
فصلنامه راهبردهای فنی در سامانه های آبی

شاپای الکترونیک: ۱۴۴۹-۲۹۸۱

بهار ۱۴۰۴، دوره ۳، شماره ۱

-
- | | |
|--------|--|
| ۱-۲۰ | بررسی کاربرد منابع آب نامتعارف در تأمین پایدار آب: مزایا، محدودیت ها و راهکارهای اجرایی
فریدا ایرجی، پیام نجفی |
| ۲۱-۳۵ | پایش تغییرات مورفولوژیکی خط ساحلی رودخانه کارون با استفاده از تصاویر ماهواره ای چندزمانه
(مطالعه موردی: محدوده شهر اهواز، ۲۰۰۶-۲۰۱۶)
محمد ساردویی، محمدابراهیم عقیفی |
| ۳۶-۵۶ | بررسی جریان روی سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق
محمدحسن هاشمی فشارکی، علی خوش فطرت، الهام ایزدی نیا، احسان دلاوری |
| ۵۷-۷۱ | مدل سازی عددی بررسی تأثیر وجود یا عدم وجود سطح آزاد بر جریان اطراف پایه استوانه ای
مهدی اسمعیل زاده فریدنی، یاسین آقایی شلمانی |
| ۷۲-۸۶ | بررسی روند تخریب کیفیت آب در رودخانه زاینده رود با مدل SIAQUA- IPH
محمد رضا فدائی تهرانی، مژگان میرزائی |
| ۸۷-۱۰۰ | بهینه سازی مقطع کانال دوزنقه ای مرکب با جنس پوشش غیریکنواخت
فریناز سادات میرلوحی |
-

Review Article



Evaluating unconventional water resources for sustainable water supply: Advantages, limitations and implementation strategies

Farida Irajy*, Payam Najafi

Water Studies Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: f.iraji@khuif.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 26 Feb 2025

Revised: 30 Apr 2025

Accepted: 02 Jun 2025

Published: 04 Jun 2025

Extended Abstract

Introduction

With global population growth, industrial development, and the consequences of climate change, freshwater resources in many regions of the world have experienced a significant decline. According to reputable international reports, over two billion people live in areas with severe water stress. This crisis has made the search for alternative water sources and the intelligent management of water reserves a top priority. In this context, Unconventional Water Resources (UWRs) have emerged as a strategic solution to address water scarcity. These resources encompass a wide range of technologies and methods that enable the utilization of non-traditional water sources. Despite their high potential, numerous challenges—including technical limitations, high costs, and social resistance—have hindered their development. This study aims to provide a comprehensive analysis of the advantages, limitations, and implementation strategies of UWRs, systematically examining these resources under four main categories: atmospheric water, processed water, transferred water, and unconventional groundwater.

Materials and Methods

This research employs a systematic review and qualitative content analysis to examine the existing literature on UWRs. Data were collected from reputable international databases (Scopus, Web of Science, Science Direct) and Persian databases (Sid, Magiran, Civilica). Search keywords included core concepts related to UWRs, associated technologies, and implementation challenges. Article selection criteria were based on a defined timeframe (1998–2025) and thematic scope (technologies, challenges, socio-economic and environmental dimensions). A two-stage screening process was applied: the first stage involved title and abstract screening, while the second stage assessed full-text articles. Ultimately, 41 studies with robust methodological quality were selected for final analysis. Extracted data included the type of UWR, study region, key findings, advantages, and limitations. Findings were synthesized through comparative tables and analytical evaluation.

Results and Discussion

The findings revealed that UWRs can be classified into four main categories: atmospheric water (including fog/dew harvesting, cloud seeding, and rainwater collection), processed water (desalinated water, treated wastewater, greywater, and agricultural drainage water), transferred water (glacial meltwater and virtual water), and unconventional groundwater (artificial aquifer recharge and fossil water). The optimal choice of resource depends on factors such as sustainability, cost, environmental considerations, and geographical conditions. Resources like rainwater and greywater are more sustainable due to their renewability and low operational costs, whereas advanced technologies like desalination require significant investment. Major challenges include technical limitations, high costs, social resistance, and governance barriers. However, technological advancements (e.g., nanofiltration), smart policymaking, and community engagement can help overcome these obstacles. In Iran, successful experiences with treated wastewater and atmospheric moisture extraction demonstrate the high potential of these resources. Additionally, decentralized treatment systems and salinity-adapted agriculture can enhance the efficiency of UWR utilization.



Conclusion

This study demonstrates that UWRs can play a vital complementary role in ensuring water security. Successful management of these resources requires a fundamental shift in water governance—transitioning from centralized approaches to participatory models involving the private sector and local communities. Key strategies include developing low-cost indigenous technologies, establishing flexible standards, implementing educational programs, and creating long-term monitoring systems. Ultimately, the intelligent integration of UWRs into an Integrated Water Resources Management (IWRM) framework can ensure water sustainability amid climate change and population growth. Future research should focus on cost-effective technologies, lifecycle assessments, and international collaborations.

Keywords: Unconventional water resources, Sustainable water management, Desalination, Treated wastewater, Climate change, Water security

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Farida Iraj: Writing, Methodology, Investigation & Data Collection; **Payam Najafi:** Supervision, Editing, Methodology, and Validation.

Citation: Iraj, F., & Najafi, P. (2025). Evaluating unconventional water resources for sustainable water supply: Advantages, limitations and implementation strategies. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(1), 1-20. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1206427>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی کاربرد منابع آب نامتعارف در تأمین پایدار آب: مزایا، محدودیت‌ها و راهکارهای اجرایی

فریدا ایرجی*، پیام نجفی

مرکز تحقیقات مطالعات آب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: f.iraji@khuif.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸

چکیده

با توجه به افزایش جمعیت جهانی، توسعه صنعتی و تغییرات اقلیمی، منابع آب شیرین در بسیاری از مناطق جهان با کاهش چشمگیری مواجه شده‌اند. منابع آب نامتعارف (UWRs) به عنوان راهکاری استراتژیک برای مقابله با کمبود آب مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مطالعه با استفاده از روش مرور نظام‌مند و تحلیل محتوای کیفی، به بررسی ۱۲ منبع آب نامتعارف در چهار گروه اصلی (آب جوی، آب پردازش‌شده، آب انتقال‌یافته و آب زیرزمینی نامتعارف) و مطالعات کلیدی در این زمینه پرداخته است. یافته‌ها نشان داد که انتخاب مناسب‌ترین منبع آب نامتعارف به عواملی مانند پایداری، هزینه، ملاحظات محیط‌زیستی و شرایط جغرافیایی بستگی دارد. منابعی مانند آب باران، آب خاکستری و آب شبنم به دلیل تجدیدپذیری و هزینه پایین، گزینه‌های پایدارتری هستند، درحالی‌که فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند نمک‌زدایی و استخراج آب‌های فسیلی نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی می‌باشند. چالش‌های اصلی شامل محدودیت‌های فنی، هزینه‌های بالا، مقاومت اجتماعی و موانع مدیریتی است، اما پیشرفت‌های فناوریانه، سیاست‌گذاری هوشمند و مشارکت محلی می‌توانند به غلبه بر این چالش‌ها کمک کنند. در ایران، تجربیات موفق در استفاده از پساب تصفیه‌شده، استحصال رطوبت هوا و پرورش آبزیان با آب‌های شور، نشان‌دهنده پتانسیل بالای این منابع است. نتیجه‌گیری کلی این مطالعه تأکید بر لزوم مدیریت یکپارچه منابع آب نامتعارف در کنار منابع متعارف، با رویکردی تطبیقی و مبتنی بر شرایط محلی دارد تا امنیت آبی پایدار در آینده تضمین شود.

واژه‌های کلیدی: منابع آب نامتعارف، مدیریت پایدار آب، نمک‌زدایی، پساب تصفیه‌شده، تغییرات اقلیمی، امنیت آبی

استناد: ایرجی، ف. و نجفی، پ. (۱۴۰۴). بررسی کاربرد منابع آب نامتعارف در تأمین پایدار آب: مزایا، محدودیت‌ها و راهکارهای اجرایی. *راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی*، ۳(۱): ۱-۲۰. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1206427>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

با توجه به رشد فزاینده جمعیت جهانی، توسعه سریع صنایع و پیامدهای نگران کننده تغییرات اقلیمی، منابع آب شیرین در بسیاری از مناطق جهان با کاهش چشمگیری مواجه شده‌اند. بر اساس گزارش‌های معتبر بین‌المللی، بیش از دو میلیارد نفر از جمعیت جهان در مناطقی زندگی می‌کنند که با تنش آبی شدید مواجه هستند (UN-Water, 2021). این وضعیت بحرانی، ضرورت جستجوی منابع آب جایگزین و مدیریت هوشمندانه ذخایر آبی موجود را به یکی از اولویت‌های اصلی جامعه جهانی تبدیل کرده است. در این میان، آب‌های نامتعارف (¹UWRs) به عنوان راهکاری استراتژیک و نویدبخش برای مقابله با چالش کمبود آب مورد توجه قرار گرفته‌اند (Gosling & Arnell, 2016; Yazdandoost et al., 2021). آب‌های نامتعارف به منابع آبی اطلاق می‌شوند که به دلایل مختلف کیفی یا کمی، به صورت سنتی در مصارف انسانی، کشاورزی و صنعتی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند و برای بهره‌برداری نیازمند فرآیندهای پیشرفته تصفیه و آماده‌سازی هستند (Odendaal, 2009). این منابع معمولاً از طریق روش‌های متداول استحصال آب مانند برداشت از منابع سطحی یا زیرزمینی در دسترس مصرف‌کنندگان قرار نمی‌گیرند (Indelicato et al., 1993; Haddad & Mizyed, 2004; Pereira et al., 2009). مفهوم آب‌های نامتعارف در طول چند دهه اخیر تحولات معنایی قابل توجهی را تجربه کرده است. در دهه ۱۹۹۰، این اصطلاح عمدتاً به منابع آبی با ویژگی‌های خاص مانند محتوای بالای مواد آلی، آلاینده‌های میکروبیولوژیکی یا غلظت زیاد املاح اشاره داشت که پیش از استفاده نیاز به فرآیندهای تصفیه پیشرفته داشتند (Indelicato et al., 1993). در اوایل قرن بیست و یکم، با گسترش فناوری‌های نوین، تعریف این منابع توسعه یافت و سیستم‌های جمع‌آوری و ذخیره‌سازی آب باران نیز به فهرست آب‌های نامتعارف اضافه شدند (Jaber & Mohsen, 2001). Buchholz, 2008) در مطالعات خود دامنه تعریف آب‌های نامتعارف را به منابعی همچون آب شور، آب لب‌شور، زه‌آب کشاورزی، فاضلاب تصفیه‌شده و آب استحصال‌شده از طریق روش‌های نوین مانند جمع‌آوری مه، اصلاح آب‌وهوا و برداشت آب باران گسترش داد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران این حوزه تعریف جامع‌تری ارائه کرده‌اند که بر اساس آن، هر منبع آبی غیر از آب شیرین متعارف که برای بهره‌برداری نیازمند فناوری‌های پیشرفته باشد، در زمره آب‌های نامتعارف قرار می‌گیرد (Murad, 2014; Negm et al., 2018; Ji et al., 2020). فناوری‌های تولید آب نامتعارف شامل طیف متنوعی از روش‌ها و رویکردهای نوآورانه است که امکان بهره‌برداری از منابع غیرسنتی آب را فراهم می‌کنند. اگرچه آب‌های نامتعارف امکانات امیدوارکننده‌ای را برای غلبه بر بحران کم‌آبی ارائه می‌دهند، اما بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که دانش کنونی در این زمینه هنوز ناقص است و این منابع با محدودیت‌های متعددی روبرو هستند. مهم‌ترین این محدودیت‌ها شامل عوامل جغرافیایی، اقلیمی، اقتصادی و سیاسی می‌باشد که باعث شده‌اند کاربرد آب‌های نامتعارف در بسیاری از مناطق جهان همچنان محدود باقی بماند. از نظر جغرافیایی، دسترسی به برخی از این منابع مانند آب‌های فسیلی یا یخچال‌های طبیعی به مکان‌های خاصی محدود است. از جنبه اقلیمی، کارایی بسیاری از فناوری‌های استحصال آب نامتعارف مانند جمع‌آوری مه یا بارورسازی ابرها به شرایط جوی منطقه وابسته است. چالش‌های اقتصادی نیز از موانع اصلی توسعه این منابع محسوب می‌شوند، چرا که بسیاری از فناوری‌های مرتبط با آب‌های نامتعارف نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه سنگین و هزینه‌های عملیاتی بالا هستند. علاوه بر این، موانع سیاسی و قانون‌گذاری نیز می‌توانند توسعه این منابع را با مشکل مواجه سازند. با وجود تمام چالش‌های مذکور، آب‌های نامتعارف به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از راهبردهای مدیریت پایدار منابع آب در قرن بیست و یکم شناخته می‌شوند. این منابع به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود شدید آب مواجه هستند، می‌توانند نقش حیاتی در تأمین امنیت آبی ایفا کنند. ادغام هوشمندانه آب‌های نامتعارف در سیستم‌های مدیریت یکپارچه منابع آب (²IWRM) و توسعه فناوری‌های

¹ Unconventional Water Resources² Integrated Water Resources Management

مقرون به صرفه و کارآمد در این زمینه، از جمله راهکارهای کلیدی برای غلبه بر بحران جهانی آب محسوب می‌شوند. هدف از مطالعه حاضر، بررسی انواع منابع آب نامتعارف، مزایا و محدودیت‌های آنها و مرور نظام‌مند مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه است تا با بررسی مقایسه‌ای امکان درک بهتر قابلیت‌ها و چالش‌های هر یک از روش‌های استحصال و استفاده از منابع آب نامتعارف فراهم شود.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق با به کارگیری روش مرور نظام‌مند و تحلیل محتوای کیفی به بررسی جامع پیشینه مربوط به منابع آب نامتعارف پرداخته شد. فرآیند تحقیق با جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های داده معتبر بین‌المللی شامل Scopus، Web of Science، Science Direct و Google Scholar و همچنین پایگاه‌های اطلاعاتی فارسی مانند Sid، Magiran و Civilica آغاز شد. کلیدواژه‌های جستجو در دو زبان انگلیسی و فارسی شامل مفاهیم اصلی مرتبط با منابع آب نامتعارف، فناوری‌های مرتبط و چالش‌های موجود انتخاب گردید. معیارهای انتخاب مقالات بر اساس محدوده زمانی (۱۹۹۸-۲۰۲۵) با تمرکز بر دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۳ و حوزه محتوایی مرتبط با فناوری‌ها و چالش‌های منابع آب نامتعارف و ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی تعیین شد. فرآیند غربالگری در دو مرحله انجام گرفت مرحله اول: غربالگری بر اساس عنوان و چکیده (حذف مقالات نامرتبط)، مرحله دوم: بررسی متن کامل مقالات باقیمانده (حذف مطالعات با روش‌شناسی ضعیف یا داده‌های ناکافی). در نتیجه مقالات با کیفیت روش‌شناختی مناسب برای تحلیل نهایی باقی ماندند. داده‌های استخراج شده از مقالات شامل نوع منبع آب نامتعارف، منطقه مورد استفاده، نتایج کلیدی، مزایا و محدودیت‌ها و دسته بندی موضوعی برای هر مقاله بود. ترکیب یافته‌ها از طریق تهیه جداول مقایسه‌ای، تحلیل تطبیقی چالش‌ها در مناطق مختلف و توسعه چارچوب مفهومی یکپارچه انجام شد. این مطالعه با محدودیت‌هایی از جمله عدم دسترسی به برخی مطالعات منطقه‌ای به زبان‌های دیگر و تفاوت در استانداردهای گزارش‌دهی بین مطالعات مواجه بود. این روش‌شناسی جامع امکان ارائه تحلیلی نظام‌مند از وضعیت فعلی دانش در حوزه منابع آب نامتعارف و شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی را فراهم ساخت.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، ۱۲ منبع آب نامتعارف براساس تقسیم‌بندی (Karimidastenaeci et al., 2022) بررسی شدند. (Karimidastenaeci et al., 2022) منابع آب نامتعارف را در چهار گروه اصلی ذیل دسته‌بندی کردند:

آب جوی: شامل آب مه، شبنم، بارورسازی ابرها و جمع‌آوری آب باران.

آب پردازش‌شده: شامل آب شیرین‌شده، پساب تصفیه‌شده، آب خاکستری و آب زهکشی کشاورزی.

آب انتقال‌یافته: شامل آب کوه‌های یخی و آب مجازی.

آب زیرزمینی نامتعارف: شامل تغذیه مصنوعی سفره‌های آب و آب فسیلی.

در جدول (۱) مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف استفاده از این منابع (از نظر مزایا، محدودیت‌ها و نمونه کاربرد جهانی) ارائه شد. این مقایسه به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا مناسب‌ترین روش را بر اساس شرایط محلی انتخاب کنند.

۳-۱- بررسی منابع آب نامتعارف

۳-۱-۱- آب مه

آب مه به عنوان یکی از اشکال بارش غیربارانی، شامل قطرات معلق آب و رطوبت موجود در جو یا نزدیک سطح زمین است که در مناطق مستعد مه به عنوان یک منبع آب نامتعارف باکیفیت قابل دسترس است. این منبع، جزء مهمی از چرخه آب در مناطق

کم‌آب محسوب می‌شود. برداشت مه با استفاده از تورهای ویژه در مناطق کوهستانی و مه‌خیز امکان‌پذیر است. این روش انرژی کمتری نیاز دارد، اما تولید فصلی و نیاز به نگهداری از معایب آن است (Schemenauer & Cereceda, 1991; Fesshaye et al., 2014).

۳-۱-۲- آب شبنم

آب شبنم یک پدیده هواشناسی است که به طور گسترده در سراسر جهان رخ می‌دهد. این منبع آب نامتعارف و قابل شرب، از رطوبت جو تشکیل می‌شود که بر روی سطوح سرد به صورت قطرات مایع تبدیل می‌شود (Beysens, 2006). شبنم به عنوان منبعی تجدیدپذیر و کم‌هزینه برای مصارف آشامیدنی در مناطق خشک مطرح است. با این حال، وابستگی به شرایط جوی و بازده کم، استفاده گسترده از آن را محدود می‌کند (Beysens, 2006; Kaseke & Wang, 2018).

۳-۱-۳- بارورسازی ابرها

بارورسازی ابرها یک فناوری برای تغییر مقدار، شدت و حتی نوع بارش با استفاده از روش‌های اصلاح آب‌وهواست. این روش با تزریق مواد شیمیایی مانند یدید نقره به ابرها، بارش را تحریک می‌کند. فرایندهای باروری ابرها شامل روش‌های پرتاب موشک، روش‌های هوایی و ژنراتورهای زمینی است. برای بهبود فرآیند برخورد-ادغام در ابرهای گرم، مواد بارورکننده می‌توانند به عنوان هسته‌های تراکم ابر عمل کنند یا به عنوان هسته‌های یخ باعث تبدیل آب مایع به بلورهای یخ شده و فرایندهای رسوب بخار، یخ‌زایی و تجمع را در ابرهای فوق‌سرد تقویت کنند (Jensen & Lee, 2008). محدودیت‌های اصلی شامل افزایش حداکثر ۱۰-۱۲ درصد بارش و چالش‌های سیاسی بین‌کشوری است (Talabi & Pourmohammadi, 2016). آب حاصل از بارورسازی ابرها را می‌توان به عنوان یک منبع آب نامتعارف باکیفیت در نظر گرفت.

۳-۱-۴- جمع‌آوری آب باران

جمع‌آوری آب باران یک روش سنتی و رایج در سطح جهانی است که برای مصارف خانگی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و کشاورزی در مقیاس کوچک، به ویژه در کشاورزی دیم مورد استفاده قرار می‌گیرد (Toosi et al., 2020). با توجه به کمبود بارندگی و توزیع نامناسب مکانی-زمانی آن، سیستم‌های جمع‌آوری آب باران به عنوان یکی از منابع آب نامتعارف در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد دارند (Rahaman et al., 2019). سادگی اجرا و هزینه کم از مزایای آن است، اما وابستگی به الگوی بارش از محدودیت‌های آن محسوب می‌شود (Ngigi, 2003; Zhang et al., 2020).

۳-۱-۵- آب شیرین‌کن‌ها

نمک‌زدایی از آب دریا یا آب‌های شور منبعی پایدار برای تأمین آب شیرین است، اما هزینه‌های بالا و تولید شورابه از چالش‌های اصلی آن محسوب می‌شود (Jones et al., 2019). هدف از سیستم‌های نمک‌زدایی، پاکسازی و تصفیه آب دریا یا آب لب‌شور، تأمین آبی است که میزان کل مواد جامد محلول (TDS) آن در حد مجاز کمتر از ۵۰۰ ppm باشد. این فرآیند از طریق روش‌های مختلف نمک‌زدایی انجام می‌شود (Ghafoor et al., 2020). این روش فقط برای کشورهای ثروتمند مقرون به صرفه است. کشورهایی مانند عربستان سعودی پیشرو در این فناوری هستند.

۳-۱-۶- پساب تصفیه‌شده

پساب به هر منبع آبی اطلاق می‌شود که در اثر فعالیت‌های انسانی شامل صنعتی، کشاورزی، تجاری و خانگی آلوده شده باشد. امروزه پساب تصفیه‌شده به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب نامتعارف شناخته می‌شود (Almanaseer et al., 2020). کاربردهای پساب تصفیه‌شده شامل کشاورزی (آبیاری محصولات)، آبیاری فضای سبز شهری، مصارف صنعتی است. این منبع به

ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود آب مواجه هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Adewumi et al., 2010; Baawain et al., 2010) پذیرش اجتماعی و هزینه‌های تصفیه از چالش‌های اصلی آن است (Adewumi et al., 2010; Karimidastenaie et al., 2022)

۳-۱-۷- آب خاکستری

آب خاکستری به پساب خانگی گفته می‌شود که از تمام فاضلاب‌های خانگی مانند آب‌های مصرفی در وان حمام، روشویی، دوش، ماشین‌های لباسشویی، سینک آشپزخانه یا ماشین ظرفشویی تولید می‌شود و شامل آب سرویس‌های بهداشتی نمی‌گردد (Boano et al., 2020). در مناطق کم‌آب، آب خاکستری تصفیه‌شده می‌تواند به عنوان یک منبع آب نامتعارف برای مصارف غیرشرب مورد استفاده قرار گیرد و از فشار بر منابع آبی بکاهد. با این حال، تصفیه آب خاکستری نیازمند فناوری‌های پیشرفته برای حذف آلاینده‌ها است (Patel et al., 2020).

۳-۱-۸- آب زهکشی کشاورزی

آب زهکشی کشاورزی به آب‌های سطحی و زیرسطحی طبیعی یا مصنوعی گفته می‌شود که به عنوان آب مازاد از مناطق کشاورزی خارج می‌شود و می‌توان آن را به عنوان یک منبع آب نامتعارف در نظر گرفت (Niaghi et al., 2019). آب زهکشی کشاورزی، در رشد محصولات نقش ندارد (Zhang et al., 2020). این آب در صورت جمع‌آوری و جلوگیری از دفع به عنوان فاضلاب، می‌تواند به عنوان منبعی احتمالی برای آبیاری مجدد مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، هنگامی که آب از خاک و شبکه زهکشی عبور می‌کند، حاوی نمک‌ها، مواد شیمیایی کشاورزی و سایر آلاینده‌ها مانند آفت‌کش‌ها می‌شود؛ بنابراین نیاز به تصفیه دارد (Barnes, 2014).

۳-۱-۹- آب یخچال‌های طبیعی

آب کوه‌های یخی به عنوان یکی از منابع آب نامتعارف شناخته می‌شود که می‌توان آن را پس از ذوب به مناطق نیازمند آب انتقال داد یا مستقیماً کوه یخی را به مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود آب مواجه هستند، منتقل کرد (Marchenko & Eik, 2012; Yulmetov & Løset, 2017). آب کوه‌های یخی خالص‌ترین منبع آب نامتعارف در جهان محسوب می‌شود. این روش نیازمند فناوری انتقال و ذخیره‌سازی است و عمدتاً در مناطق قطبی کاربرد دارد (Marchenko & Eik, 2012).

۳-۱-۱۰- آب مجازی

مفهوم آب مجازی برای اولین بار توسط (Allan, 1998) مطرح شد و به مقدار آب شیرینی اطلاق می‌شود که در طول زنجیره تأمین برای تولید کالاها و خدمات مصرف می‌شود. این مفهوم شامل آبی است که در کالاهای وارداتی مانند گوشت، برنج و شکر مصرف شده است - محصولاتی که برای تولیدشان به حجم قابل توجهی آب نیاز است. بر اساس این تعریف، چندین سال طول کشید تا آب مجازی به ارزیابی‌های جهانی منابع آب راه یابد (Horlemann & Neubert, 2007; Wichelns, 2010). امروزه آب مجازی به عنوان یکی از منابع آب نامتعارف شناخته می‌شود که می‌تواند برای مناطق خشک مفید باشد، چرا که با واردات کالا از سایر مناطق، در واقع آب را نیز وارد می‌کند (Zhao et al., 2020). هم انتقال فیزیکی آب و هم آب مجازی می‌توانند به عنوان گزینه‌های ممکن برای تأمین آب کافی در مناطق خشک در نظر گرفته شوند (Winpeny et al., 2010).

۳-۱-۱۱- تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی

تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها روشی مؤثر برای افزایش ذخایر آب زیرزمینی از طریق نفوذ آب‌های سطحی است. این روش به ویژه در مناطق خشک و ساحلی برای جلوگیری از نفوذ آب شور کاربرد دارد (Bouwer, 2002; Prabhu and Venkateswaran, 2002).

(2015) پیدا کردن یک مکان بالقوه برای تغذیه مصنوعی نقش مهمی را در این روش ایفا می‌کند و به عوامل کلیدی مختلفی مانند بارندگی، تراکم زهکشی، شیب، نفوذپذیری خاک، کاربری/ پوشش اراضی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی وابسته است (Senanayake et al., 2016).

۳-۱-۱۲- آب فسیلی

آب فسیلی یا آب باستانی، منبع آب نامتعارف ارزشمند، محدود و غیرقابل تجدید محسوب می‌شود. این آب کهن در فضاهای دست‌نخورده مانند سفره‌های آب زیرزمینی و دریاچه‌های زیرخچالی یافت می‌شود. این آب شیرین باستانی میلیون‌ها سال پیش تشکیل شده و در مخازن عظیم زیرزمینی یا سفره‌های آبی محبوس شده است که تحت شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی گذشته به وجود آمده‌اند (Margat et al., 2006). سفره‌های آبی فسیلی اغلب از نظر زمین‌شناسی در حد بالا و پایین توسط سنگ‌های نفوذناپذیر محدود شده‌اند، به این معنی که پس از استخراج، این آب برای همیشه از بین می‌رود (Salameh, 2004).

جدول ۱- ویژگی‌های منابع آب نامتعارف (مزایا، محدودیت‌ها، نمونه کاربردها) اقتباس از Karimidastenaie et al., 2022 با تغییرات
Table 1- Characteristics of unconventional water resources (advantages, limitations, and global applications)
Adapted from Karimidastenaie et al., 2022, with modifications

منبع آب نامتعارف	نمونه کاربرد جهانی	مزایا	محدودیت‌ها
آب مه	آفریقای جنوبی، پرو، ایران	(۱) فناوری کم‌هزینه (۲) کیفیت بالا (۳) نیاز به تصفیه ندارد	(۱) دسترسی فصلی (۲) نیاز به نظارت
آب شبنم	شیلی، اسپانیا، هند	(۱) بدون نیاز به انرژی (۲) کیفیت بالا (۳) هزینه نگهداری کم	(۱) حجم کم (۲) وابسته به شرایط جوی
بارورسازی ابرها	چین، امارات، ایران، آمریکا	(۱) افزایش بارش (۲) بهبود اقتصاد کشاورزی (۳) کاهش خشکسالی	(۱) نیاز به شرایط جوی خاص (۲) هزینه بالا (۳) اثرات محیط زیستی (دید نقره)
جمع‌آوری آب باران	آلمان، هند، آفریقای جنوبی	(۱) ساده و کم‌هزینه (۲) تجدیدپذیر	(۱) وابسته به بارش (۲) آلودگی احتمالی
آب شیرین شده	خاورمیانه (عربستان)، مدیترانه	(۱) دسترسی به منابع نامحدود آب دریا (۲) کاهش وابستگی به منابع خارجی	(۱) هزینه بالا (۲) تولید شورابه (۳) مصرف انرژی زیاد
پساب تصفیه‌شده	جهانی (مناطق خشک)	(۱) مناسب برای کشاورزی و صنعت	(۱) نیاز به تصفیه پیشرفته (۲) هزینه عملیاتی بالا
آب خاکستری	آمریکا، اروپا، استرالیا	(۱) کاهش مصرف آب شرب (۲) مفید برای آبیاری فضای سبز	(۱) خطر آلودگی میکروبی (۲) افزایش شوری خاک
آب زهکشی کشاورزی	هند، مصر، سوریه	(۱) استفاده مجدد در کشاورزی	(۱) آلودگی آب‌های زیرزمینی/سطحی
آب یخچال‌های طبیعی	کانادا (نیوفاندلند)	(۱) خالص و بدون آلودگی (۲) ایجاد اشتغال	(۱) هزینه حمل و نقل بالا (۲) اثرات محیط زیستی

منبع آب نامتعارف	نمونه کاربرد جهانی	مزایا	محدودیت‌ها
آب مجازی	چین، آرژانتین، روسیه	(۱) صرفه‌جویی در منابع محلی (۲) کاهش تنش آبی	(۱) محاسبه پیچیده (۲) عدم استاندارد قیمت‌گذاری
تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی	خاورمیانه، اروپا (آلمان، فرانسه)	(۱) مقرون به صرفه (۲) کنترل سیل (۳) بهبود کیفیت آب (۴) نیاز به فناوری پیچیده ندارد (۵) تبخیر کم	(۱) نیاز به نگهداری (۲) کاهش جریان در مناطق خشک (۳) اختلال در خاک و پوشش گیاهی
آب فسیلی	لیبی، مصر، چاد	(۱) کیفیت بالا (۲) ذخایر زیاد	(۱) هزینه استخراج بالا (۲) غیرقابل تجدید

جدول (۱) نشان می‌دهد که انتخاب مناسب‌ترین منبع آب نامتعارف به عوامل متعددی از جمله پایداری، هزینه، ملاحظات محیط‌زیستی و شرایط جغرافیایی بستگی دارد. در این میان، منابعی مانند آب باران، آب خاکستری و آب شبنم به دلیل ماهیت تجدیدپذیر، هزینه‌های عملیاتی پایین و اثرات محدود محیط‌زیستی، به‌عنوان گزینه‌های پایدار و مقرون‌به‌صرفه مطرح می‌شوند. در مقابل، فناوری‌های پیشرفته‌تر نظیر آب‌شیرین‌کن‌ها و استخراج آب‌های فسیلی، با وجود قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود، نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه و عملیاتی قابل توجهی هستند که ممکن است امکان به‌کارگیری گسترده آنها را محدود کند. از سوی دیگر، برخی روش‌ها مانند بارورسازی ابرها و استفاده از آب یخچال‌های طبیعی، علیرغم مزایای بالقوه، با چالش‌های محیط‌زیستی همراه هستند که ضرورت ارزیابی دقیق اثرات اکولوژیک را پررنگ می‌کند. همچنین، نتایج مؤید آن است که شرایط جغرافیایی و اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب روش مناسب ایفا می‌کنند؛ به‌طوری‌که راهکارهای مؤثر در مناطق ساحلی ممکن است در نواحی خشک داخلی کارایی نداشته باشند و بالعکس. این یافته‌ها بر اهمیت اتخاذ رویکردی جامع و منطقه‌ای در مدیریت منابع آب نامتعارف تأکید دارند.

۳-۲- مرور نظام‌مند منابع در حوزه آب‌های نامتعارف

تعداد مقالات منتشر شده در مورد منابع آب نامتعارف در طول زمان، به ویژه در ده سال گذشته، به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در حالی که اکثر انتشارات توسط محققان مستقر در ایالات متحده آمریکا یا چین نوشته شده‌اند، کشورهای دیگری مانند هند، ایران، استرالیا و اسپانیا نیز در این زمینه تحقیقات برجسته‌ای انجام داده‌اند. مرور نظام‌مند منابع در حوزه آب‌های نامتعارف نشان‌دهنده گستردگی و تنوع مطالعات انجام‌شده در این زمینه است. درحالی‌که مطالعات جهانی بیشتر بر توسعه فناوری‌های پیشرفته و چارچوب‌های نظری تمرکز دارند، پژوهش‌های ایرانی عمدتاً به حل مسائل محلی و کاربردی پرداخته‌اند. ترکیب این دو دیدگاه می‌تواند راهگشای توسعه پایدار منابع آب در آینده باشد.

جدول (۲) به‌صورت جامع به بررسی مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه پرداخته و جنبه‌های مختلفی شامل مزایا، محدودیت‌ها، نتایج کلیدی و دسته‌بندی موضوعی برای هر مطالعه را در بر می‌گیرد. این بررسی مقایسه‌ای امکان درک بهتر قابلیت‌ها و چالش‌های هر یک از روش‌های استحصال و استفاده از منابع آب نامتعارف را فراهم می‌سازد. این جدول مروری نظام‌مند بر مطالعات مرتبط با منابع آب نامتعارف از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۵ ارائه می‌دهد. بررسی سیستماتیک این مطالعات، سیر تکاملی پژوهش‌های این حوزه را نشان می‌دهد. در دهه‌های اولیه، مطالعات عمدتاً بر شناسایی منابع نامتعارف مانند آب خاکستری و بارش مصنوعی متمرکز بودند، در حالی که در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به سمت توسعه فناوری‌های پیشرفته تصفیه، مدیریت یکپارچه منابع آب و ابعاد اجتماعی استفاده از این منابع معطوف شده است. این تحول نشان‌دهنده گذار از نگرش‌های

صرفاً فنی به رویکردهای جامع‌تر است که جنبه‌های پایداری و حکمرانی را نیز دربرمی‌گیرد. یافته‌های کلیدی این مطالعات حاکی از آن است که منابع آب نامتعارف می‌توانند سهم قابل توجهی در تأمین نیازهای آبی آینده داشته باشند. بر اساس پژوهش‌ها، این منابع قادرند تا ۲۵ درصد از نیاز آبی جهانی را تا سال ۲۰۵۰ تأمین کنند. در این میان، آب‌های بازیافتی و فناوری‌های شیرین‌سازی بیشترین سهم را در تأمین آب شهری و صنعتی به خود اختصاص داده‌اند. با این وجود، چالش‌های متعددی از جمله هزینه‌های بالای فناوری، مقاومت‌های فرهنگی در استفاده از پساب و خطرات محیط‌زیستی مانند شوری خاک، توسعه این منابع را با محدودیت مواجه ساخته است. در مقابل، راهکارهای نوینی مانند نانوفیلتراسیون و سیستم‌های غیرمتمرکز تصفیه آب، همچنین استفاده ترکیبی از منابع مختلف، امیدواری‌هایی برای غلبه بر این چالش‌ها ایجاد کرده‌اند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در این حوزه، پژوهش‌های موجود با محدودیت‌های مهمی روبرو هستند. کمبود داده‌های بلندمدت و عدم قطعیت در اطلاعات اقلیمی، قابلیت تعمیم بسیاری از مطالعات را محدود ساخته است. علاوه بر این، بعد اجتماعی استفاده از منابع آب نامتعارف که نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پروژه‌ها دارد، در بسیاری از مطالعات نادیده گرفته شده است. چالش‌ها و فرصت‌های منابع آب نامتعارف در جهان و ایران با توجه به مرور منابع در جدول (۲) به شرح ذیل خلاصه می‌شود:

۳-۲-۱- چالش‌های اساسی

منابع آب نامتعارف با وجود پتانسیل بالای تأمین امنیت آبی، با موانع متعددی در سطح جهانی و ایران مواجه هستند.

۳-۲-۱-۱- محدودیت‌های فنی: وابستگی شدید به شرایط محیطی (مانند نیاز سیستم‌های جمع‌آوری مه به رطوبت بالا Kaseke & Wang, 2018) و کیفیت متغیر منابع (به‌ویژه پساب‌ها و آب‌های شور) چالش اصلی محسوب می‌شود. در ایران، مطالعاتی مانند Jamali et al. (2018) نشان داده‌اند که حساسیت گونه‌های گیاهی به شوری (مانند کاهش ۵۰ درصدی عملکرد فلفل دلمه‌ای) استفاده از این منابع را محدود می‌کند.

۳-۲-۱-۲- موانع اقتصادی: هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری، به ویژه در فناوری‌های پیشرفته مانند نمک‌زدایی (Gude, 2017)، یکی از اصلی‌ترین موانع گسترش این سیستم‌هاست. اگرچه برخی فناوری‌ها مانند سیستم‌های ترکیبی آب خاکستری (Dixon et al., 1999) بازگشت سرمایه ۳-۵ ساله دارند، اما برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه، حتی این میزان سرمایه‌گذاری اولیه نیز سنگین است.

۳-۲-۱-۳- مقاومت اجتماعی: به‌ویژه در پذیرش عمومی آب بازیافتی (Dolnicar & Schäfer, 2009) و نگرانی‌های بهداشتی مشهود است. در ایران، اگرچه پروژه‌هایی مانند استفاده از پساب در مشهد (Taheri et al., 2023) موفقیت‌آمیز بوده‌اند، اما مقاومت محلی به دلیل باورهای فرهنگی همچنان وجود دارد.

۳-۲-۱-۴- محدودیت‌های مدیریتی: مانند نبود چارچوب‌های حکمرانی یکپارچه و عدم تطبیق فناوری‌ها با شرایط محلی (به‌ویژه در مناطق خشک ایران) از دیگر موانع هستند.

۳-۲-۲- فرصت‌های راهبردی

با این حال، فرصت‌های قابل توجهی برای غلبه بر این چالش‌ها وجود دارد.

۳-۲-۲-۱- پیشرفت‌های فناورانه: پیشرفت‌های اخیر مانند توسعه سوپرجاذب‌های سازگار با شوری (Teymouri & Sharifan, 2013) و سیستم‌های هیبریدی نمک‌زدایی با انرژی تجدیدپذیر (Beigi & Hosseinzadeh, 2021) می‌توانند هزینه‌ها را تا ۵۰٪ کاهش دهند. در ایران، موفقیت پروژه‌هایی مانند پرورش ماهی قزل‌آلا با آب لب‌شور در کرمان (Nakhaei & Takasi, 2013) و

استحصال رطوبت هوا در قزوین (Koochi et al., 2023) نشان‌دهنده پتانسیل بالای منابع محلی است. پیشرفت در فناوری‌های غشایی، به ویژه نانوفیلتراسیون و نانولوله‌های کربنی (Werber et al., 2016)، امکان تصفیه کارآمدتر آب‌های نامتعارف را با هزینه کمتر فراهم آورده است. این فناوری‌ها نه تنها راندمان استفاده از منابع آب را بهبود بخشیده‌اند، بلکه گامی مهم در جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شوند.

۲-۲-۳- مدل‌های مدیریتی پیشرفته: تدوین استانداردهای انعطاف‌پذیر کیفیت آب بر اساس نوع مصرف (Echchel et al., 2024) و ادغام این منابع در مدیریت یکپارچه (Wiek & Larson, 2012) می‌تواند راهگشا باشد. تجربیات موفق جهانی مانند استفاده از آب بازیافتی در کشاورزی (استرالیا) و شیرین‌سازی مقرون‌به‌صرفه (عربستان) نیز الهام‌بخش است. در ایران، تمرکز بر راهکارهای کم‌هزینه مانند تصفیه غیرمتمرکز (Shamabadi et al., 2015) و انتخاب گونه‌های مقاوم مانند کینوا (Jamali & Sharifan, 2020) می‌تواند بهره‌وری را افزایش دهد. توسعه چارچوب‌های تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی (Wu et al., 2020) و مدل‌های یکپارچه (Wang et al., 2024) امکان تحلیل چندمعیاره منابع آب نامتعارف را فراهم کرده است. این مدل‌ها با در نظر گرفتن ابعاد فنی، اقتصادی و اجتماعی، به برنامه‌ریزان کمک می‌کنند تا تخصیص بهینه‌ای از منابع آب داشته باشند. همچنین، همکاری‌های بین‌المللی برای انتقال فناوری و جذب سرمایه‌گذاری (Qadir et al., 2022) از جمله فرصت‌های کلیدی برای ایران محسوب می‌شود.

۳-۲-۲- کاربردهای عملی در بخش کشاورزی و شرب: مطالعات میدانی نشان داده‌اند که استفاده از آب‌های شور و پساب تصفیه‌شده می‌تواند تا ۲۰٪ عملکرد محصولات کشاورزی را افزایش دهد (Qadir et al., 2007). این یافته به ویژه برای مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود منابع آب شیرین مواجه هستند، حائز اهمیت است. در مصارف شرب نیز استقرار سیستم‌های تصفیه غیرمتمرکز در مناطقی مانند قم (Shamabadi et al., 2015) نشان داده که می‌توان تا ۴۰٪ در مصرف آب شرب صرفه‌جویی کرد. این سیستم‌ها با بازگشت سرمایه حدود ۲/۵ سال، از توجیه اقتصادی مناسبی نیز برخوردارند.

به‌طور خلاصه، درحالی‌که چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا، وابستگی فنی و مقاومت اجتماعی استفاده از منابع آب نامتعارف را محدود می‌کنند، ترکیب فناوری‌های نوین (هوش مصنوعی، نانوفیلتراسیون)، سیاست‌گذاری هوشمند (استانداردهای تطبیقی) و مشارکت محلی می‌تواند این منابع را به راهکاری پایدار برای مدیریت بحران آب تبدیل کند.

۳-۲-۳- راهکارهای پیشنهادی

۳-۲-۳-۱- توسعه فناوری‌های یکپارچه:

تلفیق انرژی‌های تجدیدپذیر با سیستم‌های نمک‌زدایی (Beigi & Hosseinzadeh, 2021) می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را تا ۵۰٪ کاهش دهد.

توسعه فیلترهای کم‌هزینه مبتنی بر سیلیس (Ajaloyan et al., 2019) برای تصفیه غیرمتمرکز پساب‌ها، راهکاری عملی برای مناطق محروم است.

۳-۲-۳-۲- اصلاح نظام حکمرانی:

تدوین چارچوب‌های سیاستی انعطاف‌پذیر (Karimidastenaee et al., 2022) که بتواند با شرایط مختلف منطقه‌ای سازگار شود. استانداردسازی کیفیت آب بر اساس نوع مصرف (Echchel et al., 2024) به جای استانداردهای یکسان برای همه مصارف.

