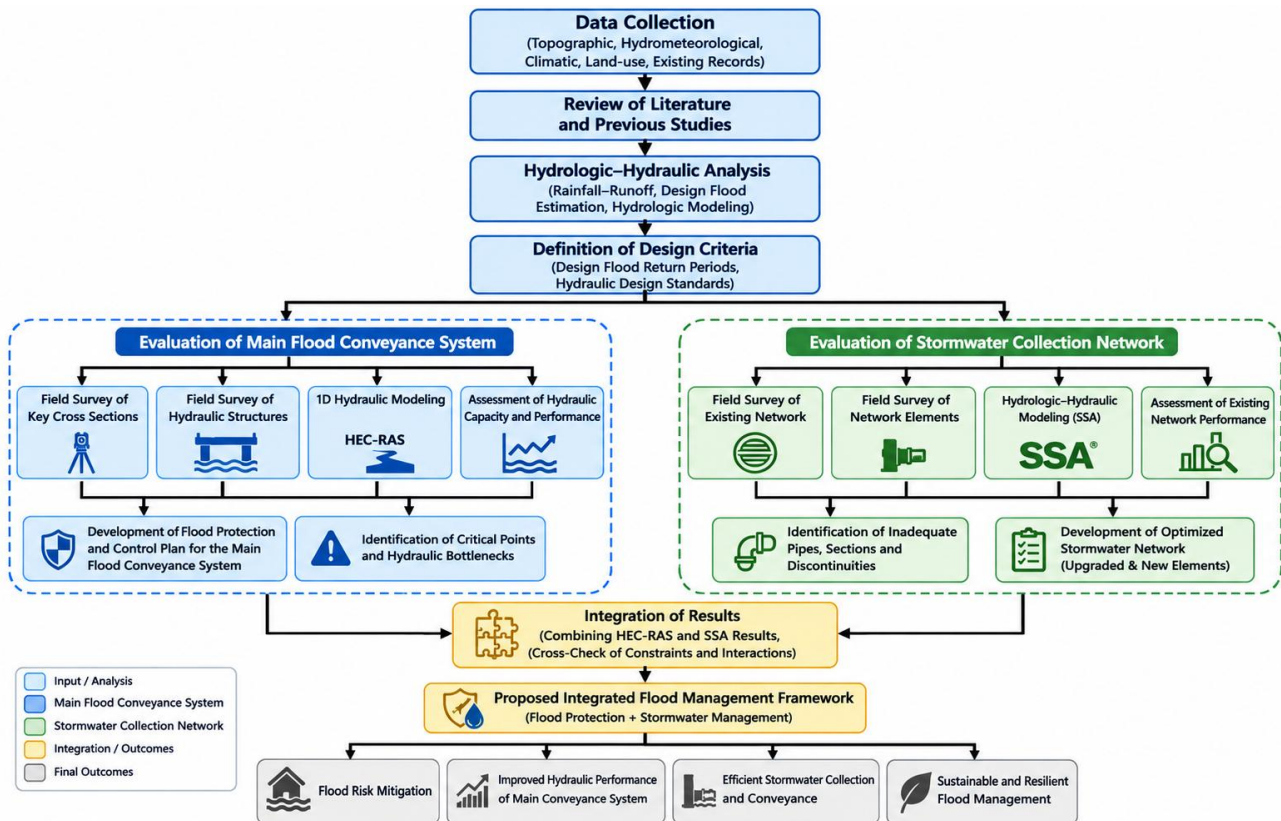


Fig. 10. Conceptual framework of the proposed integrated flood-management approach

شکل ۱۰- چارچوب مفهومی رویکرد یکپارچه پیشنهادی برای مدیریت سیلاب

۱۴۰۱، آغاز سیلاب از محدوده باغ جلیلی و در مدت زمان بسیار کم پس از شروع بارش بوده است. با بالا زدن آب در زیرگذر جاده در این محدوده و با سوار شدن جریان سیلاب بر روی جاده ورودی به داخل مجتمع و افزوده شدن رواناب حوضه‌های آبریز دیگر در طی مسیر، قدرت سیلاب افزایش یافته و به تبع آن آثار مخربی نیز برجای گذاشته است.

کانال ترشاب در مجاورت واحد اکسیژن مطابق شکل ۷ است که با توجه به کاهش ناگهانی و شدید ابعاد مقطع کانال در این نقطه منجر به بالازدگی آب و خروج جریان آب از کانال خواهد شد. مطابق با گزارش‌های موجود در سیلاب سال ۱۴۰۱ نیز در این مقطع جریان سیلاب از کانال خارج و به سمت مجتمع حرکت کرده است. نتایج مدل هیدرولیکی نیز بالازدگی جریان مطابق با شکل ۱۲ را نشان می‌دهد.

