

Research Paper

Hydraulic Simulation and Flood Risk Assessment for Fish Farms Along the Haraz River

Majid Rezaie Mayani¹, Mohsen Masoudian², Ramin Fazloulou³ & Mohammad Rostami⁴

1- Ph.D., Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran,
(Corresponding author: mohsen_masoudian@yahoo.com)

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

4- Assistant Professor (Research), Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 11 August, 2025

Revised: 5 November, 2025

Accepted: 10 December, 2025

Extended Abstract

Background: Floods are among the most devastating and recurrent natural hazards worldwide, and their frequency and severity are expected to increase due to climate change, urban expansion, and land-use alterations. In riverine environments, flood events pose serious threats to infrastructure, ecosystems, and local livelihoods, especially in developing regions where flood mitigation systems may be insufficient. In northern Iran, aquaculture—particularly cold-water fish farming has grown significantly along riverbanks due to the availability of clean and consistent water resources. However, many of these fish farms are located within active floodplains, exposing them to considerable flood risk. The Haraz River, a high-discharge perennial river in Mazandaran Province, is a key economic and ecological artery and hosts over 30 operational fish farms. Despite its importance, the flood hazard associated with different return periods along its reaches has not been adequately quantified. This study aims to perform a detailed hydraulic simulation of the Haraz River using HEC-RAS integrated with GIS tools to delineate flood-prone zones and assess the vulnerability of adjacent fish farms under multiple flood scenarios. The findings aim to support sustainable land-use planning and inform flood risk mitigation strategies in the region.

Methods: The study focused on three selected reaches of the Haraz River characterized by the highest density of fish farming activities. These reaches were surveyed and mapped using a high-resolution Digital Elevation Model (DEM) with 2-meter spatial resolution, derived from topographic and remote sensing data. The hydraulic modeling was conducted using HEC-RAS version 6.5, a one-dimensional steady-flow model widely used for simulating open channel hydraulics. Key inputs included channel geometry, bankfull cross-sections, flow path centerlines, and bank stations, which were extracted and digitized in the GIS environment. Manning's roughness coefficients for the channel bed and banks were assigned based on field observations and hydrologic reports from regional water authorities.

Discharge values corresponding to return periods of 2, 10, 25, 50, and 100 years were obtained from the "After the Spring" gauging station located upstream. These flow rates were incorporated as upstream boundary conditions in the HEC-RAS model. Simulated hydraulic parameters included water surface elevations, flow velocities, cross-sectional profiles, and energy grade lines. The RAS Mapper utility was used to convert the model results into spatial flood depth grids, inundation extents, and flood hazard zones in a GIS environment, enabling quantitative overlay with the geolocations of existing fish farms.

Results: The hydraulic simulations revealed substantial spatial variability in flood impacts across the three study reaches. In Reach 1 (3,500 m), the floodplain was relatively narrow, and six fish farms situated further from the main channel exhibited minimal inundation. Under a 100-year flood event, only 16.9% of the farm area was affected, whereas the 2-year flood impacted only 8%. This was attributed to favorable terrain conditions and proper siting practices.

In contrast, Reach 2 (3,000 m) displayed significantly higher flood susceptibility. Seven fish farms in this segment were located close to the riverbanks, and the simulations indicated that up



to 53.7% of their area could be inundated during a 100-year event. Even the 2-year flood affected 45.8% of these farms, highlighting the high baseline vulnerability in this zone.

Reach 3 (1,400 m) demonstrated moderate flood risk, with inundation areas ranging from 26.5% for the 2-year event to 33.3% for the 100-year scenario. The confined cross-sectional geometry and lack of natural levees in this reach contributed to the observed flood propagation.

Overall, the cumulative area of fish farms across the three reaches was 137,180 square meters. In the 100-year return period scenario, 45,713 square meters (approximately 33.3%) were inundated, underscoring the severity of flood exposure. The results confirm a direct correlation between return period and both the spatial extent and depth of inundation.

The study emphasized the critical role of topography, channel morphology, and land use in determining flood risk. Improper siting of aquaculture facilities within active floodplains significantly increases vulnerability to even low-frequency flood events. The lack of protective levees or floodwalls in Reach 2 and parts of Reach 3 exacerbated the situation. Moreover, anthropogenic modifications, such as unregulated construction and riverbank encroachment, were identified as aggravating factors. These interventions reduce the effective flow capacity of the river, raise water surface elevations, and trigger out-of-bank flow, particularly during peak discharge events.

In contrast, Reach 1 benefited from adherence to buffer zones and implementation of minor structural mitigation, such as berms and retaining walls. The comparative safety of farms in this reach validates the importance of incorporating hydraulic flood zoning into aquaculture planning. The use of HEC-RAS, combined with GIS spatial analysis, provided robust outputs that align with observed flood patterns and historical damage records in the region. Such tools offer valuable insight into flood dynamics and can support proactive planning, especially in flood-vulnerable watersheds with economic assets at stake.

Conclusion: This study demonstrates that more than one-third of the total area of fish farms along the Haraz River is at risk of inundation during high-return-period flood events. The HEC-RAS-GIS framework proved highly effective in simulating flow behavior, delineating flood zones, and quantifying flood risk to aquaculture operations. The outputs provide actionable guidance for river corridor management, aquaculture zoning, and disaster preparedness.

Key recommendations include:

Enforcing legal river setback distances during site selection and permitting of new fish farms.

Retrofitting existing vulnerable farms with engineered embankments and elevation adjustments.

Integrating flood hazard maps into early warning systems and emergency planning.

Monitoring and restricting development in sensitive floodplain zones to maintain hydraulic connectivity.

The findings support the integration of hydrodynamic modeling into regional planning efforts aimed at reducing the socioeconomic impacts of floods. Future research should explore coupling hydraulic simulations with economic loss modeling to estimate cost-benefit ratios of different flood mitigation strategies.

Keywords: Fish farming, Flood hazard, Floodplain management, GIS, Hydraulic modeling, Haraz River, HEC-RAS, Return period analysis

How to Cite This Article: Rezaie Mayani, M., Masoudian, M., Fazloul, R., & Rostami, M. (2026). Hydraulic Simulation and Flood Risk Assessment for Fish Farms Along the Haraz River. *J Watershed Manage Res*, 17(1), 138-153. DOI: 10.61882/jwmr.2026.1313



مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی هیدرولیکی و ارزیابی خطر سیل به مزارع ماهی حاشیه رودخانه هراز

مجید رضائی مایانی^۱، محسن مسعودیان^۲، رامین فضل‌اولی^۳ و محمد رستمی^۴

- ۱- دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
 ۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران،
 (نویسنده مسوول: mohsen_masoudian@yahoo.com)
 ۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
 ۴- استادیار پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴
صفحه: ۱۲۸ تا ۱۵۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: سیلاب‌ها از جمله مخرب‌ترین و پرتکرارترین مخاطرات طبیعی در سراسر جهان محسوب می‌شوند و انتظار می‌رود در نتیجه تغییرات اقلیمی، توسعه شهری و تغییرات کاربری اراضی، شدت و فراوانی آن‌ها افزایش یابد. در محیط‌های رودخانه‌ای، سیلاب‌ها تهدیدی جدی برای زیرساخت‌ها، زیست‌بوم‌ها و معیشت جوامع محلی هستند، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که سیستم‌های کاهش خطر سیل اغلب ناکارآمد یا ناکافی‌اند. در شمال ایران، آبی‌پروری (به‌ویژه پرورش ماهی سردابی) به دلیل دسترسی به منابع آب سالم و پایدار، در حاشیه رودخانه‌ها توسعه یافته است. با این حال، بسیاری از این مزارع در سیلاب‌دشت‌های فعال واقع شده‌اند و در معرض خطر قابل توجه سیلاب قرار دارند. رودخانه هراز به عنوان یکی از رودخانه‌های دائمی و پرآب استان مازندران، نقش حیاتی را در اقتصاد و اکوسیستم منطقه ایفا می‌کند و میزبان بیش از ۳۰ مزرعه فعال پرورش ماهی است. علی‌رغم اهمیت بالای این رودخانه، خطرات سیل با دوره بازگشت‌های مختلف در طول بازه‌های آن به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف این مطالعه، شبیه‌سازی دقیق شرایط هیدرولیکی رودخانه هراز با استفاده از مدل HEC-RAS و ابزارهای GIS، به منظور پهنه‌بندی مناطق سیل گیر و ارزیابی آسیب‌پذیری مزارع ماهی در برابر سناریوهای مختلف سیلاب است. یافته‌ها می‌توانند برنامه‌ریزی کاربری اراضی را تقویت کنند و در تدوین راهبردهای کاهش خطر سیلاب مفید باشند.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، سه بازه کلیدی از رودخانه هراز که دارای بالاترین تراکم مزارع ماهی بودند، برای مدل‌سازی هیدرولیکی دقیق انتخاب شدند. داده‌های ورودی شامل مدل ارتفاع رقومی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۲ متر، داده‌های هندسی مقاطع عرضی، خط مرکزی جریان و نقاط کناری بستر رودخانه بودند که در محیط GIS استخراج و رقومی شدند. مدل یک‌بعدی HEC-RAS نسخه ۶/۵ برای شبیه‌سازی جریان یکنواخت در بازه‌های مختلف استفاده شد. ضرایب زبری مانینگ برای بستر و دیواره‌ها با استناد به مشاهدات میدانی و گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای تعیین گردید. مقادیر دبی متناظر با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله از ایستگاه هیدرومتری "بعد از چشمه" اخذ و به عنوان شرایط مرزی بالادست وارد مدل شدند. پارامترهای هیدرولیکی شامل تراز سطح آب، سرعت جریان، پروفیل‌های مقاطع عرضی و خطوط انرژی محاسبه گردیدند. نتایج مدل در محیط RAS Mapper به نقشه‌های عمق سیلاب، گستره آبگرفتگی و پهنه‌های مخاطره تبدیل و با موقعیت جغرافیایی مزارع ماهی ترکیب شدند تا تحلیل ریسک دقیق‌تری صورت گیرد.