جدول ۲- مرور سیستماتیک مطالعات کلیدی منابع آب نامتعارف: رویکردها، یافته‌ها و کاربردها

Table 2. Systematic review of key studies on unconventional water resources: approaches, findings, and applications

منبع آب نامتعارف	منطقه مطالعه	نتایج کلیدی	مزایا	محدودیت‌ها	دسته‌بندی موضوعی	نویسندگان
منابع متعارف و نامتعارف	جهانی	شناسایی مناطق بحرانی آبی	ارائه شاخص‌های جدید	تمرکز بر کشورهای توسعه‌یافته	مدیریت کلان منابع آب	Gleick (1998)
آب خاکستری + باران	مساکن شهری بریتانیا	صرفه‌جویی سالانه ۶۵-۴۵ مترمکعب	کاهش مصرف آب، بازگشت سرمایه ۳-۵ سال	نیاز به فضای نصب، چالش کیفیت آب	سیستم‌های ترکیبی	Dixon et al. (1999)
بارش مصنوعی	ماهاراشترا، هند	موفقیت ۶۸٪ عملیات	کاهش خشکسالی، بهبود کشاورزی	وابستگی به شرایط جوی، هزینه بالا	فناوری‌های تعدیل آب و هوا	Murty et al. (2000)
آب ذوب یخ‌ها	شبه‌جزیره جنوبگان	افزایش دما، کاهش یخ‌ها	پایه مطالعات اقلیمی	کمبود داده، پیچیدگی مدل‌سازی	تغییرات اقلیمی	Smith & Stammerjohn (2001)
آب زیرزمینی	بریتانیا	شناسایی چالش‌های پیاده‌سازی	امکان افزایش ذخیره آب شیرین	نیاز به مطالعات محلی دقیق	ذخیره‌سازی آب زیرزمینی	Gale et al. (2002)
تمام منابع نامتعارف	جهانی	منابع نامتعارف ۲۵٪ نیاز ۲۰۵۰ را فراهم می‌کنند	چارچوب مفهومی نظام‌مند	عدم در نظر گرفتن مسائل اجتماعی	ارزیابی منابع جهانی	Oki et al. (2003)
مه‌بارش	جنگل ابری گواتمالا	تفاوت جذب بین گونه‌ها	داده‌های دقیق میدانی	اندازه‌گیری پیچیده	آب‌های جوی	Holder (2004)
آب خاکستری تصفیه‌شده	عمان	راهکارهای عملی	کاهش فشار بر منابع	چالش‌های کیفیت آب و بهداشت	آب خاکستری	Prathapar et al. (2005)
آب زیرزمینی غیر تجدیدپذیر	مناطق خشک جهانی	طبقه‌بندی سفره‌ها	رویکرد یکپارچه	ارزیابی ذخایر پیچیده	آب زیرزمینی	Foster & Loucks (2006)
آب‌های شور و پساب	کشورهای خشک	افزایش ۲۰٪ تولیدات	تحلیل منطقه‌ای	کیفیت متغیر آب	کشاورزی با منابع نامتعارف	Qadir et al. (2007)
آب‌های شور و پساب	جهانی	نانوفیلتراسیون مؤثرترین	پوشش گسترده فناوری‌ها	هزینه بالای فناوری‌ها	فناوری‌های تصفیه	Shannon et al. (2008)
آب بازیافتی	استرالیا	پذیرش بیشتر آب بازیافتی	مطالعه میدانی گسترده	تفاوت‌های فرهنگی	پذیرش اجتماعی	Dolnicar & Schäfer (2009)

Li et al. (2010)	سیستم‌های خانگی	محدودیت ظرفیت ذخیره	کاهش ۴۰٪ مصرف آب	طراحی مناسب برای خانه‌ها	ایرلند	آب باران + خاکستری
Elimelech & Phillip (2011)	شیرین‌سازی	چالش‌های فنی در مقیاس بزرگ	تحلیل جامع	کاهش ۵۰٪ انرژی تا ۲۰۳۰	جهانی	آب دریا
Wiek & Larson (2012)	حکمرانی آب	پیچیدگی اجرا	رویکرد یکپارچه	نیاز به مشارکت ذینفعان	جهانی	تمام منابع
Grant et al. (2012)	استفاده از پساب	چالش‌های بهداشتی	رویکرد اکوسیستمی	پساب منبعی با ارزش	جهانی	پساب شهری
Nakhaei & Takasi (2013)	آبزی‌پروری	محدودیت در گونه‌ها	استفاده از منابع بلااستفاده	امکان پرورش قزل‌آلا	کرمان	آب‌های لب‌شور
Farhadi Maboud et al. (2013)	کشاورزی با آب شور	کاهش عملکرد در شوری بالا	کاهش مصرف آب شیرین	اختلاط ۱۰٪ آب دریا	گلخانه گرگان	آب دریا
Teymouri & Sharifan (2013)	فناوری‌های جذب آب	هزینه اولیه بالا	جذب آب بالا	عملکرد بهتر KCl	-	آب شور
Khalil et al. (2014)	مدیریت آبخیزداری	وابستگی به بارش	بهبود رطوبت خاک	کاهش نیاز آبیاری	شمال غرب پاکستان	آب باران
Vuollekoski et al. (2014)	آب‌های جوی	عدم قطعیت پارامترها	شناسایی مناطق مستعد	مناطق ساحلی مستعد	مناطق خشک جهانی	شبنم
Shamabadi et al. (2015)	تصفیه غیرمتمرکز	محدودیت ظرفیت	صرفه‌جویی انرژی	بازگشت سرمایه ۲/۵ سال	قم	آب خاکستری
Lo & Koralegedara (2015)	تغییر اقلیم	عدم قطعیت پیش‌بینی	افزایش تاب‌آوری	نیاز به افزایش ۳۰٪ ظرفیت	کلمبو، سری‌لانکا	آب باران شهری
Fakhri et al. (2016)	آب خاکستری	خطر آلودگی میکروبی	صرفه‌جویی اقتصادی	کاهش ۶۶٪ مصرف	-	آب خاکستری
Shirzad (2016)	استفاده از پساب	خطر شوری خاک	ارزش کودی بالا	تأمین ۴/۸ میلیون مترمکعب	بیرجند	پساب شهری
Werber et al. (2016)	فناوری‌های تصفیه	چالش تولید انبوه	بررسی جامع	نانولوله‌های کربنی آینده‌دار	جهانی	آب‌های شور
Gude (2017)	شیرین‌سازی	مصرف انرژی بالا	کاهش هزینه‌ها	هزینه به ۰/۵ دلار/m ³	جهانی	آب دریا و لب‌شور
Sprenger et al. (2017)	تغذیه مصنوعی	ناهمگونی داده‌ها	امکان مطالعات تطبیقی	رشد ۴۰٪ پروژه‌ها	اروپا	آب سطحی، پساب، باران
Kaseke & Wang (2018)	آب‌های جوی	وابستگی به شرایط جوی	منبع تجدیدپذیر	نیاز به تصفیه ساده	مناطق خشک	مه و شبنم

Jamali et al. (2018)	کشاورزی با آب شور	حساسیت بالای گیاه	ارزیابی دقیق	کاهش ۵۰٪ عملکرد	گلخانه گرگان	آب دریا
Elkiran et al. (2019)	استفاده از پساب	نیاز به تصفیه پیشرفته	کاهش فشار بر منابع	استفاده محدود برای آبیاری	قبرس شمالی	پساب شهری
Ajaloyan et al. (2019)	آبیاری با پساب	نیاز به تعمیر و نگهداری	افزایش کارایی آبیاری	کاهش شوری خاک	اصفهان	آبیاری زیرسطحی با پساب
Jamali & Sharifan (2020)	کشاورزی با پساب	اثر منفی شوری بر رشد	بهبود عملکرد	افزایش رشد کینوا	مشهد	پساب
Wu et al. (2020)	ارزیابی منابع	پیچیدگی سطوح دانه‌بندی	انعطاف‌پذیری بالا	شناسایی منابع بهینه	مناطق با تنش آبی	آب‌های بازیافتی، شور، اتمسفری، صنعتی
Beigi & Hosseinzadeh (2021)	شیرین‌سازی	مصرف انرژی بالا	کاهش هزینه‌ها	سازگاری با انرژی تجدیدپذیر	-	شیرین‌سازی آب‌های شور
Raveesh et al. (2021)	آب‌های جوی	وابستگی به شرایط جوی	پوشش تمام روش‌ها	راندمان به ۹۰٪ رسیده	مناطق خشک	رطوبت هوا
Ghorbani Minaee et al. (2021)	کشاورزی با پساب	نیاز به زیرساخت‌های ویژه	افزایش راندمان	بهبود کارایی مصرف آب	گرگان	پساب
Nasr et al. (2022)	تصفیه غیرمتمرکز	نیاز به نظارت مستمر	کاهش مصرف آب شیرین	صرفه اقتصادی	مناطق روستایی	فاضلاب تصفیه‌شده
Qadir et al. (2022)	مدیریت جهانی	تفاوت دسترسی فناوری	کاهش فشار بر منابع	نیاز به سرمایه‌گذاری	مناطق خشک	نمک‌زدایی، آب‌های بازیافتی، اتمسفری، زیرزمینی شور، صنعتی
Karimidastenaee (2022)	سیاست‌گذاری جهانی	تفاوت‌های منطقه‌ای	امنیت آبی جهانی	نیاز به همکاری بین‌المللی	مناطق خشک جهانی	آب‌های بازیافتی، نمک‌زدایی‌شده، اتمسفری، صنعتی
Ramezani et al. (2023)	آب‌های جوی	دقت کمتر در مناطق خشک	مدل‌های اقلیمی قابل قبول	بهترین قابلیت در منجیل و بندرانزلی	شمال و شمال غرب ایران	رطوبت هوا
Taheri et al. (2023)	استفاده از پساب	نیاز به نظارت مستمر	کاهش مصرف آب شیرین	در محدوده استاندارد	مشهد	پساب تصفیه‌شده
Koohi et al. (2023)	آب‌های جوی	وابستگی به شرایط جوی	روش سیمی-توری کارآمد	قابلیت بالا در بهار و تابستان	استان قزوین	رطوبت هوا
Wanget al. (2024)	مدیریت یکپارچه	کمبود داده‌ها	بهبود پایداری	کاهش فقر آبی	مناطق خشک چین	آب‌های بازیافتی، نمک‌زدایی‌شده، خاکستری، باران

Echchelh et al. (2024)	آب صنعتی	نگرانی کیفیت آب	کاهش فشار بر منابع	استفاده ایمن برای برخی محصولات	حوضه آندارکو (آمریکا)	آب تصفیه شده نفت/گاز
Ruifang et al (2024)	مدیریت منطقه‌ای	کمبود داده‌های بلندمدت	توسعه پایدار منطقه‌ای	نیاز به سیاست‌گذاری یکپارچه	پکن تیانجین هبئی چین	فاضلاب تصفیه شده، آب‌های شور، صنعتی، باران
Wang et al. (2025)	مدیریت شهری	عدم بررسی هزینه‌ها	سناریوهای عرضه-تقاضا	افزایش شکاف آبی	شهرهای انرژی خیز نیمه خشک	آب‌های بازیافتی، نمک‌زدایی شده
Angelakis et al. (2025)	مدیریت تاریخی	عدم تحلیل هزینه‌های تاریخی	حل بحران آب	استفاده تاریخی از قنات‌ها	یونان	آب باران، آب‌های شور، فاضلاب بازیافتی

۳-۲-۳- برنامه‌های اجتماعی- فرهنگی:

اجرای برنامه‌های آموزشی هدفمند (Fakhri et al., 2016) برای افزایش آگاهی عمومی از مزایا و ایمنی آب‌های بازیافتی. مشارکت فعال ذینفعان محلی (Nasr et al., 2022) در طراحی و اجرای پروژه‌های آب نامتعارف.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با بررسی نظام‌مند چالش‌ها و فرصت‌های منابع آب نامتعارف در سطح جهانی و ایران نشان می‌دهد که این منابع پتانسیل قابل توجهی برای کمک به حل بحران فزاینده آب دارند. یافته‌ها حاکی از آن است که در شرایط کنونی که تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضا، فشار بی‌سابقه‌ای بر منابع آب متعارف وارد کرده است، آب‌های نامتعارف می‌توانند به عنوان مکملی حیاتی در تأمین امنیت آبی عمل کنند. تحلیل مطالعات نشان داد که علیرغم چالش‌های متعدد از جمله هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری، وابستگی به شرایط محیطی، محدودیت‌های فناورانه و موانع اجتماعی-فرهنگی، پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های تصفیه، سیستم‌های هوشمند مدیریت آب و رویکردهای مشارکتی، امکان بهره‌برداری مؤثر از این منابع را فراهم کرده‌اند. در ایران نیز تجربیات موفق در زمینه‌هایی مانند استفاده از پساب تصفیه شده، استحصال رطوبت هوا و پرورش آبزیان با آب‌های شور، گواه پتانسیل بالای این منابع در شرایط اقلیمی خاص کشور است. کلید موفقیت در بهره‌برداری پایدار از منابع آب نامتعارف، اتخاذ رویکردی یکپارچه و چندبعدی است که شامل موارد ذیل است:

۱. توسعه فناوری‌های بومی و کم‌هزینه متناسب با شرایط محلی
۲. تدوین چارچوب‌های سیاستی انعطاف‌پذیر و استانداردهای کیفیت آب
۳. اجرای برنامه‌های آموزشی و فرهنگ‌سازی برای افزایش پذیرش اجتماعی
۴. ایجاد نظام‌های پایش و ارزیابی مستمر اثرات محیط‌زیستی
۵. توسعه همکاری‌های بین‌المللی برای انتقال دانش و فناوری

در نهایت، این مطالعه بر این نکته تأکید دارد که منابع آب نامتعارف نه به عنوان جایگزین، بلکه به عنوان مکملی برای منابع متعارف باید در چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب مورد توجه قرار گیرند. موفقیت در مدیریت منابع آب نامتعارف مستلزم تحول اساسی در حکمرانی آب است. گذار از رویکردهای متمرکز فعلی به سمت مدل‌های مشارکتی که در آن بخش خصوصی و جوامع محلی نقش فعالی ایفا می‌کنند. این تحول باید همراه با توسعه زیرساخت‌های نظارتی قوی و استقرار سیستم‌های پایش

بلندمدت باشد تا از تبدیل راهکارهای کوتاه‌مدت به بحران‌های آتی جلوگیری شود. این رویکرد یکپارچه، تضمین‌کننده پایداری منابع آب در مواجهه با چالش‌های فزاینده تغییرات اقلیمی و رشد جمعیت خواهد بود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منفعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

فریدا ایرجی: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها. پیام نجفی: نظارت، ویرایش، روش‌شناسی و اعتبارسنجی.

منابع

- Adewumi, J. R., Ilemobade, A. A., & van Zyl, J. E. (2010). Treated wastewater reuse in South Africa: Overview, potential, and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.012>
- Ajaloyan, S., Najafi, P., Nazem, Z., & Tabatabaei, S. H. (2019). Effect of applying silicate filter with subsurface drip irrigation using treated wastewater on soil chemical parameters. *Iranian Water Research Journal*, 13 (1), 59-68.
- Allan, J. A. (1998). Virtual water: A strategic resource. *Ground Water*, 36(4), 545-546.
- Almanaseer, N., Hindiyeh, M., & Al-Assaf, R. (2020). Hydrological and environmental impact of wastewater treatment and reuse on Zarqa River Basin in Jordan. *Environments*, 7(2), 14. <https://doi.org/10.3390/environments7020014>
- Angelakis, A. N., Zafeirakou, A., Kourgialas, N. N., & Voudouris, K. (2025). The evolution of unconventional water resources in the Hellenic world. *Sustainability*, 17(6), 2388. <https://doi.org/10.3390/su17062388>
- Baawain, M. S., Al-Mamun, A., Omidvarborna, H., Al-Sabti, A., & Choudri, B. S. (2020). Public perceptions of reusing treated wastewater for urban and industrial applications: challenges and opportunities. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 1859-1871. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0266-0>
- Barnes, J. (2014). Mixing waters: The reuse of agricultural drainage water in Egypt. *Geoforum*, 57, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2012.11.019>
- Beigi, N., & Hosseinzadeh, M. (2021). Introduction and economic evaluation of various methods proposed for unconventional water desalination considering current and future challenges for sustainable water supply [Conference presentation]. *International Conference on Sustainable Development and Urban Development*, Iran. <https://sid.ir/paper/901791/en>
- Beysens, D. (2006). Dew nucleation and growth. *Comptes Rendus Physique*, 7(9-10), 1082-1100. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2006.10.020>
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., ... & Revelli, R. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of The Total Environment*, 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 121-142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4>
- Buchholz, M. (2008). A scenario for the future development of the agricultural and water sector in arid and hyper arid areas. Overcoming Drought, The Cyclor Support Implementation Guide.
- Dixon, A., Butler, D., & Fewkes, A. (1999). Water saving potential of domestic water reuse systems using greywater and rainwater in combination. *Water Science and Technology*, 39(5), 25-32. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00083-9)

- Dolnicar, S., & Schäfer, A. I. (2009). Desalinated versus recycled water: Public perceptions and profiles of the accepters. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 888-900. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.02.003>
- Echchelh, A., Hutchison, J. M., Randtke, S. J., & Peltier, E. (2024). Treated water from oil and gas extraction as an unconventional water resource for agriculture in the Anadarko Basin. *Science of The Total Environment*, 912, 168820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168820>
- Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712-717. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>
- Elkiran, G., Aslanova, F., & Hiziroglu, S. (2019). Effluent water reuse possibilities in Northern Cyprus. *Water*, 11(2), 191. <https://doi.org/10.3390/w11020191>
- Fakhri, S. A., Nasri, M., & Nasri, A. (2016). Application of gray water to reduce drinking water consumption in residential homes [Conference presentation]. *Iranian Congress of Water and Wastewater Science and Engineering*, Iran. <https://sid.ir/paper/875982/en>
- Farhadi Maboud, F., Shahnazari, A., Ziatbar Ahmadi, M. K., & Aghajani, G. (2013). Investigating the effect of different concentrations of Caspian Sea water on yield and yield components of oil sunflower [Conference presentation]. *National Conference on Drainage and Sustainable Agriculture*, Iran.
- Fessehaye, M., Abdul-Wahab, S. A., Savage, M. J., Kohler, T., Gherezghiher, T., & Hurni, H. (2014). Fog-water collection for community use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.063>
- Foster, S., & Loucks, D. P. (2006). Non-renewable groundwater resources: A guidebook on socially sustainable management for water-policy makers (IHP-VI Series on Groundwater No. 10). UNESCO.
- Gale, I. N., Williams, A. T., Gaus, I., & Jones, H. K. (2002). ASR-UK: elucidating the hydrogeological issues associated with Aquifer Storage and Recovery in the UK.
- Ghafoor, A., Ahmed, T., Munir, A., Arslan, C., & Ahmad, S. A. (2020). Techno-economic feasibility of solar based desalination through reverse osmosis. *Desalination*, 485, 114464. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114464>
- Ghorbani Minaee, L., Zakerinia, M., Rezaei Asl, A., & Mirkarimi, H. R. (2021). Investigating the effect of irrigation management with magnetized urban wastewater on rice growth indices. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 12(1), 226-240. <https://doi.org/10.22125/iwe.2021.138337>
- Gleick, P. H. (1998). Water in crisis: Paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 8(3), 571-579. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0571:WICPTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0571:WICPTS]2.0.CO;2)
- Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2016). A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 134(3), 371-385. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>
- Grant, S. B., Saphores, J. D., Feldman, D. L., Hamilton, A. J., Fletcher, T. D., Cook, P. L., ... & Marusic, I. (2012). Taking the "waste" out of "wastewater" for human water security and ecosystem sustainability. *Science*, 337(6095), 681-686. <https://doi.org/10.1126/science.1216852>
- Gude, V. G. (2017). Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16(4), 591-609. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9449-7>
- Haddad, M., & Mizyed, N. (2004). Non-conventional options for water supply augmentation in the Middle East: A case study. *Water International*, 29(2), 232-242. <https://doi.org/10.1080/02508060408691773>
- Holder, C. D. (2004). Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. *Forest Ecology and Management*, 190(2-3), 373-384. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.11.004>
- Horlemann, L., & Neubert, S. (2007). Virtual water trade: A realistic concept for resolving the water crisis?. 25. *DEU*, p. 139.
- Indelicato, S., Tamburino, V., & Zimbone, S. M. (1993). Unconventional water resource use and management. *Ressources en eau: developpement et gestion dans les pays mediterraneens*.
- Jaber, J. O., & Mohsen, M. S. (2001). Evaluation of non-conventional water resources supply in Jordan. *Desalination*, 136(1-3), 83-92. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00168-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00168-0)
- Jamali, S., Sharifan, H., & Sajadi, F. (2018). Utilization of unconventional water resources for irrigation of bell pepper (*Capsicum annuum*) under greenhouse conditions. *Water and Soil Conservation Research (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 25 (1), 243-256. <https://sid.ir/paper/156378/en>

- Jamali, S., & Sharifan, H. (2020). Investigating the effect of Zaytoonik on yield and yield components of quinoa (*Chenopodium quinoa*) under irrigation with unconventional water resources. *Water and Soil Conservation Research*, 27 (3), 229-244. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.14856.2999>
- Jensen, J. B., & Lee, S. (2008). Giant sea-salt aerosols and warm rain formation in marine stratocumulus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(12), 3678-3694. <https://doi.org/10.1175/2008JAS2617.1>
- Ji, L., Wu, T., Xie, Y., Huang, G., & Sun, L. (2020). A novel two-stage fuzzy stochastic model for water supply management from a water-energy nexus perspective. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123386>
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T., Smakhtin, V., & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment*, 657, 1343-1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- Karimidastenaie, Z., Avellán, T., Sadegh, M., Kløve, B., & Haghighi, A. T. (2022). Unconventional water resources: Global opportunities and challenges. *Science of the Total Environment*, 827, 154429. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154429>
- Kaseke, K. F., & Wang, L. (2018). Fog and dew as potable water resources: Maximizing harvesting potential and water quality concerns. *GeoHealth*, 2(10), 327-332. <https://doi.org/10.1029/2018GH000171>
- Khalil, S. K., Rehman, S., Rehman, A., Wahab, S., Muhammad, F., Khan, A. Z., & Khan, A. (2014). Water harvesting through micro-watershed for improved production of wheat (*Triticum aestivum* L.) in semiarid region of Northwest, Pakistan. *Soil and Tillage Research*, 138, 85-89. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.12.007>
- Koohi, S., Bahmanabadi, B., Partovi, Z., Safari, F., Khajevand Sas, M., Ramezani Etedali, H., et al. (2023). Evaluation of ERA5 reanalysis dataset for simulation of climatic variables and water harvesting from humidity (Case study: Qazvin Province). *Journal of Water and Soil Science*, 27 (4), 153–167. <https://doi.org/10.47176/jwss.27.4.50623>
- Li, Z., Boyle, F., Reynolds, A., 2010. Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination* 260 (1-3), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.035>
- Lo, K. F. A., & Koralegedara, S. B. (2015). Effects of climate change on urban rainwater harvesting in Colombo city, Sri Lanka. *Environments*, 2(1), 105-124. <https://doi.org/10.3390/environments2010105>
- Marchenko, A., & Eik, K. (2012). Iceberg towing in open water: Mathematical modeling and analysis of model tests. *Cold Regions Science and Technology*, 73, 12-31. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.11.008>
- Margat, J., Foster, S., & Droubi, A. (2006). Concept and importance of non-renewable resources. In *Non-renewable groundwater resources* (pp. 13-24). UNESCO.
- Murad, A. A. (2010). An overview of conventional and non-conventional water resources in arid region: assessment and constrains of the United Arab Emirates (UAE). *Journal of Water Resource and Protection*, 2(2), 181-190. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.22020>
- Murty, A. S. R., Selvam, A. M., Devara, P. C. S., Krishna, K., Chatterjee, R. N., Mukherjee, B. K., & Jadhav, D. B. (2000). 11-year warm cloud seeding experiment in Maharashtra State, India. *Journal of Weather Modification*, 32(1), 10-20.
- Nakhaei, N., & Takasi, M. V. (2013). Utilization of unconventional water resources (brackish water) for cold-water fish production [Conference presentation]. *National Conference on Development and Breeding of Cold-Water Fishes*, Iran. <https://sid.ir/paper/871486/en>
- Nasr, F., & El-Shafai, S. A. (2022). Decentralized domestic wastewater management as unconventional water resource for agricultural purposes. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(5), 119-129. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.91991.4395>
- Negm, A. M., Bouderbala, A., Chenchouni, H., & Barcelo, D. (2018). Update, Conclusions, and Recommendations for the “Unconventional Water Resources and Agriculture in Egypt”. In: Negm, A. (eds) *Unconventional Water Resources and Agriculture in Egypt. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 75. Springer, Cham. pp. 509–532. https://doi.org/10.1007/698_2018_336
- Ngigi, S. N. (2003). What is the limit of up-scaling rainwater harvesting in a river basin?. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(20-27), 943-956. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.015>

- Niaghi, A. R., Jia, X., Steele, D. D., & Scherer, T. F. (2019). Drainage water management effects on energy flux partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of corn. *Agricultural Water Management*, 225, 105760. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105760>
- Odendaal, P.E., 2009. Unconventional sources of water supply. *Water Health* II, 88.
- Oki, T., Agata, Y., Kanae, S., Saruhashi, T., & Musiake, K. (2003). Global water resources assessment under climatic change in 2050 using TRIP. *International Association of Hydrological Sciences, Publication*, 280, 124-133.
- Patel, P., Muteen, A., & Mondal, P. (2020). Treatment of greywater using waste biomass derived activated carbons and integrated sand column. *Science of the Total Environment*, 711, 134586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134586>
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2009). Coping with water scarcity: Addressing the challenges. Springer Science & Business Media.
- Prabhu, M. V., & Venkateswaran, S. (2015). Delineation of artificial recharge zones using geospatial techniques in Sarabanga Sub Basin Cauvery River, Tamil Nadu. *Aquatic Procedia*, 4, 1265-1274. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.165>
- Prathapar, S. A., Jamrah, A., Ahmed, M., Al Adawi, S., Al Sidairi, S., & Al Harassi, A. (2005). Overcoming constraints in treated greywater reuse in Oman. *Desalination*, 186(1-3), 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.01.018>
- Qadir, M., Sharma, B. R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R., & Karajeh, F. (2007). Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agricultural Water Management*, 87(1), 2-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.018>
- Qadir, M., Smakhtin, V., Koo-Oshima, S., & Guenther, E. (2022). Global water scarcity and unconventional water resources. In M. Qadir, V. Smakhtin, S. Koo-Oshima, & E. Guenther (Eds.), *Unconventional Water Resources* (pp. 3-17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90146-2_1
- Rahaman, M. F., Jahan, C. S., & Mazumder, Q. H. (2019). Rainwater harvesting: practiced potential for integrated water resource management in drought-prone Barind tract, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100267>
- Ramezani Etedali, H., Koohi, S., & Partovi, Z. (2023). Evaluation of multi-model climate development methods based on CMIP5 for assessing atmospheric water harvesting potential. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (11), 1609-1625. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.364087.669553>
- Raveesh, G., Goyal, R., & Tyagi, S. K. (2021). Advances in atmospheric water generation technologies. *Energy Conversion and Management*, 239, 114226. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114226>
- Salameh, E. (2004). Exploitation of Fossil Aquifers and Future Water Supplies in the Middle East. In: Zereini, F., Jaeschke, W. (eds) *Water in the Middle East and in North Africa*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-10866-6_2
- Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1991). Fog-water collection in arid coastal locations. *Ambio*, 20(7), 303-308. <http://www.jstor.org/stable/4313850>
- Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.03.002>
- Shamabadi, N., Bakhtiari, H., Kochakian, N., & Farahani, M. (2015). The investigation and designing of an onsite grey water treatment systems at Hazrat-e-Masoumeh University, Qom, IRAN. *Energy Procedia*, 74, 1337-1346. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.780>
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
- Shirzad, S. (2016). Evaluation of irrigation water supply potential and fertilizer value of urban wastewater treatment plant effluent: Case study of Birjand city treatment plant [Conference presentation]. *9th Congress of Pioneers of Progress*, Iran.
- Smith, R. C., & Stammerjohn, S. E. (2001). Variations of surface air temperature and sea-ice extent in the western Antarctic Peninsula region. *Annals of Glaciology*, 33, 493-500. <https://doi.org/10.3189/172756401781818662>

- Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F., & Hannappel, S. (2017). Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: Historical development, current situation and perspectives. *Hydrogeology Journal*, 25(6), 1909-1922. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8>
- Taheri, S. M., Banejhad, H., & Karimi Miyandoab, H. (2023). Investigating the possibility of using treated wastewater for irrigation considering its environmental effects (Case study: Chaharbakht local treatment plant effluent). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17 (6), 1035-1052.
- Talabi, A., & Pourmohammadi, S. (2016). *Principles of cloud seeding (Feasibility, implementation, and evaluation)*. Yazd University Press. (In Persian)
- Teymouri, F., & Sharifan, H. (2013). Investigating the effect of monovalent salts on water absorption by superabsorbent hydrogels [Conference presentation]. *National Conference on Drainage and Sustainable Agriculture*, Iran. <https://sid.ir/paper/872682/en>
- Toosi, A. S., Tousi, E. G., Ghassemi, S. A., Cheshomi, A., & Alaghmand, S. (2020). A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting. *Journal of Hydrology*, 582, 124501. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124501>
- UN-Water. (2021). Summary Progress Update 2021: SDG 6 — water and sanitation for all. United Nations.
- Vuollekoski, H., Vogt, M., Sinclair, V. A., Duplissy, J., Järvinen, H., Kyrö, E. M., ... & Kulmala, M. (2014). Estimates of global dew collection potential. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 11(8), 9519-9549. <https://doi.org/10.5194/hessd-11-9519-2014>
- Wang, R., Wu, F., Ji, Y., & Feng, C. (2024). Nonlinear impact of unconventional water use on water resource sustainability in China: A perspective on water poverty. *Ecological Indicators*, 162, 112065. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112065>
- Wang, D., Li, K., Li, H., Zhang, Y., Fu, T., Sun, L., Wang, Y., & Zhang, J. (2025). Water resource utilization and future supply-demand scenarios in energy cities of semi-arid regions. *Scientific Reports*, 15(1), 5005. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85458-5>
- Werber, J. R., Osuji, C. O., & Elimelech, M. (2016). Materials for next-generation desalination and water purification membranes. *Nature Reviews Materials*, 1(5), 1-15. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.18>
- Wichelns, D. (2010). Virtual water: A helpful perspective, but not a sufficient policy criterion. *Water Resources Management*, 24, 2203-2219. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9547-6>
- Wiek, A., & Larson, K. L. (2012). Water, people, and sustainability—A systems framework for analyzing and assessing water governance regimes. *Water Resources Management*, 26(11), 3153-3171. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0065-6>
- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernandez, F., & Torricelli, R. (2010). The Wealth of Waste. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/4/i1629e/i1629e.pdf>
- Wu, X., Wen, Q., Hu, L., & Liu, M. (2020). Evaluation of unconventional water resources based on knowledge granularity. *E3S Web of Conferences*, 144, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014401004>
- Yazdandoost, F., Noruzi, M. M., & Yazdani, S. A. (2021). Sustainability assessment approaches based on water-energy Nexus: Fictions and nonfictions about non-conventional water resources. *Science of the Total Environment*, 758, 143703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143703>
- Yulmetov, R., & Løset, S. (2017). Validation of a numerical model for iceberg towing in broken ice. *Cold Regions Science and Technology*, 138, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.03.002>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Shi, K., & Yao, X. (2020). Research development, current hotspots, and future directions of water science in China. *Water*, 12(1), 136. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9107-1>
- Zhao, Y., He, G., Wang, J., Gao, X., Li, H., Zhu, Y., & Jiang, S. (2020). Water stress assessment integrated with virtual water trade and physical transfer water: A case study of Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 708, 134578. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134578>

Research Article



Monitoring morphological changes of the Karun River shoreline using multi-temporal satellite imagery (Case study: Ahvaz city, 2006-2016)

Mohammad Sardavii, Mohammad Ebrahim Afifi*

Department of Geography, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, Larestan Branch, Fars, Iran.

Corresponding Author email: afifi.ebrahim6353@gmail.com

© The Author (s) 2025

Received: 30 Jan 2025

Revised: 15 Mar 2025

Accepted: 27 May 2025

Published: 13 Jun 2025

Extended Abstract

Introduction

The Karun River, as the longest river in Iran, plays a vital role in the ecosystem and economy of the country's southwestern region. The area around Ahvaz city, due to its high concentration of human activities and unique hydrological conditions, has consistently experienced significant morphological changes. This study aims to monitor changes in the shoreline of the Karun River between 2006 and 2016. Previous research has demonstrated that alterations in river shorelines can profoundly impact the environment, economic activities, and urban infrastructure. In this context, remote sensing technology has been recognized as an effective tool for monitoring changes across various temporal and spatial scales. Combining multi-temporal satellite data with GIS analytical methods, this research provides a detailed examination of morphological changes in the study area.

Materials and Methods

This study utilized satellite imagery from IKONOS, GeoEye, and Sentinel-2A for the years 2006, 2011, and 2016. Processing steps included radiometric and atmospheric corrections using the Dark Subtraction model in ENVI 5.3 software. Image quality was enhanced through the Gram-Schmidt fusion method. Image classification was performed using the Maximum Likelihood algorithm, categorizing pixels into water and non-water classes. Classification accuracy was assessed using overall accuracy and Kappa coefficient metrics. The study area was divided into northern and southern sections, with 551 measurement stations established along the shorelines. Shoreline changes were analyzed using change detection techniques in ArcGIS 10.7.

Results and Discussion

The results indicated classification accuracies of 93.97%, 96.32%, and 91.73% for 2006, 2011, and 2016, respectively, with Kappa coefficients of 0.94, 0.95, and 0.89. The most significant changes were observed in the northern section and the eastern bank, reaching 255.8 meters during 2006–2011. The overall trend showed shoreline retreat, with maximum values of 232 meters in the northern section and 180 meters in the southern section over the ten-year period. Analyses revealed that the eastern bank experienced the most pronounced changes throughout the study period. These changes were primarily attributed to a combination of natural factors (e.g., climate variability and flooding) and anthropogenic influences (e.g., riverside construction and sand mining). The findings of this study align with similar research on other regional rivers. As noted by Khabazi and Abdollahi (2015), human activities play a significant role in riverine morphological changes. This study confirms that the eastern bank of the Karun River has undergone substantial alterations due to higher human activity density. Comparisons with other studies, such as Ahmadzadeh et al. (2021),



suggest that the change patterns in the Karun River resemble those of other major regional rivers. The use of high-resolution satellite imagery, as recommended by Woldesemayat and Genovese (2021), also yielded reliable results in this research.

Conclusion

This study demonstrated that integrating remote sensing data with GIS analytical methods provides a powerful tool for monitoring riverine changes. The results indicate that the Karun River in the Ahvaz region has undergone significant morphological changes, necessitating integrated management strategies. The following recommendations are proposed:

Implementing regulations to control destructive human activities within the river's buffer zone.

Establishing continuous monitoring programs using remote sensing technology.

Restoring the riverine ecosystem through the planting of native vegetation.

Conducting further research on the impact of climate change on river morphology.

This study can serve as a scientific basis for decision-making aimed at preserving the sustainability of the Karun River.

Implementing the proposed measures could mitigate the adverse effects of morphological changes and protect this valuable aquatic ecosystem.

Keywords: Shoreline change, Remote sensing, Karun River, Maximum Likelihood Classification, GIS

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammad Sardavii: Writing, Methodology, Investigation, Data Collection, Software; **Mohammad Ebrahim Afifi:** Analysis, Supervision, Writing – Review & Editing, Data Curation.

Citation: Sardavii, M., & Afifi, M. I. (2025). Monitoring morphological changes of the Karun River shoreline using multi-temporal satellite imagery (Case study: Ahvaz city, 2006-2016). *Technical Strategies in Water Systems*, 3(1), 21-35. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1197637>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



پایش تغییرات مورفولوژیکی خط ساحلی رودخانه کارون با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه (مطالعه موردی: محدوده شهر اهواز، ۲۰۰۶-۲۰۱۶)

محمد ساردویی، محمدابراهیم عفیفی*

گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، فارس، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: affi.ebrahim6353@gmail.com

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۳/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

چکیده

رودخانه‌ها سیستم‌هایی بسیار پویا و فعال هستند، تغییر و تحول در آن‌ها به دلیل برخورد دو محیط دینامیک خشکی و آبی، نسبتاً سریع رخ می‌دهد. داده‌های سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای در دوره‌های مختلف به عنوان یکی از منابع معتبر و نسبتاً دقیق برای بررسی و تفسیر تغییرات خطوط کناره رودخانه‌ها محسوب می‌شوند. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات مورفولوژیکی خط ساحلی رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز طی دوره ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ انجام شد. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای GeoEye، IKONOS، Sentinel-2A و بکارگیری روش‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، تغییرات خط ساحلی مورد تحلیل قرار گرفت. پس از انجام تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری، تصاویر با روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال در دو کلاس پهنه‌های آبی و غیرآبی طبقه‌بندی شدند. دقت طبقه‌بندی با شاخص‌های دقت کلی (۹۳/۹۷٪ تا ۹۶/۳۲٪) و ضریب کاپا (۰/۸۹ تا ۰/۹۵) مورد ارزیابی قرار گرفت که نشان‌دهنده قابلیت بالای روش مورد استفاده بود. نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات خط ساحلی در بخش شمالی رودخانه (تا ۲۵۵/۸ متر) و در ساحل شرقی رخ داده است. روند کلی تغییرات در تمامی دوره‌ها به صورت پسروی خط ساحلی بوده که در دوره ده ساله به حداکثر ۲۳۲ متر در بخش شمالی و ۱۸۰ متر در بخش جنوبی رسیده است. این تغییرات که ناشی از ترکیب عوامل طبیعی (اقلیمی و هیدرولوژیکی) و فعالیت‌های انسانی است، تأثیرات قابل توجهی بر ساختارهای زیست‌محیطی و اکولوژیک رودخانه داشته است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های سنجش از دور با روش‌های تحلیلی سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌تواند ابزاری کارآمد برای پایش تغییرات رودخانه‌ها و برنامه‌ریزی مدیریت پایدار این منابع ارزشمند فراهم آورد. نتایج این تحقیق می‌تواند مبنای علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در راستای کاهش اثرات منفی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه کارون قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات خط ساحلی، سنجش از دور، رودخانه کارون، طبقه‌بندی حداکثر احتمال، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

استناد: ساردویی، م.، عفیفی، ا. (۱۴۰۴). پایش تغییرات مورفولوژیکی خط ساحلی رودخانه کارون با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه (مطالعه موردی: محدوده شهر اهواز، ۲۰۰۶-۲۰۱۶). راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۳(۱): ۲۱-۳۵.

<https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1197637>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان شاخص‌ترین زیستگاه‌های آب‌های جاری (Afifi & Kolte, 2023) در مقابل آب‌های ساکن مانند دریاچه‌ها و آبگیرها قرار می‌گیرند. با این حال، رودخانه‌ها در طول تاریخ نتوانسته‌اند به اندازه دریاچه‌ها ارزش زیستگاهی خود را به اثبات برسانند و جایگاه مطمئنی در حفاظت محیط زیست کسب کنند (Akter & Mezbah-ul-Islam, 2016). ویژگی‌های منحصربه‌فرد رودخانه‌ها مانند ناآرامی، پویایی ذاتی و گستردگی جغرافیایی آنها از کوهستان‌ها تا دشت‌ها، حفاظت، کنترل و نظارت بر آنها را حتی در مقیاس ملی به چالشی بزرگ تبدیل کرده است (Azkia & Eimani, 2015). با این وجود، رودخانه‌ها شریان‌های حیاتی هر کشور محسوب می‌شوند (Arkhi et al., 2022) و ضرورت حفاظت و بهره‌برداری خردمندانه از آنها نیازی به توجیه ندارد. تغییرات بیوفیزیکی و عملکردی رودخانه‌ها در طول مسیرشان از مبدا تا مقصد، زیستگاه‌های متنوع، منحصربه‌فرد و پیچیده‌ای ایجاد کرده است (Afifi & Kolte, 2023). از سوی دیگر، نواحی ساحلی به دلیل تأثیرپذیری از عوامل انسانی و طبیعی، همواره در حال تغییر هستند. این تغییرات بر خطوط ساحلی تأثیر گذاشته و با گذشت زمان، اثرات منفی بر زندگی انسان، فعالیت‌های انسانی و ارتباطات دریایی می‌گذارند. مناطق دلتایی به عنوان عوارض فیزیکی پویا، تغییرات سریعی را در مقیاس‌های زمانی و مکانی تجربه می‌کنند که می‌تواند منجر به رویدادهای مخاطره‌آمیز شود (Bahadori Amjez et al., 2022). آشکارسازی تغییرات و تهیه نقشه‌های تغییرات رودخانه‌ای از نیازهای اساسی برنامه‌ریزان منطقه‌ای و محیطی محسوب می‌شود. پایش نواحی ساحلی و استخراج خط ساحلی در بازه‌های زمانی مختلف، گامی کلیدی در این فرآیند است. خط ساحلی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوارض خطی روی زمین، طبیعت پویای خود را به نمایش می‌گذارد. سیستم‌های ساحلی به دلیل تقابل دو محیط پویای دریا و خشکی، تغییرات سریعی را تجربه می‌کنند (Bahat, 2003).

رودخانه‌ها و آبراهه‌ها سیستم‌هایی کاملاً پویا هستند که الگوی مورفولوژیک آنها به طور مداوم در حال تغییر است. این پویایی منجر به فرسایش کناره‌ای، آسیب به تأسیسات ساحلی و جابه‌جایی مرزها می‌شود (Daniali, 2018). اگرچه عوامل متعددی مانند انحراف آبراهه‌ها، کف‌کنی رودخانه‌ها، تفاوت در سازند بستر و سیل‌خیزی در تغییر الگوی مجاری نقش دارند، اما معمولاً یک یا دو عامل اصلی این تغییرات را کنترل می‌کنند. در این میان، داده‌های سنجنش از دور به عنوان کارآمدترین منبع اطلاعاتی برای بررسی اشکال ساحلی، سطوح جزر و مدی، تغییرات خطوط ساحلی و عمق آب شناخته می‌شوند (Drastikal, 2003). مطالعات متعددی از تکنیک‌های سنجنش از دور و GIS برای پایش تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها و خطوط ساحلی استفاده کرده‌اند. (Morshedi et al., 2010) با بررسی تغییرات طولی کارون از شوشتر تا اروند (۱۹۵۵-۲۰۰۷) دریافتند که طول رودخانه و سینوسی‌تی آن افزایش یافته است (۳/۳٪ در ۱۹۹۱، ۳/۶٪ در ۲۰۰۲، ۱/۴٪ در ۲۰۰۷ نسبت به ۱۹۵۵). (Khabazi & Abdollahi, 2015) با ترکیب روش‌های کتابخانه‌ای، میدانی، تصاویر لندست (۲۰۰۰)، نقشه‌های توپوگرافی و تکنیک‌های GIS، چهار مسیر اصلی و چندین مسیر فرعی قدیمی رودخانه کارون را شناسایی کردند. عوامل مؤثر شامل تغییرات سطح اساس، تکنونیک، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بودند. (Mansouri, 2021) تأثیر نوسانات دریای خزر بر فرسایش ساحل را با تصاویر لندست بررسی کردند. (Ahmadzadeh et al., 2021) با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای (لندست) و نقشه‌های توپوگرافی، کاهش ۳۶۵۳ متری طول رودخانه زهره را تا ۲۰۳۰ پیش‌بینی کردند. قطع‌شدگی کانال‌ها و تهدید اراضی کشاورزی از پیامدهای اصلی بودند. (Rostami Saghez et al., 2021) با Sentinel-1 فرسایش متوسط ۷ متر در سال را در ساحل چالوس- تنکابن شناسایی کردند. (Woldesemayat & Genovese, 2021) دقت بالای تصاویر IKONOS، Sentinel-2 و GeoEye را در پایش تغییرات رودخانه‌ها و گسترش شهری تأیید کردند. (Liu et al., 2021) با طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات پهنه‌های آبی و غیرآبی را تحلیل نمودند. (Shamkhi et al., 2022) با استفاده از Sentinel-2 و IKONOS، جابه‌جایی ۲/۸ تا ۱۲۴/۲ متری خط ساحل کارون (۲۰۰۶-۲۰۱۸) را ثبت کردند. (Afifi & Kolte, 2023) کاهش ۵۱ سانتی‌متری تراز آب (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

و پیشروی ۶۳۵۵ متری خط ساحل در گمیش تپه را گزارش دادند. (Saffari et al., 2023) نشان دادند عرض کارون از ۳۶ مقطع (به‌ویژه اطراف اهواز با ۴۵۰ متر کاهش) باریک‌تر شده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند ترکیب تصاویر ماهواره‌ای لندست، Sentinel، IKONOS، GIS و مدل‌های آماری، ابزاری کارآمد برای پایش تغییرات رودخانه‌ها و خطوط ساحلی است. عوامل طبیعی (تکتونیک، اقلیم) و انسانی به‌ویژه در کاهش عرض رودخانه‌ها و فرسایش سواحل نقش کلیدی دارند. این تحقیق با هدف بررسی تغییرات خط ساحلی رودخانه کارون با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در دوره زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ (مطالعه موردی: سطح رودخانه کارون در شهر اهواز) و استخراج و ارزیابی روند خط ساحلی رودخانه با استفاده از داده‌های دورسنجی در دوره ۵ ساله انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

حوضه آبریز کارون بین طول ۴۰° ۴۷' تا ۵۵° ۶۲' طول شرقی و عرض‌های ۳۰° ۰۰' و ۳۴° ۰۶' عرض شمالی واقع شده است. حوضه آبریز این رودخانه با وسعت ۶۰۵۰۰ کیلومتر مربع جزئی از حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان است. محدوده‌ی مورد مطالعه در این پژوهش بین عرض ۳۱° شمالی و طول ۴۹° شرقی قرار دارد.

۲-۲- نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش از نرم‌افزارهای تخصصی مختلفی برای پردازش و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. نرم‌افزار ENVI نسخه ۵/۳ برای انجام تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری بر روی تصاویر ماهواره‌ای به کار گرفته شد. از ArcGIS نسخه ۱۰/۷ برای تهیه نقشه‌های خروجی و انجام تحلیل‌های مکانی استفاده گردید. در بخش تحلیل‌های آماری، نرم‌افزار Microsoft Office Excel 2017 مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳- پردازش تصاویر ماهواره‌ای

روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای شامل مراحل مختلفی بود. ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری با استفاده از مدل Dark Subtraction انجام شد. سپس برای بهبود کیفیت تصاویر از روش‌های بارسازی و تلفیق تصاویر به شیوه Gram-Schmit استفاده گردید. مرحله بعد شامل طبقه‌بندی تصاویر با الگوریتم حداکثر احتمال بود. در نهایت، دقت تصاویر طبقه‌بندی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. این روش‌ها بر اساس استانداردهای علمی ارائه شده در تحقیق (Taheri et al., 2018) انجام شدند.