مطابق با نتایج مدل هیدرولیکی، با بررسی عملکرد سامانه کنترل سیلاب در وضع موجود، ضمن بررسی نقاط بحرانی در زمان وقوع سیلاب و شرایط زیرساخت‌های کنترل سیلاب، نقشه طرح‌های

رودخانه، مسیل‌ها و آبراهه‌ها در محدوده مطالعاتی و همچنین بررسی مناطق آسیب‌دیده در سیلاب‌های پیشین، نقاط بحرانی در زمان وقوع سیلاب شناسایی و تعیین شد. از جمله این مناطق عبارت‌اند از محدوده باغ جلیلی، پل اکسیژن، پل نظارت و کانال سنگ‌شکن که در ادامه به شرح دو مورد پرداخته شده است.

باغ جلیلی واقع در حریم آبراهه حوضه‌های آبریز T1-1 و T1-2 است (شکل ۱۱) که در مجموع سیلاب ۲۳/۴۷ مترمکعب بر ثانیه در سیلاب با دوره بازگشت ۵۰۰ سال در محدوده باغ جلیلی جریان خواهد یافت که هدایت و کنترل این سیلاب ضروری است. مسیر عبور جریان پس از محدوده باغ جلیلی به صورت خط‌چین قرمز رنگ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود جریان سیلاب در دو مقطع از طریق لوله زیرگذر از جاده عبور خواهد کرد که با توجه به حجم سیلاب عبوری و میزان پرشدگی لوله‌های زیرگذر جاده، در حدفاصل پایین‌دست باغ جلیلی تا رستوران شقایق احتمال بالازدگی جریان و ورود سیلاب به جاده وجود خواهد داشت. مطابق با گزارش‌های موجود از سیلاب سال

و ترسیم مناطق در معرض سیلاب را نشان دادند (Qian et al., 2024).

در پژوهش حاضر نیز HEC-RAS برای ارزیابی ظرفیت آبگذری رودخانه شور، مسیل ترشاب و کانال‌های اصلی و شناسایی گلوگاه‌های هیدرولیکی به کار گرفته شد. با این حال، تفاوت مهم پژوهش حاضر با این پژوهش‌ها آن بود نتایج مدل‌سازی صرفاً به تهیه پهنه سیلابی محدود نشده، بلکه مستقیماً برای تعیین نقاط بحرانی و تدوین اقدامات اصلاحی و حفاظتی در یک مجتمع صنعتی و معدنی استفاده شد.

۵-۲- نتایج ارزیابی و طراحی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی مجتمع

یکی از مهم‌ترین اقدامات مدیریتی برای کنترل سیلاب مناطق درون‌شهری احداث شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی است که می‌تواند ریسک هزینه‌های جانی و مالی ناشی از سیلاب را کاهش دهد. به دنبال سیلاب ۸ مرداد سال ۱۴۰۱ و عدم وجود سیستم مناسب کنترل و مهار سیلاب در منطقه شهری مجتمع مس سرچشمه خسارات گسترده‌ای در بخش‌های مختلف مجموعه به وجود آمد و

پیشنهادی به منظور کنترل و هدایت سیلاب در محدوده مجتمع مس سرچشمه در شکل ۱۳ نمایش یافته است. طرح‌های پیشنهادی باهدف اصلاح ضعف‌های طراحی یا بهره‌برداری در شرایط موجود و با بررسی تأثیر انسداد در زیرگذرها بر عملکرد کل سامانه و همچنین هدایت صحیح رواناب در نقاط بحرانی در شرایط وقوع سیلاب ارائه شده است.

نتایج این پژوهش از نظر نقش مدل‌سازی هیدرولیکی در شناسایی نقاط بحرانی و ارزیابی عملکرد مسیرهای انتقال سیلاب، با یافته‌های پژوهش‌های پیشین هم‌خوانی دارد. در مطالعات مبتنی بر HEC-RAS، از این مدل عمدتاً برای شبیه‌سازی رفتار جریان، تعیین تراز آب و شناسایی پهنه‌ها و نواحی در معرض خطر سیلاب استفاده شده است.