یافته‌ها: شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی، تفاوت‌های چشم‌گیری را در شدت سیلاب و گستره آبگرفتگی بین سه بازه مورد مطالعه نشان دادند. در بازه اول (به طول ۳۵۰۰ متر)، به دلیل موقعیت مناسب مزارع نسبت به کانال اصلی و ویژگی‌های توپوگرافیکی مساعد، فقط ۸ درصد از اراضی مزارع در جریان سیلاب ۲ ساله و ۱۶/۹ درصد در جریان ۱۰۰ ساله دچار آبگرفتگی شدند. در مقابل، بازه دوم (۳۰۰۰ متر) بالاترین میزان آسیب‌پذیری را داشت. در این بازه، ۷ مزرعه ماهی واقع شده‌اند و تحلیل‌ها نشان دادند که در سیلاب با دوره بازگشت ۲ ساله، ۴۵/۸ درصد و در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، ۵۳/۷ درصد از سطح مزارع تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این بازه دارای ساختار عرضی تنگ‌تر و فاقد موانع طبیعی یا حفاظتی مؤثر بود. در بازه سوم (۱۴۰۰ متر)، خطر سیلاب در حد متوسط تا بالا ارزیابی شد و مساحت آسیب‌پذیر از ۲۶/۵ درصد در سیلاب ۲ ساله تا ۳۳/۳ درصد در سیلاب ۱۰۰ ساله متغیر بود. در مجموع، از ۱۳۷۱۸۰ مترمربع اراضی مزارع ماهی در این سه بازه، ۴۵۷۱۳ مترمربع (معادل ۳۳/۳ درصد) در سناریوی سیلاب ۱۰۰ ساله در معرض آبگرفتگی قرار گرفتند. این روند حاکی از رابطه مستقیم میان دوره بازگشت و شدت و گستره مخاطره است.

این مطالعه بر نقش کلیدی توپوگرافی، شکل مقطع رودخانه و نحوه استفاده از اراضی در تعیین میزان خطر سیلاب تأکید دارد. استقرار نادرست مزارع در سیلاب‌دشت‌های فعال، آن‌ها را حتی در برابر سیلاب‌هایی با دوره بازگشت پایین نیز بسیار آسیب‌پذیر می‌کند. نبود دیواره‌های حفاظتی و تجاوز به حریم بستر از عوامل اصلی تشدید خطر بوده‌اند. در مقابل، رعایت حریم و وجود تمهیدات حفاظتی در بازه اول موجب کاهش محسوس میزان آسیب‌پذیری شده است. ترکیب مدل HEC-RAS با سامانه GIS امکان استخراج نقشه‌های دقیق، تحلیل مکان‌محور، و برآورد کمی خطر سیلاب را فراهم ساخت که با مشاهدات میدانی و خسارات ثبت‌شده در سال‌های گذشته مطابقت داشت. نتایج به‌خوبی نشان می‌دهند که اتخاذ تصمیمات مبتنی بر مدل‌سازی هیدرولیکی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش آسیب‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از سیل ایفا کند.

نتیجه‌گیری: مطالعه حاضر نشان می‌دهد که بیش از یک‌سوم از سطح مزارع ماهی حاشیه رودخانه هراز در معرض خطر جدی سیلاب‌های با دوره بازگشت بلندمدت قرار دارند. استفاده از چارچوب مدل‌سازی HEC-RAS در کنار تحلیل‌های مکانی GIS، رویکردی مؤثر را در شناسایی مناطق پرخطر و پشتیبانی تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم می‌آورد. بر اساس نتایج، پیشنهاد می‌شود:

رعایت حریم قانونی رودخانه در انتخاب مکان مزارع جدید به‌طور سخت‌گیرانه اعمال شود.

مزارع موجود در معرض خطر با دیواره‌های حفاظتی مناسب تجهیز شوند یا جانمایی آن‌ها بازنگری شود.

نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب در سیستم‌های هشدار سریع و برنامه‌ریزی بحران لحاظ گردند.

توسعه غیرمجاز و ساخت‌وساز در مناطق حساس سیلابی کنترل و ممنوع شود.

نتایج این پژوهش ضرورت به‌کارگیری ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی هیدرولیکی و تحلیل فضایی را در مدیریت یکپارچه خطر سیلاب و توسعه پایدار سیستم‌های آبی‌پروری در حاشیه رودخانه‌ها اثبات می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: پرورش ماهی، تحلیل دوره بازگشت، خطر سیلاب، رودخانه هراز، مدل‌سازی هیدرولیکی، مدل HEC-RAS، GIS، مدیریت سیلاب‌دشت

مقدمه

اهمیت موضوع در سطح جهانی

سیل یکی از شایع‌ترین و در عین حال پرخطرترین بلایای طبیعی در سراسر جهان است که پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی سنگینی را به همراه دارد. بنا بر گزارش سازمان ملل متحد، سیلاب‌ها بیش از ۴۰ درصد از خسارات ناشی از بلایای طبیعی در جهان را به خود اختصاص می‌دهند (UNDRR, 2021). این پدیده به‌ویژه در مناطق در حال توسعه که زیرساخت‌های حفاظتی ضعیف‌تر هستند، منجر به نابودی دارایی‌های اقتصادی، تهدید امنیت غذایی، و افزایش آسیب‌پذیری جوامع می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که در قرن بیست و یکم تنها سیلاب‌های ناگهانی بیش از ۴۶ میلیارد دلار خسارت اقتصادی ایجاد کرده‌اند (Li et al., 2017). شدت و فراوانی سیلاب‌ها نیز با توجه به تغییرات اقلیمی، افزایش بارش‌های حدی، جنگل‌زدایی و شهرنشینی بی‌رویه، روندی صعودی داشته است (Change, 2014; Zhang et al., 2016). در نتیجه، شناسایی مناطق مستعد سیل‌خیزی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب یکی از ضروری‌ترین اقدامات در مدیریت ریسک بلایا محسوب می‌شود (Mishra et al., 2010).

وضعیت در ایران و رودخانه هراز

ایران به دلیل ویژگی‌های اقلیمی و توپوگرافی خاص خود، از جمله کشورهای بسیار سیل‌خیز جهان به‌شمار می‌رود. وقوع سیلاب‌های ناگهانی در مناطق شمالی، غربی و جنوب‌غربی کشور در سال‌های اخیر، نشان‌دهنده شکنندگی بالای این مناطق در برابر مخاطرات طبیعی است. در استان مازندران، رودخانه‌های متعددی همچون تجن، نکا و هراز بارها خسارات اقتصادی و اجتماعی سنگینی بر جای گذاشته‌اند (Masoudian et al., 2014). رودخانه هراز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های شمال ایران، به دلیل شرایط خاص هیدرولوژیک، وجود روستاهای متعدد در حاشیه و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی همچون کشاورزی و پرورش ماهی، به شدت در معرض خطر سیلاب قرار دارد. مطالعات نشان داده‌اند که در دهه‌های اخیر، وقوع سیلاب‌های متعدد در این رودخانه موجب خسارات قابل توجه به مزارع پرورش ماهی، زیرساخت‌های روستایی و اراضی کشاورزی شده است (Jafari et al., 2007). از این‌رو، شناخت دقیق مناطق پرخطر در حاشیه رودخانه هراز برای کاهش خسارات اقتصادی و اجتماعی ضرورت دارد.

مرور پژوهش‌های پیشین

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در زمینه شبیه‌سازی سیلاب و پهنه‌بندی مناطق پرخطر با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی و GIS انجام شده‌اند.

در سطح ملی، (Masoudian et al., 2014) با استفاده از HEC-RAS مدیریت غیر سازه‌ای سیلاب در رودخانه نکا را بررسی کردند و نشان دادند که عامل اصلی خسارت، انسداد پل‌ها پس از وقوع سیلاب اولیه بود. گنجی نوروزی و همکاران (Ganji Norouzi et al., 2016) اثر عدم قطعیت تابع دبی-احتمال را در برآورد ریسک خسارت کشاورزی تحلیل کردند. کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2016) در

رودخانه سیمینه‌رود نشان دادند که با افزایش دوره بازگشت، وسعت مناطق تحت خطر سیلاب افزایش یافت. آواد و همکاران (Avad et al., 2022) نیز در رودخانه جاجروید بیان داشتند که بیشترین خسارت ناشی از سیلاب به اراضی کشاورزی تعلق داشت.

در سطح بین‌المللی، سیلوا و همکاران (Silva et al., 2014) در برزیل و پاتان و آگنی‌هوتی (Pathan & Agnihotri, 2021) در هند نشان دادند که ترکیب مدل HEC-RAS و GIS ابزاری قدرتمند برای شناسایی و پهنه‌بندی سیلاب است. همچنین مالیری و بشیرگنبد (Malayeri & Bashirgonbad, 2024) دقت بالای این مدل را در مقایسه با داده‌های میدانی تأیید کردند.

با وجود این پیشرفت‌ها، بیشتر تحقیقات بر اراضی شهری و کشاورزی متمرکز بوده‌اند و مطالعات اختصاصی بر مزارع پرورش آبزیان به‌عنوان بخشی آسیب‌پذیر و مهم از اقتصاد محلی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

شکاف علمی

مرور پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اگرچه روش‌های مدل‌سازی هیدرولیکی و پهنه‌بندی سیلاب به‌خوبی توسعه یافته‌اند، اما هنوز بررسی دقیق ریسک سیلاب بر مزارع پرورش ماهی در حاشیه رودخانه‌ها مغفول مانده است. این موضوع در حوضه رودخانه هراز که فعالیت‌های پرورش ماهی در آن گسترده است، اهمیت دوچندان دارد. شکاف علمی موجود عبارت است از:

فقدان تحلیل جامع خطرپذیری مزارع پرورش ماهی در برابر سیلاب.