۲-۳-۱- تلفیق تصاویر به روش Gram Schmit

در این پژوهش از روش تلفیق تصاویر Gram-Schmidt برای بهبود کیفیت تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. این الگوریتم ابتدا با میانگین‌گیری بین باندهای تصویر چندطیفی، یک باند با قدرت تفکیک مکانی بالا شبیه‌سازی می‌کند. سپس تبدیل Gram-Schmidt روی باندهای تصویر چندطیفی و باند شبیه‌سازی شده اعمال می‌شود. در مرحله بعد، باند پانکروماتیک جایگزین اولین باند تبدیل شده و تبدیل معکوس Gram-Schmidt انجام می‌گیرد که در نهایت منجر به تولید تصویر ادغام‌شده با کیفیت بالا می‌گردد. (Seif al-Dini et al., 2018) پس از تلفیق تصاویر (شکل ۱)، عملیات طبقه‌بندی به روش نظارت‌شده در دو کلاس پهنه‌های آبی و غیرآبی انجام شد. این فرآیند امکان تفکیک دقیق‌تر مناطق آبی از سایر سطوح را فراهم می‌کند (Sirat & Gomarki, 2023) روش مذکور با ارائه نتایج قابل اعتماد، امکان تحلیل بهتر تغییرات در مناطق آبی را برای محققان میسر ساخته است.

۲-۳-۲- طبقه بندی حداکثر احتمال

در این تحقیق از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال به عنوان یک روش پیکسل‌پایه برای تفکیک پهنه‌های آبی و غیرآبی استفاده شد. ابتدا مناطق آموزشی برای هر دو کلاس (آبی و غیرآبی) مشخص گردید. سپس با بهره‌گیری از قابلیت‌های نرم‌افزار ENVI، عملیات طبقه‌بندی بر روی تصاویر ماهواره‌ای انجام پذیرفت. نتایج این فرآیند منجر به استخراج دقیق مسیر رودخانه در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۶ شد (شکل ۲). این روش با تکیه بر الگوریتم‌های آماری پیشرفته، امکان تفکیک و تحلیل تغییرات رودخانه را با دقت بالایی فراهم کرده است.

۲-۳-۳- ارزیابی دقت تصاویر طبقه‌بندی شده

برای ارزیابی دقت تصاویر طبقه‌بندی شده، نتایج حاصل از روش حداکثر احتمال با داده‌های واقعیت زمینی مقایسه شد. دقت طبقه‌بندی از طریق دو شاخص کلیدی یعنی دقت کلی و ضریب کاپا مورد سنجش قرار گرفت. نتایج نشان داد که دقت کلی طبقه‌بندی در سال ۲۰۰۶ به ۹۳/۹۷ درصد، در سال ۲۰۱۱ به ۹۴/۰۶ درصد و در سال ۲۰۱۶ به ۹۰/۹۳ درصد رسیده است. همچنین ضریب کاپا که نشان‌دهنده میزان توافق طبقه‌بندی با واقعیت زمینی است، در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱ به ترتیب ۰/۹۳ و در سال ۲۰۱۶ به ۰/۸۹ محاسبه شد. این ارقام حاکی از دقت بالای روش به کار گرفته شده در تفکیک پهنه‌های آبی و غیرآبی است. جزئیات کامل ارزیابی دقت در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۴- بررسی تغییرات مورفولوژیکی خط ساحلی رودخانه کارون

برای بررسی تغییرات مورفولوژیکی خط ساحلی رودخانه کارون، منطقه مورد مطالعه به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم شد (شکل ۳). در این راستا، تعداد ۵۵۱ ایستگاه اندازه‌گیری در امتداد سواحل شرقی و غربی در بخش‌های شمالی و میانی رودخانه تعیین گردید. این ایستگاه‌ها امکان محاسبه دقیق مقادیر جابجایی‌های خط ساحلی را در بازه‌های زمانی مختلف فراهم می‌کنند. پس از استخراج محدوده رودخانه در هر سال، با استفاده از روش شناسایی تغییرات (Change detection)، تغییرات بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱، ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ و ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفت. سپس مقادیر تغییرات برای هر دوره زمانی در ایستگاه‌های بخش شمالی و جنوبی رودخانه، هم در سواحل شرقی و هم غربی محاسبه شد. این نتایج به صورت نقشه‌های تغییرات ارائه شده‌اند که میزان و الگوی تغییرات خط ساحلی را به وضوح نشان می‌دهند (اشکال ۴-۹).

۳- نتایج و بحث

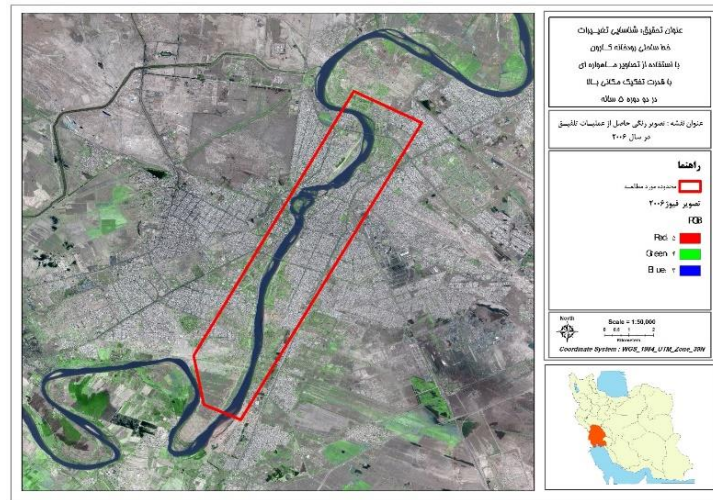
مطالعه حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به بررسی تغییرات خط ساحلی رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز طی دوره ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ پرداخته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در مورفولوژی رودخانه در هر دو بخش شمالی و جنوبی می‌باشد.

دوره ۲۰۰۶-۲۰۱۱:

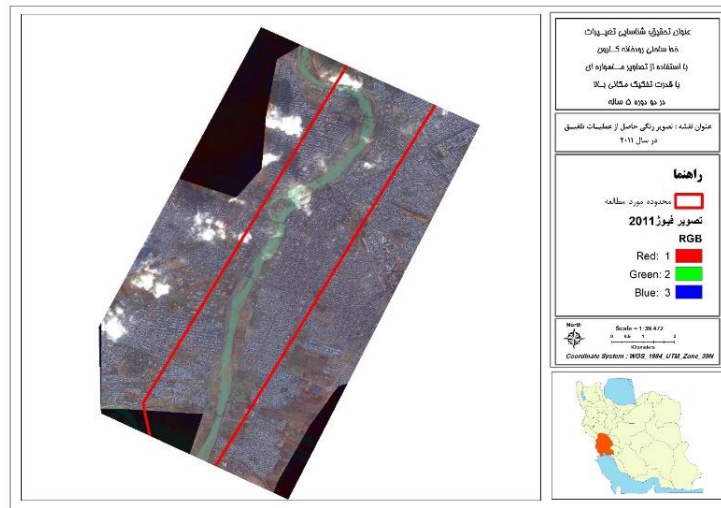
در بخش شمالی، تغییرات خط ساحلی در محدوده ۱ تا ۲۵۵/۸ متر مشاهده شد که بیشترین میزان جابجایی در ساحل شرقی ثبت گردید (شکل ۴). این نتایج با یافته‌های (Khabazi & Abdollahi, 2015) که بر نقش عوامل انسانی در تغییرات رودخانه تأکید داشتند، همخوانی دارد. در بخش جنوبی نیز دامنه تغییرات بین ۱/۴ تا ۱۵۶ متر بود که مجدداً ساحل شرقی بیشترین تغییرات را نشان داد (شکل ۵). این الگو تأییدکننده یافته‌های (Morshedi et al., 2010) در مورد افزایش سینوسی‌تی رودخانه است.

شکل ۱- تصویر رنگی کاذب

۲۰۰۶



۲۰۱۱



۲۰۱۶

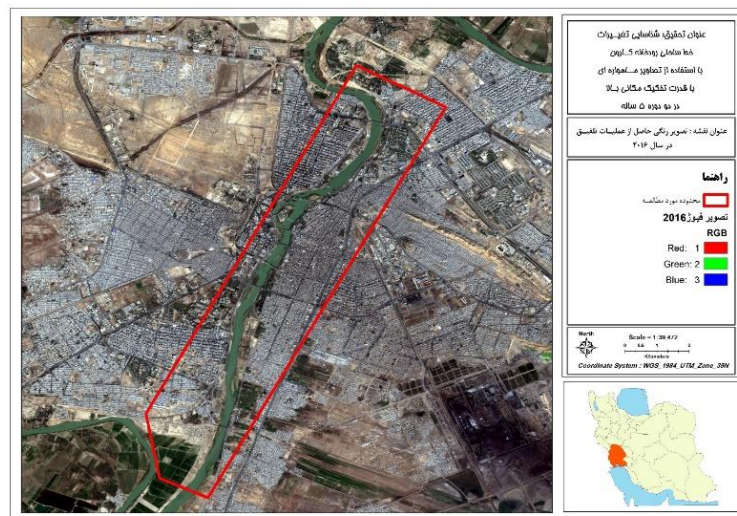


Fig 1. False color composite image

شکل ۲- طبقه بندی رودخانه به روش حداکثر احتمال

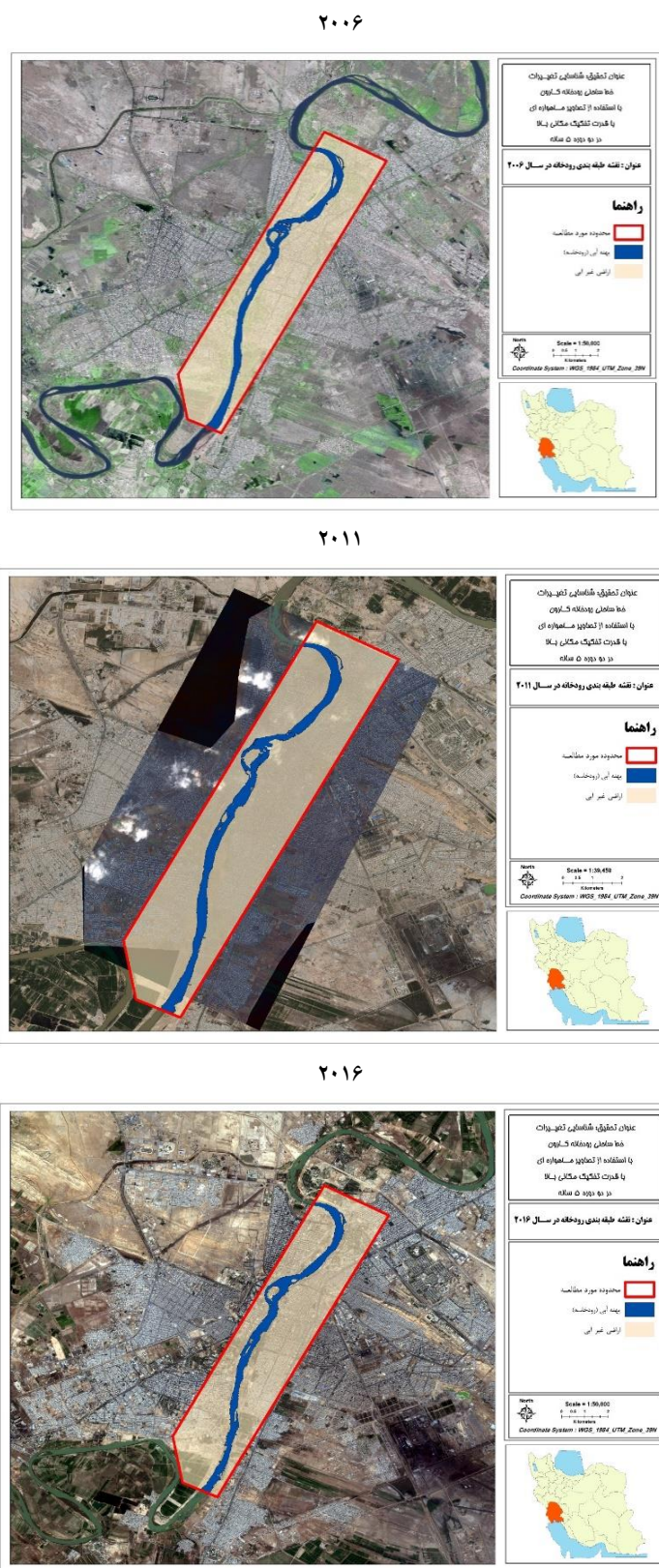


Fig 2. River classification using the Maximum Likelihood method

جدول ۱- دقت کلی و ضریب کاپای محاسبه شده برای تصاویر طبقه‌بندی شده سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۱، ۲۰۱۶

Table 1. Overall accuracy and Kappa coefficient calculated for the classified images of 2006, 2011, and 2016

صحت طبقه بندی سال ۲۰۰۶				
Classification	پهنه آبی	پهنه غیر آبی	Total	دقت کاربر
پهنه آبی	۲۴۶	۱۶	۲۶۲	۹۳/۸۹
پهنه غیر آبی	۱۱	۲۷۲	۲۸۳	۹۶/۱۱
توتال	۲۵۷	۲۸۸	۵۴۵	
دقت تولیدکننده	۹۵/۷۲	۹۴/۴۴		
Accuracy	۹۵/۵			
Kappa	۰/۹۴			
صحت طبقه بندی سال ۲۰۱۱				
Classification	پهنه آبی	پهنه غیر آبی	Total	دقت کاربر
پهنه آبی	۲۷۱	۱۶	۲۸۷	۹۴/۴۳
پهنه غیر آبی	۵	۲۷۹	۲۸۴	۹۸/۲۴
توتال	۲۷۶	۲۹۵	۵۷۱	
دقت تولیدکننده	۹۸/۱۹	۹۴/۵۸		
Accuracy	۹۶/۳۲			
Kappa	۰/۹۵			
صحت طبقه بندی سال ۲۰۱۶				
Classification	پهنه آبی	پهنه غیر آبی	Total	دقت کاربر
پهنه آبی	۲۵۰	۲۹	۲۷۹	۸۹/۶۱
پهنه غیر آبی	۱۶	۲۴۹	۲۶۵	۹۳/۹۶
توتال	۲۶۶	۲۷۸	۵۴۴	
دقت تولیدکننده	۹۳/۹۸	۸۹/۵۷		
Accuracy	۹۱/۷۳			
Kappa	۰/۸۹			

شکل ۳- بخش‌های شمالی و جنوبی حوزه رودخانه کارون در محدوده مورد مطالعه

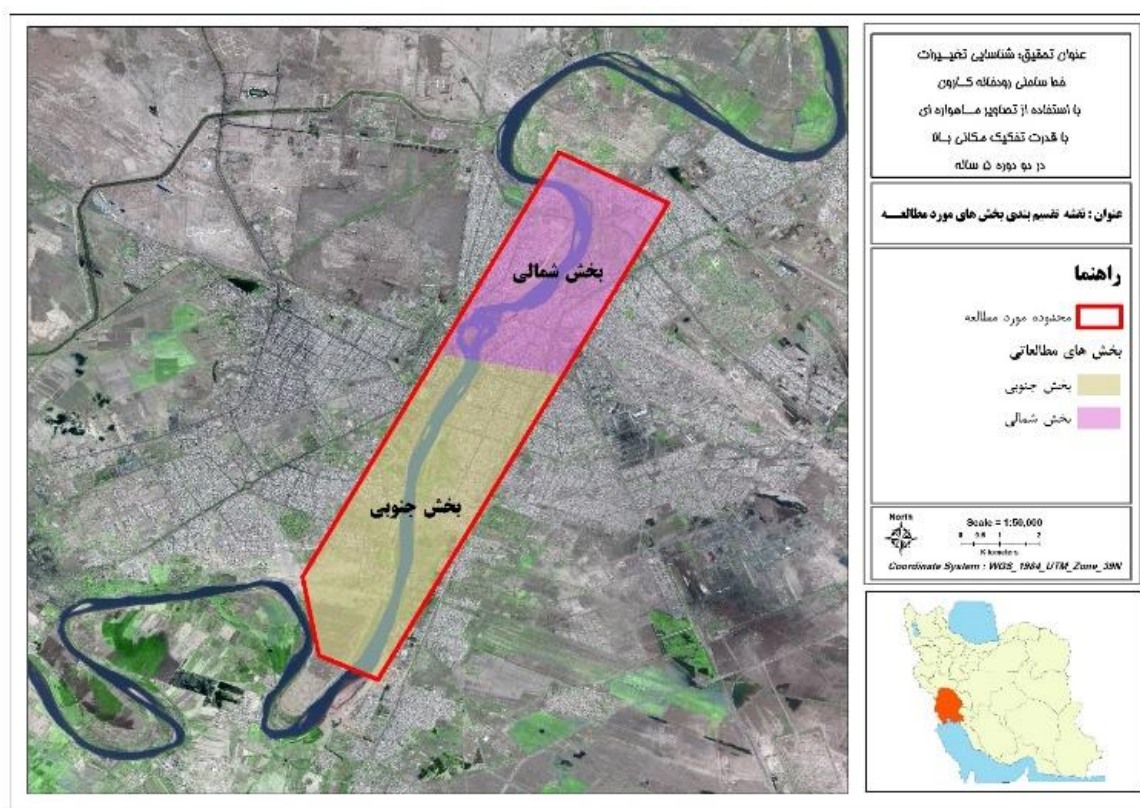


Fig 3. Northern and southern sections of the Karun River basin within the study area

دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۶:

تداوم روند تغییرات در این دوره نیز مشهود بود. در بخش شمالی، تغییرات بین ۰/۲۵ تا ۲۱۲/۶ متر (شکل ۶) و در بخش جنوبی بین ۱ تا ۱۷۲ متر (شکل ۷) ثبت شد. این نتایج با پژوهش‌های (Ahmadzadeh et al., 2021) در مورد کاهش طول رودخانه‌ها و (Saffari et al., 2023) در مورد کاهش عرض رودخانه همسو می‌باشد.

دوره ۲۰۰۶-۲۰۱۶ (تحلیل جامع):

بررسی ده ساله نشان داد که در بخش شمالی تغییرات بین ۰/۶۲ تا ۲۳۲ متر (شکل ۸) و در بخش جنوبی بین کمتر از ۱ متر تا ۱۸۰ متر (شکل ۹) بوده است. این یافته‌ها با نتایج (Shamkhi et al., 2022) در مورد جابجایی خطوط ساحلی و (Mansouri, 2021) در مورد تأثیر عوامل طبیعی بر تغییرات مورفولوژیکی همخوانی دارد.

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات خط ساحلی تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی قرار داشته و الگوی مشخصی از فرسایش را دنبال می‌کند که با استفاده از روش‌های سنجش از دور به‌خوبی قابل پایش است بطوریکه:

- ساحل شرقی در تمامی دوره‌ها بیشترین تغییرات را تجربه کرده که می‌تواند ناشی از ترکیب عوامل طبیعی (جریان آب) و انسانی (فعالیت‌های ساحلی) باشد.
- الگوی غالب تغییرات به صورت پسروری خط ساحلی بوده که با یافته‌های (Rostami Saghez et al., 2021) در مورد فرسایش ساحلی مطابقت دارد.

- کارایی روش‌های سنجش از دور در پایش تغییرات رودخانه‌ای، همانگونه که (Woldesemayat & Genovese, 2021) اشاره کرده‌اند، در این پژوهش نیز تأیید شد. این پژوهش نشان داد که تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با روش‌های تحلیلی GIS می‌تواند ابزار قدرتمندی برای مدیریت و پایش تغییرات رودخانه‌ها فراهم آورد. یافته‌ها می‌تواند مبنای علمی برای برنامه‌ریزی‌های محیطی و مدیریت پایدار رودخانه کارون قرار گیرد.

شکل ۴- تغییرات مورفولوژی خط ساحلی رودخانه کارون در بخش شمالی ۲۰۱۱-۲۰۰۶

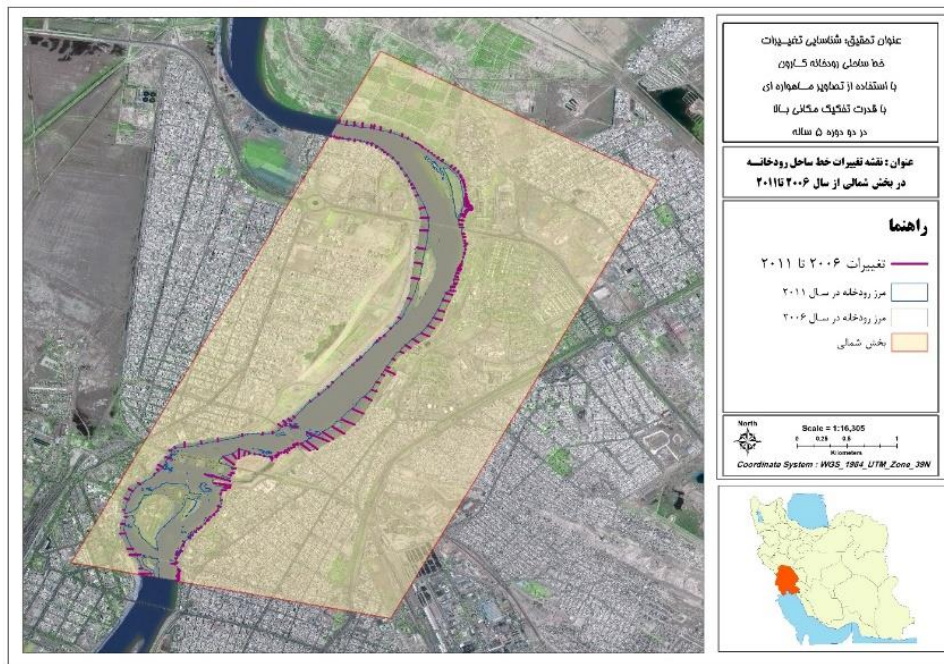


Fig 4. Morphological changes in the shoreline of the Karun River in the northern section (2006-2011)

شکل ۵- تغییرات مورفولوژی خط ساحلی رودخانه کارون در بخش جنوبی ۲۰۱۱-۲۰۰۶

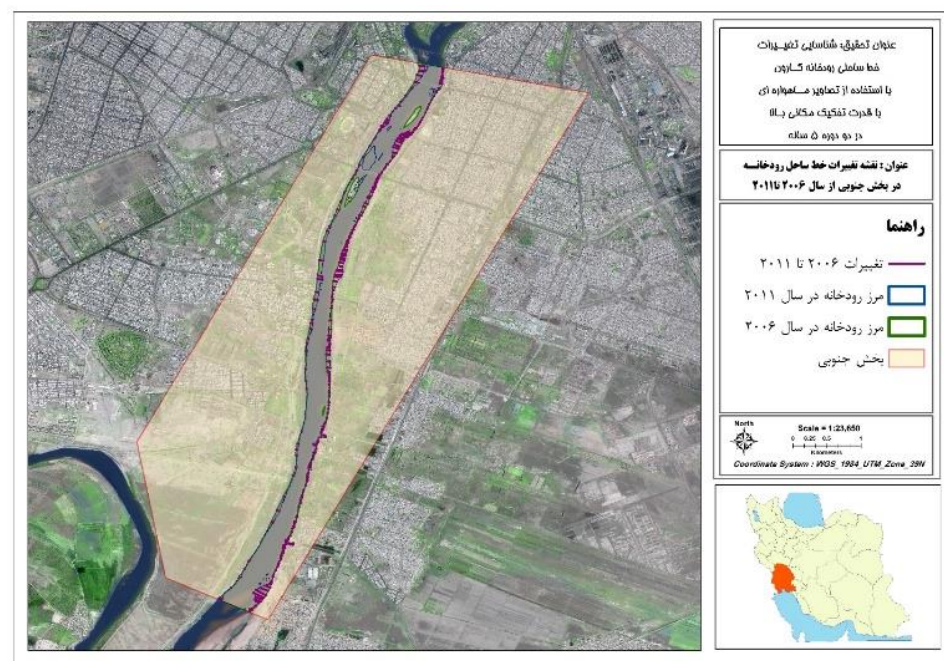


Fig 5. Morphological changes in the shoreline of the Karun River in the southern section (2006-2011)

شکل ۶- تغییرات مورفولوژی خط ساحلی رودخانه کارون در بخش شمالی ۲۰۱۱-۲۰۱۶

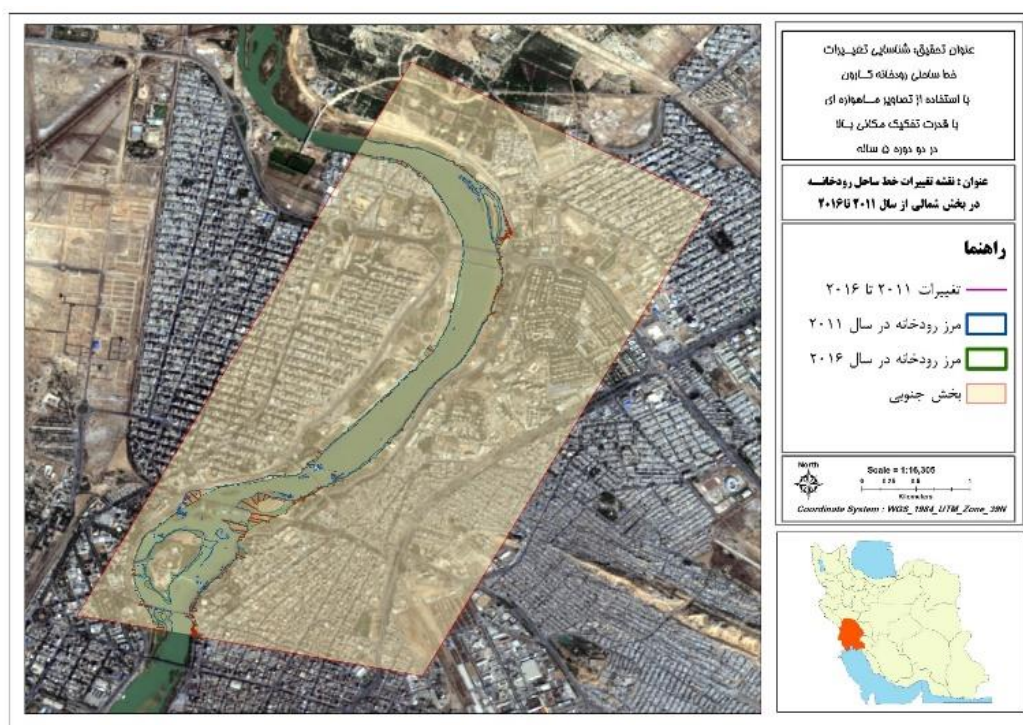


Fig 6. Morphological changes in the shoreline of the Karun River in the northern section (2011-2016)

شکل ۷- تغییرات مورفولوژی خط ساحلی رودخانه کارون در بخش جنوبی ۲۰۱۱-۲۰۱۶

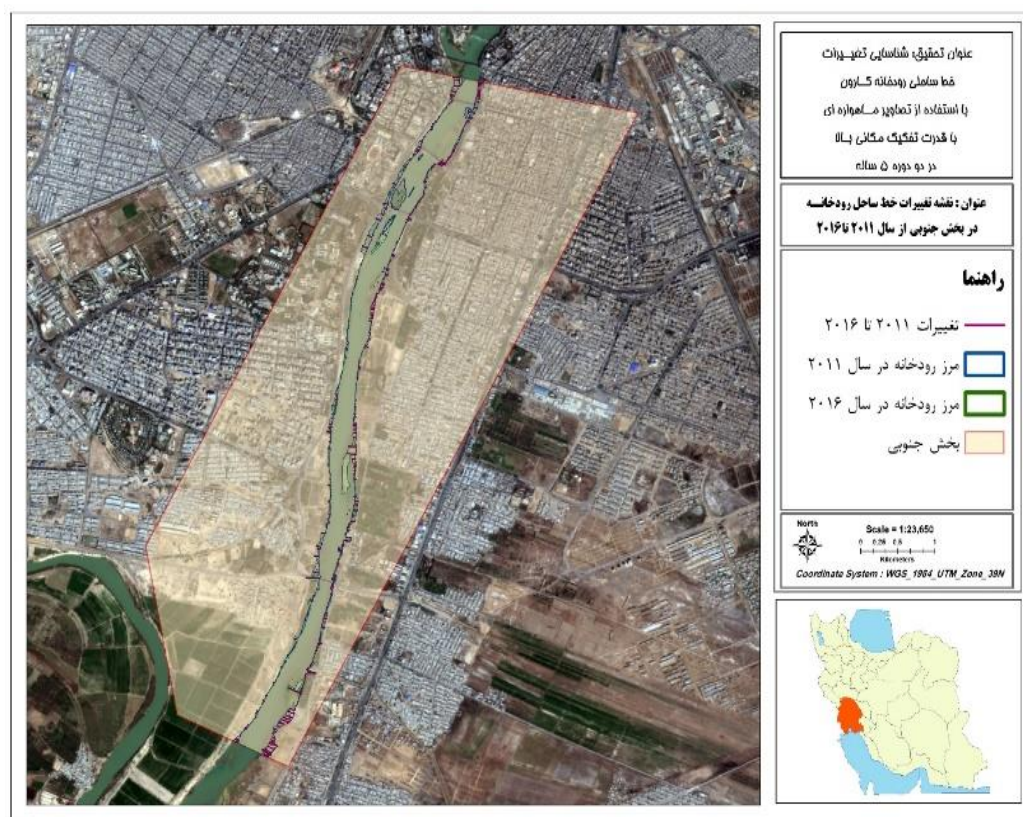


Fig 7. Morphological changes in the shoreline of the Karun River in the southern section (2011-2016)

شکل ۸- تغییرات مورفولوژی خط ساحلی رودخانه کارون در بخش شمالی ۲۰۱۶-۲۰۰۶

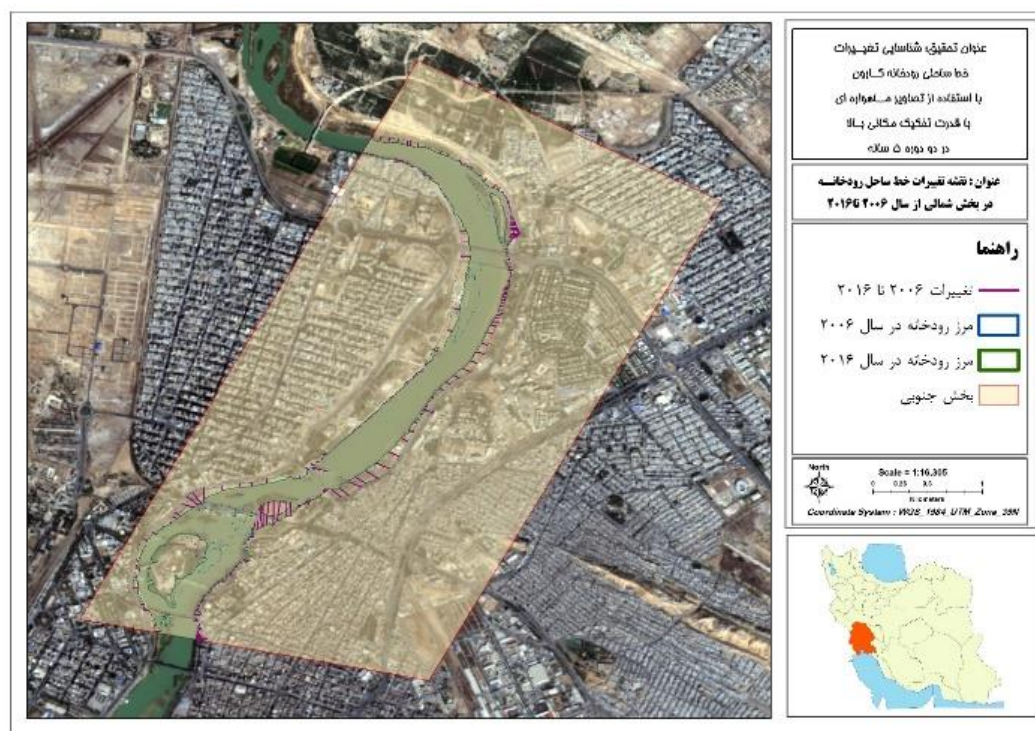


Fig 8. Morphological changes in the shoreline of the Karun River in the northern section (2006-2016)

شکل ۹- تغییرات مورفولوژی خط ساحلی رودخانه کارون در بخش جنوبی ۲۰۱۶-۲۰۰۶

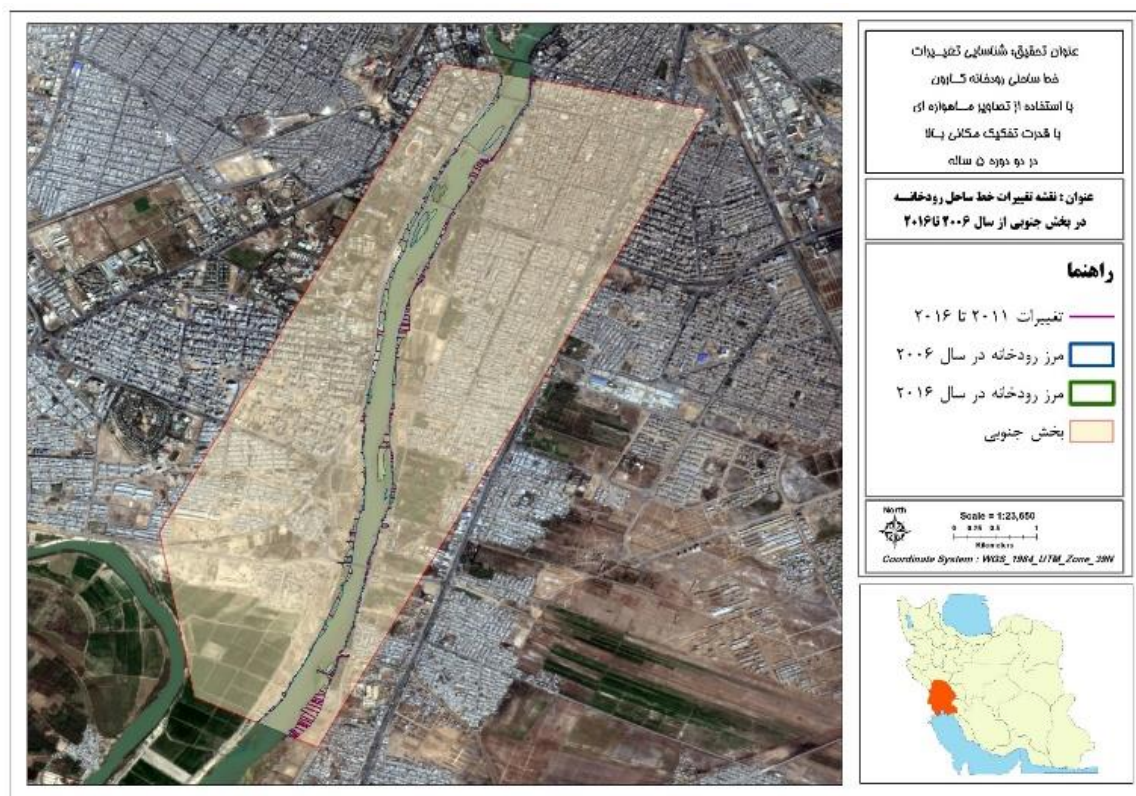


Fig 9. Morphological changes in the shoreline of the Karun River in the southern section (2006-2016)

۴- نتیجه گیری

مطالعات منابع طبیعی به طور فزاینده‌ای بر پایه سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و داده‌های سنجش از دور استوار است. این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای IKONOS، GeoEye و Sentinel-2A تغییرات مورفولوژیکی رودخانه کارون در محدوده اهواز را طی دوره ۲۰۱۶-۲۰۰۶ بررسی کرده است. پس از انجام تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری، تصاویر با روش حداکثر احتمال طبقه‌بندی شدند که دقت کلی طبقه‌بندی به ترتیب ۹۵/۰۵٪، ۹۶/۳۲٪ و ۹۱/۷۳٪ و ضریب کاپا ۰/۹۴، ۰/۹۵ و ۰/۸۹ برای سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۶ حاصل شد. این نتایج نشان‌دهنده قابلیت بالای تصاویر ماهواره‌ای در پایش تغییرات رودخانه‌ها با دقتی قابل قبول و سرعتی بسیار بیشتر از روش‌های زمینی است. تحلیل تغییرات خط ساحلی در دو بخش شمالی و جنوبی رودخانه نشان داد بیشترین تغییرات (تا ۲۵۵ متر) در بخش شمالی و ساحل شرقی رخ داده است. روند کلی تغییرات در تمامی دوره‌ها به صورت پسروری خط ساحلی بوده که حداکثر به ۲۳۲ متر در بخش شمالی و ۱۸۰ متر در بخش جنوبی در دوره ده‌ساله رسیده است. این تغییرات ناشی از ترکیب عوامل طبیعی (اقلیمی) و انسانی است.

نتایج این تحقیق هشداردهنده تأثیرات منفی این تغییرات بر ساختارهای زیست‌محیطی، الگوهای اکولوژیک رودخانه و تخریب اراضی کشاورزی و تأسیسات انسانی است. در صورت عدم مدیریت صحیح و کنترل تغییرات کاربری اراضی، این روند می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشد. روش ارائه‌شده در این تحقیق با دقت و سرعت بالا امکان پایش دوره‌ای تغییرات رودخانه‌ها و برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار این منابع ارزشمند را فراهم می‌کند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

محمد ساردویی: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها، نرم افزار. محمد ابراهیم عقیفی: تحلیل، راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Afifi, M. I., & Kolte, M. (2023). Evaluation of the impact of morphological risks of Caspian Sea water retreat on coastal tourism (case study of the coastal city of Komish Tepe). *Journal of Geographical Sciences*, 19(43), 144-160. (In Persian)
- Ahmadzadeh, M., Alizadeh, E., & Dadolahi, A. (2021). Prediction of geometric changes in the meanders of the Zohreh River. *Journal of Geographical Spatial Planning*, 10(36), 53-63. (In Persian)
- Akter, R., & Mezbah-ul-Islam, M. (2016). Television as a medium of information for rural development in Bangladesh: A case study of Dinajpur District. In *Proceedings of the NEFLIBNET Conference* (pp. 9-11). INFLIBNET Centre.
- Arkhi, S., Atta, B., & Shahkoei, E. (2022). Evaluation of techniques for vegetation/land use changes using satellite images and GIS, case study: Gorganrood basin. *Physical Development Planning*, 9(2), 41-60. (In Persian)
- Azkia, M., & Eimani, A. (2015). *Rural sustainable development, information* (2nd ed.). Tehran. (In Persian)

- Bahadori Amjez, F., Anabestani, A., & Tavakolinia, J. (2022). The role of key components in forming the smart growth approach for sustainable development of rural settlements (Case study: Jiroft County). *Spatial Planning*, 12(2), 91-118. <https://doi.org/10.22108/sppl.2022.132321.1639>. (In Persian)
- Bahat, S. (2003). Rural industrialization through small enterprises. Paper presented at the WASME 14th International Conference.
- Daniali, T. (2018). Challenges of sustainable development using information and communication technology (ICT) (Case study: Villages in Saveh County). *Geography* (Scientific Quarterly of the Iranian Geographical Association), 16(58), 201-213. (In Persian)
- Drastikal, P. (2003). Participatory evaluation of rural communications: A new approach to research and design of communications for development programs and strategies (E. Mardani Beladachi, Trans.). Ministry of Jihad-e-Sazandegi. (In Persian)
- Gouvea, R., Kapelianis, D., & Kassicieh, S. (2018). Assessing the nexus of sustainability and information & communications technology. *Technological Forecasting and Social Change*, 131(3), 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.001>
- Khabazi, M., & Abdollahi, A. A. (2015). Tracing the effects of the change in the course of the Karun River in the Quaternary. *Geography of the Land*, 12(45), 97-110. (In Persian)
- Liu, Y., Zuo, R., & Dong, Y. (2021). Analysis of temporal and spatial characteristics of urban expansion in Xiaonan District from 1990 to 2020 using time series Landsat imagery. *Remote Sensing*, 13(21), 4299.
- Mansouri, R. (2021). The impact of sea level fluctuations on shoreline displacement along the southern coasts of the Caspian Sea from 1975 to 2017. *Journal of Water and Soil Science and Technology*, 1(1), 46-69. <https://doi.org/10.22034/jamst.2022.247205>. (In Persian)
- Morshedi, J., Alavi Panah, K., & Moghimi, A. (2010). Investigation of the longitudinal changes of the Karun River using the linear average method in the study area from Shushtar to Arvand. *Quarterly Journal of Environment*, 19(4). (In Persian)
- Rostami Saghez, E., Sharifi, M. A., & Hassanlou, M. (2021). Monitoring shoreline changes from Chalous to Tonekabon using Sentinel-1 satellite imagery. *Nivar*, 45 (114-115), 108-116. (In Persian)
- Saffari A, ghanavati E, Alipour Dezdouli Asl H. (2023). Investigation of morphology changes in Karun River and its hazards (Case Study: Bandagir to Khorramshahr). *JGS*. 23(68), 12. <https://doi.org/10.52547/jgs.23.68.199>. (In Persian)
- Seif al-Dini, Frank, Panahandeh Khah, Musa, (2018). Evolution of theories and perspectives in land use planning with emphasis on sustainable development, *Sepehr Quarterly*, pp. 24-19. (In Persian)
- Shamkhi, T., Azizi, Z., & Ghaderi, B. (2022). Detection and analysis of river shoreline changes using remote sensing data. *Journal of Water and Soil Science and Technology*, 3(1), 84-96. <https://doi.org/10.22034/jamst.2022.543610.1064>. (In Persian)
- Shojaei Nouri, A., Janbaz Ghobadi, G., & Motavalli Sadruddin, S. (2022). The impact of Caspian Sea water level fluctuations on spatial changes of shorelines in the urban areas of Nowshahr and Royan. *Quarterly Journal of Earth Science Research*, 13(2), 1-20. <https://doi.org/10.48308/esrj.2022.101295>. (In Persian)
- Sirat, Mohammad Karim, Gomarki, Masoumeh. (2023). Investigating land use changes in Herat city using satellite images between 2015 and 2022. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*. 192. (In Persian)
- Taheri, F., Rahnama, M., Kharazmi, O. A., & Khakpour, B. A. (2018). Investigating and predicting land use changes using multi-temporal satellite data of Shandiz city (during 2010-2015). *Journal of Geography and Development*, 16(50), 127-142. (In Persian)
- Woldesemayat, E. M., & Genovese, P. V. (2021). Monitoring urban expansion and urban green spaces change in Addis Ababa: Directional and zonal analysis integrated with landscape expansion index. *Forests*, 12(4), 389. <https://doi.org/10.3390/f12040389>

Research Article



Investigation of flow over a crump weir in free and submerged flow conditions

Mohammadhasan Hashemi F.¹, Ali Khoshfetrat^{2*}, Elham Izadinia³, Ehsan Delavari¹

1 Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2 Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

3 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: ali.khoshfetrat@iau.ir

© The Author (s) 2025

Received: 09 Apr 2025

Revised: 15 Jun 2025

Accepted: 15 Jul 2025

Published: 16 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

Weirs are essential hydraulic structures widely used for flow regulation, water level control in reservoirs, and discharge measurement. Among various types, the Crump weir stands out due to its simple and cost-effective design, making it particularly valuable for irrigation channels and water distribution networks. Its unique features, such as reduced sediment accumulation and adaptability to both free and submerged flow conditions, have attracted significant research interest. However, a comprehensive analysis of the discharge coefficient and flow patterns under different hydraulic conditions remains a research gap. This study aims to experimentally and numerically investigate the discharge coefficient of Crump weirs under free and submerged flow conditions, while evaluating the effects of geometric and hydraulic parameters on their performance. The findings can contribute to optimizing the design and application of these structures in practical scenarios.

Materials and Methods

This research employed a combined experimental and numerical approach to analyze flow over Crump weirs. Laboratory experiments were conducted in a flume measuring 10 m in length, 0.6 m in width, and 1.1 m in height. Four distinct Crump weir models were tested, with the following specifications:

1. Model M1: Height (P): 0.15 m; Upstream slope: 30°; Downstream slope: 60°
2. Model M2: Height (P): 0.15 m; Upstream slope: 60°; Downstream slope: 30°
3. Model M3: Height (P): 0.15 m; Upstream and downstream slopes: 45° (symmetrical)
4. Model M4: Height (P): 0.20 m; Upstream and downstream slopes: 45° (symmetrical)

Flow rates ranged from 0.03 to 0.05 m³/s, and water depths were measured at multiple points using precision sensors. For numerical simulation, the study utilized *Flow-3D* software, which solves the Navier-Stokes equations using the finite volume method. The numerical model was validated against experimental data, with accuracy assessed using RMSE and MAPE metrics. A grid convergence analysis was performed, leading to the selection of an optimal mesh with 679,800 cells. The model effectively simulated three-dimensional flow fields, velocity distributions, and pressure profiles around the weir.