به عنوان نمونه، در پژوهش روح‌الهی و همکاران با استفاده از مدل HEC-RAS به شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه و پهنه‌بندی سیلاب پرداخته و بر نقش این مدل در شناسایی مناطق مستعد خطر تأکید کرده‌اند (Rouhollahi et al., 2023). همچنین، کیان و همکاران با استفاده از HEC-RAS در یک محدوده دارای زیرساخت‌های حیاتی، اهمیت مدل‌سازی هیدرولیکی برای شناسایی

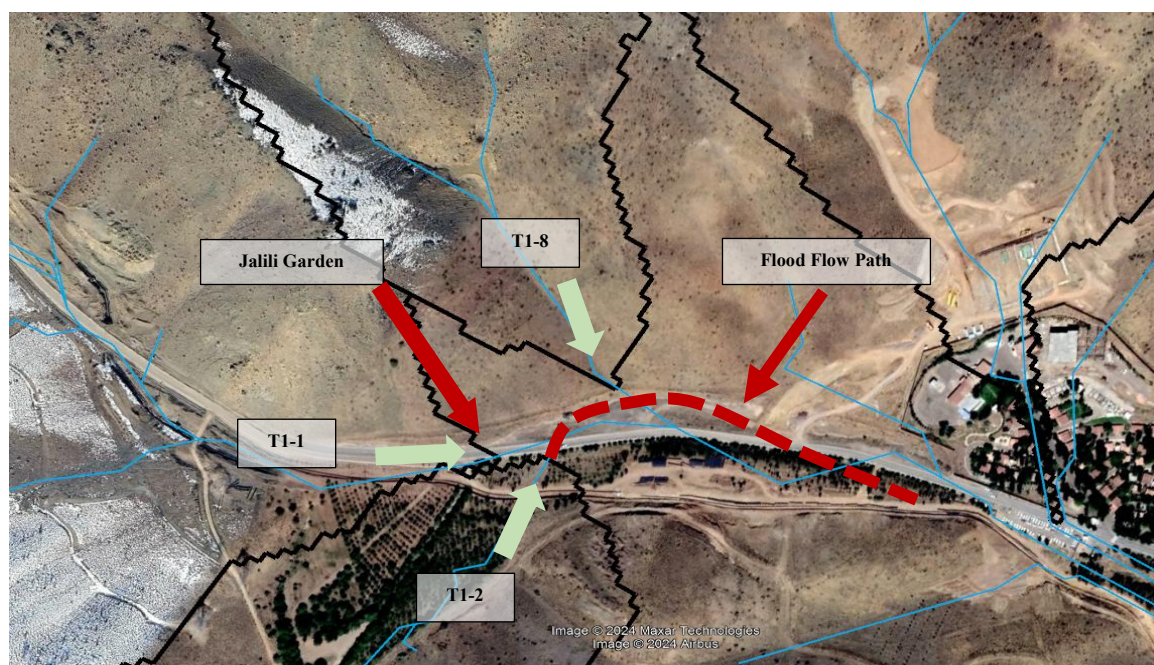


Fig. 11. Location of Jalili Garden and the flood flow path toward the Shaqhayegh Guest House

شکل ۱۱- موقعیت باغ جلیلی شرایط و مسیر عبور سیلاب تا مهمانسرای شقایق

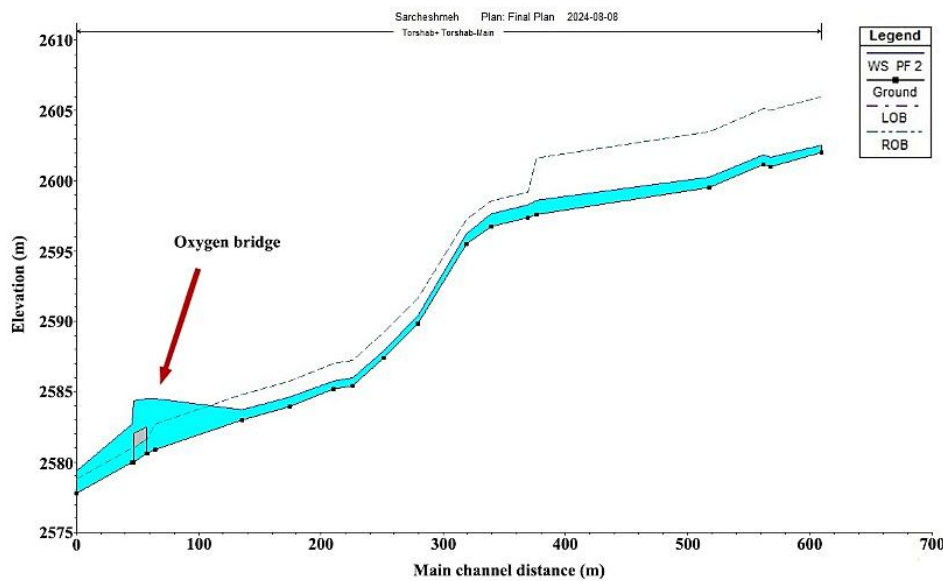


Fig. 12. Water surface profile in the Torshab Channel at the Oxygen Bridge for the 500-year return period flood

شکل ۱۲- نیم‌رخ سطح آزاد در کانال ترشاب در محدوده پل اکسیژن در سیلاب با دوره بازگشت ۵۰۰ سال

کاهش ظرفیت هیدرولیکی کانال‌های موجود و همچنین عدم انتقال مناسب رواناب می‌شود. به‌منظور ایمنی شبکه لازم است تمامی لوله‌های تأسیساتی از شبکه جدید حذف شده و به مکان دیگری انتقال داده شود.