کمبود مطالعاتی که ترکیب داده‌های هیدرولوژیک، مدل HEC-RAS و تحلیل GIS را با تمرکز بر بخش آبزی‌پروری ارائه دهند.

نبود شاخص‌های کمی برای مقایسه میزان خسارت در دوره‌های بازگشت مختلف در این بخش اقتصادی.

با توجه به مطالب فوق، هدف اصلی پژوهش حاضر عبارت است از: شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه هراز با استفاده از مدل HEC-RAS و تحلیل خطرپذیری مزارع پرورش ماهی در برابر سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف، با بهره‌گیری از داده‌های هیدرولوژیک و توپوگرافی و ابزار GIS.

اهداف جزئی عبارت‌اند از:

- معرفی و تحلیل ویژگی‌های هیدرولوژیک و هندسی رودخانه هراز.

- شبیه‌سازی جریان سیلاب در شرایط مختلف و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر.

- شناسایی و مقایسه مزارع پرورش ماهی واقع در پهنه‌های خطر در سه بازه مورد مطالعه.

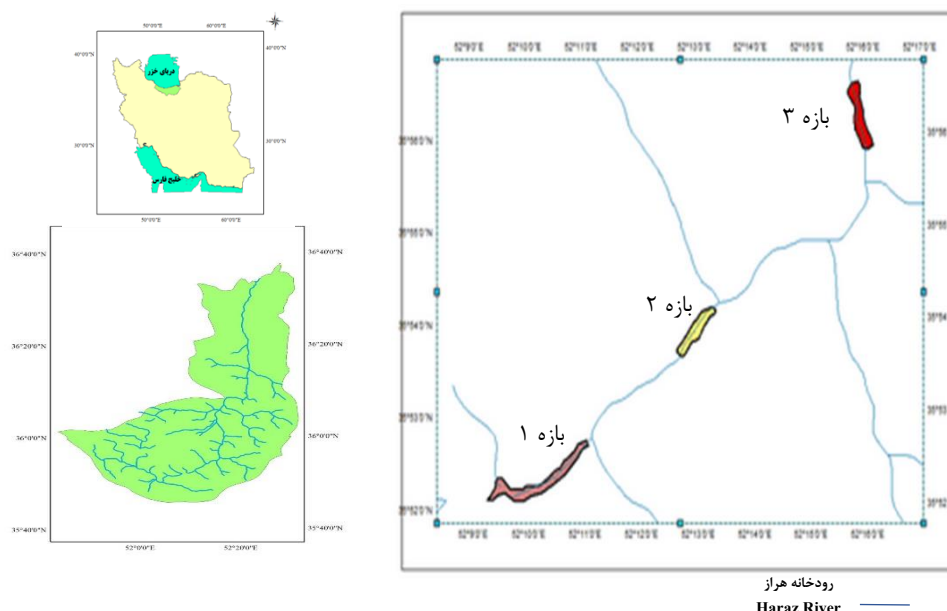
- ارائه راهکارهای مدیریتی جهت کاهش خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از سیلاب.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش

رودخانه هراز با طول ۱۸۱ کیلومتر از جنوب غربی و جنوب قله دماوند در محله نهم لار سرچشمه می‌گیرد که یکی از مهم‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه‌های استان مازندران است. در واقع رودخانه هراز از به هم پیوستن دو رودخانه لاسم و لار در شمال شرقی روستای پلور تشکیل شده است. گذشته از رودهای لاسم و لار که هراز اصلی را تشکیل می‌دهند. رودهای تلخ‌رود، دینان، آب‌رزان، سیاه‌رود، آفن‌سر، شیرکلارود، نمارستاق، نوررود، جلورود و هلی‌چال به آن می‌ریزند. محدوده حوضه آبریز هراز بیش از ۴۱۰۰ کیلومتر مربع است. رودخانه هراز در کوهستان در دره عمیق و هولناک هراز جریان دارد و در ۱۵ کیلومتری جنوب آمل از این دره و کوهستان خارج و وارد منطقه جلگه‌ای می‌گردد که سرانجام در محل سرخ‌رود و در ۲۴

کیلومتری شمال‌شرقی آمل با یک دلتای وسیع وارد دریا می‌شود. شیب رودخانه هراز بسیار زیاد است به طوری‌که رودخانه در طول مسیر، بستر خود را شسته، رسوبات زیادی را با خود حمل می‌کند، از دره‌های کوهستانی می‌گذرد و در پایین‌دست کوهستان جلگه‌هایی مانند لار و وانه ایجاد کرده است و شیب متوسط آن ۲ درصد است. هراز یکی از سه رودخانه پرآب و دائمی شمال کشور با متوسط دبی ۴۰ متر مکعب در ثانیه است. در بالادست و حاشیه این رودخانه به علت دسترسی به آب مناسب، بیش از ۳۰ مزرعه ماهی سردابی در حال فعالیت هستند که از لحاظ تعداد مزرعه و میزان تولید بیشترین سهم تولید ماهیان سردابی استان مازندران را به‌خود اختصاص داده است. در بازه های ۱، ۲ و ۳ بیش‌ترین تراکم مزارع ماهی وجود دارد (شکل ۱).



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه رودخانه هراز، استان مازندران - ایران
Figure 1. Study area: the Haraz River, Mazandaran Province, Iran

روش پژوهش

در پژوهش حاضر، از روش تجزیه و تحلیل مبتنی بر سناریو از تلفیق HEC-RAS و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، در مطالعه خطر سیلاب استفاده شده است. این روش شامل استفاده از داده‌های ژئومورفولوژی، توپوگرافی، شرائط مرزی و هیدرولیکی می‌شود و نوعی روش کمی است که داده‌های مختلف را با هم ترکیب می‌کند. این مدل HEC-RAS در برابر دبی‌های مختلف و نواحی سیلابی کالیبره می‌شود و نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

نتایج به‌دست آمده از این روش شامل تهیه نقشه‌های عمق و پهنه گسترش سیلاب می‌شوند و اطلاعات ارزشمندی برای کاهش میزان ریسک سیلاب را فراهم می‌آورد. به منظور انجام مطالعات تعیین حدود بستر و تهیه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، با استفاده از نرم‌افزار ArcMap، مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۲ متر برای سه بازه مورد مطالعه که بیشترین تراکم

مزارع ماهی را در حاشیه رودخانه هراز داشتند تهیه شد. ترسیم نقشه‌ها در محیط نرم‌افزار GIS و تهیه مدل هیدرولیکی در نرم‌افزار HEC-RAS 6.5 انجام گرفت. در نسخه‌های جدید HEC-RAS برای تهیه داده‌های هندسی و محاسبات مسیر رودخانه، لایه خط مرکزی جریان، تعیین محدوده قرارگیری مقاطع، نمایش موقعیت رودخانه و تعریف جهت جریان در رودخانه امکان‌پذیر هستند و نیازی به استفاده از ابزار RAS Mapper نیست. با استفاده از بخش HEC-Geo RAS از زیر برنامه‌های مدل HEC-RAS جهت جداسازی مجرای اصلی رودخانه از سواحل آن، لایه سواحل رودخانه ترسیم و سپس لایه ابعاد مسیر جریان تهیه گردید. از این لایه به‌منظور تعیین ابعاد مسیر هیدرولیکی جریان در مجرای اصلی جریان و ساحل چپ و راست آن در ناحیه سیلاب‌گیر استفاده شده است. کلید اصلی شبیه‌سازی سیلاب، مقاطع عرضی هستند که این

گردیدند. این مقاطع با استفاده از داده‌های DEM و کنترل میدانی تهیه و در محیط RAS Mapper پردازش شدند.

تحلیل GIS و پهنه‌بندی

نتایج مدل HEC-RAS برای تحلیل مکانی و ارزیابی میزان همپوشانی با مزارع پرورش ماهی به محیط ArcGIS منتقل شدند. مراحل تحلیل عبارت بودند از:

* ورود خروجی‌های مدل (نقشه‌های عمق و پهنه سیلاب) به محیط GIS.

* همپوشانی این داده‌ها با لایه مکانی مزارع پرورش ماهی. * طبقه‌بندی مناطق بر اساس عمق سیلاب (مثلاً کم‌عمق، متوسط، پرعمق) برای هر دوره بازگشت.

* محاسبه مساحت و تعداد مزارعی که در هر بازه و هر سطح عمق قرار گرفته‌اند.

* تهیه نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی سیلاب و استخراج جداول آماری برای تحلیل و مقایسه بازه‌ها.

این ترکیب مدل‌سازی هیدرولیکی و تحلیل GIS امکان ارائه تصویری روشن از وضعیت خطرپذیری مزارع در برابر سیلاب را فراهم ساخت.

برآورد سیلاب‌ها

برای شبیه‌سازی شرایط سیلابی، از داده‌های ایستگاه هیدرومتری «بعد از چشمه» استفاده شد. دبی‌های طراحی مربوط به دوره‌های بازگشت ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله از گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای تهران استخراج و در مدل اعمال شدند (جدول ۱). این داده‌ها مبنای ترسیم پروفیل‌های سطح آب و تعیین پهنه سیلاب در بازه‌های مورد مطالعه بودند.

نتایج و بحث

پهنه سیلاب

به‌منظور تحلیل جریان، از مقادیر دبی مربوط به دوره‌های بازگشت ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله استفاده شد. این داده‌ها مربوط به ایستگاه هیدرومتری موسوم به «بعد از چشمه» هستند که در موقعیت جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه و ۲۶ ثانیه شمالی و ۵۲ درجه و ۵ دقیقه و ۱۶/۲۰ ثانیه شرقی، در فاصله ۵ کیلومتری از بازه نخست مطالعه، واقع شده‌اند و تحت نظارت شرکت آب منطقه‌ای استان تهران هستند. مقادیر مربوط به این دوره‌های بازگشت در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

مقاطع در جهت جریان، عمود بر مسیر جریان از ساحل سمت چپ به ساحل سمت راست کشیده شدند.