Results and Discussion

The results indicated that the discharge coefficient of the Crump weir decreased as the dimensionless hydraulic head-to-weir height ratio (H/P) increased. The highest discharge coefficient was observed for Model M4 (0.2 m height, 45° slope) under both free and submerged flow conditions, while the lowest coefficient corresponded to Model M2 (0.15 m height,

asymmetric slopes). Symmetrical upstream and downstream slopes improved performance, increasing the discharge coefficient by approximately 16%. Submerged flow conditions reduced the coefficient by an average of 3.5% compared to free flow. Flow field analysis revealed counterclockwise vortices downstream of the weir, with weaker intensity under submerged conditions. Velocity distributions (longitudinal, transverse, and vertical) were significantly influenced by weir geometry and flow conditions. For instance, Model M4 exhibited the highest longitudinal velocity in free flow, whereas Model M1 recorded the lowest. Pressure peaks reached 2662 Pa upstream under free flow, but no negative pressures were observed in submerged conditions. These findings underscore the interplay between weir design and hydraulic performance.

Conclusion

This study demonstrated that the *Flow-3D* numerical model accurately simulates flow over Crump weirs. Key findings highlighted the impact of weir geometry and flow conditions on the discharge coefficient and flow patterns. Specifically, weirs with symmetrical slopes exhibited superior performance, while increased hydraulic head reduced the discharge coefficient. Notable differences in velocity and pressure distributions were observed between free and submerged flows. These insights provide valuable guidance for optimizing Crump weir designs in practical applications. Future research could explore additional parameters, such as surface roughness and varying flow rates, to further enhance performance predictions. The integration of experimental and numerical methods proved effective, offering a robust framework for similar hydraulic studies.

Keywords: Discharge coefficient, Experimental model, Free flow, Numerical simulation, Submerged flow

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammadhasan Hashemi F. and Ali Khoshfetrat: Writing, Methodology, Investigation, Data Collection, Software; **All authors:** Analysis, Supervision, Writing – Review & Editing, Data Curation.

Citation: Hashemi F., M., Khoshfetrat, A., Izadinia, E., & Delavari, E. (2025). Investigation of flow over a crump weir in free and submerged flow conditions. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(1), 36-56. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.12100770>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی جریان روی سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق

محمدحسن هاشمی فشارکی^۱، علی خوش فطرت^{۲*}، الهام ایزدی‌نیا^۳، احسان دلاوری^۱

۱. دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اشرافی اصفهانی، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: ali.khoshfetrat@iau.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

چکیده

در مطالعه حاضر، ضریب دبی و الگوی جریان بر روی یک سرریز کرامپ با هندسه‌های مختلف در شرایط هیدرولیکی متنوع در حالت جریان دائمی و در شرایط جریان آزاد و مستغرق به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که سرریزهای کرامپ، سازه‌های ساده و مقرون به‌صرفه‌ای هستند و لذا بررسی اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ و کاهش آبشستگی در آن‌ها حائز اهمیت است. در این مطالعه سه سرریز با ارتفاع ۰/۱۵ متر و یک سرریز با ارتفاع ۰/۲ متر مورد بررسی قرار گرفتند. این چهار سرریز دارای شیب‌های متفاوت در بالادست و پایین‌دست هستند. همچنین از پنج دبی ۰/۰۳، ۰/۰۳۵، ۰/۰۴، ۰/۰۴۵ و ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. به‌منظور شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از سرریز کرامپ از مدل Flow 3D استفاده شد. ضریب آبگذری سرریز کرامپ با افزایش نسبت بی بعد کل بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز و عدد فرود کاهش یافت. بیشترین ضریب آبگذری در سرریز کرامپ با ارتفاع ۰/۲ متر و زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق در شرایط جریان آزاد و مستغرق مشاهده شد. همچنین کمترین ضریب دبی توسط سرریز کرامپ با ارتفاع ۰/۱۵ متر و زوایای پایین‌دست و بالادست به‌ترتیب ۶۰ و ۳۰ درجه نسبت به افق در هر دو شرایط ایجاد شد. نتایج نشان داد ضریب آبگذری سرریزها با زوایای شیب یکسان بالادست و پایین‌دست نسبت به زمانی که شیب بالادست بیشتر از شیب پایین‌دست بود، تقریباً ۱۶ درصد افزایش یافت. مقدار هد هیدرولیکی بالادست سرریز، ضریب آبگذری و عدد فرود در جریان مستغرق نسبت به شرایط جریان آزاد ۷/۳ درصد افزایش و ۳/۳ و ۵/۲۴ درصد کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: ضریب آبگذری، مدل آزمایشگاهی، جریان آزاد، شبیه‌سازی عددی، جریان مستغرق

استناد: هاشمی فشارکی، م.، خوش فطرت، ع.، ایزدی‌نیا، ا.، و دلاوری، ا. (۱۴۰۴). بررسی جریان روی سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و

مستغرق. راهبردهای فنی در سیستم‌های آبی، ۳(۱): ۳۶-۵۶. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.12100770>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

سرریزها برای تخلیه جریان مازاد یا تنظیم سطح آن در مخازن سدها استفاده می‌شوند. جریانی که بیش از ظرفیت انتقال سدهای انحرافی باشد، می‌تواند برای کاهش فرسایش در رودخانه‌ها عبور داده شود. همچنین، سرریزها در بالا بردن و تثبیت سطح جریان در کانال‌ها بسیار مؤثر هستند و به عنوان سازه‌های اندازه‌گیری جریان در سیستم‌های انتقال آب عمل می‌کنند. یک نوع خاص از سرریز که معمولاً در شبکه‌ها و کانال‌های آبیاری استفاده می‌شود، سرریز کرامپ نام دارد. نام این سرریز از نام طراح آن (C. S. Crump) گرفته شده است. این سرریز در مطالعات جریان و اندازه‌گیری دبی جریان در داخل کانال استفاده می‌شود. پروفیل آن شامل یک مقطع طولی مثالی و یک مقطع عرضی مستطیلی است. این ساختار ساده، طراحی و ساخت آن را آسان می‌کند و اجازه می‌دهد ذرات گل و لای و رسوب کمتری در پشت آن جمع شوند و به راحتی به پایین‌دست منتقل شوند (Deelstra et al. 2002). برای اولین بار، سرریز کرامپ در سال ۱۹۶۵ برای اندازه‌گیری جریان در رودخانه آیس‌بروک^۱ در انگلستان با مساحت حوضه آبریز ۱۹۴ کیلومتر مربع مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، در کرکتون گلن^۲ در بریتانیا با عرض ۷ متر و موناشیل گلن^۳ در اسکاتلند به‌ترتیب برای اندازه‌گیری سرعت و تعیین میزان رسوبات معلق و بار بستر مورد استفاده قرار گرفت (Spaan et al., 2003). در یک پروژه، از این نوع سرریز برای شمارش و ردیابی ماهی‌ها با نصب یک سری نوارهای مغناطیسی در شیب پایین‌دست آن استفاده شد (Stott, 2006). همچنین، در یک طرح، ساختار سرریز کرامپ با هدف تسهیل عبور ماهی‌ها و جلوگیری از تخریب جمعیت گونه‌های آبی اصلاح و تغییر شکل داده شد (Rockne, 2006).

Keller (1984) با استفاده از روش تزریق رنگ در آزمایشگاه، وجود یک ناحیه چرخشی جریان در پایین‌دست تاج سرریز مشخص شد و فرمولی تجربی برای شکل هندسی حباب‌ها در این ناحیه چرخشی به دست آمد. او همچنین نشان داد که این سازه برای اندازه‌گیری دبی جریان در نزدیکی پیچ رودخانه مناسب است. Span et al. (2003) از نوعی سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق استفاده کردند. آن‌ها فرمول‌های جریان سرریز را برای شبیه‌سازی کامپیوتری به دست آوردند. Bettess et al. (1984) آزمایش‌هایی را روی سرریزهای کرامپ در مسیر مستقیم انجام دادند و نتیجه گرفتند که سرریز کرامپ کوچک‌تر می‌تواند به عنوان یک سرریز اندازه‌گیری در جریان‌های کم استفاده شود. Sarker et al. (2006) در مطالعه‌ای برای بهبود سرریز کرامپ به منظور تسهیل عبور ماهی‌ها در مسیر مستقیم، به این نتیجه رسیدند که ایجاد سازه‌های آرام‌کننده مانند بافل‌ها در پایین‌دست سرریز، یک مقطع زمانی ایجاد می‌کند که به‌عنوان یک مسیر صعودی برای ماهی‌ها در نظر گرفته می‌شود. وقتی پایه آن به تاج سرریز نزدیک‌تر بود، می‌توانست منجر به ایجاد سرعت بهینه کم در شیب پایین‌دست شود و در نتیجه عبور و مهاجرت ماهی‌ها به سمت پایین‌دست سرریز را آسان‌تر کند. در مطالعه‌ای که توسط Hussein (2014) انجام شد، از سه مدل سد با ارتفاع‌های مختلف در آزمایش‌ها استفاده کرد. هر مدل دارای سه نوع زبری مختلف در سطح سد بود. نتایج نشان داد که مقادیر ضریب تخلیه با افزایش ارتفاع سد افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، مشاهده کرد که افزایش زبری سطح منجر به کاهش قابل توجه مقادیر ضریب تخلیه می‌شود. AL-Naely et al. (2018) بر تأثیر دهانه‌های طولی جریان که به طور مساوی وارد هر دو طرف پایین‌دست و بالادست یک سرریز کرامپ می‌شدند، تمرکز کردند. این دهانه‌ها به عنوان مستهلک‌کننده انرژی عمل می‌کردند و بر ضریب آبگذری تأثیر می‌گذاشتند. Al-Khateeb et al. (2019) یک سرریز کرامپ با تاج زاویه‌دار را در مقایسه با یک تاج استاندارد بررسی کردند. ایشان چهار مدل سرریز کرامپ را با استفاده از چوب ساختند که هر کدام دارای یک مقطع مثلی متقارن طولی با پایه صاف بود.

¹ Icebrook² Kirkton Glen³ Monashill Glen

Khalifa et al. (2021) یک مطالعه تجربی برای تعیین پارامترهای جریان روی مدل‌های سرریز کرامپ زبر انجام دادند. نتایج نشان داد که مقادیر ضریب آبگذری (C_d) با افزایش دبی جریان و کاهش ارتفاع سرریز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش زبری سطح سرریز کرامپ منجر به کاهش قابل توجه مقادیر C_d شد. این مطالعه همچنین نشان داد که تأثیر نسبت ارتفاع سرریز به عمق جریان بالادست (h/P) بر مقادیر C_d تأثیرگذار است و با افزایش ارتفاع سرریز افزایش می‌یابد. (Achour & Amara (2022) رابطه دقیقی برای ضریب آبگذری در سرریز کرامپ یافتند. رابطه بین دبی عبوری از سرریز کرامپ و پارامترهای مؤثر بر آن به شرح زیر است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{(2gH_t^3)} L \quad (1)$$

همچنین ضریب تخلیه سرریز کرامپ (C_d) را می‌توان با دانستن دبی جریان (Q) و بار کل آب (H_t) تعیین کرد:

$$C_d = \frac{3Q}{2\sqrt{(2gH_t^3)} L} \quad (2)$$

در روابط بالا و شکل (۱)، L طول تاج سرریز است که برابر با عرض کانال و H_t بار کل آب (عمق آب بالادست (h) به علاوه هد سرعت ($v^2/2g$) و g ثابت گرانش است.

شکل ۱- مشخصات جریان و هندسه سرریز در حالت جریان آزاد و مستغرق

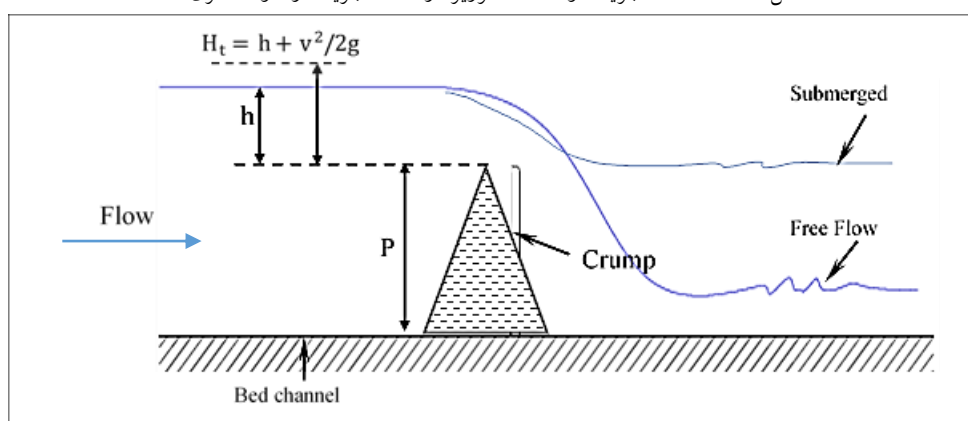


Fig 1. Flow characteristics of the Crump weir in the free and submerged flow conditions

کاربرد و اهمیت روش‌های عددی در حوزه‌های علوم و مهندسی روز به روز در حال افزایش است. محدودیت‌های حاکم بر شرایط فیزیکی، از جمله مقیاس مدل، نیاز بیشتری به استفاده از شبیه‌سازی عددی را آشکار می‌کند. نرم‌افزارهای مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای تحلیل میدان جریان و بررسی تنش‌ها و نیروهای موجود ارائه شده‌اند. یکی از نمونه‌های قابل توجه در میان این روش‌ها، FLOW-3D است. این مدل سه‌بعدی توسط برخی از محققان در تحقیقات هیدرولیکی جریان عبوری از سرریزها مورد استفاده قرار گرفته است. (Oertel (2015) ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی (PKW) را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کرد و گزارش داد که مدل عددی به خوبی قادر به شبیه‌سازی جریان هیدرولیکی از روی سرریز است. Karimi et al. (2018) به صورت عددی عملکرد سرریز کلیدپیانویی و سرریز کنگره‌ای را در مقایسه با سرریز خطی که به عنوان سرریز جانبی عمل می‌کند، بررسی کردند و نشان دادند که سرریز کلیدپیانویی در مقایسه با سایر سرریزها دبی بیشتری دارد. Sarhan & Jalil (2018) اثر جریان بر روی یک سازه مرکب سرریز-دریچه را با مدل عددی FLOW-3D شبیه‌سازی و با توجه به مدل تجربی آن اعتبارسنجی کردند. نتایج ایشان نشان‌دهنده دقت خوب این نرم‌افزار بود. در مطالعه‌ای که توسط Habibi & Khosrowjerdi

(2007) انجام شد، ضریب آبگذری سرریز کرامپ بررسی و با ضریب آبگذری سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT مقایسه شد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که ضریب آبگذری در سرریز کرامپ برخلاف سرریز اوجی با افزایش ارتفاع آب کاهش می‌یابد. مروری بر مطالعه انجام شده توسط محققان در سال‌های گذشته نشان داد که ضریب آبگذری در سرریز کرامپ بررسی نشده است. بنابراین، این موضوع در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. (Hosseini Mobarra & Yasi (2013) تأثیر ارتفاع سرریز کرامپ را بر الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه بررسی کردند. ایشان نتایج مربوط به توزیع عمق جریان و سرعت عمقی متوسط در مقطع کنترل سرریز را به صورت نمودارهایی که توزیع دبی در واحد عرض را نشان می‌دهند، ارائه کردند. نتایج ایشان نشان داد که توزیع دبی در واحد عرض در مقاطع قوس‌های نامتقارن و غیریکنواخت رخ می‌دهد. همچنین، با افزایش ارتفاع سرریز، اثر غیریکنواختی اندکی کاهش یافت، اما به طور کلی غیریکنواختی در توزیع عرضی دبی در واحد عرض وجود داشت. (Muhsun et al. (2019 & 2020 شبیه‌سازی‌های پیش‌بینی و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) جریان روی یک سرریز خمیده کرامپ را تحت شیب‌های طولی مختلف انجام دادند. بر اساس یافته‌های ایشان، رابطه جدیدی برای پیش‌بینی دبی روی سرریز کرامپ استخراج شد. این معادله با نتایج عملی و شبیه‌سازی شده CFD با حداکثر اختلاف ۴٪ مطابق با چندین شاخص خطای استاندارد و تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) مطابقت بسیار خوبی نشان داد. تکنیک CFD از روش کسر حجمی برای شبیه‌سازی سرعت و الگوی جریان سرریز خمیده کرامپ استفاده کرد. علاوه بر این، ایشان از یک مدل CFD فلوئنت برای شبیه‌سازی نرخ جریان بالای سرریز لبه پهن و لبه مربعی استفاده کردند. آزمایش‌های تجربی نیز انجام شد و عمق انتهایی به عنوان یک بخش کنترل برای استخراج رابطه جدید نرخ جریان در نظر گرفته شد. این مدل با موفقیت مسئله را با اختلاف کمتر از ۱۰٪ در مقایسه با آزمایش‌های عملی شبیه‌سازی کرد. (Behroozi & Vaghefi (2022 با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D تأثیر فرورفتگی‌های تاج سرریز بر دبی را بررسی کردند. اعتبارسنجی مدل عددی ایشان نشان داد که Flow-3D نتایجی با میانگین خطای مطلق درصد (MAPE) کمتر از ۵٪ از نظر ضریب آبگذری ارائه می‌دهد. (Abdi-Chooploul et al. (2023 با استفاده از مدل عددی Flow-3D و یک مدل آشفتگی مبتنی بر RNG، یک مطالعه عددی روی میدان جریان و آبشستگی سرریزهای PKW انجام دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که Flow-3D به طور مؤثر میدان‌های جریان سرریزهای غیرخطی را مدل‌سازی می‌کند.

با توجه به توضیحات فوق و همچنین با توجه به هندسه‌های مختلف سرریزهای کرامپ، هنوز نیاز به مطالعه جامع در مورد بررسی ضریب آبگذری در شرایط جریان آزاد و مستغرق وجود دارد. در این مطالعه، تأثیر ارتفاع سرریز، زاویه ورودی، زاویه خروجی و طول تاج سرریز کرامپ بر ضریب آبگذری در شرایط جریان آزاد و مستغرق به صورت تجربی و عددی بررسی شد. علاوه بر این، توزیع سرعت و فشار در اطراف سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق نیز بررسی شد.

۲- روش کار

۲-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها بر روی سرریز کرامپ در یک آزمایشگاه هیدرولیک انجام شد. کانال مورد استفاده برای آزمایش‌ها دارای ابعاد ۱۰ متر طول، ۰/۶۰ متر عرض و ۱/۱۰ متر ارتفاع بود. کف فلوام از ورق‌های گالوانیزه و دیواره‌های آن از شیشه نشکن ساخته شده بود. جریان آب در آزمایشگاه توسط پمپی با قابلیت ارائه حداکثر دبی ۵۵ لیتر بر ثانیه تأمین می‌شد. شکل (۲-الف) طرح فلوام آزمایشگاهی را ارائه می‌دهد. از سه سنسور برای اندازه‌گیری عمق جریان استفاده شد. سنسورهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در بالادست، روی تاج سرریز و در فاصله‌ای معادل ۵ برابر هد آب روی تاج سرریز در پایین‌دست، همانطور که در شکل (۲-ب) نشان داده شده است،

نصب شدند. از یک کنترل کننده منطقی قابل برنامه ریزی (PLC) برای اندازه گیری دبی و هد آب در زمان های مختلف استفاده شد (شکل ۲-ج).

شکل ۲- مشخصات الف) کانال آزمایشگاهی، ب) سنسورها و ج) دستگاه PLC

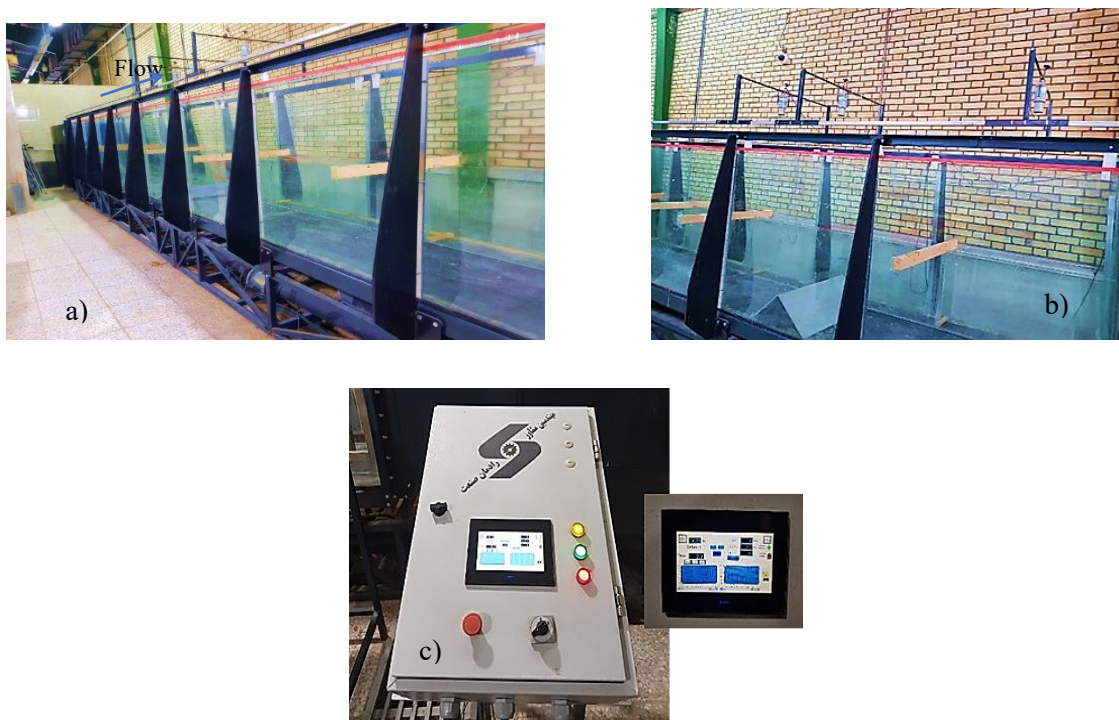


Fig 2. A view of a) the laboratory channel, b) flow depth sensors and c) PLC

در مطالعه حاضر، سرریز کرامپ از ورق های گالوانیزه ساخته شد. شکل (۳) مشخصات هندسی سرریز کرامپ مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد، در حالی که جدول (۱) مقادیر ابعاد مربوطه را ارائه می دهد. شیب های سرریزهای مورد بررسی مطابق با تحقیق (Hashemi. F & Khoshfetrat (2024) در نظر گرفته شده اند. شکل (۳) اجزای مختلف سرریز کرامپ، از جمله طول افقی سازه، ارتفاع سرریز و شیب های هر دو طرف بالادست و پایین دست را نشان می دهد.

شکل ۳- الف) سرریز کرامپ در آزمایشگاه و ب) تصویر شماتیک آن

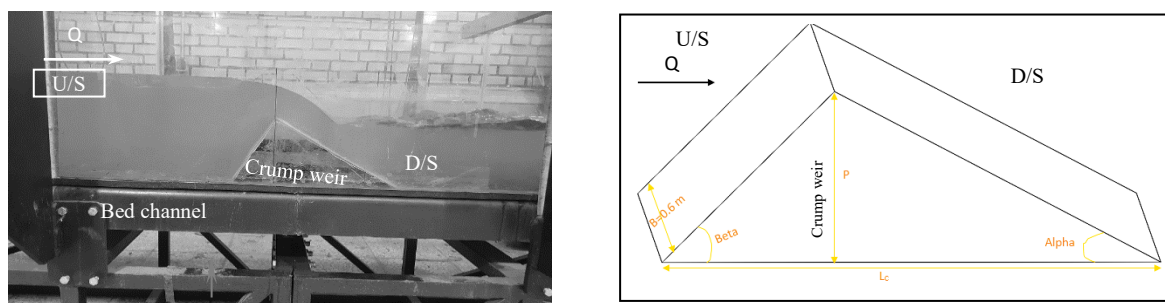


Fig 3. a) A picture of the Crump weir in the laboratory and b) its schematic view

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای کرامپ

Table 1. Geometric characteristics of the Crump weir

Model	Structure length (L_C) (m)	Height (P) (m)	Upstream slope (degree)	Downstream slope (degree)
M1	۰/۳۵	۰/۱۵	۶۰	۳۰
M2	۰/۳۰	۰/۱۵	۴۵	۴۵
M3	۰/۲۵	۰/۱۵	۹۰	۳۰
M4	۰/۴۰	۰/۲۰	۴۵	۴۵

برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به هر هندسه سرریز، سرریز در فلوم نصب و به طور ایمن آب‌بندی شد. متعاقباً، آزمایش‌ها به روش زیر انجام شد:

پس از روشن کردن پمپ، تنظیم دبی جریان، کنترل آن با جریان‌سنج و دستیابی به جریان یکنواخت در فلوم و تنظیم دریچه پایین‌دست کانال برای ایجاد شرایط جریان آزاد و مستغرق، عمق جریان در نقاط مختلف توسط سنسورهای تعبیه‌شده اندازه‌گیری شد. این فرآیند برای هندسه‌های مختلف سرریز کرامپ در حالت‌های هیدرولیکی مختلف و در زمان‌های مختلف تکرار شد.

۲-۲- مدل عددی و اعتبارسنجی آن

در این مطالعه از نرم‌افزار Flow-3D v 10.0.1 برای شبیه‌سازی میدان جریان استفاده شد (Flow Science, 2011). این نرم‌افزار به طور مؤثر معادلات ناویر-استوکس را در فرمول‌بندی ناویر-استوکس میانگین رینولدز (RANS) برای تحلیل سه‌بعدی جریان تراکم‌ناپذیر حل می‌کند. این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای مدل‌سازی دقیق رفتار سیالات استفاده می‌کند. معادلات حاکم برای یک جریان تراکم‌ناپذیر دو فازی با (w, v, u) که نشان‌دهنده مؤلفه‌های سرعت در سیستم مختصات دکارتی در امتداد محورهای (x, y, z) هستند، می‌توانند به صورت زیر بیان شوند (Łukaszewicz & Kalita, 2016):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{SOR} \quad (3)$$

$$V_F \frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (AUF) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + Gx + fx \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{R}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + Gy + fy \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + Gz + fz - bz \quad (7)$$

در این مطالعه، V_F نشان دهنده نسبت حجم سیال عبوری از یک عنصر به حجم کل آن عنصر است؛ نماد p نشان دهنده چگالی سیال است، در حالی که R_{SOR} تابعی مربوط به منبع است؛ A_x ، A_y و A_z مقادیر نسبت مساحت را نشان می‌دهند و G_x ، G_y و G_z نشان دهنده شتاب‌های گرانش هستند. شتاب‌های ویسکوزیته با (f_x, f_y, f_z) و (b_x, b_y, b_z) به ترتیب نشان‌دهنده افت جریان در محیط متخلخل در امتداد جهات x ، y و z هستند؛ A مساحت جریان را نشان می‌دهد؛ U نشان دهنده سرعت متوسط جریان در جهات x ، y و z است؛ و F تابعی مربوط به حجم سیال است. نرم‌افزار Flow-3D از روش حجم سیال (VOF) برای شبیه‌سازی سطح مشترک سیال-هوا در سطوح آزاد استفاده می‌کند. همچنین از روش نمایش کسری مساحت/حجم مانع (FAVOR) برای نمایش دقیق سطوح و حجم موانع جامد و مرزهای هندسی صلب استفاده می‌کند. این نرم‌افزار مدل‌های تخمین آشفته‌گی متعددی را ارائه می‌دهد که آن را به گزینه‌ای مناسب برای انجام شبیه‌سازی‌های نهایی در این مطالعه تبدیل می‌کند. انتخاب Flow-3D بر اساس توصیه‌های منابع مختلف انجام شد و پیش‌بینی بهبودیافته گردابه‌های آشفته‌گی را با استفاده از مدل آشفته‌گی RNG تضمین کرد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای این مطالعه، از شرط مرزی دبی ثابت (دبی جریان حجمی) برای تأیید پروفیل‌های جریان برای دبی‌های مختلف 0.03 تا 0.05 متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. کمترین دبی به نحوی انتخاب شد که عمق جریان در بالادست سرریز بیشتر از 0.03 متر باشد تا بتوان از تأثیر عدد ویر و ضریب کشش سطحی صرف نظر کرد. بیشترین دبی نیز بر اساس بیشینه دبی پمپ در نظر گرفته شد. عمق جریان در حالت مستغرق توسط دریچه‌ای انتهایی کانال تنظیم شد. عمق جریان در پایین‌دست مطابق تحقیق (Bodaghi et al. (2024) در نظر گرفته شده است. در مرز خروجی، شرط مرزی فشار مشخص با ارتفاع جریان معلوم اعمال شد. این مدل تحت شرایط مرزی خاصی از جمله شرایط مرزی دیواره اعمال شده به کف و دیواره‌های کانال قرار گرفت. علاوه‌براین، همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، شرط مرزی تقارن بر روی سطح آزاد سیال و مرزهای داخلی کانال اعمال شد.

شکل ۴- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی عددی

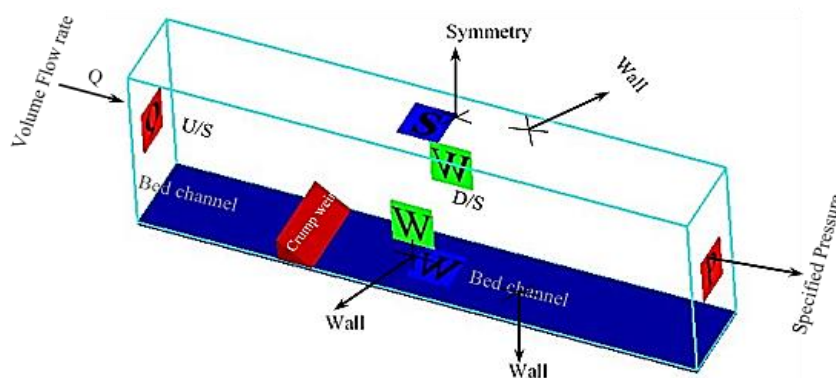


Fig 4. illustrates the computational domain and the boundary conditions applied in the numerical simulation.

برای تعیین وضوح بهینه شبکه، تحلیل همگرایی شبکه انجام شد. پنج وضوح شبکه مختلف مورد استفاده قرار گرفت که با برچسب‌های ۱# (۵۲۳۰۸۰ سلول)، ۲# (۶۱۶۱۷۰ سلول)، ۳# (۶۷۹۸۰۰ سلول)، ۴# (۹۰۳۴۵۰ سلول) و ۵# (۱۱۵۴۱۹۰ سلول) نامگذاری شدند. سپس ضرایب تخلیه به صورت عددی محاسبه و با مقادیر به دست آمده از داده‌های تجربی مقایسه شدند. برای ارزیابی دقت مدل عددی، از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شد. این معیارها با معادلات زیر تعریف می‌شوند: در معادلات ذکر شده، O_i نشان دهنده مقادیر مشاهده شده است؛ P_i مقادیر پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد؛ و n تعداد نقاط داده مشاهده شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، اعتبارسنجی

مدل عددی نشان می‌دهد که Flow-3D قادر به تولید نتایجی با میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) کمتر از ۵/۶۲٪ برای ضریب تخلیه است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|^2} \quad (8)$$

$$MAPE (\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \quad (9)$$

شکل ۵- هنجارهای خطاهای عددی در محاسبه ضریب آبگذری

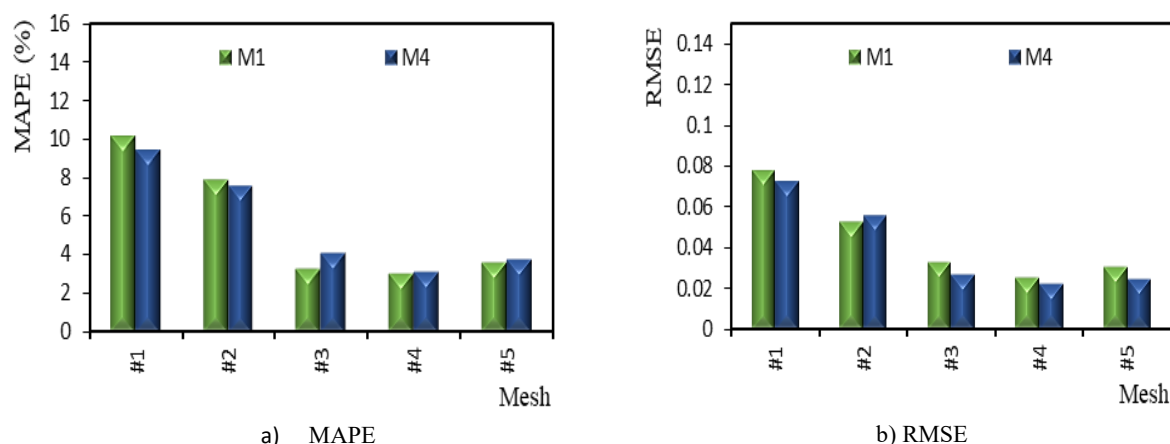


Fig 5. illustrates the error norms of the numerical model in calculating the discharge coefficient

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از فرآیند اعتبارسنجی، مشاهده شد که کاهش تعداد سلول‌ها به زیر عدد ۳ منجر به بهبود قابل توجهی در دقت نمی‌شود. بنابراین، این تعداد سلول خاص به عنوان وضوح شبکه بهینه برای شبیه‌سازی عددی سرریز کرامپ تعیین شد. در نتیجه، همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، در مجموع ۶۷۹۸۰۰ سلول برای هر مدل‌سازی استفاده شد.

شکل ۶- نمایی از شبکه‌بندی نقاط

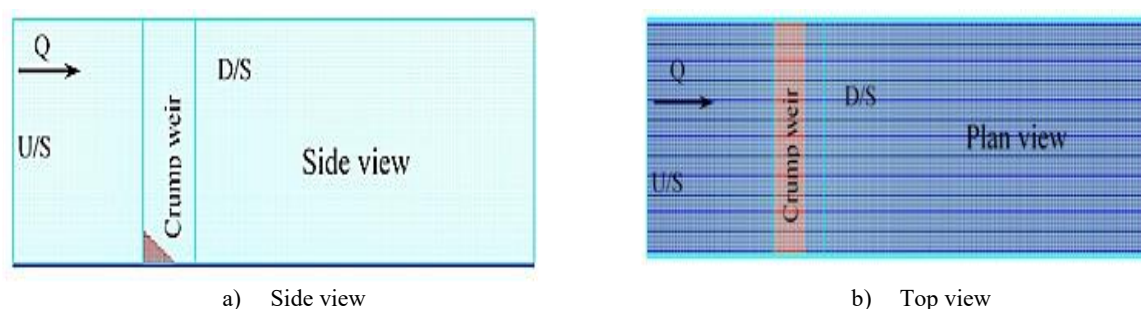


Fig 6. A view of the meshing of points

شکل (۷) مقایسه‌ای بین پروفیل طولی جریان روی سرریز کرامپ و سمت بالادست آن که از داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی مدل‌های مختلف سرریز کرامپ تحت شرایط هیدرولیکی مختلف به دست آمده است، ارائه می‌دهد. پروفیل‌های جریان عددی مدل‌های ۱ و ۴ به طور متوسط خطای بسیار کمی با پروفیل‌های تجربی خود دارند. این نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی عددی از دقت قابل قبولی برخوردارند.

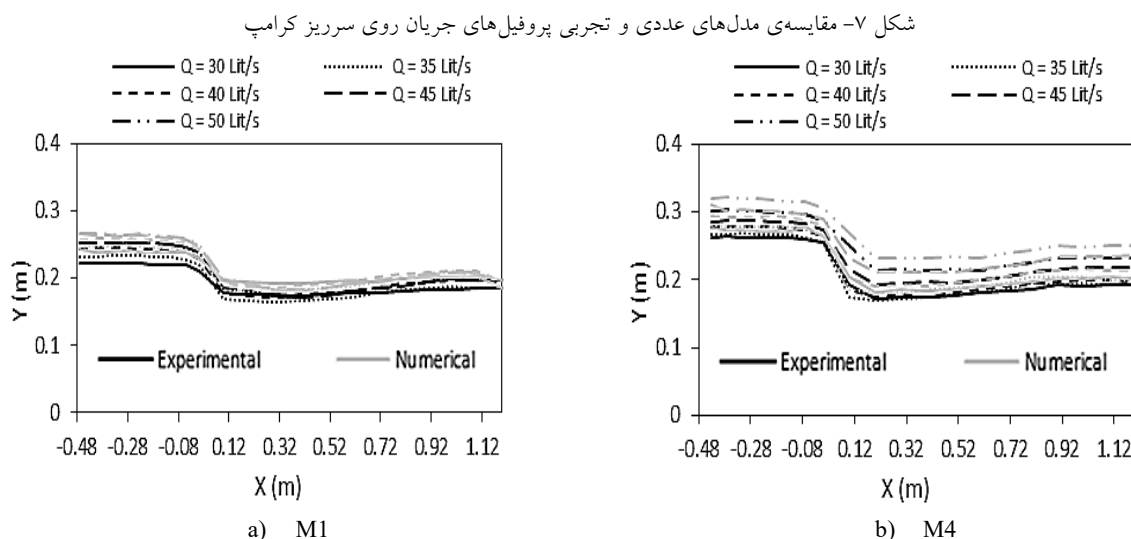


Fig 7. Comparison of the numerical and experimental models of the profiles of flows over the Crump weir

بر اساس نتایج مقایسه بین مدل عددی Flow-3D و داده‌های تجربی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل Flow-3D به طور مؤثر جریان عبوری از سرریز کرامپ را شبیه‌سازی می‌کند.

۳- نتایج و بحث

شکل (۸) تغییرات بار هیدرولیکی کل (هد کل جریان) بر اساس دبی را در مدل‌های مختلف سرریز کرامپ در هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی، بار هیدرولیکی سرریز افزایش می‌یابد. در حالت جریان آزاد، افزایش بار هیدرولیکی در مدل‌های M1، M2، M3 و M4 به ترتیب حدود $4/87$ ، $6/69$ ، $7/62$ و $9/93$ درصد بیشتر از مقادیر محاسبه شده در حالت جریان مستغرق اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌ها با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه شروع شد و تا محدوده ۵۲ لیتر بر ثانیه افزایش یافت. در ابتدای آزمایش‌ها مشاهده شد که تفاوت بارهای هیدرولیکی سرریزهای مختلف تا دبی‌های ۲۵ و ۳۵ لیتر بر ثانیه در حالت جریان آزاد و مستغرق تقریباً ناچیز است.

شکل ۸- تغییرات دبی بر حسب هد کل جریان در سرریزهای کرامپ با هندسه مختلف، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

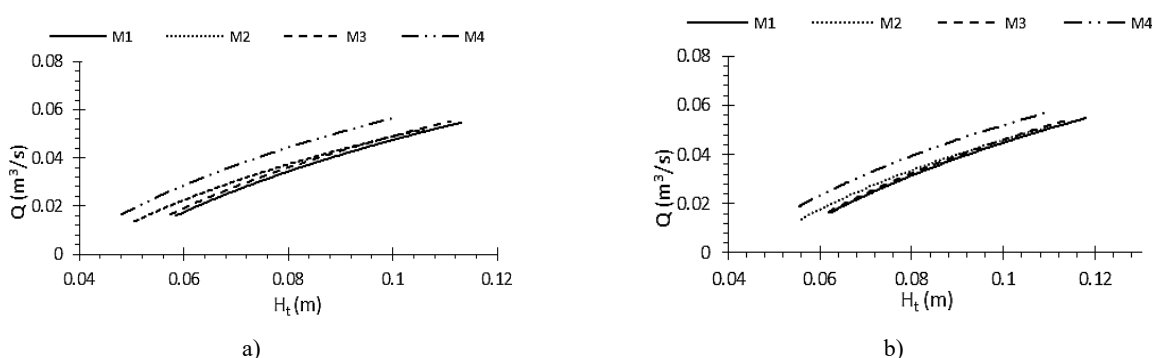


Fig 8. Changes in flow rate vs. H_t in the Crump weirs with different geometries in a) free flow and b) submerged flow conditions

شکل (۹) تغییرات ضریب آبگذری جریان عبوری از روی مدل‌های مختلف سرریزهای کرامپ را متناسب با H_t/P در شرایط جریان آزاد و مستغرق نشان می‌دهد. طبق شکل (۹)، مشاهده می‌شود که ضریب آبگذری سرریز کرامپ با افزایش نسبت بی‌بعد بار کل آبی

به ارتفاع سرریز کاهش می‌یابد. با افزایش بار آبی تا مقدار H_t/P کمتر از ۰/۴، کاهش ضریب آبگذری به دلیل وقوع هوادهی کامل (به‌ویژه در M4) با شیب زیادی رخ داده است. سپس به دلیل ورود و خروج (حالت گذرا) هوا از زیر جریان، کاهش با شیب کمتری ادامه می‌یابد تا زمانی که در مقدار H_t/P کوچکتر از ۰/۶ هوادهی رخ ندهد. بیشترین ضریب آبگذری در سرریز کرامپ M4 در شرایط جریان آزاد و مستغرق مشاهده شد. همچنین مشاهده شد که کمترین ضریب دبی در مدل ۲ در شرایط جریان آزاد ایجاد شده است. وقتی سرریز با زاویه شیب بالادست و پایین‌دست یکسان نصب شد، در مقایسه با زمانی که شیب بالادست بیشتر از شیب پایین‌دست بود، ضریب آبگذری در حالت جریان آزاد تقریباً ۱۶ درصد افزایش یافت. نتایج همچنین نشان داد که افزایش بار هیدرولیکی منجر به کاهش دبی سرریز کرامپ می‌شود. تغییرات زاویه دیواره سرریز، روند خاصی را در تغییرات ضریب دبی بر اساس تمام مقادیر بی‌بعد نسبت بار کل آب به ارتفاع سرریز ایجاد نکرد. جالب توجه است که ضرایب آبگذری مدل‌های ۳ و ۱ تقریباً با تمام بارهای کل آب در هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق برابر بود؛ از این رو می‌توان گفت که شیب بالادست سرریز تأثیر چندانی نداشته است. مشاهده شد که با افزایش نسبت بی‌بعد بار کل آب به ارتفاع سرریز، ضریب آبگذری در مدل‌های ۳ و ۱ با شیب تندتری نسبت به سایر سرریزها کاهش یافته است. با مقایسه بخش‌های الف و ب در شکل ۹، مشاهده می‌شود که ضریب آبگذری عبوری از سرریز کرامپ در تمام مدل‌ها با مستغرق شدن جریان کاهش می‌یابد، به طوری که ضرایب دبی در M2، M3 و M4 در حالت مستغرق نسبت به جریان آزاد به ترتیب ۲/۳۸، ۳/۳۶، ۳/۱۳ و ۴/۳۶ درصد کمتر اندازه‌گیری شده‌اند. مشاهده می‌شود که اختلاف ضرایب دبی در M2 و M4 در حالت آزاد نسبت به حالت مستغرق ۷ درصد بیشتر است.

شکل ۹- تغییرات ضریب آبگذری برحسب هد کل جریان در سرریزهای کرامپ با هندسه مختلف، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

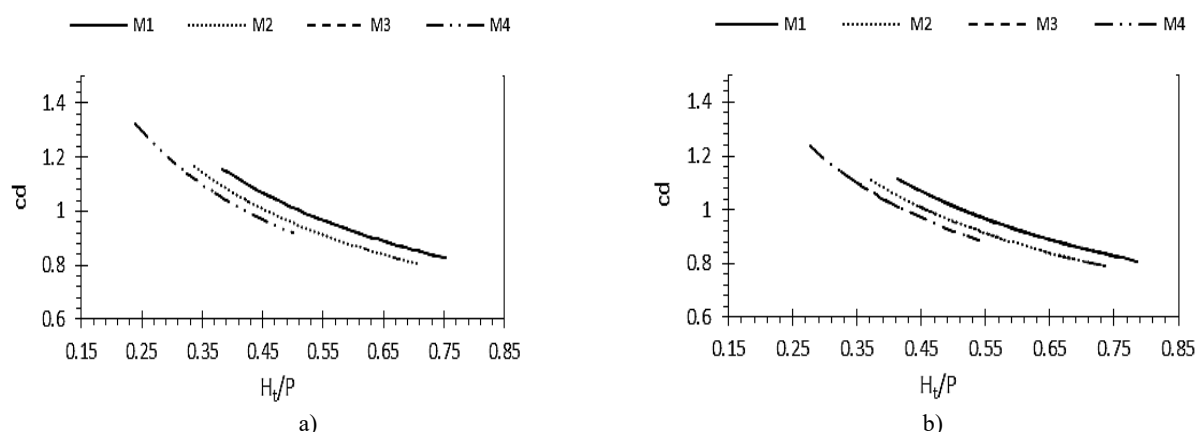


Fig 9. Changes in the discharge coefficient of the Crump weir with different geometries proportionate to H_t/P in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

تغییرات ضریب آبگذری عبوری بر حسب عدد فرود ($V_1/(gH_t)^{0.5}$) در بالادست سرریز در مدل‌های مختلف سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق در شکل (۱۰) نشان داده شده است که در آن V_1 سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد فرود در هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق منجر به کاهش دبی سرریز کرامپ شده است. مشاهده می‌شود که ضریب آبگذری در مدل ۱ با افزایش عدد فرود در مقایسه با سایر سرریزها با شیب تندتری کاهش یافته است. در تمام مدل‌های آزمایش شده سرریز کرامپ، مشاهده می‌شود که عدد فرود با مستغرق شدن جریان کاهش یافته است، به طوری که اعداد فرود در M1، M2، M3 و M4 به ترتیب ۳/۹۲، ۵/۴۳، ۵/۱۱ و ۶/۵۰ درصد در حالت مستغرق نسبت به حالت جریان آزاد کمتر اندازه‌گیری شده‌اند.