- تخلیه پساب‌های فرایندی

با توجه به وجود واحدهای عملیاتی در سطح مجتمع مس سرچشمه و تولید پساب‌های ناشی از فعالیت آن‌ها، برخی از واحدها، پساب‌های فرایندی تولید شده را به کانال‌های آب سطحی موجود تخلیه می‌کند که این امر دو معضل را در پی خواهد داشت. معضل اول، عدم کفایت ظرفیت هیدرولیکی مجرا در حین بارندگی در حضور پساب‌های فرایندی است و معضل دوم آلاینده‌های ناشی از پساب‌های فرایندی است که سبب فرسایش زود هنگام کف و جداره‌های کانال‌های بتنی و همچنین افزایش هزینه‌های مرمت و نگهداری کانال‌ها می‌شود. به‌منظور اعمال این مورد در این پژوهش، ۵ درصد پرشدگی کانال‌های آب سطحی ناشی از تخلیه پساب‌های فرایندی در مدل لحاظ شد.

- تخلیه زهکش‌های زیرسطحی به شبکه

در محدوده مورد مطالعه زهکش‌های زیرسطحی به‌منظور کنترل سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و حفظ ایمنی سازه‌های صنعتی موجود طراحی شدند که برخی از این زهکش‌ها مستقیماً به رودخانه

منجر به اختلال و توقف کوتاه‌مدت خط تولید کارخانه شد؛ بنابراین با توجه به اهمیت استراتژیک و اقتصادی مجتمع مس سرچشمه طراحی و احداث شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به‌منظور کنترل سیلاب شهری باید انجام شود. با توجه به بررسی شبکه آب‌های سطحی در وضع موجود و بر اساس بازدید میدانی از وضعیت شبکه موجود آب‌های سطحی، عوامل منجر به عدم کارکرد صحیح شبکه وضع موجود به شرح زیر است:

- ناپیوستگی شبکه

یکی از مشکلات شبکه آب‌های سطحی وضع موجود منقطع بودن شبکه و عدم وجود نقاط تخلیه‌گاه مناسب است که این امر کارایی شبکه وضع موجود را به شدت کاهش می‌دهد. حذف و تخریب کانال‌ها در برخی زیرحوضه‌ها پیوستگی شبکه را بر هم زده و عملکرد آن را با مشکل مواجه کرده است. بدین منظور احداث کانال‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی در قسمت‌های منقطع شده شبکه وضع موجود و همچنین در نظر گرفتن نقاط تخلیه‌گاهی مناسب برای شبکه از راهکارهایی است که برای رفع مشکل ناپیوستگی شبکه در نظر گرفته شده است.

- لوله‌های تأسیساتی

عبور لوله‌های تأسیساتی همچون کابل‌های برق از مسیر کانال‌ها در زمان بارندگی نه‌تنها خطرات جانی به دنبال داشته بلکه منجر به



Fig. 13. Layout of the proposed flood control and mitigation measures along the Shur River and the streams

شکل ۱۳- نقشه جانمایی طرح‌های کنترل و مهار سیلاب در رودخانه شور و مسیل‌ها

برداشت شده از کانال‌های وضع موجود ابعاد مجراها برای اتصال به شبکه تعیین شد و سپس سایر کانال‌ها (کانال‌های جدید) با مقاطع بهینه در شبکه در نظر گرفته شدند.

در ادامه با توجه به شرایط سیلاب طرح، کانال‌های وضع موجودی که در داخل شبکه جوابگوی سیلاب طرح (دوره بازگشت ۲۵ ساله) بودند بدون تغییر و ابعاد مجراهای وضع موجود که ظرفیت هیدرولیکی لازم برای عبور سیلاب طرح را نداشتند افزایش داده شدند. همچنین در نقاطی از شبکه که رواناب زهکش‌های آب زیرزمینی به آن متصل می‌شود دبی خروجی از زهکش‌ها تحت عنوان جریان خارجی در مدل در نظر گرفته شد. به این ترتیب، طول شبکه نسبت به وضع موجود حدود ۹۰/۵ درصد افزایش یافت و حدود ۵۱ درصد از کانال‌های موجود در طرح پیشنهادی حفظ و ادغام شدند. همچنین حداکثر درصد پرتلاشی در طراحی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی ۷۵ درصد است.