معادلات پایه مدل HEC-RAS

مدل HEC-RAS بر اساس معادلات یک‌بعدی جریان‌های سطحی (معادلات سنت-وانانت) عمل می‌کند.

این معادلات شامل معادله پیوستگی و معادله مومنتوم هستند:

$$1. \text{ معادله پیوستگی: } \frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_t$$

که در آن، ∂A_T سطح مقطع جریان، ∂Q دبی جریان، ∂x طول مسیر رودخانه، ∂t زمان و q_t جریان جانبی ورودی یا خروجی هستند.

۲. معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z_s}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

که در آن V سرعت جریان، ∂z_s تراز سطح آب، g شتاب گرانش و S_f بیانگر اثر اصطکاک و زبری بستر هستند. این معادلات اساس محاسبات هیدرولیکی در نرم‌افزار HEC-RAS هستند و شرایط مرزی و هیدرولیکی جریان بر اساس آنها شبیه‌سازی می‌شوند.

ضرایب زبری مانینگ

یکی از ورودی‌های کلیدی در مدل‌سازی هیدرولیکی، ضرایب زبری مانینگ (n) است که بر سرعت جریان و وسعت پهنه سیلاب اثرگذار است. در این پژوهش، مقادیر ضرایب زبری بستر و دیواره رودخانه از گزارش‌های رسمی شرکت آب منطقه‌ای مازندران اخذ و بر اساس شرایط مورفولوژیک بازه‌های مورد مطالعه در مدل به کار گرفته شدند (جدول ۲). این ضرایب در نرم‌افزار HEC-RAS برای هر بازه وارد شدند تا رفتار هیدرولیکی جریان به‌صورت دقیق‌تر شبیه‌سازی گردد.

مقاطع عرضی

به‌منظور شبیه‌سازی دقیق جریان، مقاطع عرضی به‌صورت عمود بر محور جریان رودخانه ترسیم شدند. در سه بازه مورد مطالعه، جمعاً ۱۶۵ مقطع عرضی (۱۰۹ مقطع در بازه اول، ۳۹ مقطع در بازه دوم و ۱۵ مقطع در بازه سوم) برداشت و وارد مدل

جدول ۱- دبی با دوره‌های بازگشت مختلف در رودخانه هراز

Table 1. Discharge with different return periods of the Haraz River

دوره بازگشت (سال) Return Period (years)					نام ایستگاه Station Name
100	50	25	10	2	بعد از چشمه (مترمکعب بر ثانیه) Discharge (m ³ /s)
104	89	76	60	33	

موانع در مسیر جریان و دبی جریان بستگی دارد. مقادیر ضریب زبری مانینگ بستر و دیواره‌ها، از گزارشات شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران اخذ شدند که در جدول شماره ۲ آورده شده‌اند.

یکی از پارامترها در مدل‌سازی، ضریب مانینگ است که بر روی سرعت جریان و پهنه گسترش سیلاب تاثیرگذار است. مقدار ضریب زبری مانینگ به عواملی از قبیل: زبری بستر کانال، نامنظمی سطح مقطع، پوشش گیاهی، شکل مسیر، وجود

جدول ۲- مقدار ضریب زبری مانینگ (n) در مقاطع رودخانه هراز

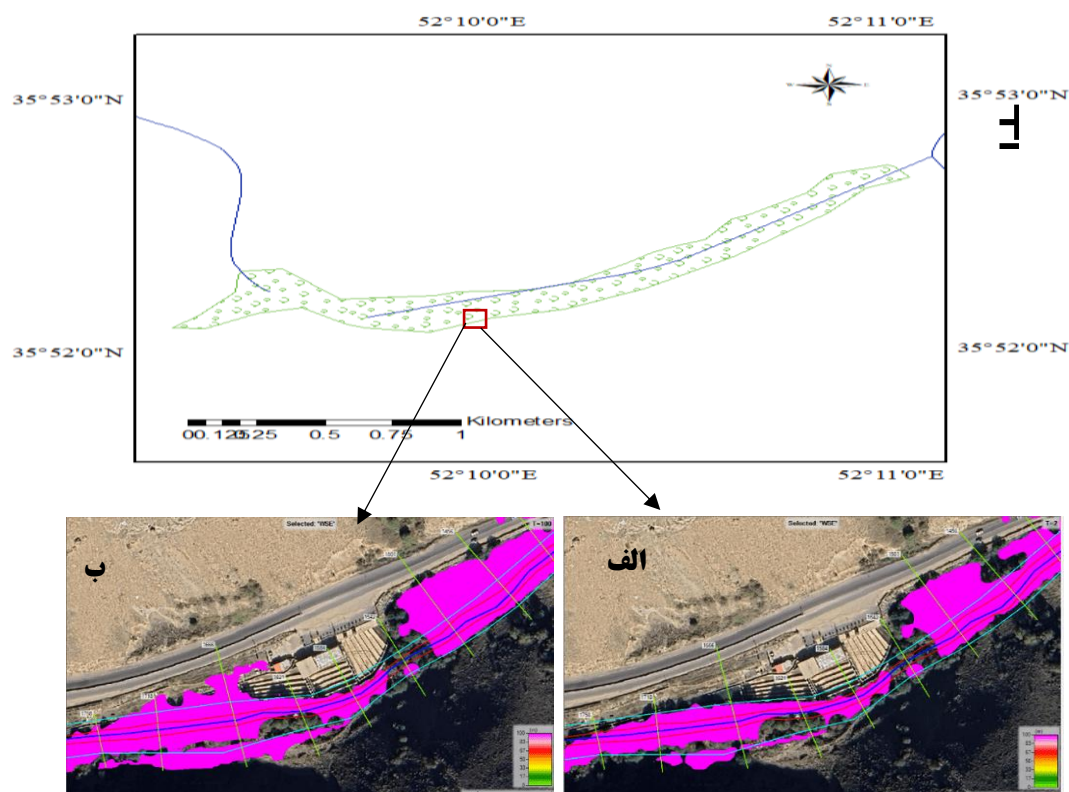
Table 2. Manning roughness coefficient (n) values in sections of the Haraz River

شماره بازه Reach No.	مقاطع Cross-sections	ساحل راست Right Bank	کانال Channel	ساحل چپ Left Bank
1	1-109	0.085	0.054	0.085
2	110-149	0.085	0.054	0.085
3	150-165	0.085	0.054	0.085

بازه نخست

این بازه از رودخانه هراز به طول ۳۵۰۰ متر واقع در عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۲ دقیقه و ۸/۹۴ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۵۲ دقیقه و ۴۴/۳۰ ثانیه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۹ دقیقه و ۲۰/۷۷ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۱۱ دقیقه و ۱/۶۷ ثانیه شرقی، شامل شش واحد مزرعه ماهی در مسیر خود است. نقشه مدل رقومی DEM بازه نخست و خروجی پهنه

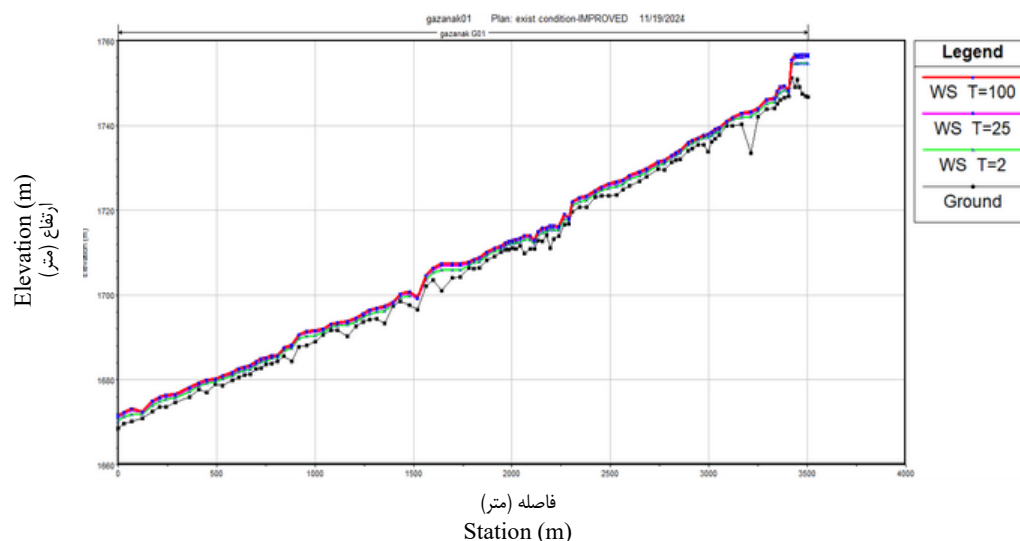
سیلاب با دوره بازگشت ۲ ساله و ۱۰۰ ساله در بخشی از این مسیر در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲ ساله تا ۱۰۰ ساله خطری برای مزرعه ماهی حاشیه رودخانه ایجاد نمی‌نماید و با تمهیدات ساده، مانند ایجاد دیوار حفاظتی، خسارات ناشی از سیل به حداقل خواهد رسید.