شکل ۱۰- تغییرات ضریب آبگذری برحسب عدد فرود در سرریزهای کرامپ با هندسه مختلف، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

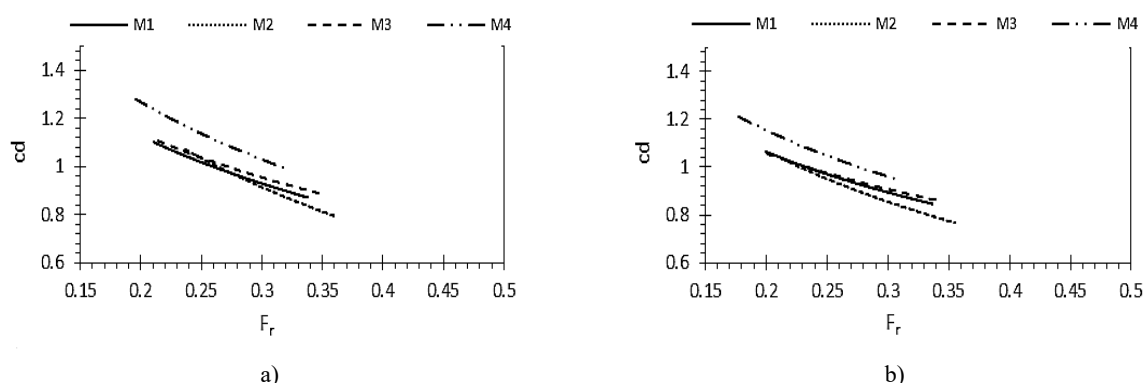


Fig 10. Changes in discharge coefficients of the Crump weir with the different geometries in relation to the Froude number in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

همانطور که قبلاً گفته شد، به دلیل محدودیت‌ها و مشکلات موجود در اندازه‌گیری تجربی میدان جریان، مدل‌سازی با ترکیبی از مدل‌سازی تجربی و عددی انجام شد. علاوه بر این، میدان جریان و سرعت‌های جریان سه‌بعدی از طریق شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D تجزیه و تحلیل شدند. کانتورهای سرعت طولی مدل‌های مختلف سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در تمام مدل‌ها در هر دو شرایط جریان آزاد و مستغرق، سرعت‌های طولی منفی در پایین‌دست سرریز کرامپ وجود دارد. این مشاهده نشان‌دهنده وجود گردابه‌های خلاف جهت عقربه‌های ساعت و ناحیه‌ای با چرخش ضعیف در پایین‌دست سرریز است. مقادیر سرعت آن‌ها در شرایط جریان مستغرق کمتر است. این گردابه‌ها را می‌توان در مدل‌های تجربی نیز مشاهده کرد (شکل ۱۲). مشاهده می‌شود که در سطح معادل تاج سرریز، سرعت جریان پایین‌دست به دلیل برخورد جریان در حال سقوط به تاج سرریز بیشتر است. حداکثر سرعت طولی مثبت در جهت جریان در M4 و در حالت جریان آزاد اندازه‌گیری شد که نشان دهنده ضریب دبی بالاتر در این مدل است. در مدل M1 مشاهده می‌شود که گردابه‌های پادساعتگرد با قدرت بیشتری تشکیل شده‌اند و بیشترین سرعت‌های طولی منفی در این مدل وجود دارد. به طور کلی، با تغییر چیدمان سرریز کرامپ از M4 به M2، M3 و M1، سرعت طولی در حالت جریان آزاد به ترتیب ۱۲، ۱۴ و ۷/۵ درصد کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که کمترین و بیشترین سرعت‌های طولی مثبت به ترتیب در مدل‌های M4 و M3 در حالت جریان مستغرق است. با تغییر هندسه سرریز از M3 به M2 و M1، مقادیر ذکر شده به ترتیب ۶/۹ و ۱۴/۷ درصد کاهش یافته است. بیشترین و کمترین گرادیان سرعت طولی به ترتیب در مدل‌های M2 و M4 مشاهده می‌شود.

شکل (۱۳)، نمونه‌ای از کانتورهای سرعت عرضی دو مدل مختلف سرریز کرامپ را در شرایط جریان آزاد و مستغرق نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در این شکل، مشخص است که سرعت‌های عرضی منفی در پایین‌دست سرریز در هر دو حالت آزاد و مستغرق وجود دارد. دامنه و مقادیر این سرعت‌های منفی در M1 بیشتر است. مشاهده می‌شود که سرعت‌های عرضی مثبت روی سطح جریان در حالت جریان آزاد بیشتر است. با تغییر چیدمان سرریز از M1 به M4 در حالت جریان مستغرق، سرعت عرضی منفی تقریباً ۲۰٪ کاهش یافت. این مقدار در حالت جریان آزاد بیشتر بود.

شکل ۱۱- خطوط سرعت طولی در مدل‌های مختلف سرریز الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

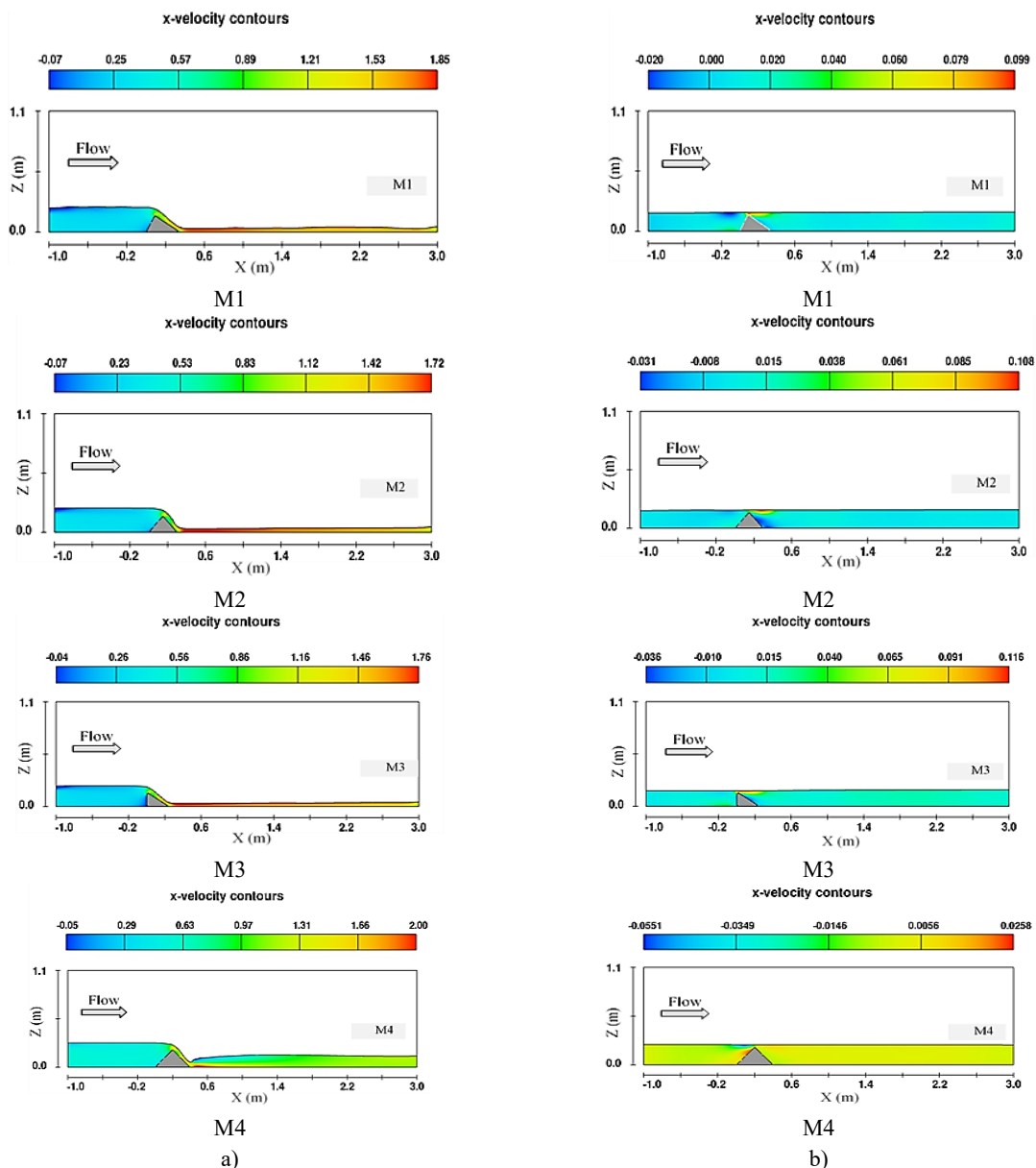


Fig 11. Contours of longitudinal velocities in the different weir models in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

شکل ۱۲- نمای جانبی جریان عبوری از روی سرریز کرامپ در حالت شرایط آزاد

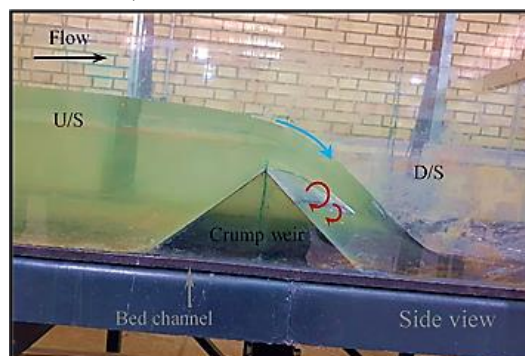


Fig 12. The side view of the experimental flow passing over the Crump weir in the free flow condition

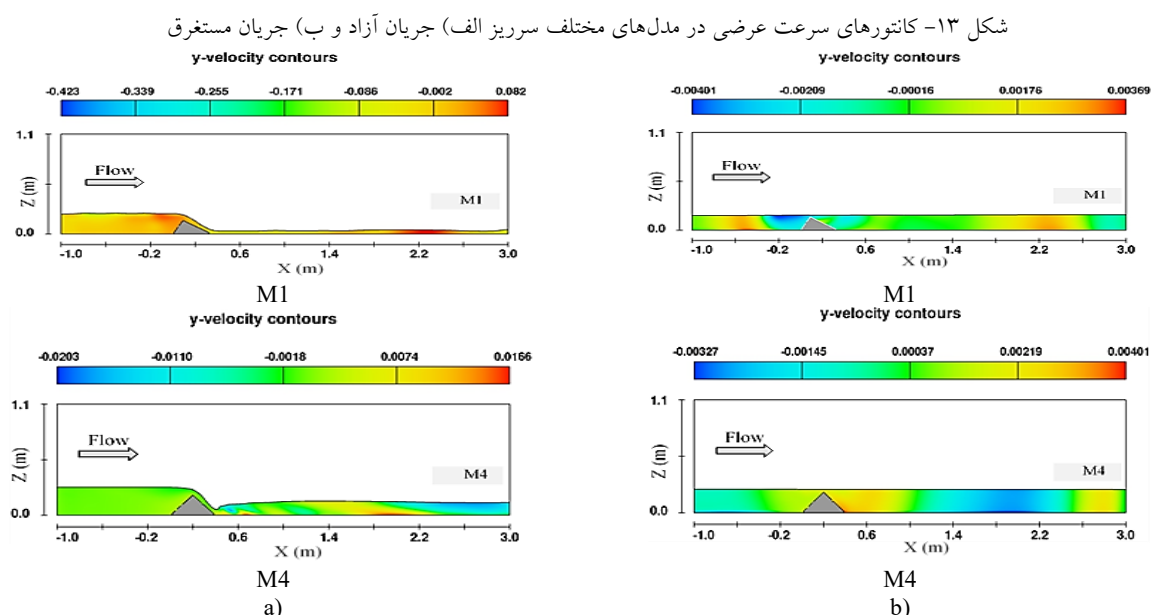


Fig 13. Contours of transverse velocities in the different weir models in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

شکل (۱۴)، نشان می‌دهد که سرعت عمقی جریان در بالادست سرریز قابل توجه است و سرعت آن پس از عبور از روی سرریز بیشتر افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش یافته در جریان مستغرق در مقایسه با حالت جریان آزاد به طور قابل توجهی کاهش یافته است. الگوهای جریان پایین دست مدل‌های مختلف سرریز شباهت قابل توجهی را نشان می‌دهند، به طوری که جریان عبوری از روی سرریز به شکل یک جت مایل خارج می‌شود. پس از برخورد به پایاب، بردارهای سرعت (نشان دهنده سرعت‌های منفی) به دلیل سرعت بالای جریان به سمت کف کانال تشکیل می‌شوند. این مشاهده در شکل (۱۲) نشان داده شده است. بالاترین مقدار سرعت عمودی منفی در M4 در حالت جریان آزاد اندازه‌گیری شد. می‌توان مشاهده کرد که شکل هندسی سرریز کرامپ بر توزیع سرعت‌های عمقی تأثیر دارد، به طوری که با تغییر چیدمان سرریز از M4 به M2، M3 و M1، سرعت‌های عمقی در حالت جریان آزاد به ترتیب ۳۷، ۱۵ و ۳۷ درصد کاهش یافته است. نتایج نشان داد که کمترین و بیشترین سرعت‌های عمقی منفی در شرایط جریان مستغرق به ترتیب در مدل‌های M1 و M2 مشاهده شد.

سرعت حاصل در مدل‌های مختلف سرریز مدل‌سازی شده در شرایط جریان آزاد و مستغرق در شکل (۱۵) نشان داده شده است. بدیهی است که در شرایط جریان مستغرق، سرعت جریان ورودی به کانال بالادست سرریز در مدل M2 در مقایسه با سایر مدل‌ها کمتر است. در نتیجه، شدت تخلیه نیز به دلیل کاهش سرعت جریان کمتر است. سرعت جریان در مدل M4 در شرایط جریان آزاد دارای شیب عمقی شدیدی است.

فشارهای موجود در امتداد کانال در مقاطع میانی مدل‌های مختلف سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق در شکل (۱۶) ارائه شده است. طبق این شکل، مشاهده می‌شود که فشارهای بالادست سرریزها در شرایط جریان آزاد و مستغرق به ترتیب تا ۲۶۶۲ و ۲۱۸۳ پاسکال می‌رسد که دلیل اصلی آن برخورد آب با بدنه سرریز و عبور آن از روی سرریز است. همچنین مشاهده می‌شود که در شرایط جریان مستغرق، در تمام مقاطع بالادست و پایین دست سرریز فشار مثبت وجود دارد و هیچ فشار منفی رخ نداده است. همچنین مشاهده می‌شود که هندسه‌های مختلف سرریز در شرایط جریان مستغرق تأثیر زیادی بر فشار نداشته‌اند، در حالی که در شرایط جریان آزاد بر مقادیر و توزیع فشار تأثیر داشته‌اند.

شکل ۱۴- کانتورهای سرعت جریان عمودی در مدل‌های مختلف سرریز، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

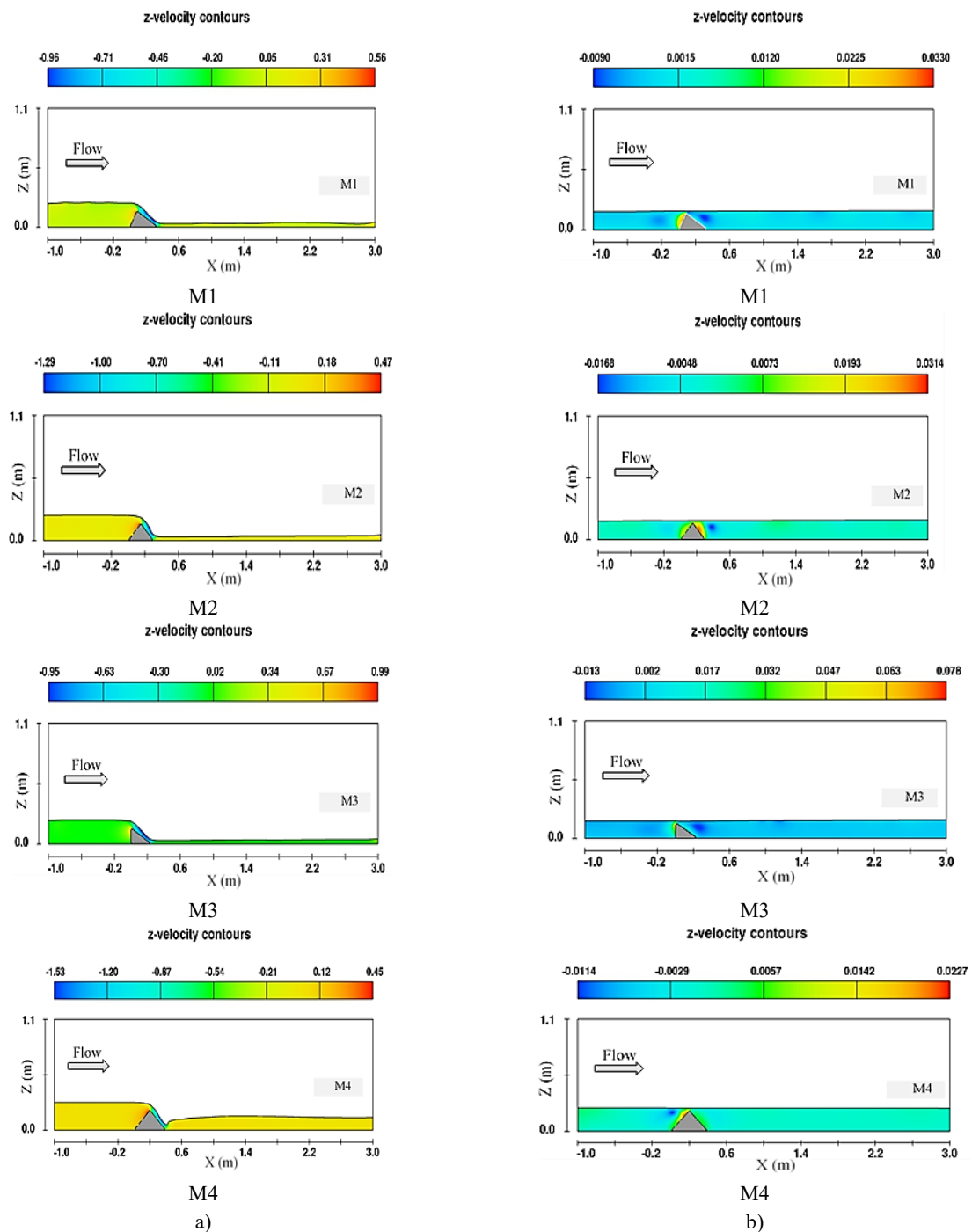


Fig 14. Contours of vertical flow velocities in the different weir models in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

شکل ۱۵- سرعت حاصل در مدل‌های مختلف سرریز، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

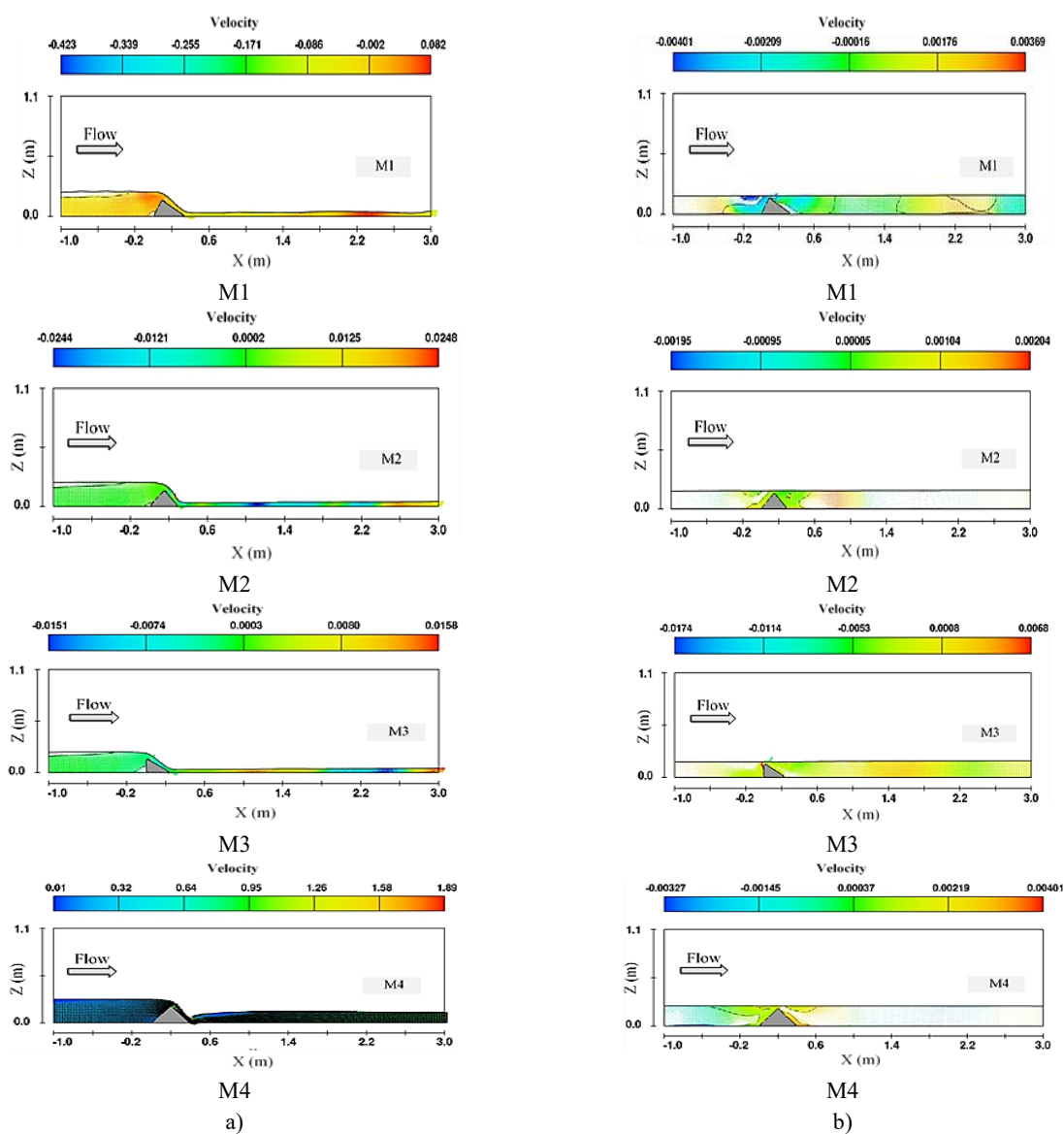


Fig 15. The resultant velocity in the different models of the weir in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

شکل ۱۶- توزیع فشار در امتداد کانال و در مدل‌های مختلف سرریز، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

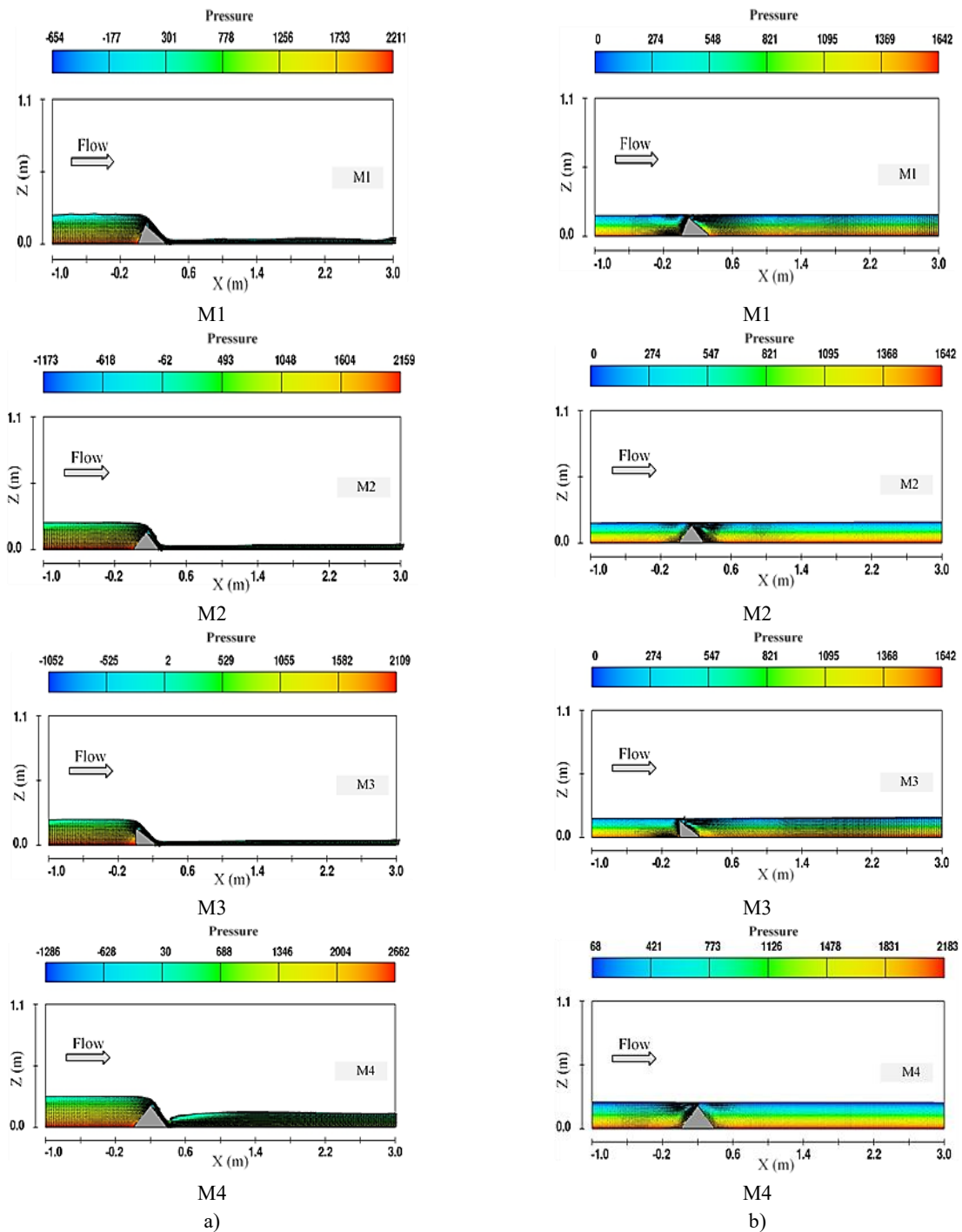


Fig 16. Pressure distribution along the channel in the different models of the weir in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله، تحلیل جامعی از ضریب تخلیه سرریز کرامپ را از طریق بررسی‌های تجربی و عددی ارائه داد. با توجه به اینکه تاکنون هیچ مطالعه‌ای با هدف بررسی دبی و میدان جریان سرریز کرامپ انجام نشده بود، انجام مدل‌سازی تجربی و عددی این نوع سرریز و همچنین بررسی میدان جریان آن ضروری بود. با توجه به چالش‌ها و محدودیت‌های مرتبط با جمع‌آوری داده‌های میدان جریان

برای سرریزهای کرامپ، از یک رویکرد ترکیبی شامل مدل‌سازی تجربی و عددی استفاده شد. یافته‌های اصلی به‌دست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- مدل عددی Flow-3D می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریز کرامپ با سطح دقت رضایت‌بخشی مورد استفاده قرار گیرد. با مدل‌سازی سرریز کرامپ، پروفیل جریان نشان داد که دو مدل عددی و تجربی دارای خطای متوسط حدود ۶٪/۵۳ هستند. Flow-3D می‌تواند نتایجی با میانگین خطای مطلق درصد (MAPE) کمتر از ۵٪/۶۲ از نظر ضریب تخلیه تولید کند.
- بیشترین و کمترین ضریب دبی به ترتیب در سرریزهای کرامپ M2 و M4 در شرایط جریان آزاد و مستغرق مشاهده شد. ضریب دبی در زمانی که سرریزها با زاویه شیب بالادست و پایین‌دست یکسان نصب شدند، در مقایسه با زمانی که شیب بالادست بیشتر از شیب پایین‌دست بود، تقریباً ۱۶ درصد افزایش یافت.
- افزایش بار هیدرولیکی منجر به کاهش دبی سرریز کرامپ در هر دو شرایط جریان آزاد و مستغرق شد.
- اختلاف ضرایب تخلیه M2 و M4 در حالت جریان آزاد نسبت به مستغرق ۷ درصد بیشتر بود.
- مقادیر بار هیدرولیکی بالادست سرریز، ضریب تخلیه روی سرریز کرامپ و عدد فرود در تمام مدل‌ها در حالت مستغرق در مقایسه با حالت جریان آزاد به طور متوسط ۷/۳ درصد افزایش و ۳/۳ و ۵/۲۴ درصد کاهش یافت.
- به طور کلی، سرعت طولی با تغییر هندسه سرریز کرامپ از M4 به M3، M2 و M1 در شرایط جریان آزاد به ترتیب ۱۲، ۱۴ و ۷/۵ درصد کاهش یافت.
- کمترین و بیشترین سرعت‌های طولی مثبت در مدل‌های M4 و M3 در شرایط جریان مستغرق مشاهده شد. این سرعت‌ها با تغییر هندسه سرریز از M3 به M2 و M1 به ترتیب ۶/۹ و ۱۴/۷ درصد کاهش یافتند.
- سرعت‌های جانبی مثبت در سطح جریان بیشتر بودند. با تغییر آرایش سرریز از M1 به M4، سرعت عرضی در حالت جریان مستغرق تقریباً ۲۰٪ کاهش یافت. مقدار آن در حالت جریان آزاد بیشتر بود.
- شکل هندسی سرریز کرامپ بر توزیع سرعت‌های عمقی تأثیر گذاشت، به طوری که با تغییر آرایش سرریز از M4 به M3، M2 و M1 در شرایط جریان آزاد، به ترتیب ۳۷، ۱۵ و ۳۷ درصد کاهش یافت.
- هندسه‌های مختلف سرریز کرامپ برخلاف حالت جریان آزاد، تأثیر چندانی بر تغییرات فشار در حالت مستغرق نداشتند.
- برخلاف حالت جریان آزاد، فشار در تمام قسمت‌های بالادست و پایین‌دست در حالت مستغرق مثبت بود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منفعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

محمدحسن هاشمی فشارکی و علی خوش فطرت: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها و نرم‌افزار. تمامی نویسندگان: تحلیل، راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Abdi Chooplou, C., Ghodsian, M., Abediakbar, D., & Ghafouri, A. (2023). An experimental and numerical study on the flow field and scour downstream of rectangular piano key weirs with crest indentations. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(5), 140. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01108-7>
- Achour, B., & Amara, L. (2022). Accurate discharge coefficient relationship for the Crump weir. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (52), 93-115.
- Al-Khateeb, H. M. M., Sahib, J. H., & Al-Yasisri, H. H. H. (2019). An experimental study of flow over V-shape crump weir crest. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 584, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
- Al-Naely, H., Al-Khafaji, Z., & Khassaf, S. (2018). Effect of opening holes on the hydraulic performance for crump weir. *International Journal of Engineering*, 31(12), 2022-2027. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.12c.05>
- Behroozi, A. M., & Vaghefi, M. (2022). Experimental and numerical study of the effect of zigzag crests with various geometries on the performance of A-type piano key weirs. *Water Resources Management*, 36(12), 4517-4533. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03261-7>
- Bettess, P., White, W. R., & Bettess, R. (1984). Recirculation in Flow over Crump Weirs. In *Channels and Channel Control Structures: Proceedings of the 1st International Conference on Hydraulic Design in Water Resources Engineering: Channels and Channel Control Structures, University of Southampton, April 1984* (pp. 103-117). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-11300-4_9
- Bodaghi, E., Abdi-Chooplou, C., & Ghodsian, M. (2024). Experimental investigation of scour downstream of a type A trapezoidal piano key weir under free and submerged flow conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 72(1), 34-48. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0041>
- Deelstra, J., Vandsemb, S., Eggestad, H. O., Bechmann, M., & Vagstad, N. (2002). Monitoring and Assessment of Non-Point Source Pollution in Norway.
- Flow Science, Inc. FLOW-3D® Version 10.0 (Computer software). [https://www.flow3d.com\(2011\)](https://www.flow3d.com(2011))
- Habibi, M.S., & Khosrowjerdi, A. (2008). Investigation of the discharge coefficient of a Cramp weir and its comparison with that of an ogee weir by using FLUENT software. The 3rd Conference of Water Resources Management, Tabriz, Iran. <https://civilica.com/doc/50444>
- Hashemi Fesharaki, M. H., & Khoshfetrat, A. (2024). Experimental Investigation of Energy Loss in Crump Spillways in Free Flow and Submerged State. *Modares Civil Engineering journal*, 24(2), 157-167.
- Hosseini Mobarra, S.E., & Yasi, M. (2013). The effect of the height of a short-edged weir (Crump weir) on its flow pattern at a 90-degree bend. 12th Hydraulic Conference, Karaj, Iran. <https://civilica.com/doc/379448>
- Hussein, J. N. (2014). Experimental study of height and surface roughness effects of crump weirs on over flow characteristics. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*, 22(4), 845-859.
- Karimi, M., Attari, J., Saneie, M., & Jalili Ghazizadeh, M. R. (2018). Side weir flow characteristics: comparison of piano key, labyrinth, and linear types. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(12), 04018075. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001539](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001539)
- Keller, R. J. (1989). Sloping crest crump weir. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 115(2), 231-238. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:2\(231\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:2(231))
- Khalifa, S. Y., Adeogun, B. K., Ismail, A., Ajibike, M. A., & Muhammad, M. M. (2021). Experimental Study to Determine Flow Parameters over Roughed Crump Weir Models. *ATBU Journal of Science, Technology and Education*, 9(2), 18-29.
- Lukaszewicz, G., & Kalita, P. (2016). Navier–stokes equations. *Advances in Mechanics and Mathematics*, 34.

- Muhsun, S. S., Al-Madhhachi, A. S. T., & Al-Sharify, Z. T. (2020). Prediction and CFD simulation of the flow over a curved crump weir under different longitudinal slopes. *International Journal of Civil Engineering*, 18(9), 1067-1076. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00527-2>
- Muhsun, S. S., Talab Al-Osmy, S. A., Al-Hashimi, S. A. M., & Al-Sharify, Z. T. (2019). Theoretical, CFD simulation and experimental study to predict the flowrate across a square edge broad crested weir depending on the end depth as a control section. In *AWAM International Conference on Civil Engineering* (pp. 15-34). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32816-0_2
- Oertel, M. A. R. I. O. (2015). Discharge coefficients of piano key weirs from experimental and numerical models. In *36th IAHR World Congress the Hague. Netherlands*.
- Rockne.karl, (2006). laboratory 7-open channel flow, [www.uic.edu / classes / cmeng 211 / lab 7](http://www.uic.edu/classes/cmeng211/lab7)
- Sarhan, S. A., & Jalil, S. A. (2018). Analysis of simulation outputs for the mutual effect of flow in weir and gate system. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 26(6), 48-59.
- Sarker, M. A., Rhodes, D. G., & Armstrong, G. S. (2006). Modification of Crump weir to facilitate fish passage. *Environmental Hydraulics and Eco-Hydraulics, Theme B, Proceedings: 21st Century: The New Era for Hydraulic Research and Its Applications*, 371.
- Spaan, G. B. H., Van Nooyen, R. R. P., De Graaff, B. J. A., & Brouwer, R. (2003). Discharge formulas of Crump-de Gruyter gate-weir for computer simulation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(4), 270-277.
- Stott.tim, (2006). Measuring stream flow, [www.filter.ac.uk / Fluvial Geomorphology](http://www.filter.ac.uk/Fluvial%20Geomorphology)
- Woldesemayat, E. M., & Genovese, P. V. (2021). Monitoring urban expansion and urban green spaces change in Addis Ababa: Directional and zonal analysis integrated with landscape expansion index. *Forests*, 12(4), 389. <https://doi.org/10.3390/f12040389>



Numerical modeling to investigate the effect of the presence or absence of a free surface on the flow around the cylindrical pier

Mehdi Esmailzadeh Fereydani, Yasin Aghaee-Shalmani*

Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanical and Civil Engineering, Kho. C, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

Corresponding Author email: y.aghace@iaukhsh.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 04 Apr 2025

Revised: 15 Jun 2025

Accepted: 14 Jul 2025

Published: 17 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

Bridge piers, as critical components of hydraulic structures, are consistently subjected to dynamic water flow forces. Understanding flow patterns around these piers, particularly under free surface conditions, is essential for predicting phenomena like scour and structural instability. However, many numerical simulations neglect free surface effects to reduce computational costs. This study employs Flow-3D v10.0.1 to investigate the impact of free surface presence/absence on flow characteristics around cylindrical piers at subcritical Froude numbers (0.10–0.30). The primary objective is to quantify errors induced by ignoring free surface effects and compare velocity fields, shear stresses, and vortex patterns between free surface (VOF) and rigid-lid approaches.

Materials and Methods

The study implemented two modeling strategies: Free surface (Volume of Fluid - VOF method) and Rigid-lid (symmetry boundary condition).

A 4-m long flume with a 0.2-m diameter cylindrical pier was discretized using 1 million structured hexahedral cells (refined near boundaries). The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model solved Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations. Model validation against experimental data from Salaheldin et al. (2004) showed <10% deviation in upstream velocity profiles and separation lengths. Five Froude number scenarios (0.10–0.30) were simulated with consistent flow depth (0.25 m). Boundary conditions included no-slip walls and pressure outlets, with timesteps controlled by Courant–Friedrichs–Lewy stability criteria.

Results and Discussion

Key findings revealed significant free surface influences:

- Water surface deformation: Maximum wave height upstream increased from 0.004 m ($Fr=0.10$) to 0.029 m ($Fr=0.30$), while downstream depression reached 0.0245 m.
- Velocity fields: Downward flow velocities near the pier base were 17% higher in VOF simulations at $Fr=0.30$. Horizontal velocity components differed by 20% near the bed.
- Vortex dynamics: Rigid-lid models overestimated downstream separation lengths by 11% due to unaccounted pressure fluctuations from surface waves.
- Bed shear stress: VOF simulations predicted 15% higher shear stresses, emphasizing free surface effects on near-bed flow structures.

Notably, discrepancies intensified at higher Froude numbers ($Fr > 0.25$), with velocity profile variations exceeding 67% near sidewalls. The rigid-lid approach failed to capture surface-induced vertical velocities and underpredicted horseshoe vortex intensity by 12–18%.

Conclusion

This study demonstrates that neglecting free surface effects in subcritical flow modeling can introduce substantial errors ($\leq 20\%$) in hydrodynamic parameter predictions. The rigid-lid simplification proved particularly inadequate for $Fr \geq 0.25$, where free surface deformations significantly alter flow dynamics. While computational costs for VOF simulations were 35% higher, the improved accuracy justifies its application for pier design in real-world hydraulic conditions. Current limitations include the 2D-RANS framework's inability to resolve all turbulent scales and the need for finer meshes in separation zones. Future work should examine 3D free surface interactions with sediment transport mechanisms. These findings provide critical insights for optimizing numerical modeling protocols in bridge hydraulics and advancing sustainable pier design methodologies.

Keywords: Turbulent flow, Three-Dimensional modeling, Free-surface, Rigid-lid, Froud number

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mehdi Esmailzadeh F. and Yasin Aghae Sh.: Writing, Methodology, Investigation, Data Collection, Software; **Mehdi Esmailzadeh F. and Yasin Aghae Sh.:** Analysis, Supervision, Writing – Review & Editing, Data Curation.

Citation: Esmailzadeh, F., & Aghae Sh, Y. (2025). Numerical modeling to investigate the effect of the presence or absence of a free surface on the flow around the cylindrical pier. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(1), 57-71. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1208971>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



مدل‌سازی عددی بررسی تأثیر وجود یا عدم وجود سطح آزاد بر جریان اطراف پایه استوانه‌ای

مهدی اسمعیل‌زاده فریدنی، یاسین آقایی شلمانی*

گروه عمران، دانشکده مهندسی مکانیک و عمران، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: y.aghace@iaukhsh.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

چکیده

پایه‌های پل و جریان اطراف آن‌ها به دلیل اهمیت فراوانشان در سازه‌های هیدرولیکی همواره توجه ویژه بوده‌اند. در مطالعه حاضر با استفاده از مدل‌سازی عددی با استفاده از مدل آشفتگی RNG به بررسی جریان‌های آشفته در اطراف پایه استوانه‌ای پل با سطح آزاد (Free-surface) و بدون سطح آزاد (Rigid-lid) پرداخته می‌شود. هدف اصلی، مدل‌سازی عددی جریان در اعداد فرود زیر بحرانی ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۵ و ۰/۳۰ در هر دو حالت سطح آزاد و بدون سطح آزاد است. با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه آن‌ها، در مدل‌سازی با عدد فرود ۰/۲۵ و ۰/۳۰ تغییرات دو حالت با و بدون سطح آزاد در مقایسه با یکدیگر نمایان‌تر است. تفاوت سرعت جریان رو به پایین در جلوی پایه به‌ازای عدد فرود ۰/۳۰ برای جریان با سطح آزاد در مقایسه با جریان بدون سطح آزاد ۱۰ درصد است. اختلاف مقدار حداکثر سرعت در صفحه افقی در اطراف پایه در صفحه افقی به‌ازای عدد فرود ۰/۳۰ در دو مدل‌سازی ۲۰ درصد است. با افزایش عدد فرود جریان طول جدایش در بالادست جریان به مقدار جزئی افزایش می‌یابد. همچنین مقدار طول جدایش در پایین‌دست، برای دو مدل‌سازی با و بدون سطح آزاد در تمامی اعداد فرود با یکدیگر تفاوت دارد و مقدار آن برای اعداد مختلف فرود، حدود ۱۱ درصد است.

واژه‌های کلیدی: جریان آشفته، مدل‌سازی سه‌بعدی، سطح آزاد، سطح ثابت، عدد فرود

استناد: اسمعیل‌زاده فریدنی، م.، آقایی شلمانی، ی. (۱۴۰۴). مدل‌سازی عددی بررسی تأثیر وجود یا عدم وجود سطح آزاد بر جریان اطراف پایه استوانه‌ای. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۳(۱): ۷۱-۵۷. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1208971>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

قرارگیری سازه پل ها در مسیر جریان های رودخانه ای، همواره مستلزم تعبیه پایه هایی در این مناطق است که عملاً این پایه ها در معرض انواع جریان های رودخانه ای و به دنبال آن آبستگي قرار خواهند داشت. این موضوع احتمال تهدید پایداری پایه های پل را بیشتر کرده و در نهایت با ناپایدار کردن آن ها موجب شکست پل ها می گردد. موانع واقع شده در برابر جریان، موجب تغییر در الگوی جریان پیرامون آن ها می گردد. جدایش جریان از مرز پایه ها، موجب ایجاد گردابه هایی در پشت پایه شده که به تناوب از وجهی به وجه دیگر پایه حرکت می کنند. گردابه ها پس از آنکه به اندازه کافی رشد کردند به سمت پایین دست پایه حرکت کرده و در فاصله ای معین از پایه مستهلک می گردد (Aghaee-Shalmani & Hakimzadeh, 2015). اگر پایه ای در برابر جریان آب وجود داشته باشد، سرعت جریان در برخورد به سطح بالادست پایه به صفر می رسد. به دلیل اینکه پروفیل سرعت از سطح آزاد به سمت کف از میزان حداکثر خود به صفر کاهش می یابد، فشار دینامیکی نیز از سطح آزاد به سمت کف کاهش می یابد. این گرادیان فشار، جریان رو به پایینی را ایجاد می کند. جریان رو به پایین پس از برخورد به بستر در مختلف پراکنده می شود و بستر را حفر می کند. مقداری از جریان که به سمت بالادست بازگشت می کند، در برخورد با جریان اصلی کانال مجبور به حرکت در جهت جریان شده و مجدداً به پایه برخورد می کند و در داخل حفره ایجاد شده، گردابی را تشکیل می دهد. این گرداب در دو طرف پایه امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسب^۱ به وجود می آورد (Raudkivi & Ettema, 1983).

بررسی الگوی جریان اطراف پایه استوانه ای، با روش های آزمایشگاهی، تحلیلی و یا مدل سازی عددی انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی متعددی درخصوص جریان اطراف پایه ها وجود دارد که از جمله آن ها می توان به مطالعه Graf & Altinakar (1998) و Istiarto (2001) اشاره کرد. همچنین Baker (1979) و Dargahi (1989) به مطالعه رفتار گردابه های نعل اسبی پرداختند. رفتار گرداب های نعل اسبی، تعداد و دینامیک آن ها به علت تأثیر ویژه بر روی آبستگي از اهمیت بسیاری برخوردار است. Launay et al. (2017) به بررسی دقیق این گرداب ها با توجه به ابعاد پایه، عمق آب و اعداد رینولدز پایه و جریان پرداختند.