نتایج مربوط به شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی با پژوهش‌های انجام شده در زمینه ارزیابی و بازسازی شبکه‌های زهکشی شهری نیز هم‌خوانی دارد (Yazdi et al., 2018) که روش‌های بهینه‌سازی

شور و کانال ترشاب متصل می‌شوند، اما برخی از آن‌ها نیز به کانال‌های آب‌های سطحی تخلیه می‌شوند و در نتیجه ظرفیت هیدرولیکی شبکه را در زمان بارندگی تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. بدین منظور موقعیت نقاط خروجی زهکش‌ها در سطح مجتمع مس سرچشمه و مقدار دبی حداقل و حداکثر خروجی از آن‌ها تعیین شد تا به صورت دبی پایه در داخل شبکه الگوی مطلوب در نظر گرفته شود.

با توجه به موارد مطرح شده، طرح الگوی مطلوب از شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به منظور عملکرد مناسب در سیلاب طراحی بر مبنای استفاده حداکثری از ظرفیت کانال‌های وضع موجود مطابق با شکل ۱۴ ارائه شده است که مزایایی همچون کاهش هزینه‌های ساخت شبکه جدید جمع‌آوری آب‌های سطحی و افزایش سرعت اجرای پروژه را به دنبال دارد. شبکه موجود جمع‌آوری آب‌های سطحی شامل ۴۷ کانال با طول تقریبی ۸۱۹۰ متر بود که بر اساس نتایج طراحی، شبکه پیشنهادی به طول تقریبی ۱۵۶۰۰ متر توسعه یافت و ۲۴ کانال از کانال‌های موجود در ساختار شبکه پیشنهادی استفاده شد. به این صورت که ابتدا مطابق با اطلاعات

نمونه، عابدین و مک‌ویکار، با توسعه چارچوب SWMM-RASpy، مدل SWMM را با مدل دویعدی HEC-RAS تلفیق کردند و نشان دادند که ارتباط بین شبیه‌سازی تولید و انتقال رواناب و مدل‌سازی هیدرولیکی می‌تواند چارچوب جامع‌تری برای ارزیابی خطر سیلاب فراهم کند (Abedin and MacVicar, 2025).

از سوی دیگر، پژوهش خاتونی و همکاران با تلفیق SWMM و HEC-RAS-2D نشان داد که ترکیب مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی می‌تواند در شناسایی دقیق‌تر رفتار مکانی و زمانی سیلاب و تعیین مناطق دارای خطر بیشتر مؤثر باشد (Khatooni et al., 2025).

رویکرد پژوهش حاضر از این نظر با پژوهش‌های جدید هم‌راستا بود، با این تفاوت که در این پژوهش، HEC-RAS و SSA به‌عنوان دو مدل مکمل برای دو مؤلفه متفاوت سامانه سیلاب، یعنی مسیرهای اصلی انتقال سیلاب و شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی، به کار گرفته شدند و نتایج آن‌ها در قالب یک چارچوب یکپارچه مدیریت سیلاب در یک مجتمع معدنی-صنعتی تلفیق شد.

چندهدفه نشان دادند که کمبود ظرفیت هیدرولیکی شبکه‌های موجود می‌تواند یکی از عوامل اصلی بروز آب‌گرفتگی باشد و اصلاح و بازسازی شبکه می‌تواند عملکرد آن را بهبود دهد. در پژوهش حاضر نیز ارزیابی وضعیت موجود نشان داد که ناپیوستگی شبکه، محدودیت ظرفیت هیدرولیکی، تداخل با تأسیسات و ورود برخی جریان‌های جانبی، عملکرد شبکه موجود را در شرایط سیلابی محدود می‌کند.

در نهایت نتایج این پژوهش نشان داد که آسیب‌پذیری سامانه در برابر سیلاب، حاصل برهم‌کنش محدودیت‌های هیدرولیکی مسیرهای اصلی جریان و نارسایی‌های موجود در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی است. بر این اساس، نتایج مدل‌های HEC-RAS و SSA به‌صورت مکمل استفاده شدند تا نقاط بحرانی سامانه شناسایی و مبنایی برای اصلاح و توسعه شبکه و بهبود مدیریت رواناب در محدوده مورد مطالعه فراهم شود.