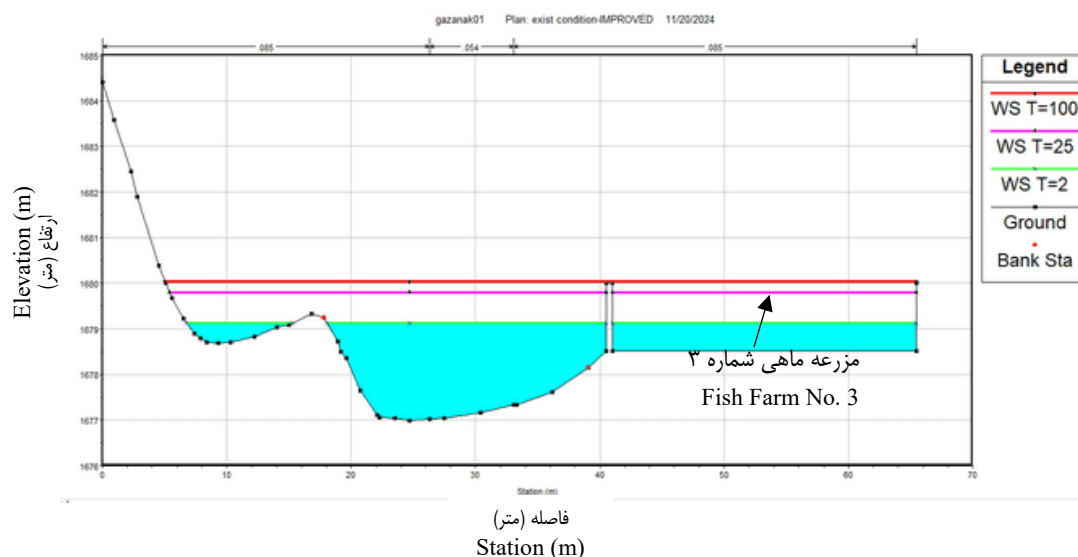
شکل ۲- مدل رقومی بازه نخست. الف: پهنه سیل با دوره بازگشت ۲ ساله. ب: پهنه سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله
Figure 2. The digital model of the first period. a) Floodplain with a 2-year return period. b) Floodplain with a 100-year return period

عرضی ترسیم شده در مسیر بازه نخست، اختلاف سطح آب برای دبی با دوره بازگشت‌های مختلف مشاهده می‌گردد (شکل ۴).

سطح آب در خروجی مدل HEC-RAS برای دبی با دوره‌های بازگشت ۲، ۲۵ و ۱۰۰ ساله برای طول این مسیر در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین، برای یکی از مقاطع



شکل ۳- سطح آب در بازه نخست برای دوره‌های بازگشت ۲، ۲۵ و ۱۰۰ ساله
Figure 3. The water level in the first period for discharge with return periods of 2, 25, and 100 years

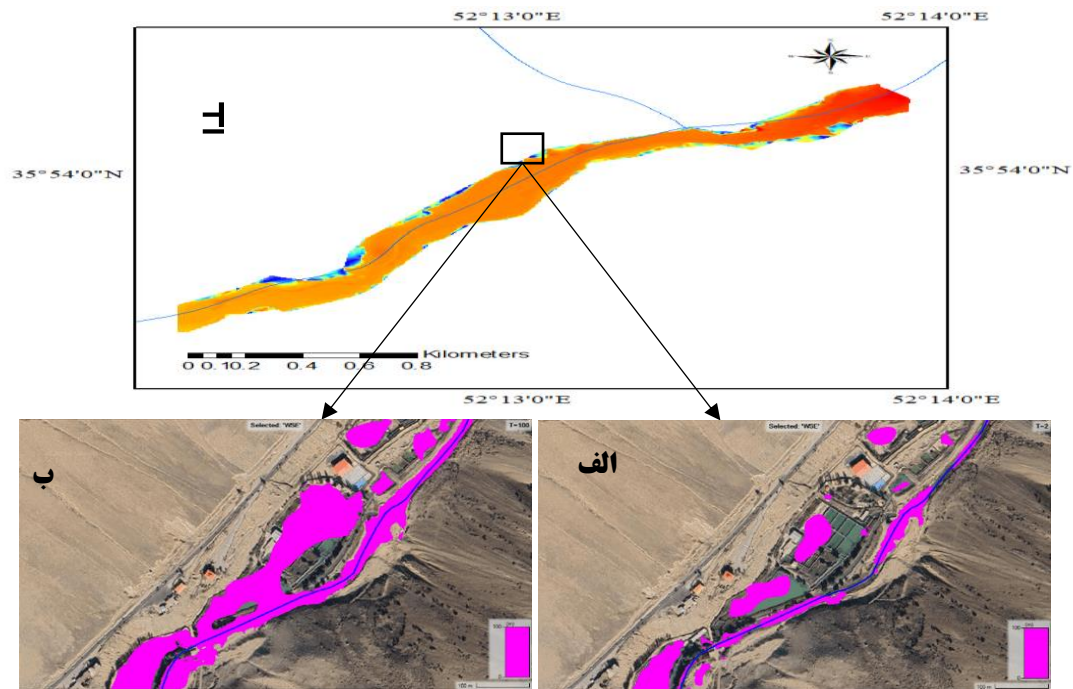


شکل ۴- سطح آب در مقطع یکی از مزارع ماهی از بازه نخست برای سیل با دوره‌های بازگشت ۲، ۲۵ و ۱۰۰ ساله
Figure 4. The water level in a cross-section of a fish farm from the first period for floods with return periods of 2, 25, and 100 years

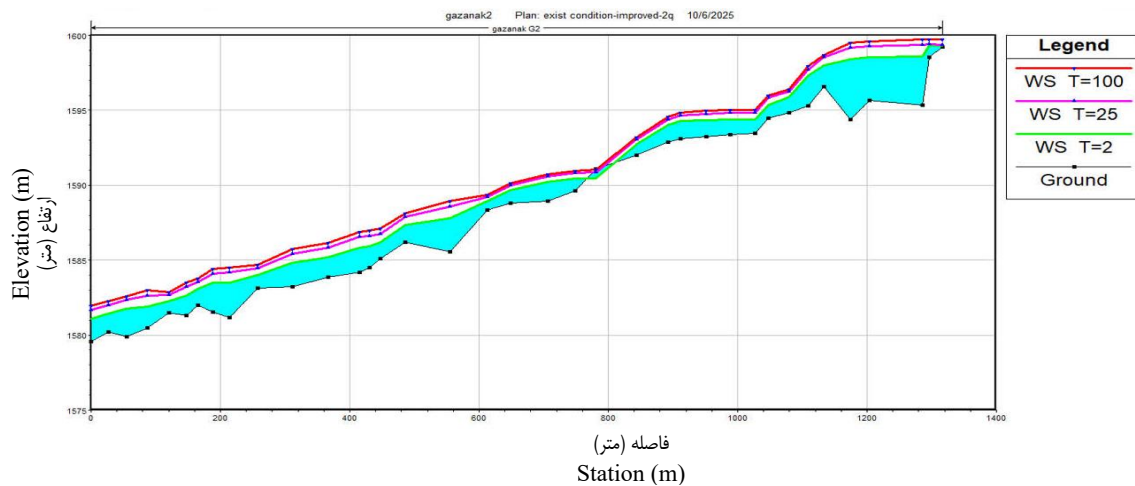
ماهی در مسیر خود است. در شکل شماره ۵ نقشه مدل رقومی DEM بازه دوم و خروجی پهنه سیلاب با دوره بازگشت ۲ ساله و ۱۰۰ ساله در بخشی از این مسیر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیلاب با دوره بازگشت‌های بیشتر، خطر بسیار زیادی برای مزارع موجود در این بازه ایجاد می‌نماید و تمهیدات لازم برای جلوگیری از خسارت به این واحدها با هزینه‌های گزاف روبرو است.

بازه دوم

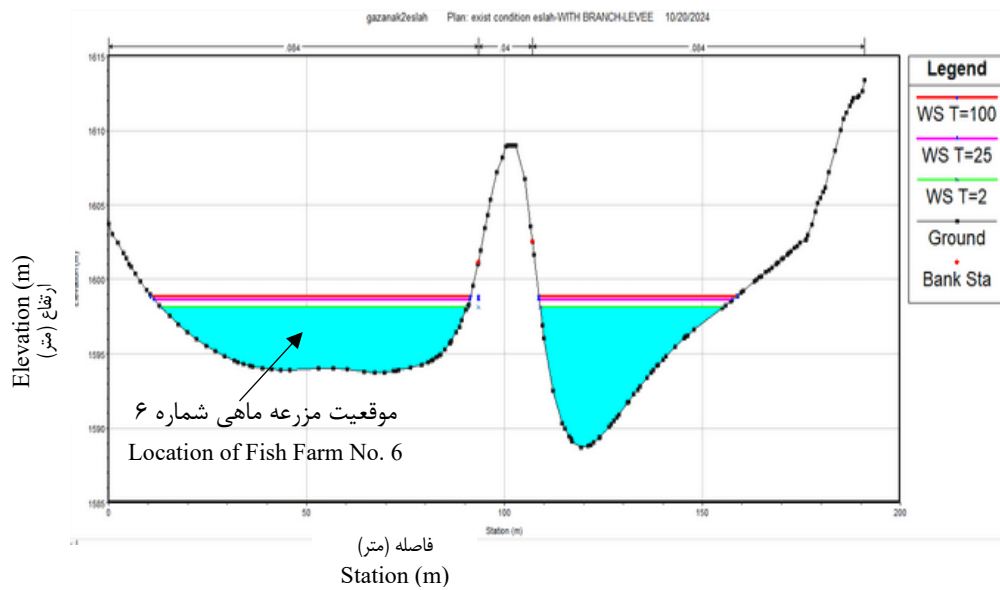
این بازه از رودخانه هراز به طول ۳۰۰۰ متر واقع در محدوده جغرافیایی بین عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۳ دقیقه و ۳۰/۳۳ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۵۴ دقیقه و ۱۰/۹۲ ثانیه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۲ دقیقه و ۳۷/۴۶ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۱۳ دقیقه و ۴۰/۰۱ ثانیه شرقی شامل هفت واحد مزرعه



شکل ۵- مدل رقومی بازه دوم. الف: تحلیل خروجی سیل با دوره بازگشت ۲ ساله. ب: تحلیل خروجی سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله
Figure 5. The second-period numerical model. a) Flood output analysis with a 2-year return period. b) Flood output analysis with a 100-year return period