مدل سازی های عددی نیز برای شبیه سازی جریان، ابزار مناسبی برای بررسی جریان های آشفته با سطح آزاد در اطراف پایه است. در اغلب مدل سازی های عددی تغییرات سطح آزاد جریان به جهت کاهش حجم محاسبات صرف نظر می گردد که اصطلاحاً به آن جریان با سرپوش (بدون سطح آزاد) گفته می شود. (Aghaee-Shalmani & Hakimzadeh, 2015) در مطالعه ای مدل سازی جریان را برای دو حالت حضور سطح آزاد و بدون سطح آزاد اطراف پایه های مخروطی با عدد فرود جریان برابر ۰/۲ انجام دادند. نتایج نشان دهنده اختلاف ناچیز بین الگوی جریان در دو حالت بود. (Roulund et al. (2005 نیز با مدل سازی عددی جریان آشفته اطراف پایه استوانه ای را شبیه سازی کردند. این محققین در مدل سازی های خود به این نکته اشاره کردند که در نظر گرفتن فرض بدون سطح آزاد در مدل سازی ها برای حالاتی که عدد فرود جریان کمتر از ۰/۲ است، خطای قابل توجهی در محاسبات و نتایج ایجاد نمی کند.

Kara et al. (2015) جریان اطراف پایه پل کناری را به صورت عددی مدل سازی کردند. در مدل سازی ها از روش شبیه سازی جریان گردابی بزرگ و هر دو حالت جریان با سطح آزاد و سطح آب ثابت، استفاده شده است. ایشان از دو روش (LES) و روش تعیین سطح (LSM) در تحقیق خود استفاده کردند. وضعیت جریان و مشخصات آن برای دو حالت جریان با سطح آزاد و جریان بدون سطح آزاد مورد مقایسه قرار گرفت. با بررسی خواص جریان به دست آمده نشان داده شد که میدان سرعت و تنش های برشی بستر در هر دو روش تا حدودی مشابه اند. با این حال، ساختارهای آشفته گی بین دو شبیه سازی متفاوت بوده که باعث تفاوت قابل توجه در

¹ Horse shoe

انرژی جنبشی آشفته و تنش رینولدز می‌گردد. (Kahraman et al. (2020) به مدل‌سازی جریان اطراف پایه نوک تیز در دو حالت سطح آزاد و بدون سطح آزاد پرداختند. در پژوهش ایشان، اعداد فرود 0.1 تا 0.4 آزمایش شد و نتایج نشان داد که مدل‌سازی‌های بدون سطح آزاد با نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی با سطح آزاد دارد. (Stipa et al. (2024) یک مدل شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ (LES) برای بررسی تأثیر موج‌های گرانشی جوی ناشی از مزارع بادی در لایه مرزی اتمسفری خشی توسعه دادند. مدل پیشنهادی به‌طور ویژه برای بررسی اثرات متقابل بین مزارع بادی و ساختارهای موجی جو طراحی شده و در آن از مرز بالایی صلب (rigid-lid) و نیز مرز آزاد استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مرز صلب می‌تواند برخی روندهای کلان مانند گرادیان فشار را بازتولید کند، اما در بازسازی دینامیک موج‌های گرانشی و بازیابی جریان در پشت توربین‌ها ناتوان است. در مقابل، مدل مرز آزاد قادر به بازنمایی دقیق‌تر سازوکارهای انتشار انرژی و واکنش‌های لایه مرزی به اغتشاش‌های ناشی از مزارع بادی است. (Shaheed et al. (2025) تأثیرات نوسانات سطح آزاد را در جریان‌های پیچیده (خم‌ها و انشعابات رودخانه‌ای) بررسی کند. نتایج نشان می‌دهند که مدل rigid-lid در بازتولید ساختارهای جریان و تنش‌های برشی نزدیک سطح دقت کمتری دارد، در حالی که مدل free-surface با جزئیات بیشتر آن‌ها را بازسازی می‌کند، اگرچه هزینه محاسباتی بالاتری دارد.

از دیگر موارد، مقایسه عددی بین دو حالت سطح ثابت و حجم مایع، ساختارهای سیال در یک جریان کم عمق توسط Nasif et al. (2016) است. در این شبیه‌سازی، یک جریان در کانال باز به طول 10 متر و عمق 0.13 متر و در نقطه تعیین شده یک صفحه عمودی قرار داده شده است. ساختارهای جریان نزدیک بستر و سطح آزاد در نظر گرفته شده‌اند. در تحقیقی که Chen et al. (2020) روی جریان اطراف پایه استوانه‌ای شکل با عدد رینولدز 27000 و عدد فرود 0.8 انجام دادند، از روش حجم سیال برای شبیه‌سازی استفاده کردند. در نزدیکی سطح آزاد، گرداب‌های منظم ریزش پیدا کرده و میانگین ارتفاع سطح آزاد با آزمایش‌ها، از نظر نتیجه تا حدودی تطبیق دارد. در شبیه‌سازی بالآمدگی و فرورفتگی در مقابل و پشت پایه، مشابه آزمایش‌ها است. همچنین گرداب‌های چرخشی نزدیکی سطح کاهش و فقط در عمق قابل مشاهده هستند. مطالعه آزمایشگاهی و عددی جریان اطراف پایه استوانه‌ای غوطه‌ور مقایسه آن‌ها مطالعه‌ای با هدف ایجاد تعامل بین جریان سطح آزاد و سینماتیک اطراف سیلندر و مدل‌سازی جریان مجاورت پایه استوانه‌ای و تعیین تأثیر سطح آزاد بر جریان پایین‌دست، صورت گرفته است. در مطالعه ایشان، بهترین نتایج با استفاده از روش RNG و روش حجم سیال بدست آمده است (TĀNASE et al., 2014). (Khosronejad et al. (2019 & 2020) در مطالعه عددی با استفاده از LES، روش‌های سطح آزاد ثابت و سطح آزاد متغیر را برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد و آبشستگی اطراف یک تکیه‌گاه در یک عدد فرود خاص مقایسه کردند. ایشان تفاوت‌هایی را بین میدان‌های جریان گزارش کردند، اما عمق آبشستگی تعادلی مشابهی برای این دو مورد به‌دست آمد. (Li et al. (2018) به مدل‌سازی عددی جریان اطراف دو پایه مجاور با استفاده از مدل آشفته‌گی RNG پرداختند. نتایج محاسباتی نشان داده که ساختار گردابی روی سطح آزاد و نزدیک آن وجود داشته و از الگوهای متفاوتی پیروی می‌کند.

در بسیاری از مدل‌سازی‌های عددی جریان در اطراف پایه و موارد مشابه با آن برای کاهش حجم محاسبات از تغییرات سطح آزاد صرف نظر شده است. از این‌رو بیشتر مطالعات موجود بر روی پایه‌های استوانه‌ای با سطح آب ثابت انجام گرفته است. تا آنجایی که ما اطلاع داریم، تاکنون مطالعه‌ای در خصوص تفاوت اثر در نظر نگرفتن سطح آزاد در مقایسه با سطح آزاد برای پایه‌های استوانه‌ای انجام نشده است. در این پژوهش، اثرات سطح آزاد در مدل‌سازی با توجه به مقدار عدد فرود و تغییر آن در مدل عددی در شرایط زیر بحرانی بررسی خواهد شد. همچنین تفاوت نتایج مربوط به الگو و مشخصات جریان در دو حالت با سطح آزاد و بدون سطح آزاد بررسی می‌شود. علاوه‌براین، شناخت تأثیر در نظر گرفتن سطح آزاد در مدل‌سازی در مطالعات آتی می‌تواند با اطمینان بیشتری

انجام شده و همچنین مقدار خطای در نظر نگرفتن سطح آزاد در مدل سازی های آتی با توجه به عدد فرود مدل واضح تر و دقیق تر خواهد بود.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مدل سازی عددی

در این مطالعه، از نرم افزار Flow-3D v 10.0.1 برای مدل سازی عددی جریان های آشسته در اطراف پایه استوانه ای با سطح آزاد و بدون سطح آزاد استفاده شد (Flow Science, 2011). بدین منظور با استفاده از امکانات موجود در نرم افزار، شبکه حلی ایجاد شده و شرایط مرزی مورد نیاز مسئله که بتواند شرایط واقعی را مدل کند، استفاده می گردد. در شکل (۱) نمای شماتیک از پایه، میدان محاسباتی و موقعیت پایه نشان داده شده است. طول کانال ۴ متر و پایه در فاصله ۱۰ برابر قطر پایه از ورودی کانال و در فاصله ۱۰ برابر قطر پایه از خروجی کانال قرار گرفته است. طول کانال بر این اساس انتخاب شده است که جریان هم در بالادست به توسعه یافتگی کامل رسیده باشد و همچنین جریان در پایین دست مستقل از اثرات انتهای کانال باشد (Aghaee-Shalmani & Hakimzadeh, 2015). عرض کانال برابر ۱/۵ متر و عمق جریان در تمام مدل ها ثابت و برابر ۰/۲۵ متر است. قطر پایه در تمام مدل سازی ها ثابت و برابر ۰/۲ متر است. شرایط مرزی مورد استفاده در دیواره ها و کف به صورت مرز جامد تعریف شده است. شرایط مرزی سطح سیال به دو صورت آزاد و عمق ثابت و حرکت افقی سطح آزاد آب لحاظ شده است. بدین صورت که برای مدل سازی جریان با سطح آزاد از روش VOF^2 و برای مدل سازی سطح آزاد به صورت Rigid-Lid از شرط مرزی تقارن در سطح آزاد استفاده شده است. شرط مرزی تقارن در مدل سازی Rigid-Lid حرکت سطح آزاد در راستای قائم را از بین برده و سطح آزاد تنها در راستای افقی امکان حرکت دارد. در مدل سازی ها دیواره ها و کف کانال و سطح استوانه به صورت مرز جامد تعریف شده است. جریان در کانال در تمامی مدل ها به صورت زیر بحرانی است. برای مدل عددی حاضر سه شبکه بندی مختلف با تعداد شبکه 5×10^5 (شبکه درشت)، 1×10^6 (شبکه متوسط) و 1.5×10^6 (شبکه ریز) در نظر گرفته شد که نتایج نشان داد که تفاوت بین نتایج شبکه متوسط و ریز بسیار ناچیز بوده و با تقریب قابل قبول شبکه انتخابی شامل یک میلیون شبکه مکعب مستطیلی متعامد (شکل ۱)، برای شبیه سازی های این پژوهش انتخاب شد. شبکه بندی به نحوی انجام شده است که تراکم شبکه ها در مجاورت مرزهای جامد به اندازه کافی باشد.

شکل ۱- نمای شماتیک از پایه، میدان محاسباتی و موقعیت پایه

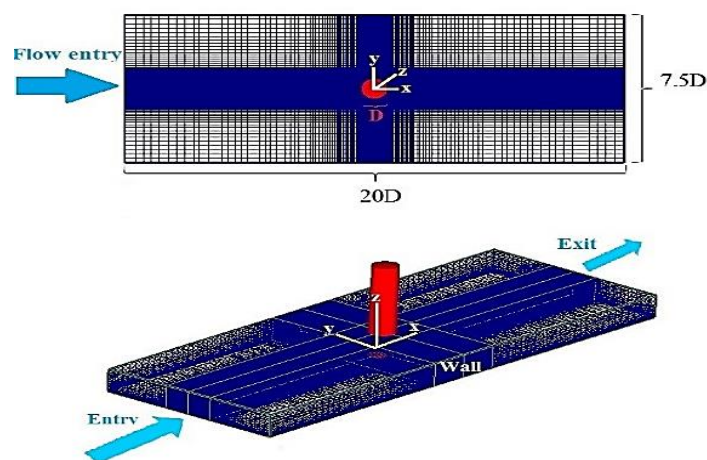


Fig 1. Schematic view of the pier, numerical domain and pier location

² Volume of Fluid

۲-۲- کاربرد معادلات و صحت‌سنجی

در مدلسازی تحقیق حاضر، از معادلات ناویر-استوکس و برای مدلسازی آشفتگی از مدل‌های آشفتگی RNG استفاده شد. موفقیت مدل RNG در پژوهش‌های سایر محققین در مدلسازی جریان اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل نیز بیان شده است که از جمله آن می‌توان به نتایج Salaheldin et al. (2004) و Wang (2010) اشاره کرد. برای جلوگیری از توقف حل عددی به دلیل ناپایداری‌های ایجاد شده در ابتدای مدلسازی، مقدار گام زمانی به $10^{-8} \times 1$ ثانیه محدود شده است. علاوه بر این، نرم‌افزار با توجه به مقدار پایداری و روند حل عددی، با تغییرات گام زمانی شرایط پایداری را برای حل ایجاد می‌کند. مدت زمان مدلسازی ۱۲۰ ثانیه بوده و همگرایی حل با بررسی حداقل شدن تغییرات جریان در گام‌های پایانی است. مدت زمان مورد نیاز برای یکبار عبور کامل جریان از میدان محاسباتی با توجه به طول میدان محاسباتی و سرعت جریان در کمترین سرعت ورودی جریان، ۲۵/۵ ثانیه است. مدت زمان ۱۲۰ ثانیه تقریباً معادل ۵ بار عبور کامل جریان از میدان محاسباتی بوده و شرایط پایدار جریان را حاصل می‌کند. برای مدلسازی سطح آزاد از روش VOF استفاده شده است. صحت‌سنجی مدل عددی پژوهش حاضر در حالت وجود سطح آزاد با مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی استخراج شده از پژوهش Salaheldin et al. (2004) مربوط به کار آزمایشگاهی Dargahi (1989) انجام شده است. برای صحت‌سنجی، ابعاد میدان محاسباتی و مشخصات پایه، عمق جریان و سرعت جریان ورودی کاملاً مشابه شرایط مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. در مدل آزمایشگاهی طول کانال ۲۲ متر، عرض ۱/۵ متر، عمق جریان ۰/۲ متر، سرعت متوسط جریان ورودی ۰/۲۶ متر بر ثانیه و قطر پایه ۰/۱۵ متر است. مرکز مختصات در مرکز پایه واقع شده است. مقایسه توزیع مولفه افقی سرعت جریان u در محور تقارن جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی در دو مقطع قبل از پایه $(x/D = -0.73, -2.5)$ و دو مقطع در پایین‌دست پایه $(x/D = 2.1, 8)$ انجام شده است. تغییرات سرعت u در عمق جریان در شکل (۲-الف) در بالادست پایه مشاهده می‌شود. در موقعیت $x/D = -2.5$ تطابق مناسبی بین پروفیل سرعت در مدلسازی عددی پژوهش حاضر و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. در موقعیت $x/D = -0.73$ همچنان نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی تطابق دارد ولی سرعت منفی در نزدیک کف نشان دهنده جریان برگشتی در جلوی پایه است که در مدل عددی مشاهده می‌شود. این سرعت منفی و اختلاف آن با مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی طول گردابه نعل اسبی در بالادست پایه را بزرگتر از نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده است. این اختلاف می‌تواند به دلیل کم بودن تعداد شبکه محاسباتی در این ناحیه و همچنین عدم توانایی مدل‌های RANS در پیش‌بینی دقیق فرآیندهای آشفتگی در مجاورت بستر باشد. شکل (۲-ب) مقایسه مولفه افقی سرعت u در پایین‌دست پایه را نشان می‌دهد. در این شکل در موقعیت $x/D = 2.1$ و $x/D = 8$ شکل کلی پروفیل سرعت و مقادیر آن با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج مدلسازی عددی تنها برای پروفیل سرعت بوده و مقایسه‌ای بین عمق جریان در مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی به دلیل عدم اندازه‌گیری‌های سطح آب در مدل آزمایشگاهی انجام نشده است. نتایج صحت‌سنجی نشان‌دهنده تطابق قابل قبول مدل عددی حاضر با اختلاف جذر میانگین مربعات ۵ تا ۱۰ درصد مربوط به پروفیل سرعت در عمق جریان در بالادست و پایین‌دست پایه است. همچنین طول جدایش جریان در بالادست پایه که گرداب نعل اسبی در آن ناحیه ایجاد می‌شود نیز با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. در تحقیق حاضر برای بررسی اثر وجود یا عدم وجود سطح آزاد در مدلسازی جریان، پنج عدد فرود جریان ($Fr = U_0 / \sqrt{gh}$) در نظر گرفته شده است که در آن U_0 سرعت متوسط ورودی جریان، g شتاب جاذبه و h عمق جریان است. مقادیر عدد فرود، ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۵ و ۰/۳۰ است. دلیل انتخاب این اعداد این است که اکثر جریان‌های مورد بررسی در تحقیقات سایر محققین مدلسازی‌های آزمایشگاهی و یا عددی در این محدوده بوده است (Aghaee-Shalmani & Hakimzadeh, 2015; Baker, 1979; Dargahi, 1989; Roulund et al., 2005; Salaheldin et al., 2004). علاوه بر این، انتخاب این محدوده از عدد فرود به این دلیل است که بسیاری از محققین از اثر تغییر سطح آب در مدلسازی عددی در عددهای

فروود کوچک صرف نظر کرده‌اند. در صورتی که به نظر می‌رسد استفاده از این فرض ساده شونده می‌تواند خطاهای قابل توجهی در نتایج ایجاد کند. در جدول (۱) مشخصات جریان مورد استفاده در حالات مختلف نشان داده شده است. در ستون اول جدول، شماره مدل سازی عددی و ستون دوم Q دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سایر ستون‌ها به ترتیب نشان دهنده سرعت متوسط جریان ورودی، عمق جریان و قطر پایه است. در مدل سازی‌های این پژوهش برای هر عدد فروود و عمق جریان، سرعت جریان ورودی محاسبه و در ورودی کانال لحاظ شده است.

شکل ۲- مقایسه نتایج پروفیل سرعت قائم در عمق جریان در پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی مندرج در (Salaheldin et al. (2004)

الف) بالادست پایه ب) پایین دست پایه

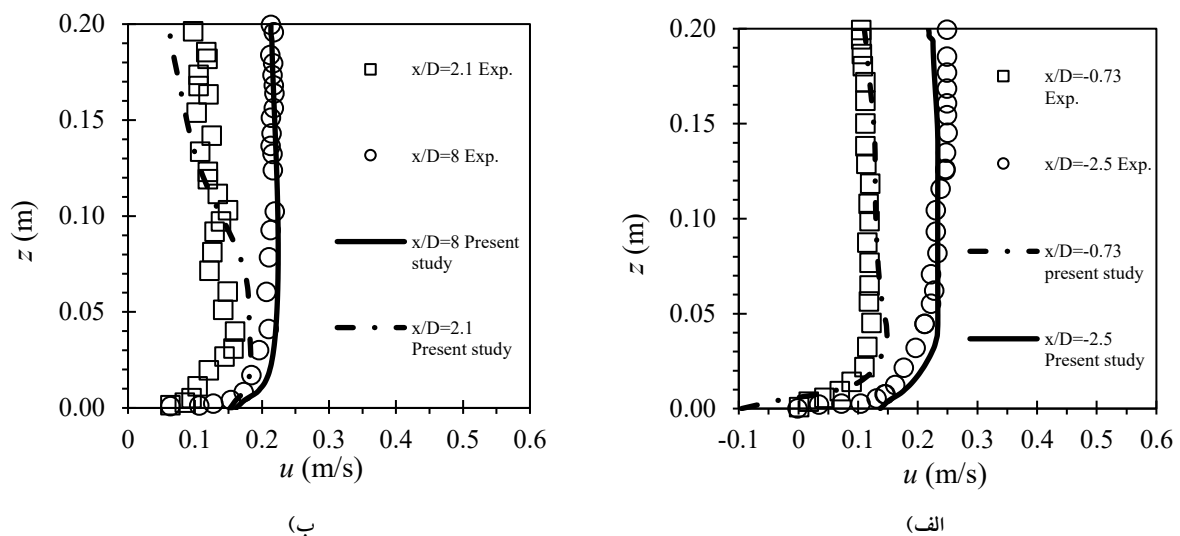


Fig 2. Comparison of the results of the vertical velocity profile at the flow depth in the present study with the experimental results reported in (Salaheldin et al., 2004). a) Upstream of the pier, and b) Downstream of the pier

جدول ۱- مشخصات جریان در کانال برای مدل سازی‌های مختلف

Table 1. Flow characteristics in the channel for different modeling

No. of numerical test	Fr (-)	Q (m ³ /s)	U_0 (m/s)	h (m)	D (m)
Verification	۰/۱۸۶	۰/۰۷۸	۰/۲۶	۰/۲۰	۰/۱۵
۱	۰/۱۰	۰/۰۵۸۷	۰/۱۵۶۶	۰/۲۵	۰/۲۰
۲	۰/۱۵	۰/۰۸۸۰	۰/۲۳۴۹	۰/۲۵	۰/۲۰
۳	۰/۲۰	۰/۱۱۷۴	۰/۳۱۳۲	۰/۲۵	۰/۲۰
۴	۰/۲۵	۰/۱۴۶۸	۰/۳۹۱۵	۰/۲۵	۰/۲۰
۵	۰/۳۰	۰/۱۷۶۱	۰/۴۶۹۸	۰/۲۵	۰/۲۰

۳- نتایج و بحث

در اثر عبور جریان از اطراف پایه تغییراتی در سطح آب ایجاد می‌گردد. شکل شماتیک تغییرات سطح آب در صفحه تقارن جریان در هنگام عبور از اطراف پایه در شکل (۳) نشان داده شده است. در مدل سازی با جریان سطح آزاد، سطح آزاد در جلوی پایه بالا آمده و در پشت و کناره‌های پایه فروافتادگی در سطح آزاد ایجاد می‌شود.

شکل ۳- تغییرات سطح آزاد جریان اطراف پایه استوانه‌ای

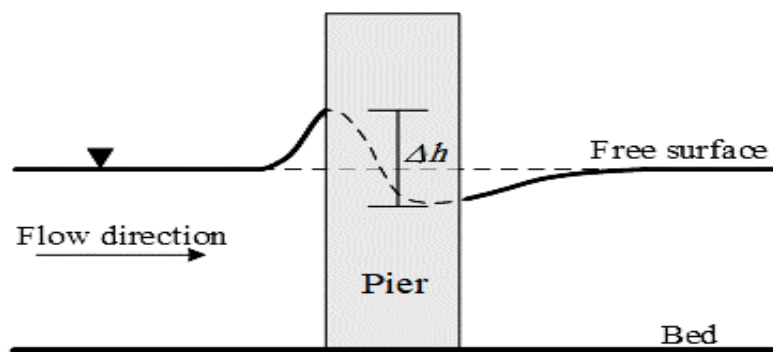


Fig 3. Changes in the free surface of the flow around a cylindrical pier

در شکل (۴)، تغییرات سطح آزاد جریان در محور تقارن جریان، در بالادست و پایین‌دست پایه به‌ازای اعداد فرود 0.15 ، 0.10 ، 0.20 ، 0.25 و 0.30 نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشینه ارتفاع سطح آزاد جریان با افزایش عدد فرود افزایش پیدا می‌کند. در پایین‌دست و در پشت پایه ارتفاع سطح آزاد جریان کاهش می‌یابد؛ اما تقریباً سطح جریان ابتدا و انتهای کانال یکسان است. افزایش عمق آب در جلوی پایه می‌تواند ناشی از افزایش فشار در جلوی پایه و تغییرات فشار دینامیکی راکد در عمق جریان در مجاورت پایه باشد (Aghaee-Shalmani & Hakimzadeh, 2015; Salaheldin et al., 2004). به همین ترتیب کاهش عمق در پشت پایه ناشی از ایجاد میدان کم‌فشار در پشت پایه است. در جلوی پایه با توجه به افزایش عمق، یک موج کمّانی کوچک ایجاد می‌شود. مقادیر بیشینه و کمینه سطح آب در بالادست و پایین‌دست پایه در حالت سطح آزاد در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس جدول (۲) بیشترین بالا آمدگی سطح آب در بالادست پایه مربوط به عدد فرود 0.30 و مقدار آن 0.262 متر است و کمترین عمق آب در پشت پایه نیز مربوط به همین عدد فرود و مقدار آن 0.245 متر است. اختلاف سطح آب در جلو و پشت پایه برای اعداد فرود 0.10 ، 0.15 ، 0.20 ، 0.25 و 0.30 به ترتیب برابر 0.0004 ، 0.0053 ، 0.0085 ، 0.0122 و 0.0172 متر است که این تغییرات سطح آب نسبت به عمق جریان در ابتدای کانال 0.1 ، 0.2 ، 0.3 ، 0.4 و 0.7 درصد است.

شکل ۴- تغییرات سطح جریان آزاد در بالادست و پایین‌دست پایه

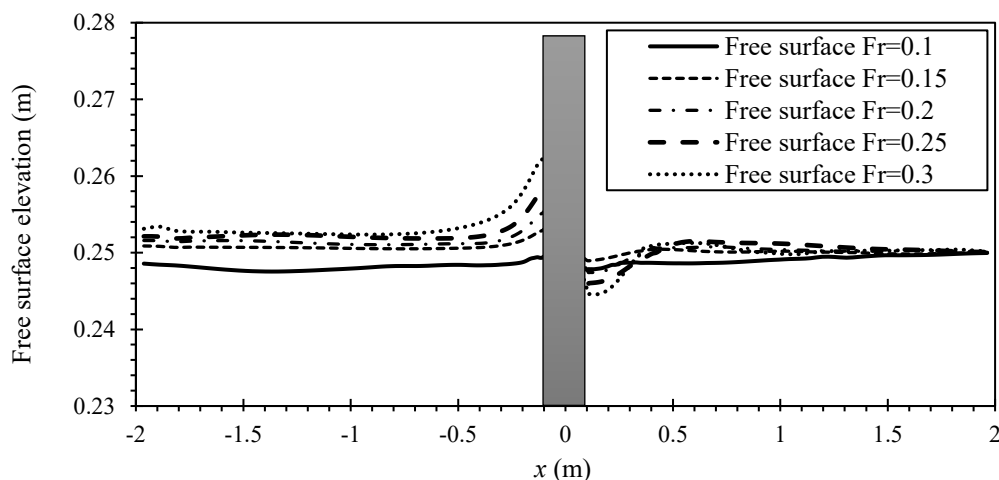


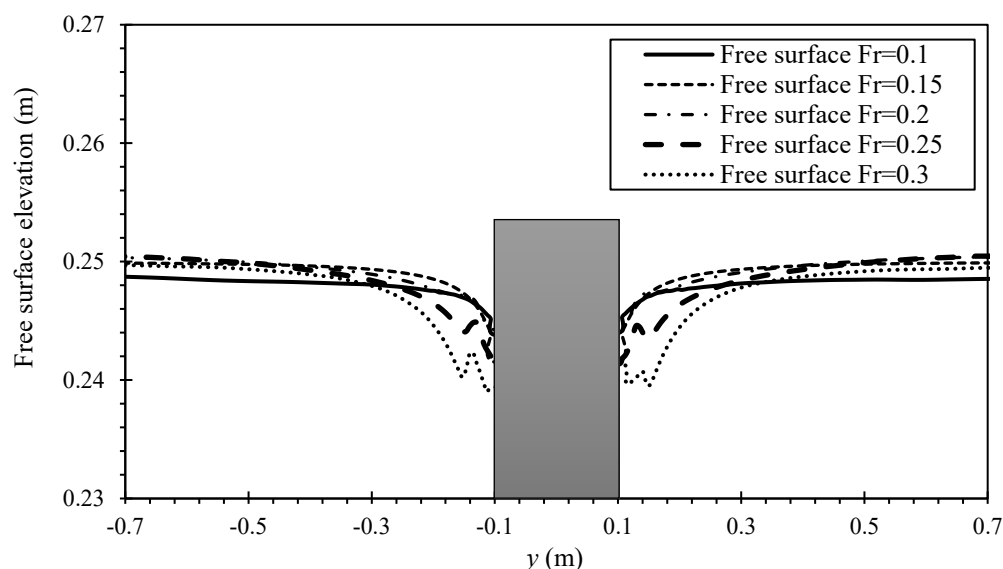
Fig 4. Changes in free surface level upstream and downstream of the pier

جدول ۲- بیشینه و کمینه تراز سطح آب در بالادست و پایین دست پایه در حالت سطح آزاد

Table 2. Maximum and minimum free-surface level upstream and downstream of the pier in free surface mode

Fr	The highest free-surface level at upstream (m)	The lowest free-surface level at downstream (m)
۰/۱۰	۰/۲۴۹۴	۰/۲۴۵۰
۰/۱۵	۰/۲۵۳۰	۰/۲۴۷۷
۰/۲۰	۰/۲۵۵۰	۰/۲۴۶۵
۰/۲۵	۰/۲۵۸۱	۰/۲۴۵۹
۰/۳۰	۰/۲۶۲۴	۰/۲۴۵۲

در شکل (۵)، تغییرات سطح آب در مقطع عرضی کانال در صفحه $y-z$ و در مختصات $x=0$ نمایش داده شده است. همانگونه که از شکل پیدا است، عمق جریان در کناره های پایه کاهش می یابد. افزایش عدد فرود جریان باعث افزایش فروافتادگی سطح آب در کناره های پایه شده است. علت کاهش عمق جریان، کاهش فشار در کناره های پایه است. محدوده این کاهش فشار از کناره های پایه و تا پشت پایه گسترش می یابد (Aghaei-Shalmani & Hakimzadeh, 2015). با توجه به شکل (۵)، بیشترین کاهش عمق آب (فروافتادگی سطح آب) در عدد فرود ۰/۳۰ رخ داده است که تغییرات تراز سطح آزاد آب نسبت به تراز اولیه، ۴ درصد است.

شکل ۵- تغییرات سطح آزاد جریان آزاد به ازای اعداد فرود متفاوت در صفحه $y-z$ و در مختصات $x=0$ Fig 5. Changes in the free surface for different Froude numbers in the $y-z$ plane and at the $x=0$ coordinate

در شکل (۶)، تغییرات سرعت جریان رو به پایین در جلوی پایه برای مقادیر مختلف عدد فرود در دو مدل سازی با سطح آزاد و ثابت با یکدیگر مقایسه شده اند. با توجه به این شکل در هر دو حالت، حداکثر سرعت جریان رو به پایین در مجاورت بستر رخ می دهد و قدر مطلق آن با افزایش عدد فرود افزایش می یابد. علاوه بر این، این مورد برای مدل سازی های با سطح آزاد، جریان رو به بالا (با سرعت قائم مثبت) در نزدیک سطح آب مشاهده می شود و در مدل سازی بدون سطح آزاد چنین جریانی وجود ندارد. با

توجه به شکل، مدل‌سازی با سطح آزاد و ثابت تفاوت‌هایی را در مقدار سرعت w در جلوی پایه نشان می‌دهد. کمترین تفاوت میان دو مدل‌سازی در عدد فرود 0.1 رخ داده و بیشترین تفاوت در عدد فرود 0.25 و 0.3 رخ می‌دهد. همچنین بیشترین اختلاف بین سرعت در مجاورت بستر برای عدد فرود 0.25 با اختلاف 17% درصد است. این اختلاف در تراز نزدیک سطح آزاد برای عدد فرود 0.3 در حالت با سطح آزاد نسبت به بدون سطح آزاد قابل توجه است.

نمودار تغییرات سرعت افقی u در صفحه افقی $x-y$ و در مختصات $x=0$ در عرض کانال در شکل (۷) نشان داده شده است. مطابق با منحنی‌های رسم شده، در هر دو حالت مدل‌سازی جریان با و بدون سطح آزاد در مجاورت پایه استوانه‌ای تا لبه‌های دیوار کانال، سرعت افقی با روند کمی در حال کاهش است؛ زیرا جریان بعد از عبور از کناره‌های پایه به حداکثر سرعت خود رسیده و مقدار این سرعت با نزدیک شدن به سمت دیواره‌های کانال کاهش می‌یابد و به مقدار سرعت جریان دست نخورده در ابتدای کانال نزدیک می‌شود. مدل‌سازی جریان با استفاده از سطح آزاد، مقادیر بزرگتری از سرعت را در مقایسه با مدل‌سازی با سطح ثابت نشان می‌دهد که در تطابق نتایج مدل‌سازی عددی (Kara et al., 2015) است. اگرچه در مطالعه (Kara et al., 2015) جریان اطراف یک پایه‌ی کناری با مقطع مربع بررسی شده است. همچنین نتایج مربوط به سرعت افقی با نتایج مدل‌سازی عددی (Khronejd et al., 2019 & 2020) هم‌خوانی دارد. با مقایسه سرعت‌های افقی کناره پایه‌ها در اعداد فرود متفاوت در دو حالت جریان با سطح آزاد و ثابت مشخص می‌گردد که در عدد فرود 0.1 کمترین تفاوت میان مقادیر سرعت در این دو نوع مدل‌سازی دیده می‌شود. با افزایش عدد فرود، تفاوت بین نتایج مدل‌سازی در حداکثر سرعت جریان بیشتر می‌گردد. در جدول (۳) مقادیر مربوط به حداکثر سرعت افقی جریان برای دو حالت جریان با سطح آزاد و ثابت ارائه شده است. سرعت‌های مذکور در این جدول، در دو موقعیت مختلف نسبت به خط تقارن پایه ($y=0.09$ m و $y=0.2$ m) استخراج شده‌اند که در آن‌ها بیشترین اختلاف بین سرعت‌ها در دو حالت با سطح آزاد و بدون سطح آزاد مشاهده شده است. افزایش شدید سرعت در موقعیت $y=0.07$ ناشی از ایجاد جریان برشی و جریان انقباضی در کناره‌های پایه است. همچنین اختلاف سرعت‌ها در موقعیت $y=0.09$ m می‌تواند به دلیل امواج شوک ناشی از برخورد و عبور جریان از اطراف پایه باشد (Wang, 2010; Kahraman et al., 2020; Geng et al., 2020). بیشترین تفاوت بین دو مدل‌سازی برای عدد فرود 0.3 رخ داده است که مقدار تقریبی آن در هر دو مختصات ذکر شده بطور تقریبی 20% درصد است.

شکل ۶- تغییرات سرعت قائم جریان سطح آزاد و ثابت در بالادست پایه به‌ازای اعداد فرود متفاوت

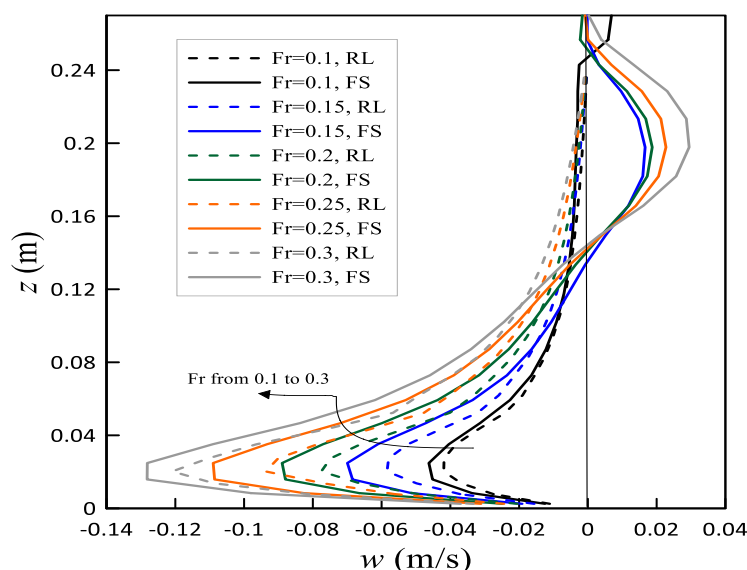


Fig.6. Changes in the vertical velocity of the free-surface and rigid-lid flow upstream of the pier for different Froude numbers

شکل ۷- تغییرات سرعت افقی u در مدلسازی جریان با سطح آزاد و ثابت در عرض کانال در مختصات $x=0$ به ازای اعداد فرود متفاوت

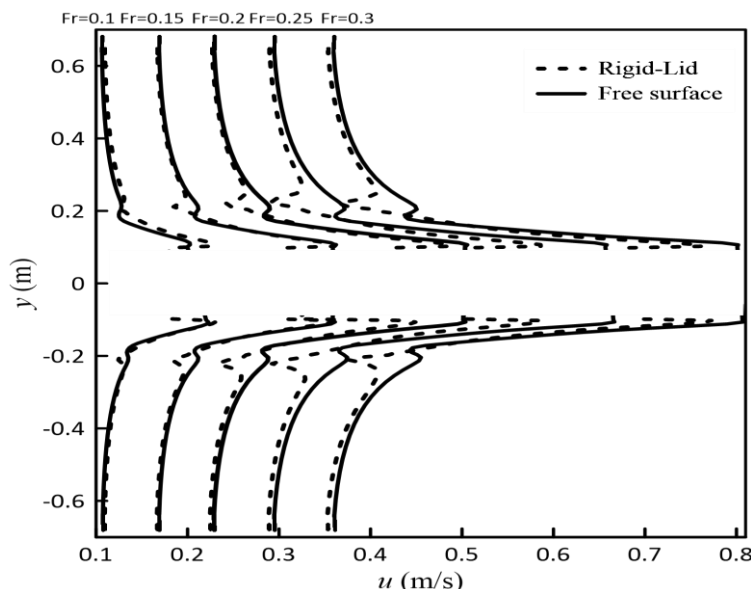


Fig 7. Changes in horizontal velocity u in modeling flow with a free surface and rigid-lid across the channel at coordinates $x=0$ for different Froude numbers

جدول ۳ - تغییرات عددی سرعت قائم به ازای اعداد فرود متفاوت در هر دو حالت با و بدون سطح آزاد

Table 3. Numerical changes in vertical velocity for different landing numbers in both cases with and without a free surface

Fr	Mode	u (m/s)	
		$y=0.09$ m	$y=0.2$ m
۰/۱۰	Rigid-Lid	۰/۲۱۵	۰/۱۲۹
	Free-Surface	۰/۲۰۰	۰/۱۳۰
۰/۱۵	Rigid-Lid	۰/۳۵۵	۰/۱۸۵
	Free-Surface	۰/۳۶۰	۰/۲۱۰
۰/۲۰	Rigid-Lid	۰/۴۸۰	۰/۲۵۰
	Free-Surface	۰/۵۱۰	۰/۲۹۰
۰/۲۵	Rigid-Lid	۰/۵۹۰	۰/۲۹۰
	Free-Surface	۰/۶۶۰	۰/۳۷۰
۰/۳۰	Rigid-Lid	۰/۷۵	۰/۳۷۰
	Free-Surface	۰/۸۰۰	۰/۴۵۰

در شکل (۸)، تغییرات سرعت در طول میدان محاسباتی در محور تقارن پایه $y=0$ در مجاورت کف ($z = 0.0025$ m) در بالادست و پایین دست پایه برای دو مدلسازی با و بدون سطح آزاد رسم شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می گردد، سرعت جریان در نزدیک شدن به پایه کاهش یافته و به صفر می رسد و پس از آن یک مقدار منفی را تجربه می کند. این مقدار منفی نشانگر جریان برگشتی در بالادست پایه در مجاورت بستر است که باعث ایجاد گردابه نعل اسبی می شود. با توجه به این شکل، مقدار سرعت جریان برگشتی در جلوی پایه با افزایش عدد فرود افزایش یافته است. این افزایش با توجه به افزایش سرعت جریان رو به پایین در جلوی پایه صورت می گیرد. در پشت پایه تغییرات سرعت از مقدار منفی در مجاورت پایه تا مقادیر مثبت

در فواصل دور از پایه است. با توجه به ناحیه سرعت منفی در پشت پایه می‌توان طول جدایش در پایین‌دست پایه در مجاورت بستر را بدست آورد. نتایج حاصل از دو مدل‌سازی با و بدون سطح آزاد نشان می‌دهد که مقادیر سرعت در این مقطع دارای اختلاف با یکدیگر است. مقدار این اختلاف در پایین‌دست بیشتر است. طول جدایش در پایین‌دست پایه در مجاورت بستر برای مدل‌سازی با سطح آزاد برای اعداد فرود ۰/۳۰ و ۰/۱۵ بزرگتر از مدل‌سازی جریان بدون سطح آزاد است و در بقیه اعداد فرود این طول برای مدل‌سازی با سطح آزاد کوچکتر از مدل‌سازی بدون سطح آزاد است. طول جدایش در بالادست تفاوت چشمگیری بین دو نوع مدل‌سازی نشان نمی‌دهد. اگرچه که طول جدایش برای مدل‌سازی بدون سطح آزاد کمی از مدل‌سازی با سطح آزاد بزرگتر است. تفاوت دیگر در پروفیل سرعت در پایین‌دست پایه، به نوسانات سرعت در مدل‌سازی بدون سطح آزاد در مقایسه با مدل‌سازی با سطح آزاد است. این نوسانات می‌تواند ناشی از نوسانات فشار در پشت پایه و عدم تغییرات سطح آزاد باشد که در جریان با سطح آزاد این تغییرات فشار اثر خود را بر تغییرات سطح آزاد می‌گذارد.

شکل ۸- تغییرات سرعت افقی u جریان سطح آزاد و ثابت در عرض کانال در مختصات $y=0$ و $z=0.0025$ به‌ازای اعداد فرود متفاوت

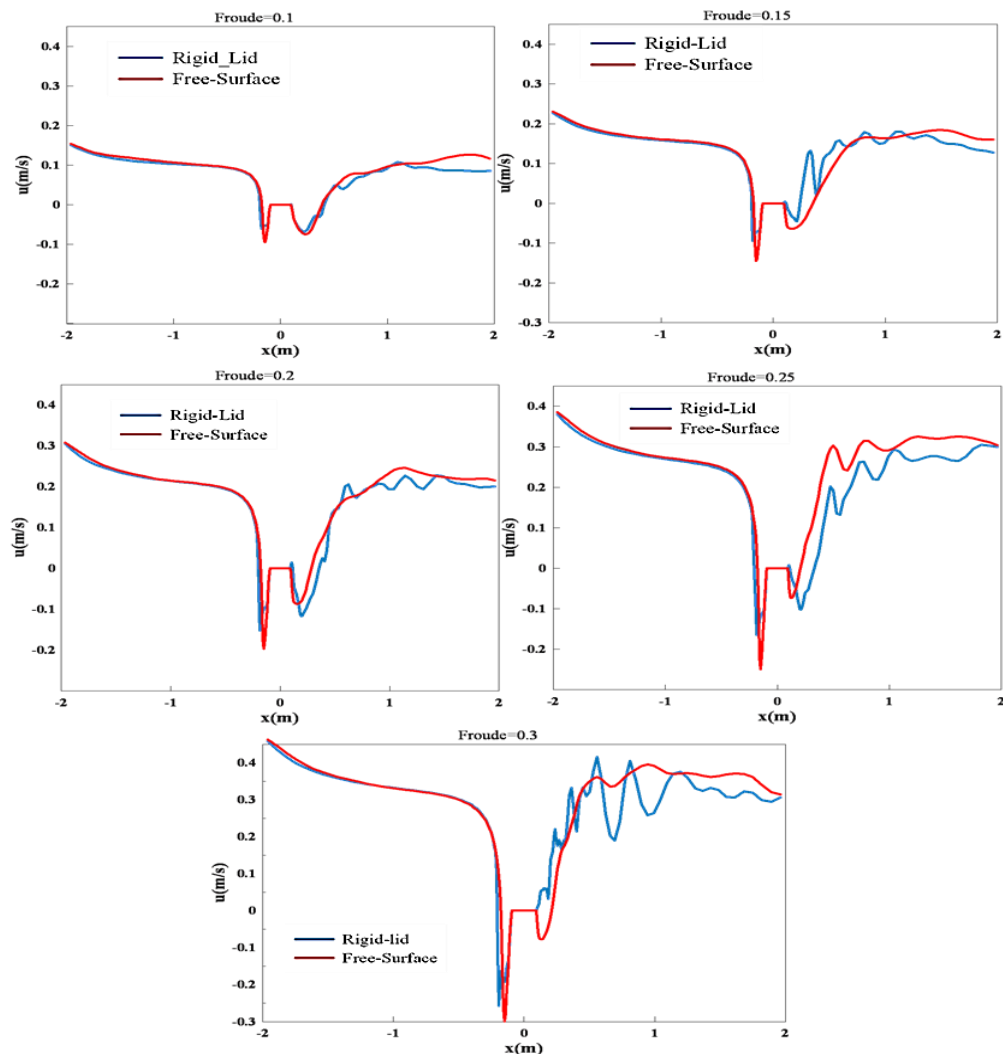


Fig 8. Variations of horizontal velocity u of free-surface and rigid-lid flow across the channel at coordinates $y=0$ and $z = 0.0025$ for different Froude numbers

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به بررسی جریان اطراف پایه های استوانه ای در دو حالت با سطح آزاد و بدون سطح آزاد پرداخته شد. نتایج حاصل از مدلسازی با روش RANS و مدل آشفتگی RNG برای جریان های زیر بحرانی در اطراف پایه نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان، نتایج حاصل از مدلسازی با سطح آزاد و بدون سطح آزاد اختلاف بیشتری با هم دارند. از جمله اختلاف بین سرعت جریان رو به پایین در جلوی پایه، اختلاف بین مولفه سرعت افقی در خط تقارن پایه و همچنین سرعت افقی در مجاورت بستر در خط تقارن میدان محاسباتی در راستای جریان اشاره کرد. تفاوت بین سرعت جریان رو به پایین در جلوی پایه برای عدد فرود ۰/۲۵ برابر ۱۷ درصد است. مولفه سرعت افقی در صفحه x-y در دو مدلسازی برای عدد فرود ۰/۳۰ دارای بیشترین تفاوت است و مقدار آن برابر ۲۰ درصد است. طول جدایش در بالادست جریان در مجاورت بستر در دو مدل تفاوت چندانی نشان نمی دهد؛ اما این طول برای مدلسازی بدون سطح آزاد از مدلسازی با سطح آزاد کمی بزرگتر است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که عدم در نظر گرفتن سطح آزاد در مدلسازی های عددی می تواند تفاوت هایی را در الگوی جریان اطراف پایه ها نسبت به مدلسازی با سطح آزاد ایجاد کند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ تضاد منفعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده ها

داده ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

مهدی اسمعیل زاده فریدنی و یاسین آقایی شلمانی: نگارش، روش شناسی، تحقیق و جمع آوری داده ها و نرم افزار. یاسین آقایی شلمانی: تحلیل، راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمع آوری داده ها.