پژوهش‌های اخیر نیز بر ضرورت تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی برای ارتقای ارزیابی خطر سیلاب تأکید کرده‌اند. برای

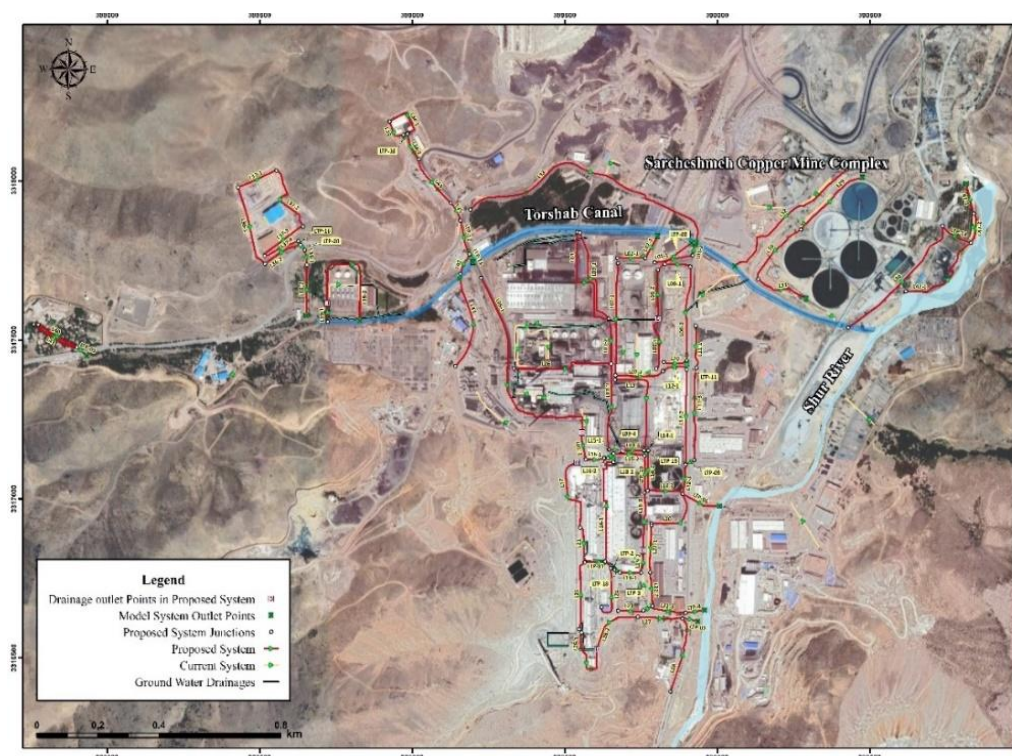


Fig. 14. Layout of the proposed stormwater collection system at the Sarcheshmeh copper complex

شکل ۱۴- نقشه الگوی مطلوب شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی مجتمع مس سرچشمه

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب یکپارچه برای مدیریت سیلاب در محدوده مجتمع مس سرچشمه انجام شد. نتایج ارزیابی هیدرولیکی رودخانه شور، مسیل ترش‌آب و سایر آبراهه‌های اصلی نشان داد که اگرچه زیرساخت‌های موجود در هدایت جریان نقش مؤثری دارند، اما محدودیت ظرفیت آب‌گذری، رسوب‌گذاری و انسداد موضعی در مسیر جریان، خطر افزایش تراز آب و وقوع سیلاب را در بخش‌هایی از محدوده مطالعه افزایش می‌دهد. بر این اساس، مجموعه‌ای از اقدامات اصلاحی، سازه‌های حفاظتی و راهکارهای مدیریتی متناسب با شرایط هر محدوده پیشنهاد شد تا ضمن افزایش ظرفیت انتقال جریان، ایمنی زیرساخت‌های موجود نیز ارتقا یابد.

بررسی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی نیز نشان داد که شبکه موجود به دلیل محدودیت ظرفیت، ناپوستگی مسیرهای انتقال، تداخل با تأسیسات و تخلیه هم‌زمان برخی پساب‌های فرایندی، پاسخگوی هدایت رواناب‌های ناشی از سیلاب طراحی نیست. نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار SSA نشان داد که توسعه و بهینه‌سازی شبکه پیشنهادی می‌تواند ظرفیت انتقال رواناب را به‌طور قابل توجهی افزایش داده، نارسایی‌های موجود را برطرف کرده و عملکرد سیستم زهکشی را در شرایط سیلابی بهبود بخشد. در نهایت، تلفیق اقدامات حفاظتی در مسیرهای اصلی جریان با طراحی شبکه بهینه جمع‌آوری آب‌های سطحی، یک سامانه منسجم برای مدیریت سیلاب و رواناب‌های سطحی در محدوده مجتمع مس سرچشمه فراهم ساخت که نقش مؤثری در کاهش خطر سیلاب، افزایش ایمنی زیرساخت‌های حیاتی و ارتقای تاب‌آوری مجتمع در برابر رخدادهای حدی دارد. نوآوری این پژوهش در ارائه رویکردی تلفیقی بود که در آن،