شکل ۶- سطح آب در بازه دوم برای دبی با دوره‌های بازگشت ۲، ۲۵ و ۱۰۰ ساله
Figure 6. The water level in the second period for discharge with return periods of 2, 25, and 100 years

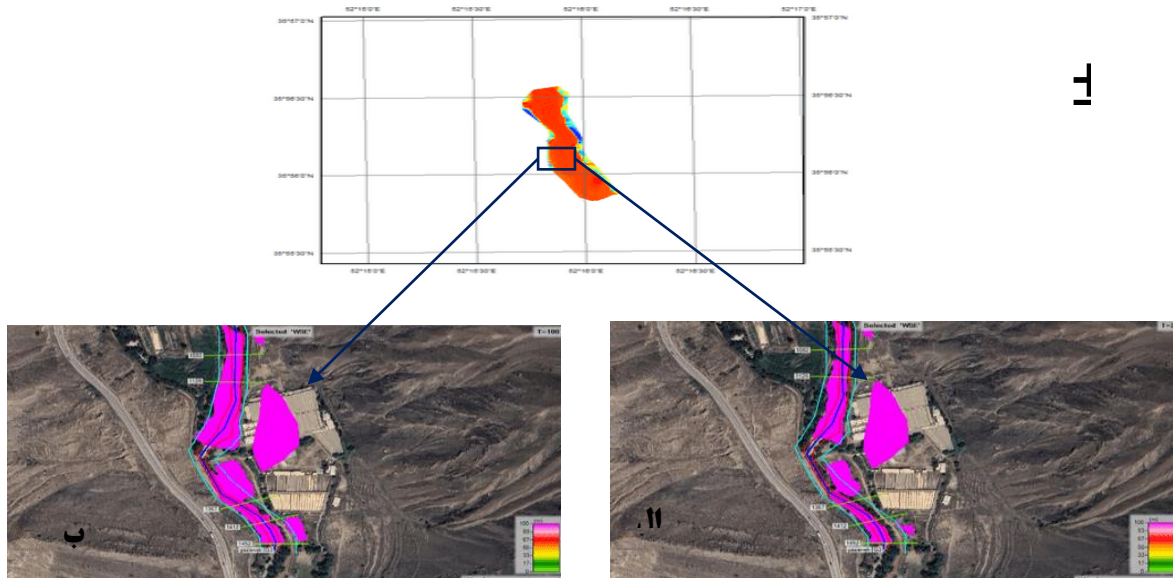


شکل ۷- سطح آب در یکی از مقاطع عرضی بازه دوم برای سیل با دوره‌های بازگشت ۲، ۲۵ و ۱۰۰ ساله
Figure 7. The water level in one of the cross sections of the second interval for floods with return periods of 2, 25, and 100 years

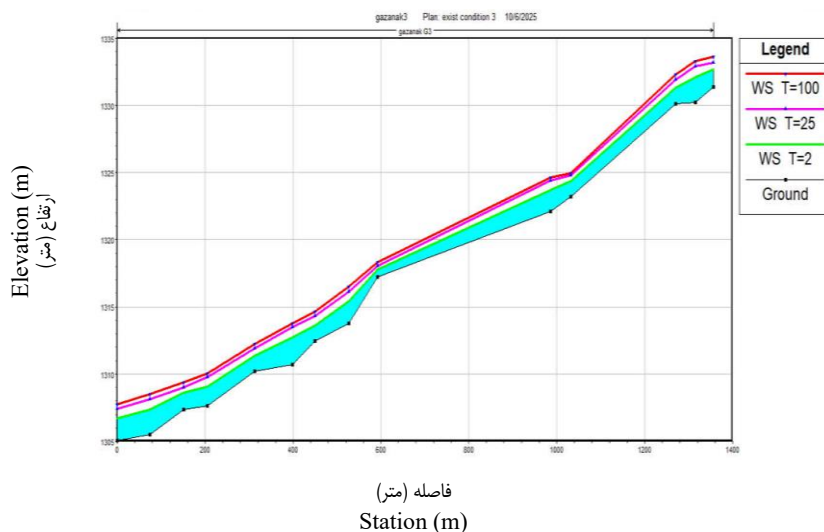
ماهی در مسیر خود است. نقشه مدل رقومی DEM بازه سوم و خروجی پهنه سیلاب با دوره بازگشت ۲ ساله و ۱۰۰ ساله در بخشی از این مسیر در شکل شماره ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیلاب با دوره‌های بازگشت کمتر و حتی بیشتر، خطر بسیار زیادی را برای مزارع موجود در این بازه ایجاد می‌نماید.

بازه سوم

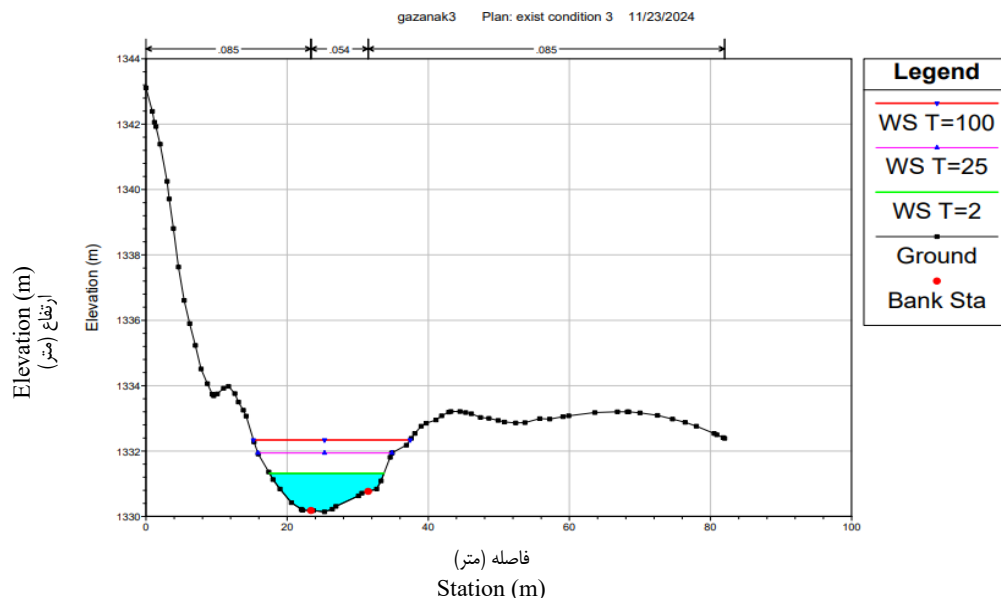
این بازه از رودخانه هراز به طول ۱۴۰۰ متر واقع در محدوده جغرافیایی بین عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۴ دقیقه و ۵۱/۰۳ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۵۶ دقیقه و ۳۹/۳۳ ثانیه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۴ دقیقه و ۴۸/۴۶ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۱۵ دقیقه و ۴۷/۷۷ ثانیه شرقی شامل شش واحد مزرعه



شکل ۸- مدل رقومی بازه سوم. الف: تحلیل خروجی سیل با دوره بازگشت ۲ ساله. ب: تحلیل خروجی سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله
Figure 8. The third-period numerical model. a) Flood output analysis with a 2-year return period. b) Flood output analysis with a 100-year return period



شکل ۹- سطح آب در بازه سوم برای دبی با دوره‌های بازگشت ۲، ۲۵ و ۱۰۰ ساله
Figure 9. The water level in the third period for discharge with return periods of 2, 25, and 100 years



شکل ۱۰- سطح آب در یکی از مقاطع عرضی بازه سوم برای سیل با دوره‌های بازگشت ۲، ۲۵ و ۱۰۰ ساله
Figure 10. The water level in one of the third interval cross sections for floods with return periods of 2, 25, and 100 years.

آمدند. مساحت گسترش یافته پهنه سیلابی بر مزارع ماهی حاشیه رودخانه هراز در بازه‌های مورد مطالعه با توجه به دبی با دوره‌های بازگشت ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله با استفاده از نرم‌افزار GIS محاسبه گردید. نتایج مساحت خسارت دیده و درصد خسارت در جدول ۳ آورده شده‌اند.

تحلیل خسارت سیلاب

در مدل HEC-RAS، پارامترهایی همچون تراز سطح آب، شامل خروجی مقاطع عرضی، پروفیل طولی رودخانه، تغییرات سرعت آب در تمام مقاطع و منحنی دبی-اشل و مشخصات هیدرولیکی جریان در دوره‌ی بازگشت‌های مختلف به‌دست

جدول ۳- مساحت مزارع ماهی خسارت‌دیده و درصد خسارت در بازه‌های مورد مطالعه

دوره بازگشت سالانه Annual Return Period					مساحت و درصد خسارت Area and Damage Percentage	مساحت مزارع ماهی (مترمربع) Total Area of Fish Farms (m ²)	شماره بازه Reach No.
100	50	25	10	2			
7654	6650	5258	5249	3644	مساحت (مترمربع) Area (m ²)	45262	1
16.9	14.7	11.62	11.6	8	درصد خسارت Damage Percentage		
32498	31396	30059	29991	27748	مساحت (مترمربع) (m ²) Area	60529	2
53.7	52	49.7	49.6	45.8	درصد خسارت Damage Percentage		
5561	5318	5152	5030	4984	مساحت (مترمربع) (m ²) Area	31389	3
17.7	16.9	16.4	16	15.9	درصد خسارت Damage Percentage		
45713	43364	40469	40270	36376	مساحت (مترمربع) (m ²) Area	137180	مجموع Total
33.3	31.6	29.5	29.4	26.5	درصد خسارت Damage Percentage		