منابع

- Aghaee-Shalmani, Y., and Hakimzadeh, H. (2015). Investigation of the local scouring pier of the bridge with variable cross-section. Ph.D. Thesis, Sahand University of Technology, Tabriz, 268p. (In Persian)
- Baker, C. J. (1979). The laminar horseshoe vortex. *Journal of fluid mechanics*, 95(2), 347-367. <https://doi.org/10.1017/S0022112079001506>
- Chen, S., Zhao, W., & Wan, D. (2020). CFD study of free surface effect on flow around a surface-piercing cylinder. In *ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium* (pp. ISOPE-P). ISOPE.
- Dargahi, B. (1989). The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in fluids*, 8, 1-12. <https://doi.org/10.1007/BF00203058>
- Flow Science, Inc. FLOW-3D® Version 10.0 (Computer software). <<https://www.flow3d.com>>(2011)
- Geng, Y. F., Guo, H. Q., & Ke, X. (2020). The flow characteristics around bridge piers under the impact of a ship. *Journal of Hydrodynamics*, 32(6), 1165-1177. <https://doi.org/10.1007/s42241-020-0082-5>
- Graf, W.H. and Altinakar, M.S. (1998). Flow and transport processes in channels of simple geometry. New York, 678P.
- Istiarto, I. (2001). Flow around a cylinder in a scoured channel bed. *Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Master's Thesis*, 263p.
- Kahraman, R., Riella, M., Tabor, G. R., Ebrahimi, M., Djordjević, S., & Kripakaran, P. (2020). Prediction of flow around a sharp-nosed bridge pier: influence of the Froude number and free-surface variation on the flow field. *Journal of*

Hydraulic Research, 58(4), 582-593. <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1631223>

Kara, S., Kara, M. C., Stoesser, T., & Sturm, T. W. (2015). Free-surface versus rigid-lid LES computations for bridge-abutment flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(9), 04015019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.000102](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000102)

Khosronejad, A., Ghazian Arabi, M., Angelidis, D., Bagherizadeh, E., Flora, K., & Farhadzadeh, A. (2019). Comparative hydrodynamic study of rigid-lid and level-set methods for LES of open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(1), 04018077. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001546)

Khosronejad, A., Arabi, M. G., Angelidis, D., Bagherizadeh, E., Flora, K., & Farhadzadeh, A. (2020). A comparative study of rigid-lid and level-set methods for LES of open-channel flows: Morphodynamics. *Environmental Fluid Mechanics*, 20, 145-164. <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09703-y>

Launay, G., Mignot, E., Rivière, N., & Perkins, R. (2017). An experimental investigation of the laminar horseshoe vortex around an emerging obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*, 830, 257-299. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.582>

Li, D., Yang, Q., Ma, X., & Dai, G. (2018). Free surface characteristics of flow around two side-by-side circular cylinders. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(3), 75. <https://doi.org/10.3390/jmse6030075>

Nasif, G., Balachandar, R., & Barron, R. M. (2016). Mean characteristics of fluid structures in shallow-wake flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 82, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.03.001>

Raudkivi, A. J., & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of hydraulic engineering*, 109(3), 338-350. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))

Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., & Michelsen, J. (2005). Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid mechanics*, 534, 351-401. <https://doi.org/10.1017/S00221120050045079>

Salaheldin, T. M., Imran, J., & Chaudhry, M. H. (2004). Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(2), 91-100. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:2\(91\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(91))

Shaheed, R., Mohammadian, A., & Shaheed, A. M. (2025). Numerical Simulation of Turbulent Flow in River Bends and Confluences Using the k- ω SST Turbulence Model and Comparison with Standard and Realizable k- ϵ Models. *Hydrology*, 12(6), 145. <https://doi.org/10.3390/hydrology12060145>

Stipa, S., Ahmed Khan, M., Allaerts, D., & Brinkerhoff, J. (2024). A large-eddy simulation (LES) model for wind-farm-induced atmospheric gravity wave effects inside conventionally neutral boundary layers. *Wind Energy Science*, 9(8), 1647-1668. <https://doi.org/10.5194/wes-9-1647-2024>, 2024

TĂNASE, N. O., BROBOANĂ, D., & BĂLAN, C. (2014). Flow around an immersed cylinder in the presence of free surface. *Scientific Bulletin, Series D, UPB*, 76(2), 259-266.

Wang, J. S. (2010). Flow around a circular cylinder using a finite-volume TVD scheme based on a vector transformation approach. *Journal of Hydrodynamics, Ser: B*, 22(2), 221-228. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60048-2](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60048-2)



Assessment of water quality deterioration trends in Zayandeh Rud River using the SIAQUA-IPH model

Mohammad Reza Fadaei Tehrani^{1*}, Mozghan Mirzaei²

1 Assistant Professor and Faculty Member, Isfahan Higher Education and Research Complex, Niroo Research Institute, Iran.

2 Assistant Professor and Faculty Member, Department of Environmental Engineering and HSE, Daneshjooyan Pishro Non-profit Higher Education Institute, Isfahan, Iran

Corresponding Author email: mfadaei@nri.ac.ir

© The Author(s) 2025

Received: 06 Apr 2025

Revised: 02 Jun 2025

Accepted: 13 Jul 2025

Published: 16 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

This study investigates the deterioration trends of water quality in the Zayandeh Rud River using the SIAQUA-IPH model within a GIS environment. As one of the most vital water resources in Iran's central plateau, the Zayandeh Rud River has been severely impacted by human activities and the discharge of industrial and urban wastewater. The primary objective of this research is to evaluate the effectiveness of the SIAQUA-IPH model in simulating qualitative water changes, including parameters such as BOD, DO, nitrate, and phosphate, resulting from point-source pollutants like the Isfahan Steel Company, Mobarekeh Steel Company, and Polyacryl Iran Corporation. Given the critical importance of the Zayandeh Rud River for drinking water, agriculture, and industry, assessing its pollution levels and proposing management strategies is essential.

Materials and Methods

To conduct this research, the river's drainage network was divided into 411 sub-basins using GIS and the SIAQUA-IPH model, with hydrological characteristics extracted using SMADA software. Pollutant concentration data from seven sampling stations along the river were collected and used as model inputs. Simulations were performed for two different seasons, and the results were compared with measured data. Model accuracy was evaluated using statistical metrics, including the correlation coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), and objective function (Fobj).

Results and Discussion

The simulation results demonstrated that the SIAQUA-IPH model exhibits high precision in predicting BOD and DO parameters, with correlation coefficients of 0.94 and 0.98, respectively. This high accuracy underscores the model's capability in simulating organic pollutants and dissolved oxygen. In contrast, the model showed moderate performance in simulating nitrate and phosphate, with correlation coefficients of 0.60 and 0.66, attributed to the complex biogeochemical cycles of these elements and their dependence on factors such as temperature, pH, and microbial activity. Further analysis revealed that the three industrial complexes significantly increase BOD levels (by approximately 58%) and reduce DO levels (by about 50%) along the river, severely degrading water quality. The discussion of results highlights the relatively good agreement between observed and simulated data, confirming the reliability of the SIAQUA-IPH model for point-source pollution assessment. These findings align with previous studies that employed water quality models to simulate oxygen-related parameters and organic pollutants. However, challenges in modeling nitrate and phosphate mirror those reported in other research, stemming from complex processes such as nitrification, denitrification, and phosphate adsorption-desorption by sediments and organisms. Additionally, the recent drying of the Zayandeh Rud River since 2015 has limited more precise modeling, emphasizing the urgent need for optimized water resource management and pollution control measures.



Conclusion

In conclusion, this study underscores the importance of integrating GIS tools and simulation models to understand and predict the impacts of point-source pollution on river water quality. The obtained results can serve as a foundation for management strategies aimed at reducing pollutant discharge and improving the Zayandeh Rud River's water quality. Future studies should combine qualitative and quantitative water models while considering the effects of climate change and recent droughts to develop more comprehensive conservation strategies for this vital river.

Keywords: Qualitative analysis, pollution, water resources, numerical model

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammad Reza Fadaei Tehrani: Writing, Methodology, Investigation, Data Collection, Software, Supervision;

Mozhgan Mirzaei: Analysis, Writing – Review & Editing, Data Curation.

Citation: Fadaei Tehrani, MR., & Mirzaei, M. (2025). Assessment of water quality deterioration trends in Zayandeh Rud River using the SIAQUA-IPH model. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(1), 72-86. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1209996>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی روند تخریب کیفیت آب در رودخانه زاینده‌رود با مدل SIAQUA-IPH

محمدرضا فدائی‌تهرانی^{۱*}، مژگان میرزائی^۲

۱. استادیار و عضو هیات علمی، مجتمع عالی آموزشی و پژوهش صنعت آب و برق، پژوهشگاه نیرو، اصفهان، ایران.

۲. استادیار و عضو هیات علمی، گروه مهندسی محیط‌زیست و HSE، موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی دانش‌پژوهان پیشرو، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: mfadaei@nri.ac.ir

© The Author(s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی و شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌های نقطه‌ای در رودخانه زاینده‌رود، یکی از مهم‌ترین منابع آبی فلات مرکزی ایران که به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و تخلیه پساب‌های صنعتی و شهری قرار گرفته، می‌پردازد. هدف این پژوهش، ارزیابی قابلیت مدل SIAQUA-IPH در محیط GIS برای شبیه‌سازی تغییرات کیفی آب شامل پارامترهای DO، BOD، نیترات و فسفات ناشی از منابع آلاینده نقطه‌ای نظیر صنایع ذوب‌آهن، فولاد مبارکه و پلی‌اکریل واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود است. در این راستا، با استفاده از نرم‌افزارهای GIS و مدل SIAQUA-IPH، شبکه زهکشی رودخانه زاینده‌رود به ۴۱۱ زیرشاخه تقسیم و خصوصیات هیدرولوژیکی آن با استفاده از نرم‌افزار SMADA استخراج شد. داده‌های مربوط به غلظت آلاینده‌ها از هفت ایستگاه نمونه‌برداری در طول رودخانه جمع‌آوری و در مدل به کار گرفته شد. بنابر نتایج شبیه‌سازی، ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مستخرج از مدل برای DO، BOD، نیترات و فسفات به ترتیب برابر ۰/۹۴، ۰/۹۸، ۰/۶۰ و ۰/۶۶ بدست آمد که نشانگر دقت بالای مدل SIAQUA-IPH در پیش‌بینی مقادیر DO و BOD است، در حالی که عملکرد آن در شبیه‌سازی نیترات و فسفات در حد متوسط ارزیابی شد. با این وجود، تطابق نسبتاً خوب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده، قابلیت اطمینان این مدل را برای ارزیابی آلودگی نقطه‌ای در زاینده‌رود تأیید کرد. تحلیل نتایج همچنین نشان داد که سه مجموعه صنعتی مورد مطالعه نقش مؤثری در افزایش BOD و کاهش DO در طول رودخانه دارند، به گونه‌ای که میزان BOD حدود ۵۸ درصد افزایش و DO حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. در نهایت، این پژوهش بر اهمیت استفاده از ابزارهای GIS و مدل‌های شبیه‌سازی در درک و پیش‌بینی اثرات آلودگی‌های نقطه‌ای بر کیفیت آب رودخانه‌ها تأکید کرده و ضرورت اتخاذ تدابیر مؤثر برای کنترل و کاهش تخلیه آلاینده‌ها به زاینده‌رود را مورد توجه قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل کیفی، آلودگی نقطه‌ای، منابع آب سطحی، زاینده‌رود

استناد: فدائی‌تهرانی، م.، میرزائی، م. (۱۴۰۴). بررسی روند تخریب کیفیت آب در رودخانه زاینده‌رود با مدل SIAQUA-IPH. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۳(۱): ۷۲-۸۶. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1209996>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

آب مهم‌ترین بخش از یک زیست‌بوم و عدم آلودگی آن برای بقاء موجودات یک مسئله حیاتی است (Aznar-Sánchez et al., 2019). رودخانه آبی است که به صورت آزاد جریان دارد و ممکن است در مسیر حرکت خود، ورودی‌هایی از زباله‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی در مناطق مسکونی، کشاورزی و صنعتی را دریافت کند. تخلیه آلودگی به رودخانه‌ها منجر به تغییرات در عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در آب آن‌ها می‌شود (Akbar & Rahayu, 2023). در بسیاری از مناطق، رودخانه‌ها منابع اصلی آب برای مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی هستند و اغلب پساب‌های بزرگ شهری، صنعتی و رواناب‌های فصلی از زمین‌های کشاورزی را به مناطق پایین‌دست منتقل می‌کنند. کیفیت آب به شرایط زمین‌شناسی و زیست‌بوم محلی بستگی دارد و فعالیت‌های انسانی می‌تواند تأثیر منفی بر کیفیت آب داشته باشد (Yaling & Zhang, 2014). کیفیت آب رودخانه تحت تأثیر زیادی از کاربری زمین و فعالیت‌های انسانی در حوضه آبخیز قرار دارد (Rachmansyah, 2021). تخلیه آلودگی‌های مختلف شهری، صنعتی و کشاورزی، بیش از ظرفیت خودپالایی رودخانه، منجر به تخریب زیست‌بوم رودخانه و افزایش هزینه‌های تصفیه آب در مناطق پایین‌دست می‌شود (Fadaei Tehrani & Mirzaei, 2024). کیفیت آب رودخانه نیز به شدت توسط متغیرهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی تعیین می‌شود و با نیازهای انسانی، به ویژه برای اهداف کشاورزی و مصرف روزانه مرتبط است (Aznar-Sánchez et al., 2019). تقاضای بیولوژیکی اکسیژن (BOD^1) ارتباط قوی با اکسیژن محلول دارد و این نشان دهنده نیاز به اکسیژن برای تجزیه مواد آلی موجود در آب است به‌طوری‌که BOD به یک عامل مهم در ارزیابی میزان آلودگی مواد آلی در رودخانه تبدیل شده است (Siwec et al., 2011). نرخ اکسیژن‌زدایی فرآیندی است که در آن میزان اکسیژن کاهش می‌یابد و این کاهش به دلیل استفاده ریزموجودات از اکسیژن برای تجزیه آلاینده‌ها رخ می‌دهد (Kumarasamy, 2015). اکسیژن‌زدایی یک فرآیند مهم در تلاش رودخانه برای خودپالایی است که به معنای از بین بردن ترکیبات آلوده‌کننده است که از نظر بیولوژیکی تجزیه‌پذیر هستند تا آب را دوباره تصفیه کند (Fadaei Tehrani & mirzaei, 2024). در تخصیص بار آلودگی به منابع مختلف آلودگی، لازم است استانداردهای محیط‌زیستی و همچنین هزینه‌های تصفیه را در نظر گرفت (Sinulingga et al., 2023). تاکنون تعداد زیادی مطالعه و پژوهش علمی در مدل‌سازی انتشار آلاینده در رودخانه‌ها به انجام رسیده و مدل‌های نرم‌افزاری متعددی توسعه داده شده است (Alizadeh et al., 2017; Fadaei Tehrani & Mirzaei, 2024; Jamalianzadeh et al., 2022; Kannel et al., 2007; Kospa & Rahmadi, 2019; Niksokhan et al., 2009; Zare Farjoudi et al., 2020). بطور مثال، Afrous & Zallaghi (2020) از مدل کیفی QUAL2Kw برای شبیه‌سازی متغیرهای کیفی NO_3^- و PO_4^{3-} در هفت ایستگاه در رودخانه دز با طول ۱۵ کیلومتر استفاده کردند. مقادیر متغیرهای کیفیت رودخانه و سایر اطلاعات بدست آمده از مطالعات میدانی برای واسنجی و پیش‌بینی مدل استفاده شد. علاوه‌براین، MAE^2 (میانگین خطای مطلق) و CV^3 (ضریب تغییرات) برای تعیین اعتبار مدل و مقایسه داده‌های مشاهده‌ای استفاده شد. نتایج مدل نشان‌دهنده شرایط واقعی رودخانه نشان‌دهنده توانایی مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی متغیرهای کیفی است. آلودگی اصلی رودخانه دز ناشی از فاضلاب شهری است. با توجه به نتایج متغیر PO_4^{3-} در دوره مطالعه در منطقه ورود فاضلاب به رودخانه دز، این متغیر تهدیدی برای زندگی آبزیان محسوب می‌شود. نرخ پایین تخلیه در پایین‌دست رودخانه دز و بارگذاری بالای آلاینده‌ها باعث افزایش غلظت متغیرهای کیفیت آب شده است. در مطالعه دیگری، برای شبیه‌سازی رودخانه ارداک در خراسان رضوی، (Rahmati et al., 2020) از مدل دینامیکی QUAL2Kw استفاده کردند. برای واسنجی، از داده‌های آبان ماه ۱۳۹۳ در شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی استفاده شد و برای اعتبارسنجی، از متغیرهای مختلف کیفیت آب ماه مه ۲۰۱۶ استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل برای متغیرهای NO_3^-

¹ Biochemical Oxygen Demand² Mean Absolute Error³ Coefficient of Variation

pH ، COD^1 و DO^2 مناسب است و می‌تواند متغیرهای کیفیت آب را در هر دو شاخه رودخانه اردک شبیه‌سازی کند. همچنین، کیفیت آب در شاخه آبغد به دلیل ثبات جمعیت و منابع آلودگی کم، بالاتر است. کیفیت آب در هر دو شاخه تحت تأثیر آلودگی‌های کشاورزی و باغداری و همچنین دفع فاضلاب روستاها است. (Sinulingga et al., 2023) تحلیل کیفیت آب رودخانه آساهان در منطقه شهر تانجونگ‌بالای را بررسی کردند. هدف آن‌ها تحلیل کیفیت آب بر اساس روش شاخص آلودگی (IP^3) در رودخانه آساهان در شهر تانجونگ‌بالای بود. در این پژوهش شش ایستگاه نمونه‌برداری بر اساس فعالیت‌های جامعه محلی با سه تکرار نمونه‌گیری وجود داشت. روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها از این مطالعه، تجزیه و تحلیل کیفیت آب با استفاده از روش شاخص آلودگی (IP) و تجزیه و تحلیل استراتژی کنترل آلودگی آب بود. نتایج تجزیه و تحلیل کیفیت آب بر اساس شاخص آلودگی آب رودخانه آساهان در شهر تانجونگ‌بالای نشان داد که میانگین شاخص آلودگی آب در رده با آلودگی متوسط قرار دارد. بنابر نتایج این مطالعه، آلودگی آب به دلیل متغیرهای فسفات، مواد شوینده، روغن و گریس و کلیفرم کل رخ داده است. همچنین تاکنون مطالعات متعددی در حوضه تحلیل کیفی آب زاینده‌رود به انجام رسیده است (Hazbavi & Kalehhouei, 2020; Mahabadi et al., 2023; Mansourmoghaddam et al., 2024). در این مطالعات، آلودگی زاینده‌رود در چهار منطقه تغییر کاربری اراضی بالادست، مراکز صنعتی قبل از اصفهان، ورود آلاینده‌ها و فاضلاب در محدوده شهری اصفهان و ورود حجم عظیم فاضلاب و پساب نیمه‌تصفیه‌شده یا تصفیه‌نشده بعد از شهر اصفهان تا باتلاق گاوخونی مورد مطالعه قرار گرفته است (Jamalianzadeh et al., 2022).

هدف از این مقاله، شبیه‌سازی پخش آلودگی زاینده‌رود ناشی از منابع نقطه‌ای با استفاده از مدل SIAQUA-IPH است. نتایج این مطالعه می‌تواند بطور خاص در برنامه‌ریزی و مدیریت کیفیت رودخانه زاینده‌رود و بطور عمومی در معرفی یک ابزار مناسب برای تحلیل کیفی آب رودخانه‌های ایران و توسعه برنامه کنترل بار آلودگی برای رودخانه به منظور تضمین سلامت کیفی آب، و کاربردهای مشابه در سازمان‌های مرتبط مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش کار

۲-۱- معرفی محدوده مورد مطالعه

زاینده‌رود به عنوان پر آب‌ترین و با اهمیت‌ترین رودخانه مرکزی ایران است که از دامنه‌های شرقی کوه بختیاری در زاگرس میانی سرچشمه می‌گیرد و با جهت عمومی شرق به غرب از چهل‌گرد تا باتلاق گاوخونی به طول ۳۵۰ کیلومتر امتداد می‌یابد. منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحت حدود ۴۱۵۰۰ کیلومترمربع، از ارتفاعات زاگرس و کوه‌های مرتفع زرد کوه بختیاری در غرب اصفهان شروع و در تالاب گاوخونی در شرق استان به پایان می‌رسد. قسمت عمده حوضه دارای اقلیم خشک و نیمه خشک می‌باشد. حداکثر بارش حوضه در منطقه کوه‌رنگ به میزان ۱۴۱۰ میلی‌متر و حداقل آن در ورزنه برابر ۸۸ میلی‌متر ثبت شده است (Mahabadi et al., 2023). در شکل (۱) حوضه آبریز زاینده‌رود به همراه رودخانه‌های اصلی و فرعی به همراه منابع نقطه‌ای اصلی آلاینده رودخانه قبل از شهر اصفهان، نشان داده شده است. سرچشمه اصلی زاینده‌رود را دو رودخانه مهم پلاسجان و شاخه‌های اصلی زاینده‌رود تشکیل می‌دهد (Mahabadi et al., 2023). شاخه اصلی زاینده‌رود که پس از مشروب کردن استان چهارمحال و بختیاری با پیمودن ۷۵ کیلومتر به سد مخزنی زاینده‌رود می‌رسد. در حد فاصل سد تا اصفهان، دو شاخه فرعی مهم دیگر به نام‌های مرغاب و شور دهقان به ترتیب از شمال و جنوب به رودخانه متصل می‌شود. در این

¹ Chemical Oxygen Demand

² Dissolved Oxygen

³ Index of Pollution

پژوهش از نرم‌افزارهای ArcView، ARCGIS، Idrisi، MapWindow GIS و SMADA استفاده شد. همچنین، مدل L_THIA جهت مدل‌سازی آلودگی غیرنقطه‌ای و مدل SIAQUA_IPH برای مدل‌سازی آلودگی نقطه‌ای به کار گرفته شد. پس از مدل‌سازی آلودگی آب‌های سطحی ناشی از منابع نقطه‌ای توسط مدل SIAQUA-IPH، مدل‌سازی آلودگی آب‌های سطحی ناشی از منابع غیرنقطه‌ای با استفاده از مدل L-THIA انجام شد.

شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز زاینده‌رود به همراه شبکه آبراهه و ایستگاه‌های اندازه‌گیری

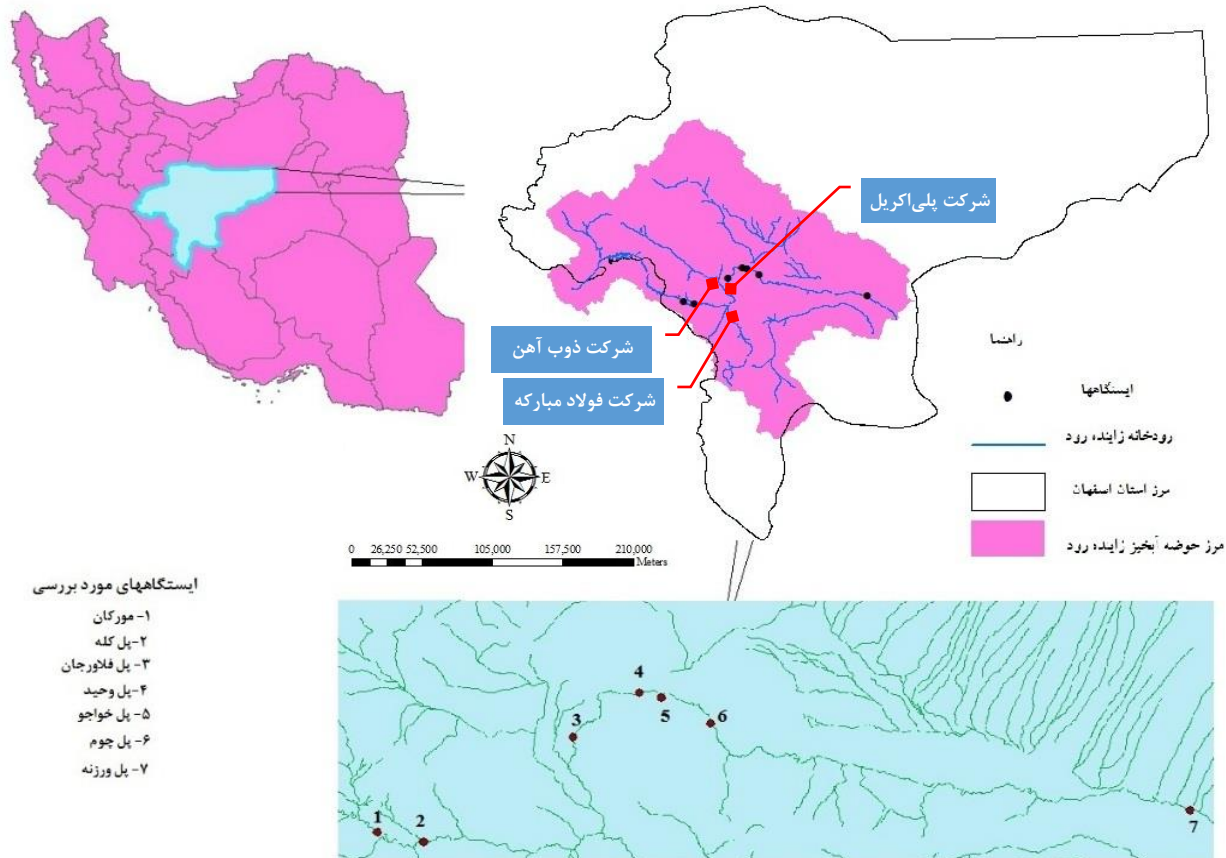


Fig 1. Location of the Zayandeh Rud watershed, the river network, and the monitoring stations

۲-۲- مدل SIAQUA-IPH

مدل‌ها جهت اندازه‌گیری گستره‌ای از خصوصیات و ارائه رفتار سیستم‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌سازی کیفیت آب شامل استفاده از معادلات ریاضی برای شبیه‌سازی سرنوشت و انتقال آلاینده‌های انتشار یافته در آب است. به تازگی مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی کیفیت آب توسعه یافته است که بطور معمول برای ارزیابی اثرات رهاسازی آلاینده‌ها در رودخانه‌های به نسبت کوچک، استفاده می‌شوند. ترکیب مدل کیفیت آب با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، می‌تواند در بررسی مسائل در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار گیرد، زیرا اجازه می‌دهد یک ارزیابی راحت از همه اثرات ممکن در منطقه با هزینه کم و دید جامع از منطقه بر حسب ابعاد فیزیکی صورت گیرد. مدل SIAQUA-IPH، حالت‌های مختلف انتشار پساب در رودخانه‌های با حوضه‌های بزرگ (بزرگتر از ۳۰۰۰ کیلومترمربع) را بررسی می‌کند. هرچند، این مدل می‌تواند در حوضه‌های کوچک‌تر هم مورد استفاده قرار بگیرد. مدل SIAQUA-IPH سازگار با شرایط کشورهای مختلف است و امکان شبیه‌سازی انواع انتشار پیوسته، لحظه‌ای و انتشار با مدت محدود را دارد. این مدل از یک روش شبیه‌سازی بر اساس راه‌حل‌های سلسله مراتبی و معادلات

ضرایب پراکندگی طولی بهره می‌برد. این مدل از طریق معادلات برنامه‌نویسی شده در محیط GIS به دست آمده است و با جفت‌شدگی کامل با نرم‌افزار GIS، اثرات رهاسازی آلاینده‌ها از منابع نقطه‌ای را شبیه‌سازی می‌کند. مدل SIAQUA-IPH مخفف "شبیه‌سازی سلسله مراتبی کیفیت آب" به زبان پرتغالی است و توسط موسسه تحقیقات هیدرولوژی کشور برزیل در سال ۲۰۱۳ توسعه داده شده است (Fan et al., 2015). مدل SIAQUA-IPH، همچنین سرنوشت و انتقال آلاینده‌ها را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. محاسبات انتقال آلاینده‌ها در طول شبکه زهکشی با استفاده از راه‌حل‌های سلسله مراتبی از معادلات انجام می‌شود. با فرض رهاسازی آبی یک آلاینده با حجم M در نقطه $x=0$ در یک رودخانه، غلظت در هر نقطه از پائین‌دست رودخانه، قرار گرفته در نقطه x (فاصله از نقطه تخلیه یا رهاسازی بر حسب متر) و در لحظه t می‌تواند توسط رابطه (۱) محاسبه شود (Chapra, 1997; Ennet et al., 2008):

$$c(x, t) = \frac{M}{A \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot EL \cdot t}} \cdot \exp \left[\left(-\frac{(x - u \cdot t)^2}{4 \cdot EL \cdot t} \right) - k \cdot t \right] \quad (1)$$

در این معادله، $c(x, t)$ ، غلظت در مکان x و در زمان t (بر حسب میلی‌گرم در لیتر) است. EL ، ضریب پراکندگی طولی بر حسب ms^{-1} ، M ، حجم مواد وارد شده به سیستم بر حسب گرم، A ، مساحت بخشی که انتشار در آن اتفاق می‌افتد بر حسب مترمربع و k ضریب اولین تجزیه بر حسب s^{-1} است.

در این پژوهش، کاربرد مدل SIAQUA-IPH در پنج گام انجام شد:

گام اول: پیش پردازش داده‌ها که خود شامل داده‌های هندسی حوضه (طول و شیب رودخانه)، داده‌های هیدرولیک، نقشه زهکشی و اطلاعات مربوط به آلودگی (BOD ، DO ، نیترات، فسفات) است.

گام دوم: تعریف ویژگی‌های هیدرولیکی.

گام سوم: بررسی رهاسازی آلاینده‌ها.

گام چهارم: واسنجی متغیرها (حسب نیاز).

گام پنجم: پردازش نهایی و نمایش نتایج.

برای پردازش توسط مدل، shapefile شبکه زهکشی به همراه ستون‌های توصیفی متعلق به هر زیرشاخه رودخانه زاینده‌رود در افزونه Taudem در محیط GIS بدست آمد. در رابطه با رودخانه زاینده‌رود، ۴۱۱ زیرشاخه ایجاد شد. در مدل برای هر زیرشاخه خصوصیات ژئومتری از جمله طول هر بخش رودخانه، شیب، مساحت زیرحوضه متعلق به هر زیرشاخه، زیرحوضه‌هایی که بلافاصله در پائین‌دست هر شاخه رودخانه قرار می‌گیرند، و طول و عرض جغرافیایی هر شاخه، وارد شد. سپس خصوصیات هیدرولوژیکی یعنی دبی جریان با دوره‌های بازگشت ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ ساله به همراه سرعت آب و سطح مقطع هر بخش از رودخانه، نیز در یک فایل جداگانه با پسوند txt ذخیره شد. این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SMADA و بررسی‌های آماری بدست آمدند. سپس در مدل، با معرفی داده‌های تهیه شده اقدام به شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی آلودگی نقطه‌ای اطلاعاتی راجع به غلظت آلاینده، BOD ، COD ، نیترات، فسفر و کلی فرم مورد نیاز است که از طریق اطلاعات ثبتی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری، حاصل شد. برای این منظور، مطابق شکل (۱)، تعداد هفت ایستگاه در طول رودخانه زاینده‌رود انتخاب و متغیرهای کیفی آب اندازه‌گیری شده در این ایستگاه‌ها استفاده شد. همچنین، برای شبیه‌سازی آلودگی نقطه‌ای از ایستگاه‌های پل کله تا فلاورجان، ایستگاه لنج به دلیل قرارگیری بین نقاط آلاینده ذوب‌آهن، فولاد و پلی‌اکریل انتخاب شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی داده‌های کیفی ایستگاه‌های هیدرومتری

بررسی داده‌های کیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری نشان داد، کیفیت آب زاینده‌رود تا قبل از زرین‌شهر تغییر شکل خاصی ندارد، اما در حد فاصل زرین‌شهر تا شهر اصفهان که تخلیه آلاینده‌های شهری، صنعتی و کشاورزی به داخل رودخانه انجام می‌شود، کیفیت آب تنزل می‌یابد. بنابراین، تغییرات کاربری بالادست سهم بزرگی در تغییرات کیفی آب زاینده‌رود نداشته است هرچند، نمی‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. از شرق اصفهان تا باتلاق گاوخونی نیز به علت تخلیه فاضلاب تصفیه‌خانه جنوب اصفهان و شور بودن اراضی منطقه، کیفیت آب رودخانه بسیار پایین آمده و بعد از محل پل فارغان استفاده از آب رودخانه حتی جهت مصارف کشاورزی نیز غیرممکن شده است.

۳-۲- تحلیل مدل SIAQUA-IPH

در این پژوهش چهار متغیر BOD، DO، فسفات و نیترات توسط مدل SIAQUA-IPH شبیه‌سازی شد. واسنجی مدل SIAQUA-IPH می‌تواند به طوردستی یا اتوماتیک انجام شود. در این پژوهش، جهت مدل‌سازی آلودگی نقطه‌ای، حد فاصل ایستگاه‌های پل کله و ایستگاه لنج انتخاب شد، زیرا مابین این دو ایستگاه، دو کارخانه بزرگ ذوب آهن و صنایع فولاد، در حال فعالیت هستند. لذا مدل‌سازی در سرشاخه‌های ما بین این دو ایستگاه صورت گرفت. در مدل شبیه‌سازی SIAQUA-IPH، می‌توان هر بخش از رودخانه را انتخاب و مورد شبیه‌سازی قرار داد. مدل‌سازی BOD، DO، نیترات و فسفات در طی دو فصل صورت گرفت. نتایج در شکل (۲) و (۳) نمایش داده شده است. در مدل SIAQUA-IPH، برای ارزیابی دقت مدل مطابق رابطه (۲) از ضریب F_{obj} استفاده می‌شود که در فرمول زیر محاسبه می‌شود (UFRGS, 2015):

$$F_{obj} = \sum_{i=0}^N \left(\frac{C_{obs} - C_{calc}}{C_{obs}} \right) \quad (2)$$

در این معادله، تابع هدف بهینه شده، N تعداد مشاهدات، C_{obs} غلظت مشاهده شده و C_{calc} غلظت محاسبه شده است. هر چقدر میزان این ضریب پایین‌تر باشد، مدل از اعتبار بالاتری برخوردار است. همچنین برای تعیین اعتبار مدل از رابطه (۳) با عنوان مربع ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$) نیز استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Ni(o) - Ni(p))^2}{n}} \quad (3)$$

$Ni(o)$ و $Ni(p)$ به ترتیب نمایانگر مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها است. مطابق رابطه (۴) هر چقدر این ضریب کوچک‌تر باشد، عملکرد مدل قابل قبول‌تر خواهد بود.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Qsim - \bar{Qsim})(Qobs - \bar{Qobs})]^2}{\sum_{i=1}^n (Qsim - \bar{Qsim})^2 \sum_{i=1}^n (Qobs - \bar{Qobs})^2} \quad (4)$$

¹ Root-Mean-Square Deviation Error

که در آن Q_{sim} , $\bar{Q}_{sim}$, Q_{obs} , $\bar{Q}_{obs}$ میانگین مقادیر مشاهده شده، مقادیر مشاهده شده، میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد مشاهدات است. ضریب تبیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است و این حالت مربوط به زمانی است که در آن مقادیر شبیه‌سازی شده دقیقاً مشابه مقادیر مشاهداتی باشد.

شکل ۲- شبیه‌سازی انواع آلاینده در سرشاخه مابین ایستگاه پل کله و لنج در زمستان (۵ اسفند ۱۳۹۳)

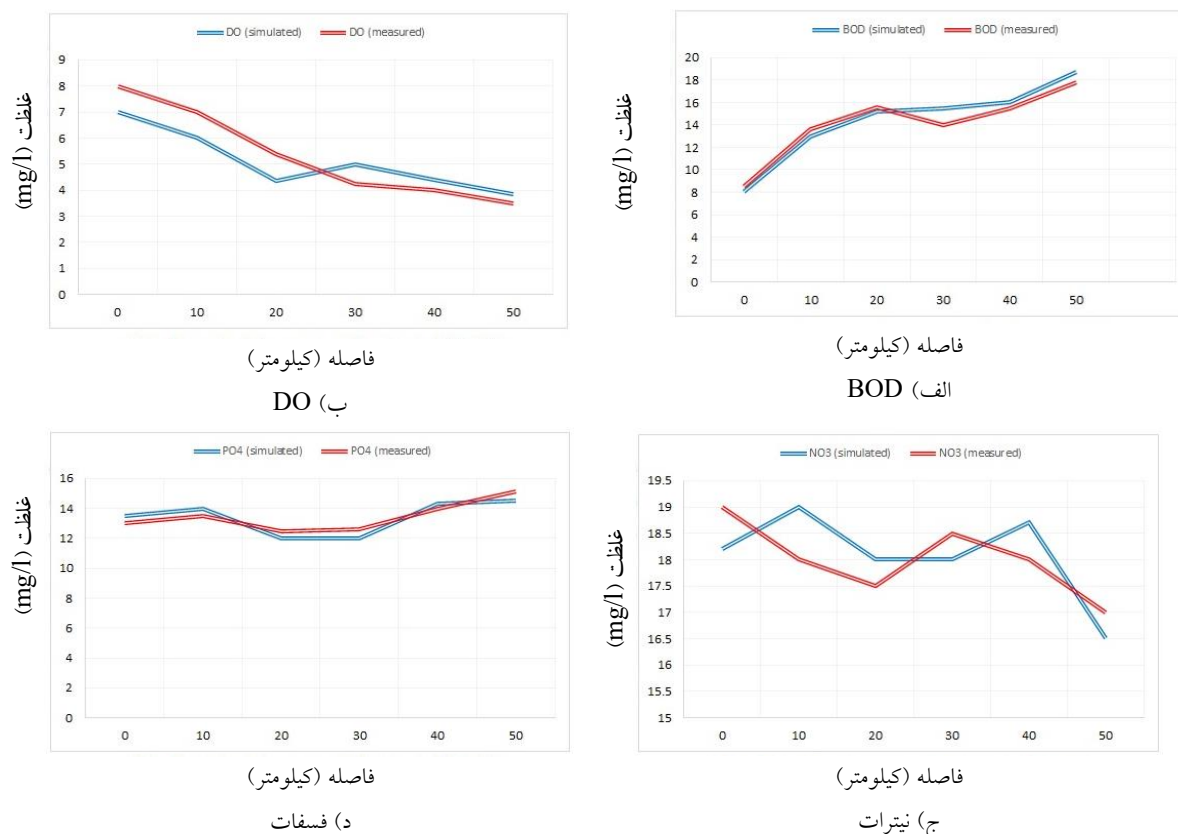


Fig 2. Simulation results for different pollutants at the upstream section between Pol-e-Kaleh and Lenj stations during winter (March 5, 2015)

همانگونه که در شکل (۲-الف) دیده می‌شود، بیشترین غلظت مشاهده شده و محاسبه شده BOD در مسافت ۲۰ و ۵۰ کیلومتری از ایستگاه پل کله است که در مسافت ۱۰ کیلومتری کارخانه ذوب‌آهن اصفهان واقع شده است. روند رو به افزایش BOD در مسافت ۳۰ کیلومتری، دوباره مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است، در مسافت ۳۰ کیلومتری نیز صنایع فولاد مبارکه واقع شده است. ضرایب آماری محاسبه شده حاکی از آن است که مدل SIAQUA-IPH دقت بالایی در محاسبه BOD دارد. نتایج داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده حاکی از آن است که میزان اکسیژن محلول از پل کله تا لنج روند نزولی را طی می‌کند و در مسافت سی و پنجاه کیلومتری، به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد (شکل ۲-ب). نتایج آماری نیز دقت خوب مدل برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول را تأیید می‌کند.

بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، در محل پل کله و همچنین فاصله ۳۰ کیلومتری آن، بیشترین میزان نیترات دیده می‌شود، اما مدل، بیشترین میزان را در فاصله ۱۰ و ۴۰ کیلومتری نشان می‌دهد (شکل ۲-ج). ضرایب آماری نیز حاکی از آن است که مدل در شبیه‌سازی نیترات، دقت بالایی ندارد. بر اساس نتایج به دست آمده، آب رودخانه پس از عبور از صنایع فولاد مبارکه، در رابطه با متغیر فسفات، روند صعودی دارد (شکل ۲-د). دقت مدل برای شبیه‌سازی این متغیر تا حدودی خوب است.

شبیه‌سازی متغیرهای DO ، BOD ، فسفات و نیترات در فصل بهار نیز انجام شد (شکل ۳) و نتایج نشان داد مدل، در شبیه‌سازی DO و BOD با دقت بسیار بالایی عمل می‌کند. به‌طورکلی، شبیه‌سازی متغیرهای در نظر گرفته شده نشان می‌دهد که علاوه بر آلودگی‌های غیرنقطه‌ای ناشی از کشاورزی، دو کارخانه ذوب‌آهن و صنایع فولاد نیز در افزایش آلودگی نقش بسزایی دارند. حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی توسط ضرایب آماری در جدول (۱) ارائه شده است. اعتبارسنجی نتایج مدل برای افزایش سطح اعتماد کاربر در قابلیت پیش‌گویانه مدل ضروری است. جهت اعتبارسنجی مدل از داده‌های مربوط به پاییز ۱۳۹۴ استفاده شد که نتایج در شکل (۴) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در دوره اعتبارسنجی توسط ضرایب آماری در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نیز نشان داد که مدل، دقت بسیار خوبی برای پیش‌گویی وضعیت DO و BOD و فسفات در آب‌های سطحی را داراست. این دقت برای نیترات نیز تا حدی قابل قبول است.

شکل ۳- شبیه‌سازی انواع آلاینده در سرشاخه مابین ایستگاه پل کله و لنج در بهار (۱۷ فروردین ۱۳۹۴)

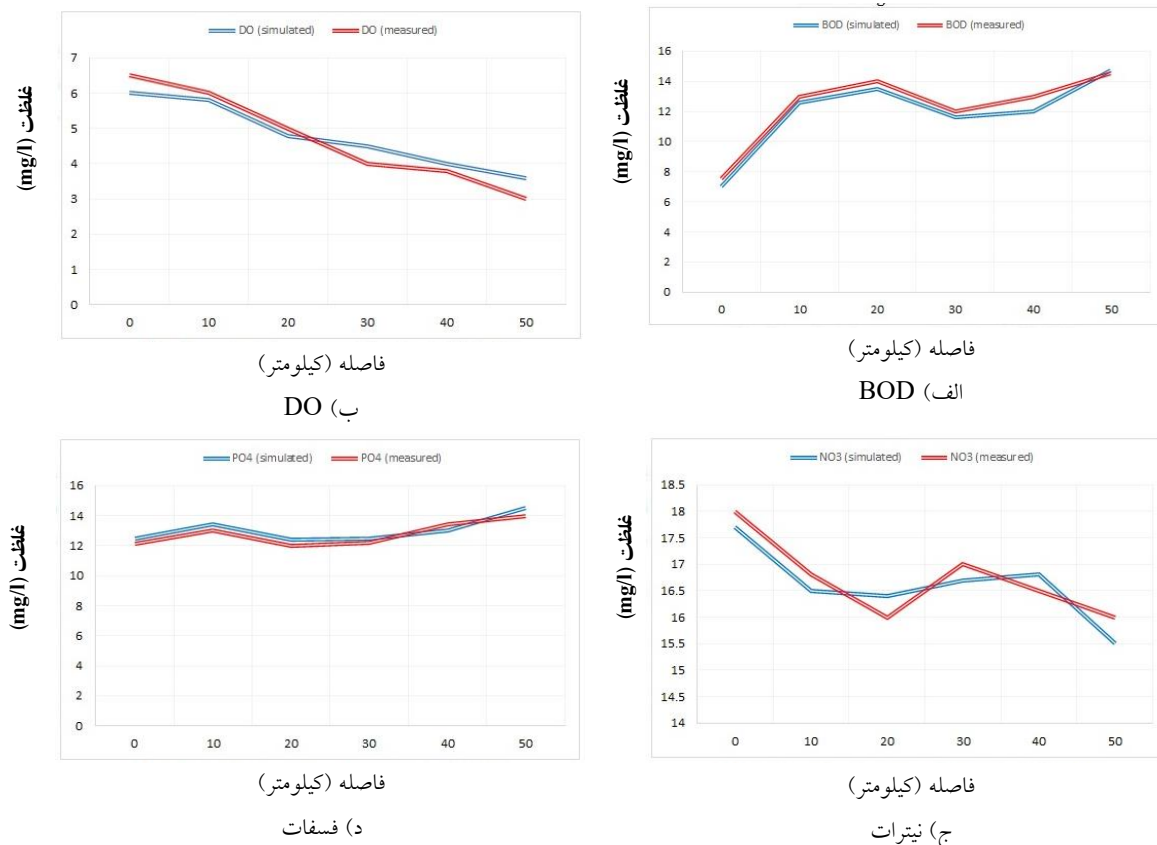


Fig 3. Simulation results for different pollutants at the upstream section between Pol-e-Kaleh and Lenj stations during spring (April 7, 2015)

جدول ۱- ضرایب آماری به منظور ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی

Table 1. Statistical coefficients for evaluating model performance during the calibration period.