مدیریت سیلاب در دو سطح حوضه آبریز (رودخانه و مسیل‌ها) و سطح محلی (شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی) به‌صورت هم‌زمان و با استفاده از دو مدل مکمل HEC-RAS و SSA انجام می‌شود. این رویکرد می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی، طراحی و تصمیم‌گیری در مدیریت سیلاب مجتمع‌های معدنی و سایر مناطق صنعتی باشد و با ایجاد پیوند میان مدیریت جریان در آبراهه‌های اصلی و سامانه‌های جمع‌آوری رواناب، گامی مؤثر برای افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها در برابر سیلاب‌های آینده محسوب شود.

از محدودیت‌های اصلی این پژوهش می‌توان به عدم وجود داده‌های مشاهده‌ای کافی و با تفکیک زمانی و مکانی مناسب از دبی، تراز آب و عملکرد هیدرولیکی مسیرهای اصلی سیلاب و شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی اشاره کرد که امکان کالیبراسیون و اعتبارسنجی کمی مدل‌ها را محدود کرده است. در پژوهش‌های آینده، توسعه شبکه پایش بارش، دبی و تراز آب در مسیرهای اصلی سیلاب و همچنین پایش جریان در کانال‌ها و اجزای شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی پیشنهاد می‌شود تا امکان کالیبراسیون و اعتبارسنجی دقیق‌تر مدل‌ها فراهم شود. همچنین، با دسترسی به داده‌های مشاهده‌ای کافی، انجام تحلیل عدم قطعیت و حساسیت پارامترهای مدل و بررسی سناریوهای تغییر اقلیم و بارش‌های حدی می‌تواند به افزایش قابلیت اطمینان نتایج و بهبود برنامه‌ریزی مدیریت سیلاب در محدوده مجتمع کمک کند.

۷- قدردانی

نویسندگان به این وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از امور آب و بازیافت مجتمع معدنی مس سرچشمه به دلیل حمایت، همکاری و فراهم‌سازی اطلاعات و بسترهای لازم برای انجام مطالعات کنترل سیلاب محدوده معدن مس سرچشمه اعلام می‌دارند.

References

- Abbassi, P., Aminnejad, B., Ahmadi, H. and Heydari, M., 2021. Measuring the efficiency of the urban major drainage networks using storm and sanitary analysis software (case study: west of Tehran). *3rd National Conference on Knowledge-Based Urban Development and Architecture*. Tehran, Iran. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Abedin, S. J. H. and MacVicar, B. J., 2025. Framework for stochastic urban flood hazard mapping using coupled and industry-standard hydrologic and hydraulic models. *Environmental Modelling and Software*, 193, 106632. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106632>.