۳/۶ درصد افزایش پیدا کرد ولی با افزایش دوره بازگشت به ۲۵ سال، افزایش ۰/۰۲ درصدی نسبت به سیل با دوره بازگشت ۱۰ ساله محاسبه گردید. با این حال، در دوره‌های بازگشت ۵۰ ساله و ۱۰۰ ساله این افزایش خسارت به ۱۴/۷ و ۱۶/۹ درصد افزایش یافت.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در بازه نخست این پژوهش، میزان مساحت مزارع ماهی خسارت دیده در سیل ۲ ساله ۳۶۴۴ مترمربع از مجموع ۴۵۲۶۲ مترمربع و معادل ۸ درصد از مزارع این بازه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین، با افزایش دوره بازگشت سیل از ۲ سال به ۱۰ سال میزان خسارت



شکل ۱۱- تاثیر پهنه سیلاب ۱۰۰ ساله بر روی مزارع ماهی حاشیه رودخانه هراز- بازه اول
Figure 11. The impact of the 100-year floodplain on fish farms along the Haraz River – the first period

در بازه دوم، درصد خسارت مزارع ماهی خسارت‌دیده توسط سیل با دوره بازگشت ۲ ساله، ۴۵/۸ درصد از مزارع این بازه را تحت تاثیر قرار داد و با افزایش دوره بازگشت سیل به ۱۰ سال و بیشتر، این میزان خسارت تا ۵۳/۷ درصد افزایش یافته است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مزرعه ماهی شماره ۱ هیچ تاثیری از سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله نشان نداد ولی در مزارع ماهی شماره ۲، ۳ و ۴ بخشی از این مزارع، تحت تاثیر سیل با دوره بازگشت‌های مختلف قرار گرفته است.



شکل ۱۲- تاثیر پهنه سیلاب ۱۰۰ ساله بر روی مزارع ماهی حاشیه رودخانه هراز- بازه دوم
Figure 12. The impact of the 100-year floodplain on fish farms along the Haraz River – the second Period

در بازه سوم، میزان خسارت در دوره بازگشت سیل با دبی ۲ ساله، از ۲۶/۵ درصد شروع و در نهایت با افزایش دوره بازگشت سیل با دبی ۱۰۰ ساله این میزان خسارت تا ۳۳/۳ درصد تحت تاثیر قرار داد.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، مزرعه ماهی شماره ۱۱، هیچ تاثیری از سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله نشان نداد ولی در مزارع ماهی شماره ۵، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ بخشی از این مزارع، تحت تاثیر سیل با دوره بازگشت‌های مختلف قرار گرفته است و در نهایت مزرعه شماره ۱۱، به‌طور کامل در معرض خطر سیل قرار دارد.



شکل ۱۳- تاثیر پهنه سیلاب ۱۰۰ ساله بر روی مزارع ماهی حاشیه رودخانه هراز- بازه سوم
Figure 13. The impact of the 100-year floodplain on fish farms along the Haraz River - Third Period

است که کوچک‌ترین تغییر در سطح آب، باعث ورود جریان به مزارع می‌شود.

پیامدهای مدیریتی و راهکارهای کاهش خسارت

بر اساس یافته‌های این پژوهش، می‌توان چند راهکار مدیریتی و اجرایی را برای کاهش خطر سیلاب در مزارع پرورش ماهی حاشیه رودخانه هراز پیشنهاد کرد:

۱. ایجاد دیوارهای حفاظتی و سازه‌های غیرسازه‌ای در بازه‌های بحرانی (به‌ویژه بازه دوم).
۲. اصلاح الگوی جانمایی مزارع جدید و جلوگیری از احداث استخرهای پرورش ماهی در مناطق با ریسک بالا (بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی).
۳. بهبود سامانه هشدار سیل و اطلاع‌رسانی به موقع به بهره‌برداران، به‌ویژه در فصل بارش‌های شدید.
۴. احیای پوشش گیاهی و مدیریت کاربری اراضی در حاشیه رودخانه برای کاهش سرعت و حجم رواناب.
۵. تعیین حد بستر قانونی رودخانه و نظارت جدی بر تجاوز به حریم آن، به‌ویژه در بازه دوم.

جمع‌بندی نتایج

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که اگرچه تمامی بازه‌های مورد مطالعه در معرض خطر سیلاب قرار دارند، اما بازه دوم بحرانی‌ترین بخش رودخانه هراز از نظر خسارت به مزارع پرورش ماهی محسوب می‌شود. این موضوع ضرورت برنامه‌ریزی جامع برای مدیریت سیلاب و کاهش خسارات را برجسته می‌سازد.

مقایسه سه بازه مورد مطالعه

بازه اول (کم‌خطر): به‌دلیل عرض بیشتر و شیب مناسب، بخش قابل‌توجهی از جریان در بستر اصلی هدایت شد. در نتیجه، میزان تأثیرگذاری سیلاب بر مزارع محدود بود و بیشتر مزارع تنها در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در معرض خطر جدی قرار گرفتند.

بازه دوم (بحرانی‌ترین): در این محدوده، تراکم بالای مزارع، عرض کم رودخانه و نبود سازه‌های حفاظتی باعث شد بخش عمده‌ای از مزارع حتی در دوره بازگشت ۲۵ ساله در معرض سیلاب قرار گیرند. افزایش قابل توجه عمق و گسترش پهنه در دوره‌های بلندمدت، شدت خطر را دوچندان کرد.

بازه سوم (متوسط): شرایط نسبتاً متعادل بودند. اگرچه در دوره بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله بخشی از مزارع تحت تأثیر قرار گرفتند، اما به دلیل پراکندگی کمتر مزارع و پهنای رودخانه، آسیب‌پذیری کلی کمتر از بازه دوم برآورد شد.

مقایسه با مطالعات مشابه

یافته‌های این تحقیق با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارند. سیلوا (Silva, 2014) نیز نشان داد که در رودخانه‌های با عرض کم و نبود دیواره‌های حفاظتی، خطرپذیری فعالیت‌های اقتصادی حاشیه‌ای به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین کاظمی (Kazemi, 2016) در مطالعه‌ای مشابه در ایران بیان کرده است که تمرکز فعالیت‌های انسانی در پهنه سیلابی یکی از عوامل اصلی افزایش آسیب‌پذیری است. نتایج حاضر با این مطالعات همسو هستند و اهمیت مدیریت فضایی مزارع در کاهش خطر را تأیید می‌کنند.

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، مزارع ماهی ۱۲، ۱۴ و ۱۵ تحت تأثیر سیل با دوره بازگشت‌های مختلف قرار نمی‌گیرند ولی مزارع ۱۳ و ۱۶ در این بازه در معرض خطر سیلاب قرار دارند. در مجموع سه بازه مورد تحقیق، از میزان ۱۳۷۱۸۰ مترمربع مزارع ماهی حاشیه رودخانه هراز، ۳۶۳۷۶ مترمربع از این مزارع در دوره بازگشت با دبی ۲ ساله که معادل ۲۶/۵ درصد است، تحت تأثیر سیل قرار گرفت. همچنین، با افزایش دوره بازگشت سیل از ۲ سال به ۱۰ سال، میزان خسارت ۲/۹ درصد افزایش پیدا کرد ولی با افزایش دوره بازگشت به ۲۵ سال، افزایش ۰/۱ درصدی نسبت به سیل با دوره بازگشت ۱۰ ساله محاسبه گردید. با افزایش دوره بازگشت سیل به ۵۰ ساله و ۱۰۰ ساله، این افزایش خسارت به ۳۱/۶ و ۳۳/۳ درصد افزایش یافت.

پهنه‌بندی سیلاب و تأثیر آن بر مزارع پرورش ماهی

نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی نشان می‌دهند که با افزایش دوره بازگشت، وسعت پهنه سیلابی در تمامی بازه‌های مورد مطالعه افزایش می‌یابد. به‌ویژه در بازه دوم، درصد خسارت به مزارع پرورش ماهی به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از سایر بازه‌ها بود (جدول ۳). این امر ناشی از تراکم بالاتر مزارع، مجاورت مستقیم با بستر اصلی رودخانه و محدودیت‌های توپوگرافی منطقه است. در بازه اول، مزارع عمدتاً در موقعیت ایمن‌تری احداث شده‌اند و به‌دلیل وجود دیوارهای حفاظتی و فاصله نسبی از بستر اصلی رودخانه، حتی در دوره بازگشت‌های بالا نیز خسارت‌ها محدود باقی مانده‌اند. در مقابل، بازه سوم با وجود تعداد کمتر مزارع، به‌دلیل عرض کمتر دشت سیلابی و تمرکز جریان، حساسیت بیشتری نسبت به افزایش دبی‌های سیلابی نشان داد.

مقایسه خسارت در بازه‌های مختلف

بر اساس نتایج محاسبات، بیش از ۶۰ درصد از کل مزارع پرورش ماهی حاشیه رودخانه هراز در معرض خطر سیلاب قرار دارند. شدت خسارت در بازه دوم در تمامی دوره‌های بازگشت بالاتر بود و در برخی سال‌ها (۲۵ و ۵۰ ساله) نزدیک به نیمی از مزارع این بازه تحت تأثیر سیلاب قرار گرفته‌اند.

این موضوع نشان می‌دهد که توزیع جغرافیایی مزارع و نوع کاربری زمین نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان آسیب‌پذیری دارند. در حالی که در بازه اول، موقعیت مناسب‌تر مزارع منجر به کاهش چشمگیر خسارات شده است، در بازه دوم تمرکز و جانمایی نامناسب واحدها باعث افزایش شدید آسیب‌پذیری گردیده است.

تحلیل اثر دوره‌های بازگشت

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در بازه‌های اول و سوم، افزایش دوره بازگشت از ۲ به ۲۵ سال باعث افزایش خسارت قابل توجهی شده است، اما از ۲۵ به ۱۰۰ سال تغییرات چندانی محسوس نبوده‌اند. این موضوع بیانگر آن است که پس از رسیدن به یک آستانه بحرانی، افزایش بیشتر دبی تأثیر چندانی بر وسعت پهنه سیلاب ندارد.

اما در بازه دوم، روند خسارت تقریباً خطی و صعودی است، به‌گونه‌ای که با افزایش هر دوره بازگشت، درصد بیشتری از مزارع تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این امر ناشی از موقعیت قرارگیری مزارع در کم‌ارتفاع‌ترین بخش‌های حاشیه رودخانه

تحلیل چرایی آسیب پذیری بازه دوم

بازه دوم به عنوان بحرانی ترین محدوده شناسایی شد. دلایل اصلی آسیب پذیری بالا در این بازه عبارتند از: تراکم بالای مزارع در پهنه سیلابی. باریک بودن مقطع عرضی رودخانه که منجر به افزایش عمق جریان در زمان وقوع سیلاب می شود. نبود سازه های حفاظتی مناسب (دیوار حائل یا سیل بند). تغییر کاربری اراضی حاشیه رودخانه بدون در نظر گرفتن ظرفیت هیدرولیکی آن. این عوامل در کنار هم باعث شده اند که بازه دوم حتی در سیلاب های با دوره بازگشت کوتاه، آسیب پذیرتر از سایر بخش ها باشد.

بحث تکمیلی

یکی از نکات مهم این پژوهش، نشان دادن روند افزایشی خطر با طولانی تر شدن دوره بازگشت است. به طور مثال، درصد مزارع آسیب پذیر در بازه دوم از حدود ۵۵٪ در دوره ۲۵ ساله به نزدیک ۹۰٪ در دوره ۱۰۰ ساله افزایش یافته است. این روند، بیانگر شدت بالای خطر در شرایط وقوع سیلاب های نادر ولی ویرانگر است.

یافته های اصلی

- ۱- بیش از ۶۰ درصد از مزارع پرورش ماهی حاشیه رودخانه هراز در معرض خطر سیلاب با دوره بازگشت های مختلف قرار دارند.
- ۲- بازه دوم بیشترین آسیب پذیری را دارد و در دوره های بازگشت ۲۵ و ۵۰ ساله حدود نیمی از مزارع آن تحت تأثیر سیلاب قرار گرفتند.
- ۳- بازه اول ایمن تر است و به دلیل جانمایی مناسب و وجود اقدامات حفاظتی، خسارات در آن حداقل است.
- ۴- بازه سوم با وجود تعداد کمتر مزارع، به دلیل عرض محدود و تمرکز جریان، در معرض خطر متوسط تا زیاد قرار دارد.
- ۵- افزایش خسارت از دوره بازگشت ۲ تا ۲۵ ساله محسوس است، اما از ۲۵ تا ۱۰۰ ساله تغییرات کمتری مشاهده شد.

نتیجه گیری کلی

مزارع ماهی حاشیه رودخانه هراز به عنوان یکی از واحدهای مهم اقتصادی در استان مازندران هستند، نقش مهمی

در توسعه اقتصادی منطقه دارند و خسارت به ابنیه و ورود سیل به این واحدها و تلفات ناشی از آن، خسارات اقتصادی زیادی را برای این واحدها به دنبال دارد. در سال های متمادی، تعداد زیادی از این واحدها دچار خسارت ناشی از سیل گردیدند که پهنه بندی سیل می تواند کمک بسیاری برای مدیریت و کاهش خسارات احتمالی در آینده به دنبال داشته باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل، می توان گفت که در بازه نخست، مزارع ماهی احداث شده ریسک پایینی از خسارات ناشی از سیل با دوره های بازگشت مختلف دارند و دارای جانمایی درستی هستند. در بازه دوم، میزان خسارت سیل در دوره های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ ساله، حدود ۵۰ درصد محاسبه شد. در بازه سوم، میزان خسارت به طور متوسط در حدود ۳۰ درصد برآورد گردید. همان طور که مشاهده گردید، در بازه های دوم و سوم، تعداد مزارع تحت تأثیر سیل بیشتر از بازه اول مشاهده شدند و از ریسک بالایی در مواجهه با خطر سیل برخوردار بودند که با نتایج و گزارشات اخذ شده از خسارت سیل در سال های گذشته مطابقت دارد. این میزان خسارت ناشی از محدود کردن مجرای جریان است که عمدتاً سبب افزایش عمق جریان و یا سرعت جریان می شود که این امر منجر به آب گرفتگی زمین های مجاور (نسبت به شرایط طبیعی رودخانه) و یا پدیده آبشستگی بستر و کناره ها (بر اثر افزایش سرعت جریان) خواهد شد. در هر دو صورت، تغییرات قابل ملاحظه ای در مورفولوژی رودخانه ایجاد خواهد شد که از آن جمله می توان به تغییر مسیر جریان رودخانه، تعریض رودخانه به واسطه فرسایش کناره های آن و تغییر شیب رودخانه به واسطه پدیده کف کنی اشاره کرد و همچنین ساخت و ساز بی رویه و نادرست در مسیر و حاشیه رودخانه، خسارات عمده ای را به دنبال خواهد داشت. نتایج به دست آمده حاکی از کارایی و حساسیت بالای مدل هیدرولیکی HEC-RAS جهت پهنه بندی سیل هستند. با بهره گیری از نرم افزارهای GIS و HEC-RAS می توان عمق، سرعت سیل و پهنه های سیل گیر را در نقاط مختلف بدست آورد که این با نتایج سایر محققان مطابقت دارد. به این طریق می توان از مناطق احتمالی خطر سیل آگاهی یافته و به منظور مقابله با آن و کاهش اثرات ناشی از آن، اقدامات و اصلاحات لازم را به عمل آورد. بنابر این، برنامه ریزی در مورد تمهیدات لازم در زمینه رفع خسارات احتمالی ناشی از این پدیده طبیعی امری ضروری و اجتناب ناپذیر است.

References

- Amirmorady, K., Shokouhi, A.R., & Azizian, A. (2019). Research on risk assessment and uncertainty of financial losses caused by river floods in urban areas (Study area: Kan basin). *Journal of Iran's Water and Soil*, 50(9), 2239-2259. [In Persian]
- Avand, M. T., Moradi, H. R., & Ramezanzadeh Lesboei, M. (2022). *Assessment of flood vulnerability in the Tajan watershed using the Best-Worst Method (BWM)*. *Journal of Watershed Management Research*, 13(26), 10–20. <https://doi.org/10.52547/jwmr.13.26.10>. [In Persian]
- Change, C. (2014). *Mitigation of Climate Change; Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York.
- Ganji Norouzi, Z., Shokoohi, A.R., & Singh, V.P. (2016). Calculating the effect of uncertainty of the probability discharge function in estimating the risk of agricultural damage caused by floods using the Monte Carlo method. *Journal of Iranian Water Resources Research*, 12(2), 13-23. [In Persian]

- Houshmand, A.M., Hosseini, S.A., & Qormezcheshmeh, B. (2019). Estimation of flood damage intensity based on global damage-depth functions in the Jajrood River area. *Journal of Water Resources Engineering*, 16(57), 61-74. [In Persian]
- Jafari, A., Ebrahimnejad, M., & Hadiani, A. (2007). Investigation of the effects of flooding on the production of cold-water fish and the resulting damages in the Haraz River. *Third Conference on Applied Geology and Environment*. [In Persian]
- Junger, L., Hohensinner, S., Schroll, K., Wagner, K., & Seher, W. (2022). Land Use in Flood-Prone Areas and Its Significance for Flood Risk Management—A Case Study of Alpine Regions in Austria. <https://www.mdpi.com/journal/land>.
- Valizadeh Kamran, Kh., Dalir Hassannia, R., & Azari-Amghani K. (2019). Flood zoning and its impact on land use in the surrounding area using drone images and geographic information systems. *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 10(3), 59-75. [In Persian]
- Kazemi, A., Rezaei Moghadam, M.H., Nikjoo, M.R., Hejazi, M.A., & Khazri, S. (2016). Zoning and flood risk management in the Simineh Rood River using the HEC-RAS hydraulic model. *Journal of Environmental Risk Management (Former Risk Knowledge)*, 3(4), 379-393. [In Persian]
- Li, H., Xie, J., & Guo, L. (2017). A review of the study on flash flood early warning in China. Pearl River, 38(6), 29-35.
- Malayeri, S., & Bashirgonbad, M. (2024). Estimation of runoff height to analyze the flood production potential of the watershed overlooking Malayer City. *Journal of Watershed Management Research*, 15(1), 29-39. <https://doi.org/10.61186/jwmr.15.1.29>. [In Persian]
- Masoudian, M., Fenderski, N., & Ghareghezloo, M. (2014). Reducing urban flood damage using non-structural management (Case study: Neka flood, 1999). *Journal of Watershed Management Research*, 5(10), 1-14. [In Persian]
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- Panahi, R., Hosseinzadeh, M.M., & Khaleghi, S. (2019). Zoning of flood hazards to determine river boundaries (case study: Gamasyab River). *Journal of Ecohydrology*, 6(2), 553-567. [In Persian]
- Pathan, A. I., & Agnihotri, P.G. (2021). Application of new HEC-RAS version 5 for 1D hydrodynamic flood modeling with special reference through geospatial techniques: a case of River Purna at Navsari, Gujarat, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 1133-1144. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00961-0>
- Silva, F.V., Bonuma, N.B., & Uda, P. K. (2014). Flood Mapping In Urban Area Using Hec-Ras Model Supported By GIS, International Conference on Flood Management, 9pp.
- Wang, Y., Li, Z., Tang, Z., & Zeng, G. (2011). A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, 25(13), 3465-3484.
- Zhang, Q., Wang, Y., Singh, V. P., Gu, X., Kong, D., & Xiao, M. (2016). Impacts of ENSO and ENSO Modoki+ A regimes on seasonal precipitation variations and possible underlying causes in the Huai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 533, 308-319.