- Agonafir, C., Lakhankar, T., Khanbilvardi, R., Krakauer, N. Radell, D. et al., 2023. A review of recent advances in urban flood research. *Water Security*, 19, 100141. <https://doi.org/10.1016/J.WASEC.2023.100141>.
- Awah, L. S., Belle, J. A., Nyam Y. S. and Orimoloye, I. R., 2024. A systematic analysis of systems approach and flood risk management research: trends, gaps, and opportunities. *International Journal of Disaster Risk Science*, 15(1), 45-57. <https://doi.org/10.1007/s13753-024-00544-y>.
- Bhatt, G. D., Sinha, K., Deka, P. K. and Kumar, A., 2014. Flood hazard and risk assessment in Chamoli District, Uttarakhand using satellite remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(8), 9. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2014.0308039>.
- Dharmarathne, G., Waduge, A. O., Bogahawaththa, M., Rathnayake, U. and Meddage, D. P. P., 2024. Adapting cities to the surge: a comprehensive review of climate-induced urban flooding. *Results in Engineering*, 22, 102123. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102123>.
- Ghadami, S. M. and Hosseini, S. M., 2025. Integration of GIS and hydraulic models in flood zoning - case study: Darungar River in North Khorasan. *The 5th Iranian Hydraulics Conference*, Kerman, Iran. (In Persian). [Link]
- Grigg, N. S., 2024. Two decades of integrated flood management: status, barriers, and strategies. *Climate*, 12(5), 67. <https://doi.org/10.3390/cli12050067>.
- Ilyati, I. and Akbari, M., 2024. Flood risk zoning in vulnerable components of the water supply system of Kashan City. *Journal of Water and Wastewater*, 35(4), 113-131. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.502819.3463>.
- Khajeh Nasiri, A. and Saneei, E., 2020. Evaluation of detention basins performance in urban flood management and control using integrated model (SSA) storm and sanitary analysis and GIS (case study: Ma'va River). *The 19th Iranian Hydraulics Conference*, Mashhad, Iran. (In Persian). [Link]
- Khatooni, K., Hooshyaripor, F., Malek Mohammadi, B., Noori, R., 2025. A new approach for urban flood risk assessment using coupled SWMM-HEC-RAS-2D model. *Journal of Environmental Management*, 374, 123849. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123849>.
- Khoshoei, M., Esteki, E. and Amini, S., 2024. Floodplain zoning of river buffer zone in Zayandeh-Rud basin using HEC-HMS and HEC-RAS. *Proceedings of the 1st National Conference on Hydrology and Water Resources*, Ahvaz, Iran. (In Persian). [Link]
- Khoshoei, M., Esteki, E. and Amini, S., 2025. Flood hazard zoning of Kashan County based on analytical hierarchy process using geographic information system. *Journal of Water and Wastewater*, 36(2), 43–62. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.521261.3491>.
- Mohammadiun, S., Yazdi, J. and Salehi Neyshabouri, S. A. A., 2018. Comparison of deterministic and uncertain approaches in rehabilitation of eastern part of Tehran stormwater drainage system. *Journal of Hydraulics*, 12(4), 57–72. (In Persian). [Link]
- Naulin, J. P., Payrastre, O. and Gaume, E., 2013. Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: application to road network supervision in Southern France. *Journal of Hydrology*, 486, 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.044>.
- Prastica, R. M. S., Maitri, C., Hermawan, A., Nugroho, P. C., Sutjiningsih, D. and Anggraheni, E., 2018. Estimating design flood and HEC-RAS modelling approach for flood analysis in Bojonegoro City. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 316, 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/316/1/012042>.
- Qian, Q., Edwards, D. J., Zhang, Y. and Haselbach, L., 2024. Improving flood inundation mapping accuracy using HEC-RAS modeling: a case study of the Neches River tidal floodplain in texas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(4), 05024011. <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6037>.



- Roohi Asl, B., MirzaEbrahimTehrani, M., Estelaji, A. and Farzad Behtash, M. R., 2022. Identification of key centers of vulnerability in the city of Hamedan against floods using GIS software and river modeling HEC-RAS. *Journal of Water and Wastewater*, 32(6), 84-97. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2021.280585.3148>.
- Rouhollahi, M., Sarai Tabrizi, M. and Babazadeh, H., 2023. Flood zoning and simulation of hydraulic behavior of river using HEC-RAS software. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 14(1), 200-214. (In Persian). <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.326215.1601>.
- Sadkou, S., Artigue, G., Fréalle, N., Ayrat, P. A., Pistre, S., Sauvagnargues, S. et al., 2024. A review of flash-floods management: from hydrological modeling to crisis management. *Journal of Flood Risk Management*, 17(3), e12999. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12999>.
- Sasanpour, F., Mohebbi, F. and Kazem, A. H., 2021. Analysis and zoning of flood hazard - case study: Taleghan Watershed. *Geographical Information Quarterly*, 30(119), 157-173. (In Persian). <https://doi.org/10.22131/SEPEHR.2021.247892>.
- Sheidayian, M., Fakhraee, H. and Nekooie, M. A., 2017. Investigating the effect of climate change on flood emergency management. *Journal of Emergency Management*, 6(2), 5-20. (In Persian). [Link]
- Wan, X., Xue, Y., Hua, L. and Wu, Q., 2023. Multi-objective collaborative decision-making for flood resource utilization in a reservoir. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(12), 4629-4640. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02530-0>.
- Yazdani, V., Behjati, E. and Arfa, A., 2015. Flood warning system established by the integrated management of hydrological and hydraulic modeling. *Natural Ecosystems of Iran*, 5(4), 109-122. (In Persian). [Link]
- Yazdi, J., Mohammadiun, S., Sadiq, R., Salehi Neyshabouri, S. A. A. and Alavi Gharahbagh, A., 2018. Assessment of different MOEAs for rehabilitation evaluation of urban stormwater drainage systems–case study: eastern catchment of Tehran. *Journal of Hydro-Environment Research*, 21, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2018.08.002>.
- Yazdi, J., Sadollah, A., Lee, E. H., Yoo, D. G. and Kim, J. H., 2017. Application of multi-objective evolutionary algorithms for the rehabilitation of storm sewer pipe networks. *Journal of Flood Risk Management*, 10(3), 326-338. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12143>.
- Zainal, N. N. and Talib, S. H. A., 2024. Review paper on applications of the HEC-RAS model for flooding, agriculture, and water quality simulation. *Water Practice and Technology*, 19(7), 2883-2900. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.173>.