متغیر	فصل و سال	R ²	RMSE	Fobj
BOD	زمستان ۱۳۹۳	۰/۹۱	۰/۹	۰/۰۰۶
DO	زمستان ۱۳۹۳	۰/۸۵	۰/۵	۰/۰۲۰
نیترات	زمستان ۱۳۹۳	۰/۳۰	۰/۶۸	۰/۰۱
فسفات	زمستان ۱۳۹۳	۰/۷۵	۰/۴۲	۰/۰۰۱
BOD	بهار ۱۳۹۴	۰/۹۸	۰/۳۱	۰/۰۰۱
DO	بهار ۱۳۹۴	۰/۹۷	۰/۳۵	۰/۰۱
نیترات	بهار ۱۳۹۴	۰/۷۶	۰/۳۱	۰/۰۰۴
فسفات	بهار ۱۳۹۴	۰/۸۳	۰/۳۴	۰/۰۰۰۹

شکل ۴- شبیه‌سازی متغیرهای کیفی در سرشاخه محدوده ایستگاه پل کله تا لنج در پاییز (۱۵ آبان ۱۳۹۴)

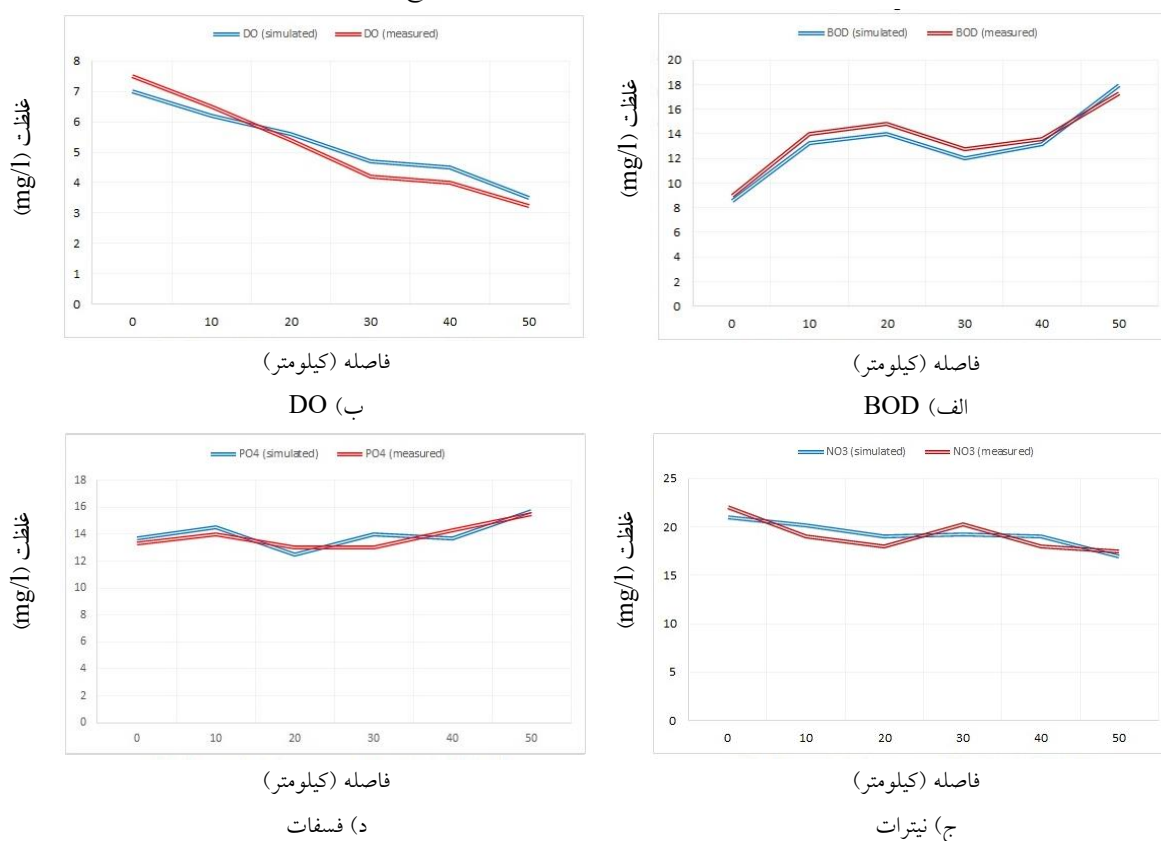


Fig 4. Simulation results for qualitative variables at the upstream section between Pol-e-Kaleh and Lenj stations during autumn (November 5, 2015)

جدول ۲- ضرایب آماری به منظور ارزیابی عملکرد مدل در دوره اعتبارسنجی

Table 2. Statistical coefficients for evaluating model performance during the validation period

متغیر	فصل و سال	R ²	RMSE	Fobj
BOD	پاییز ۱۳۹۴	۰/۹۴	۰/۵۶	۰/۰۰۲
DO	پاییز ۱۳۹۴	۰/۹۸	۰/۳۱	۰/۰۰۷
نیترات	پاییز ۱۳۹۴	۰/۶۰	۰/۷۵	۰/۰۰۲
فسفات	پاییز ۱۳۹۴	۰/۶۶	۰/۴۵	۰/۰۰۲

رودخانه زاینده‌رود و نقش آن با توجه به موقعیت و مشخصات آن، بر هیچ کسی پوشیده نیست. بنابراین، لزوم برنامه‌ریزی و اصلاح عوامل تشدیدکننده آلودگی زاینده‌رود کاملاً حیاتی است. در این پژوهش سعی شد تا با معرفی مدل SIAQUA_IPH به عنوان یک برنامه کاربردی ساده، در دسترس و دقیق جهت شبیه‌سازی انتشار آلودگی‌های نقطه‌ای و بررسی میزان و عوامل ایجادکننده این آلودگی‌ها، بتوان اقدامات مدیریتی جهت بهبود وضعیت این رودخانه را به‌عمل آورد.

نتایج حاصل از این پژوهش، حاکی از افزایش آلاینده‌ها از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۴ است. با توجه به خشکی رودخانه از سال ۱۳۹۵، مدل‌سازی انتشار آلاینده‌ها در دهه اخیر ناممکن است. از آنجایی که در این بازه زمانی، کاربری اراضی به سمت کاهش اراضی مرتعی، جنگلی، و افزایش اراضی بایر و اراضی شهری و کشاورزی در سطح کل حوضه پیش رفته است، لذا وضعیت نامناسب کیفیت آب را می‌توان به افزایش اراضی شهری و بایر و اراضی زراعی نسبت داد. بنابراین، مدل ارزیابی بلندمدت هیدرولوژیکی قادر است با داده‌های نسبتاً کم، وضعیت اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت آب را بررسی کند و بدین ترتیب می‌توان مناطق بحرانی را شناسایی و مدیریت کرد. در این تحقیق، مدل SIAQUA_IPH توانست با دقت و صحت قابل قبول به مدل‌سازی متغیرهای کیفیت آب بپردازد. درنهایت، وجود دو صنعت ذوب‌آهن اصفهان و صنایع فولاد مبارکه در افزایش آلودگی نقطه‌ای آب تأثیر بسزایی دارند. بنابراین لازم است تدابیر مدیریتی جهت جلوگیری از ورود پساب‌های حاوی آلاینده‌های این صنایع به منابع آب سطحی، به‌عمل آید.

نتایج حاصل از کاربرد مدل SIAQUA_IPH نشان داد که این مدل قابلیت بالایی برای پیش‌بینی BOD، DO و فسفات دارا است، اما در رابطه با نیترات چندان موفق عمل نمی‌کند، هر چند نتایج در مورد این شبیه‌سازی هم، قابل قبول است. دلیل این امر پیچیدگی چرخه این عناصر است. نیترات تحت تأثیر فرآیندهای پیچیده نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون قرار دارد که به شدت به دما، pH و اکسیژن وابسته بوده و نوسانات مکانی و زمانی بالایی دارند. منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای نیتروژن نیز بر پیچیدگی می‌افزایند. فسفات نیز از طریق جذب و دفع توسط رسوبات، جلبک‌ها و تجزیه مواد آلی دچار تغییر می‌شود. رهاسازی از رسوبات در شرایط بی‌هوازی و منابع ورودی متنوع، مدل‌سازی دقیق آن را دشوار می‌سازد. عدم دقت مدل در وارد کردن این فرآیندها و نبود داده‌های دقیق، دقت پیش‌بینی را کاهش می‌دهد.

نزدیکی داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد، مدل SIAQUA_IPH جهت مدل‌سازی آلودگی نقطه‌ای، تا حد زیادی قابل اطمینان است و می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی وضعیت آینده استفاده کرد. همانگونه که (Fan et al., 2015) کارایی این مدل را جهت شبیه‌سازی آلودگی نقطه‌ای تأیید کرد.

نتایج این مطالعه مبنی بر دقت بالای مدل SIAQUA-IPH در پیش‌بینی BOD و DO با یافته‌های بسیاری از پژوهش‌های پیشین که کارایی مدل‌های کیفیت آب را در شبیه‌سازی پارامترهای اکسیژنی و آلاینده‌های آلی نشان داده‌اند، همخوانی دارد (Jamalianzadeh et al., 2022; Kannel et al., 2007; Rahmati et al., 2020). با این حال، عملکرد متوسط مدل در شبیه‌سازی نیترات و فسفات، با چالش‌های مشابهی که در کاربرد مدل‌های کیفیت آب برای عناصر مغذی مشاهده شده است، مطابقت دارد. بسیاری از مطالعات نیز به دلیل پیچیدگی‌های چرخه نیتروژن و فسفر و تعامل آن‌ها با محیط و موجودات زنده، دقت پایین‌تری را در مدل‌سازی این پارامترها گزارش کرده‌اند (Afrous & Zallaghi, 2020). تأیید قابلیت اطمینان مدل SIAQUA-IPH در محیط GIS برای ارزیابی آلودگی نقطه‌ای در زاینده‌رود، یافته‌های مطالعاتی را که بر اهمیت ابزارهای تلفیقی GIS و مدل‌های شبیه‌سازی در مدیریت منابع آب تأکید دارند، تقویت می‌کند. همچنین، یافته‌های مربوط به نقش صنایع در افزایش BOD و کاهش DO، مشابه نتایج تحقیقاتی است که اثرات مخرب پساب‌های صنعتی بر کیفیت آب رودخانه‌ها را برجسته کرده‌اند، و بر اهمیت کنترل منابع آلاینده نقطه‌ای در رودخانه‌های مشابه زاینده‌رود صحنه می‌گذارد (Jamalianzadeh et al., 2022; Sinulingga et al., 2023). وجود کارخانه ذوب‌آهن در ۱۰ کیلومتری و صنایع فولاد در ۳۰ کیلومتری پل کله و

بررسی میزان تغییر آلاینده‌ها با گذشتن از مسافت‌های مختلف توسط مدل، حاکی از این است که وجود کارخانه ذوب‌آهن در افزایش BOD و کاهش DO و وجود صنایع فولاد در افزایش BOD، کاهش DO و افزایش فسفات نقش بسزایی دارند. اما این دو منبع نقطه‌ای در افزایش میزان نیتрат در حوضه آبریز زاینده‌رود نقشی ندارند. همچنین مدل در دوره واسنجی نسبت به اعتبارسنجی از دقت بیشتری برخوردار است که این وضعیت در همه مدل‌ها دیده می‌شود. چنان‌که نتایج آماری پژوهش‌هایی مانند مطالعات (Jamalianzadeh et al., 2022; Sinulingga et al., 2023; Wang et al., 2007) نشان داد که شبیه‌سازی در طی دوره واسنجی نسبت به دوره اعتبارسنجی، دقت بیشتری دارد.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با بررسی روند تخریب کیفیت آب در رودخانه زاینده‌رود با استفاده از مدل SIAQUA-IPH در محیط GIS، نتایج ارزشمندی را در مورد عوامل موثر بر آلودگی این رودخانه حیاتی فلات مرکزی ایران ارائه می‌کند. نتایج به وضوح نشان داد که فعالیت‌های انسانی، به ویژه تخلیه پساب‌های صنعتی از منابع نقطه‌ای مانند صنایع ذوب‌آهن، فولاد مبارکه و پلی‌اکریل، نقش مؤثری در افزایش آلاینده‌های آلی (BOD) و کاهش اکسیژن محلول (DO) در طول رودخانه دارند. مدل SIAQUA-IPH در پیش‌بینی دقیق BOD و DO موفق عمل کرده و ضرایب همبستگی بالای آن، قابلیت اطمینان مدل را در این زمینه تأیید می‌کند. با وجود عملکرد متوسط‌تر مدل در شبیه‌سازی نیترات و فسفات، که ناشی از پیچیدگی چرخه‌های بیوژئوشیمیایی این عناصر است، قابلیت مدل در ارزیابی آلودگی نقطه‌ای قابل قبول ارزیابی شد. تطابق نسبتاً خوب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده، مؤید کارایی این ابزار در شناسایی مناطق بحرانی و تدوین برنامه‌های مدیریتی است. افزایش حدود ۵۸ درصدی BOD و کاهش حدود ۵۰ درصدی DO در نتیجه فعالیت صنایع مورد مطالعه، زنگ خطری جدی برای سلامت اکوسیستم رودخانه و منابع آبی پایین‌دست به شمار می‌رود. از آنجایی که خشکی رودخانه زاینده‌رود در سال‌های اخیر مدل‌سازی را دشوار ساخته است، لزوم برنامه‌ریزی جامع و اقدامات فوری برای کنترل منابع آلاینده بیش از پیش آشکار می‌شود. نتایج این مطالعه بر اهمیت استفاده از ابزارهای تلفیقی GIS و مدل‌های شبیه‌سازی نظیر SIAQUA-IPH در درک دینامیک آلودگی آب و پیش‌بینی اثرات بلندمدت آن تأکید دارد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منفعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

محمدرضا فدایی تهرانی: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها، نرم افزار، راهنمایی و نظارت. مژگان میزایی: تحلیل، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Afrous, A., & Zallaghi, M. (2020). Qualitative simulation of nitrate and phosphate along the Dez river using QUAL2KW model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(9), 2099-2111. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.280173.668182>
- Akbar, S., & Rahayu, H. (2023). Tinjauan Literature: Bioakumulasi Logam Berat Pada Ikan Di Perairan Indonesia. *Lantanida Journal*, 11, 51-66. <https://doi.org/10.22373/lj.v11i1.17834>

- Alizadeh, M. J., Shahheydari, H., Kavianpour, M., Shamloo, H., & Barati, R. (2017). Prediction of longitudinal dispersion coefficient in natural rivers using a Cluster based Bayesian network. *Environmental Earth Sciences*, 76. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6379-6>
- Aznar-Sánchez, J. A., Velasco Muñoz, J., Belmonte, L., & Manzano-Agugliaro, F. (2019). The worldwide research trends on water ecosystem services. *Ecological Indicators*, 99, 310-323. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.045>
- Chapra, S. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. 1
- Ennet, P., Pachel, K., Viies, V., Jurimagi, L. & Elken, R. (2008). Estimating water quality in river basins using linked models and databases/andmebaasidel rajanev veekvaliteedi modelleerimine [Report]. *Estonian Journal of Ecology*, 57, 83.
- Fadaei Tehrani, M. R., & Mirzaei, M. (2024). Spatial-temporal qualitative analysis of Zayandehrud River based on upstream land use. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.30492/ijcce.2024.2022035,6430>
- Fan, F., Fleischmann, A., Collischonn, W., Ames, D., & Rigo, D. (2015). Large-scale analytical water quality model coupled with GIS for simulation of point sourced pollutant discharges. *Environmental Modelling & Software*, 64, 58-71. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.012>
- Hazbavi, Z., & Kolehrouei, M. (2020). Watershed Management Sciences and Engineering Conference in Iran: History and Highlights. *mdrsjns*, 8(4), 231-245. <http://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-38221-en.html>
- Jamalianzadeh, S. F., Rabieifar, H., Afrous, A., Hosseini, A., & Ebrahimi, H. (2022). Modeling DO and BOD₅ changes in the Dez river by using QUAL2Kw. *Pollution*, 8(1), 15-35. <https://doi.org/10.22059/poll.2021.322725.1070>
- Kannel, P., Lee, S., Kanel, S., Lee, Y.-S., & Ahn, K.-H. (2007). Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. *Environmental Monitoring and Assessment*, 125, 201-217. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9255-0>
- Kospa, D., & Rahmadi. (2019). Influence of community behaviour on water quality in Sekanak river, Palembang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 306, 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/306/1/012008>
- Kumarasamy, M. V. (2015). Deoxygenation and reaeration coupled hybridmixing cells based pollutant transport model to assess water quality status of a river. *International Journal of Environmental Research*, 9(1), 341-350. <https://doi.org/10.22059/ijer.2015.906>
- Mahabadi, E., Yazdani Zazerani, M., & Kangarani, H. (2023). Analyzing networks of influence and information exchange in water governance system; case study of Zayandeh-Rud river basin in Isfahan province
- Mansourmoghaddam, M., Naghipur, N., Rezaei, M., & Rousta, I. (2024). Quantifying the Zayandeh Rud river drying effects on land surface temperature and adjacent vegetation cover changes over the past 33 years using satellite images. *Climate Change Research*, 5(18), 1-30. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.425449.1175>
- Niksokhan, M. H., Kerachian, R., & Karamouz, M. (2009). A game theoretic approach for trading discharge permits in rivers. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 60, 793-804. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.394>
- Rachmansyah, A. (2021). Assessment of water quality index and pollution load capacity in the Sukowidi river and Bendo river, Banyuwangi region. *Journal Pembangunan Dan Alam Lestari*, 12. <https://doi.org/10.21776/ub.jp.al.2021.012.01.01>
- Rahmati, S. H., Bavani, A. R., & Nikakhtar, M. (2020). Simulating water quality of ARDAK river (Khorasan Razavi) using QUAL2KW
- Sinulingga, V., Barus, T., & Wahyuningsih, H. (2023). Analysis of water quality pollution index Asahan river in Tanjungbalai city. *Depik*, 12, 381-388. <https://doi.org/10.13170/depik.12.3.33274>
- Siwicz, T., Reczek, L., Abramowicz, K., Rewicka, A., & Nowak, P. (2011). BOD measuring and modelling methods - review. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation*, 43. <https://doi.org/10.2478/v10068-0100-008-0>
- UFRGS, R. G. I. (2015). SIAQUA-IPH – Analytical water quality model fully coupled with GIS. SIAQUA-IPH model and provides downloads of the program and application examples manuals

- Wang, G., Zhang, J. y., & He, R. (2007). Comparison of hydrological models in the middle reach of the Yellow River. *IAHS-AISH Publication*, 158-163
- Yaling, H., & Zhang, Z. (2014). Coupled effects of natural and anthropogenic controls on seasonal and spatial variations of river water quality during baseflow in a coastal watershed of Southeast China. *PloS one*, 9, e91528. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091528>
- Zare Farjoudi, S., Moridi, A., & Sarang, A. (2020). Multi-objective waste load allocation in river system under inflow uncertainty. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02897-5>

Research Article



Optimization of a composite trapezoidal channel cross section with non-uniform lining material

Farinaz Sadat Mirlohi

Master's degree in Civil-Water and Hydraulic Structures, Expert at Tarh Afra Consulting Engineers Company, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: mirlohi18@yahoo.com

© The Author (s) 2025

Received: 10 Apr 2025

Revised: 17 May 2025

Accepted: 17 Jul 2025

Published: 19 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

In the design of engineering systems such as water conveyance channels, minimizing construction costs and maximizing efficiency are of paramount importance. A key challenge in designing open channels is reducing the risk of flow overflow. Composite channels, which feature varying side slopes or non-uniform roughness coefficients on different surfaces, are widely used due to their design flexibility. This study investigates the optimization of a composite trapezoidal channel cross-section with different roughness coefficients for the sidewalls and bed. The primary objectives are minimizing construction costs (including excavation and lining) and reducing the probability of overflow, considering freeboard as a decision variable. This research presents, for the first time, the optimization of composite channels under this approach.

Materials and Methods

The study formulates a nonlinear optimization model with two objective functions: 1) minimizing construction costs and 2) minimizing the probability of overflow. The main constraint is the Manning equation for uniform flow. Design variables include bed width, flow depth, side slopes, and freeboard. A constrained multi-objective programming technique is employed, and the problem is solved using Wolfram Mathematica. In the numerical example, the design discharge is 10 m³/s, Manning's roughness coefficients for the sidewalls and bed are 0.1, 0.015, and 0.03, respectively, and the bed slope is 0.0025. Two scenarios for lining costs (uniform and non-uniform) are examined.

Results and Discussion

The results indicate that as the probability of overflow increases, the optimal bed width decreases while the flow depth increases. Additionally, the freeboard decreases with higher overflow probability, which aligns with previous research findings. Regarding side slopes, differences in lining costs significantly influence the optimal slopes: for a sidewall with higher lining costs, the optimal slope increases to reduce the lining area and overall cost. Conversely, for a sidewall with lower lining costs, the optimal slope decreases. Construction costs also decrease with higher overflow probability, as the reduced freeboard requirement lowers expenses.

Conclusion

This research demonstrates that optimizing composite channel designs with varying roughness coefficients and non-uniform lining costs can lead to reduced construction costs and improved hydraulic performance. The findings suggest that narrower and deeper channels increase overflow probability, while greater freeboard reduces it. Moreover, differences in sidewall lining costs directly affect the optimal side slopes. These insights can serve as a practical guide for engineers in designing more economical and efficient composite channels.

Keywords: Optimization, Freeboard, Composite channel, Construction cost, Design variable

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Farinaz Sadat Mirlohi: Writing, Methodology, Investigation, Data Collection, Software, Analysis, Supervision, Writing – Review & Editing, Data Curation.

Citation: Mirlohi, F. S. (2025). Optimization of a composite trapezoidal channel cross section with non-uniform lining material. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(1), 87-100. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025/1209611>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بهینه‌سازی مقطع کانال دوزنقه‌ای مرکب با جنس پوشش غیریکنواخت

فریناز سادات میرلوحی

کارشناسی ارشد عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی، کارشناس شرکت مهندسين مشاور طرح افرا، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: mirlohil8@yahoo.com

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱

چکیده

در هر سیستم مهندسی، مانند کانال‌های آبرسانی، مهم‌ترین مسئله در بخش طراحی، حداقل‌رسانی هزینه‌ها و نیز افزایش بازده است. از طرفی، کاهش احتمال سرریز به‌عنوان یک نکته ضروری در طراحی کانال‌ها بسیار حائز اهمیت است. کانال‌های آبی روباز به دو صورت مقاطع عرضی ساده یا مرکب هستند. مقاطع مرکب، دارای شیب‌های جانبی متفاوت در دو طرف یا ضرایب زبری متفاوت در وجوه مختلف هستند. در تحقیق حاضر، هدف کاهش هزینه‌های ساخت شامل هزینه‌های خاکبرداری و پوشش و نیز به حداقل‌رساندن احتمال سرریز با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد برای کانال با مقطع مرکب دارای شیب‌های جانبی یکسان و ضرایب زبری متفاوت در وجوه مختلف است. فرمول‌بندی مسئله با توجه به وجود قید معادله مانپینگ، منجر به یک بهینه‌سازی غیرخطی می‌شود که با استفاده از نرم‌افزار ولفرام متمتیکا (Wolfram Mathematica) حل شده است. نتایج حاصل نشان داده است که با ضرایب زبری متفاوت در دیواره‌ها و کف کانال، زمانی که هزینه پوشش کانال نیز در دیواره‌ها و کف، متفاوت در نظر گرفته شود، نسبت به هزینه پوشش یکسان، شیب‌های جانبی بهینه تغییر می‌یابند ولی مقادیر بهینه سایر پارامترهای هیدرولیکی مانند حالت مقطع ساده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، ارتفاع آزاد، کانال مرکب، هزینه ساخت، متغیر طراحی

استناد: میرلوحی، ف. س. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی مقطع کانال دوزنقه‌ای مرکب با جنس پوشش غیریکنواخت. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی،

۳(۱): ۸۷-۱۰۰. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025/1209611>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

با افزایش جمعیت، پیشرفت بشر و گسترش نیازهای انسان از یک سو و عدم وجود منابع آب شیرین در همه نقاط از سوی انتقال و توزیع آب بین مناطق مختلف ضروری است. انتقال آب به دو صورت تحت فشار و جریان روباز صورت می‌پذیرد. انتقال آب به صورت تحت فشار با استفاده از انواع لوله‌ها انجام می‌گیرد و استفاده از نیروی ثقل (وزن) به حرکت درآوردن آب به صورت جریان با سطح آزاد از طریق ساخت کانال‌ها از متداول‌ترین روش‌های انتقال آب در شبکه‌های آبرسانی و آبیاری است. کانال‌ها یکی از مهم‌ترین سیستم‌های انتقال آب هستند و برای اهدافی نظیر استفاده در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، آبرسانی شهری، تخلیه فاضلاب، کشتیرانی، انتقال آب از دریاچه سد یا رودخانه به سمت توربین‌ها جهت تولید برق و کنترل سیلاب کاربرد دارند. معمولاً مقاطع کانال‌های باز به صورت مقاطع عرضی ساده یا مرکب است. مقاطع مرکب به کانال‌هایی اطلاق می‌گردد که دارای شیب‌های جانبی متفاوت در دو طرف یا ضرایب زبری متفاوت در وجوه مختلف هستند. بهینه‌سازی ابزاری است که برای کاهش هزینه‌ها یا منابع، جهت افزایش بازده به کار گرفته می‌شود. در طراحی، ساخت و نگهداری هر سیستم مهندسی، مهندسین باید تصمیمات تکنولوژیکی و مدیریتی بسیاری را بگیرند که هدف نهایی چنین تصمیماتی، کمینه کردن هزینه‌ها یا بیشینه کردن سود مورد نظر است. هدف مورد نظر را در هر وضعیت عملی، می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای تصمیم مشخص بیان کرد. بنابراین؛ می‌توان بهینه‌سازی را به عنوان فرآیندی که با شرایطی مقدار بیشینه یا کمینه یک تابع را به دست می‌دهد، تعریف کرد. Guo & Hughes (1984) مقطع بهینه کانال باز را برای اولین بار با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد به عنوان یک پارامتر ورودی به دست آورده‌اند. ایشان با استفاده از تکنیک مشتق‌گیری، روشی تحلیلی برای تعیین ابعاد یک کانال باز دوزنقه‌ای (به منظور کاهش مقاومت اصطکاکی و یا کاهش قیمت سازه کانال) ارائه کرده‌اند. Loganathan (1991) شرایط بهینه را برای مقطع عرضی کانال سهمی شکل ارائه کرده است. او ارتفاع آزاد را به عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفته است و برای سرعت و ابعاد کانال در فرمول بهینه‌سازی، محدودیت قائل شده است. بر خلاف اغلب محققین که شیب دیواره‌های جانبی کانال سهمی شکل را برابر $0/7$ در نظر می‌گرفتند و به کانال‌های کم‌عرض با عمق زیاد گرایش داشتند، وی این مقدار را برابر $0/514$ در نظر گرفته است. همچنین به این نتیجه رسیده است که چنانچه نسبت هزینه پوشش به هزینه خاکبرداری زیاد شود، باید عرض کانال سهمی شکل به تدریج افزایش یابد. وی نتایج به دست آمده را به صورت جداول مختلفی ارائه کرده است. Das (2000) با روش ضرایب لاگرانژ مطالعات خود را بر روی بهینه‌سازی هزینه ساخت کانال معطوف نموده است. او الگوریتمی جهت محاسبه پارامترهای هندسی کانال دوزنقه‌ای مرکب دارای ارتفاع آزاد ارائه کرد و به این ترتیب کانالی با کم‌ترین هزینه ساخت به دست آمد. Anwar & Clarke (2005) طراحی بهینه‌ی کانال با مقطع پایدار^۱ که شکل کلی از یک سهمی است را در نظر گرفتند و در جهت تکمیل کارهای پیشین مربوطه، ارتفاع آزاد را به عنوان یک پارامتر طراحی لحاظ کردند. Das (2007) مدل بهینه‌سازی خود را با فرض ثابت نگه داشتن ارتفاع آزاد و معادله جریان یکنواخت با دو تابع هدف به حداقل‌رسانی قیمت کل کانال دوزنقه‌ای و به حداقل‌رسانی احتمال سرریز شدن ارائه کرده است. Bhattacccharjya & Satish (2007) نیز با توسعه مدلی بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن شیب بحرانی شیروانی‌های کانال در مدل بهینه‌سازی خود توانستند شیب جانبی کانال دوزنقه‌ای دارای ارتفاع آزاد را به گونه‌ای محاسبه کنند که هم شیروانی‌های کناری کانال پایدار باشد و هم هزینه‌ی ساخت حداقل گردد. Hussein (2008) بیان داشته از آنجا که تخمین پیرامون مرطوب در مقطع کانال‌های پایدار مشکل است و این مسأله با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد پیچیده‌تر نیز می‌گردد، برای محاسبه‌ی پیرامون مرطوب می‌توان از تئوری محیط‌های برابر به نحوی که منجر به عدم پیوستگی در حل بهینه نگردد، استفاده نمود و با به حداقل‌رسانی محیط خیس شده و مساحت جریان، به بهینه‌سازی مقطع پایدار پرداخت. نتایج وی نشان

داده است که این مقاطع در شکلی نزدیک به نیم‌دایره، بیشترین کارایی هیدرولیکی را دارد. (Ghazaw (2011 یک روش برای تعیین ابعاد بهینه کانال برای دبی مشخص و نیز یک تابع غیر خطی برای تلفات آب برای کانال که شامل نشت و تبخیر است، ارائه کرده است. دو قید و محدودیت (حداقل سرعت مجاز به‌عنوان یک محدودیت برای رسوب‌گذاری و حداکثر سرعت مجاز به‌عنوان یک محدودیت برای فرسایش کانال) در طراحی کانال در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش لاگرانژ با ضرایب نامشخص، ابعاد بهینه کانال برای حداقل نمودن تلفات آب، تابع مورد نظر به دست آمده است. همچنین یک برنامه کامپیوتری برای انجام محاسبات طراحی برای ابعاد بهینه کانال نوشته شده است. (Adarsh & Sahana (2013 طراحی برای به حداقل رساندن هزینه طراحی کانال‌های آبیاری با در نظر گرفتن هزینه خاکبرداری، هزینه پوشش، هزینه تلفات آب و هزینه تملک ارائه نمود که در آن مدل بهینه‌سازی غیر خطی کانال آبیاری با استفاده از یک ابزار فراابتکاری که اخیراً توسعه یافته، یعنی جستجوی جهانی احتمالی لوزان (PGSL^۱) حل شده است. در حالی که راه حل‌ها مطابق با روش‌های کلاسیک هستند. با توجه به کاربردهای میدانی واقعی، برای طراحی بهینه کانال‌های دوزنقه‌ای، دو محدودیت خاص محل کانال به این مدل اضافه شده است. این مطالعه، قابلیت رویکرد پیشنهادی PGSL برای انجام طراحی جامع کانال‌های آبیاری را نشان می‌دهد. Kentli & Mercan (2014) دو الگوریتم مختلف برای بهینه‌سازی مقطع کانال با توجه به نفوذ و تبخیر را مورد استفاده قرار داده و نتایج آن را با تحقیقات قبلی مقایسه کرده‌اند. ایشان از الگوریتم ژنتیک و روش برنامه‌نویسی درجه دوم متوالی در بهینه‌سازی استفاده کردند. ایشان مقطع مثلی، مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل را بهینه‌سازی کردند و نشان دادند که هر دو الگوریتم، نتایج دقیق‌تر از تحقیقات پیشین را ارائه می‌دهند. (Roshanghar et al. (2014 تابع هدف را بر اساس هزینه پوشش واحد طول کانال، هزینه خاکریزی و خاکبرداری واحد حجم، همچنین بر اساس هزینه هدررفت آب از طریق تراوش و تبخیر نیز در نظر گرفتند و معادله عمومی مانینگ را به‌عنوان تابع قید تساوی استفاده کردند. ایشان برای این منظور، طراحی بهینه مقطع کانال دوزنقه‌ای را با استفاده از الگوریتم ژنتیک با متغیرهای عمق، عرض کف و شیب‌های کناری انجام دادند. دو روش و چندین مدل بدون محدودیت و با محدودیت عمق نرمال، سرعت جریان، شیب کانال و عرض سطح آزاد کانال را مورد بررسی قرار دادند که اعمال محدودیت‌های عمق، سرعت و شیب ثابت سبب افزایش هزینه ولی محدودیت عرض سطح آزاد در مقایسه با مدل‌های دیگر سبب کاهش هزینه گردیده است، به‌علاوه مدل دیگری با کاربرد معادله مانینگ به‌عنوان قید تساوی به‌کار برده شده است. (Han & Easa (2018 یک راه حل دقیق برای مقطع بهینه کانال با k به‌عنوان یک پارامتر مبتنی بر ریاضیات هایپرگومتری گاوسی و روش چند برابر لاگرانژ، ارائه داده‌اند و روابط بین k و هر یک از مقادیر بهینه عرض، عمق و شیب جانبی را به‌دست آوردند. سپس ایشان در طراحی کانال دوزنقه‌ای به دو نکته مهم شکل و هزینه بهینه ساخت توجه کردند در حالی که در گذشته بیشتر به بهبود سرعت جریان توجه شده بود. در ابتدای تحقیق به شکل مقاطع مختلف نظیر مقاطع مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلی اشاره شده است. در قسمت بعدی یک مدل بهینه‌سازی که هزینه ساخت و ساز (گودبرداری و روکش) مقاطع را به حداقل برساند، ارائه شده است. نتایج نشان داده که تا زمانی که شیب‌های جانبی محدود به $8/6$ درصد باشد، مقطع اقتصادی‌تر خواهد بود. روش بهینه‌سازی ارائه شده نه تنها هزینه ساخت و ساز را کاهش می‌دهد، بلکه تعمیر و نگهداری را نیز بهبود می‌بخشد. (Lavasani (2020 همچنین مقطع دوزنقه‌ای کانال را بهینه‌سازی کرده است که در آن حداقل کردن هزینه‌های خاکبرداری، پوشش، تبخیر، نفوذ، تملک و همچنین حداقل شدن احتمال سرریز به‌عنوان هدف در نظر گرفته شده است. (Ghasemi Khiadani et al. (2024 ضمن در نظر گرفتن حداقل‌سازی احتمال سرریز جریان، برای اولین بار به حداقل‌سازی هزینه‌های خاکبرداری و پوشش در دبی‌های مختلف پرداختند و تأثیر تغییر دبی بر ابعاد مقطع کانال و هزینه ساخت آن را مورد بررسی قرار دادند.

طبق دانش ما، در هیچ یک از تحقیقاتی که در گذشته ارتفاع آزاد به‌عنوان یک متغیر تصمیم در مسئله در نظر گرفته شده و کمینه نمودن هزینه‌های خاکبرداری و پوشش و احتمال سرریز به‌عنوان هدف در نظر گرفته شده‌اند، بهینه‌سازی کانال مرکب انجام نشده است. در تحقیق حاضر، برای اولین بار بهینه‌سازی مقطع عرضی کانال مرکب (دارای ضرایب زبری متفاوت در دیواره‌ها و کف) با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد کل به‌عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری و کمینه نمودن هزینه‌های خاکبرداری و پوشش و احتمال سرریز به‌عنوان هدف صورت می‌پذیرد و ابعاد بهینه مقطع عرضی کانال با مقطع مرکب و هزینه‌های ساخت به دست می‌آید.

۲- روش کار

در شکل (۱) مقطع دوزنقه‌ای کانال مرکب با ضرایب زبری متفاوت و دارای ارتفاع آزاد کل نشان داده شده است. در شکل، b به‌عنوان عرض کف کانال، Z_1 و Z_2 به‌عنوان شیب‌های جانبی طرفین، y به‌عنوان عمق جریان، P_1 ، P_2 و b به‌عنوان محیط‌های مرطوب، P_{1f} و P_{2f} به‌عنوان محیط‌های پوشش شده و F به‌عنوان ارتفاع آزاد کل مشخص شده‌اند. n_1 ، n_2 و n_3 به‌ترتیب ضرایب زبری مانینگ جداره‌ها و کف کانال مرکب هستند. با توجه به اهمیت دستیابی به کمینه‌ی مقدار هزینه‌های مربوط به خاکبرداری، پوشش، تلفات تبخیر و هزینه‌ی تملک، در مدل‌های بهینه‌سازی مورد نظر، تابع هدف اول، تابع هزینه در نظر گرفته شده است. دبی، ضریب زبری مانینگ و شیب طولی کف کانال، متغیرهای تصادفی هستند و پارامترهای عرض کف، عمق آب، شیب‌های جانبی و ارتفاع آزاد، مجهولات مسئله هستند.

شکل ۱- مقاطع عرضی کانال مرکب دوزنقه‌ای دارای ارتفاع آزاد کل

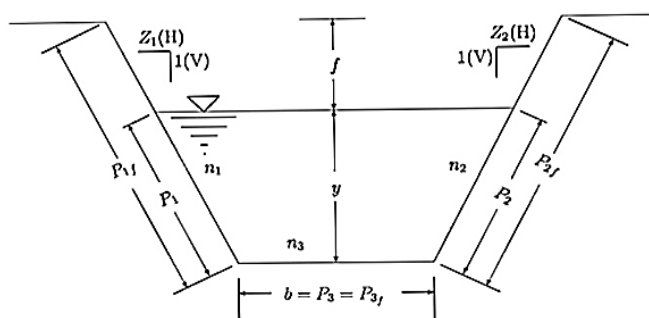


Fig 1. Cross sections of a trapezoidal composite channel with total free height

۲-۱- هزینه‌ی عملیات خاکی

عملیات خاکی در پروژه‌های عمرانی یکی از پارامترهای پرهزینه است، با توجه به اینکه عملیات خاکی به مقطع کانال بستگی دارد، هزینه آن با رابطه (۱) به دست می‌آید (Swamee et al., 2000a). در این رابطه C_e هزینه‌ی عملیات خاکی برای یک متر طول کانال (Rial/m)، c_e هزینه‌ی هر متر مکعب عملیات خاکی در سطح زمین (Rial/m^3)، c_r ضریب افزایش قیمت به‌ازای افزایش هر متر عمق (Rial/m^4)، A سطح مقطع مجرای کانال (m^2) و $\bar{y}_n$ فاصله‌ی مرکز سطح مجرای کانال از سطح آزاد جریان است.

$$C_e = c_e A + c_r \bar{y}_n \quad (1)$$

۲-۲- هزینه پوشش کانال

باتوجه به نوع و جنس پوشش، می‌توان هزینه‌ی هر متر مربع از پوشش کانال را با C_L نمایش داد، در این صورت هزینه‌ی پوشش برای واحد طول کانال با رابطه (۲) بیان می‌شود (Swamee et al., 2000b).

$$C_L = c_L P \quad (۲)$$

در این رابطه C_L هزینه‌ی پوشش برای هر متر از طول کانال (Rial/m)، c_L هزینه‌ی پوشش برای واحد سطح (Rial/m^2) و P محیط ترشده است.

۲-۳- مسئله بهینه‌سازی

فرم کلی مسئله بهینه‌سازی به شکل روابط (۳ تا ۵) است که در آن، هدف اول، حداقل نمودن مجموع هزینه‌های خاکبرداری و پوشش و هدف دوم، حداقل نمودن احتمال سرریز و معادله مانینگ قید مسئله است.

$$\text{Minimizing: } J_1 = C_e A + C_L (P_1 + P_2 + b) \quad (۳)$$

$$\text{Minimizing: } J_2 = P(y > y + F) \quad (۴)$$

$$\text{Subject to: } \frac{Q}{\sqrt{S_0}} - \frac{A^{\frac{5}{3}}}{(\sum n_i^2 P_i)^{\frac{2}{3}}} = 0 ; \quad (i = 1, 2, 3) \quad (۵)$$

از آنجا که مسئله بهینه‌سازی بالا، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است و در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه تنها یک پاسخ وجود ندارد بلکه مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه با توجه به اهداف مسئله به دست می‌آید. در مطالعه حاضر از روش محدود شده تکنیک برنامه‌ریزی چندهدفه استفاده شده است. در این روش، مسئله بهینه‌سازی برداری به یک بهینه‌سازی عددی تبدیل می‌شود. تبدیل فرم برداری به عددی بدین صورت انجام می‌شود که یکی از اهداف (در اینجا، کمینه‌سازی هزینه ساخت) به عنوان تنها هدف مدل در نظر گرفته می‌شود و هدف دوم (در اینجا، حداقل‌سازی احتمال سرریز) به عنوان یک محدودیت در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، مدل حاصل، فرم عددی و قطعی مدل برداری و تصادفی پیشین است. جزئیات این تبدیل توسط Das (2007) شرح داده است.

از طرف دیگر، دبی، ضریب زبری مانینگ و شیب طولی کف کانال، متغیرهای تصادفی هستند، به سبب اینکه در هنگام اجرای شیب طولی کف امکان خطای ساخت وجود دارد. همچنین مقادیر زبری مانینگ در هنگام اجرا و ساخت کانال ممکن است با نواقصی همراه باشد. معمولاً در واقعیت، احتمال دارد جریان ورودی از جریان طراحی بیشتر شود. اختلافات مقدار این سه عامل می‌تواند موجب سرریز احتمالی در کانال شود. به همین سبب، یک محدودیت احتمال سرریز در مدل طراحی اعمال شده است تا سرریز کانال به حداقل مقدار ممکن برسد. در نهایت مطابق آنچه در مقاله Das (2007) انجام شده، مسئله بهینه‌سازی دوهدفه بالا با در نظر گرفتن متغیرهای دبی، ضریب زبری مانینگ و شیب طولی کف کانال به عنوان متغیرهای تصادفی، با در نظر گرفتن S_Y به عنوان واریانس عمق جریان، S_{n_i} به عنوان واریانس ضریب زبری مانینگ، S_Q به عنوان واریانس دبی و S_{S_0} به عنوان واریانس شیب طولی، به صورت مسئله تک‌هدفه زیر نوشته می‌شود:

$$\text{Minimizing: } C_e A + C_L (P_1 + P_2 + b) \quad (۶)$$

$$\text{Subject to: } \frac{Q}{\sqrt{S_0}} - \frac{A^{\frac{5}{3}}}{(\sum n_i^{\frac{2}{3}} P_i)^{\frac{2}{3}}} = 0 \quad (7)$$

$$\left[\frac{5 dA}{A dy} - \frac{2}{\sum n_i^{\frac{2}{3}} P_i} \frac{d(n_i^{\frac{2}{3}} P_i)}{dy} \right] - \frac{3}{S_Y} \sqrt{\left\{ \frac{S_0^2}{Q^2} + \frac{1}{(\sum n_i^{\frac{2}{3}} P_i)^2} \sum n_i P_i^2 S_{n_i}^2 + \frac{1}{4 S_0^2} S_{S_0}^2 \right\}} \quad (8)$$

۲-۴- مثال عددی

مقطع عرضی کانال مرکب دوزنقه‌ای شکل (۱) در نظر گرفته شده است. دبی طراحی معادل ۱۰ متر مکعب بر ثانیه، ضریب زبری مانینگ در جداره‌ی مربوط به P_1 ، ۰/۱ و در جداره‌ی مربوط به P_2 برابر با ۰/۰۱۵ و در کف کانال مربوط به P_3 ، ۰/۰۳۰ در نظر گرفته شده است و در مورد زبری یکنواخت، تمامی مقادیر مربوط به P_1 ، P_2 و P_3 برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است. شیب طولی کف کانال ۰/۰۰۲۵ است. نسبت C_L/C_e (ضریب هزینه پوشش کانال) برابر ۷ در حالت هزینه پوشش یکسان و ۳، ۷ و ۵ در حالت هزینه پوشش متفاوت در نظر گرفته شده است.

۲-۵- کدنویسی در نرم‌افزار ولفرام متمتیکا

این نرم‌افزار که اولین بار توسط دکتر استیون^۳ ولفرام پایه‌ریزی شد، یکی از نرم‌افزارهای حرفه‌ای در زمینه‌ی محاسبات است و در رشته‌های مهندسی کاربرد گسترده‌ای دارد. در این تحقیق از نسخه یازده آن استفاده شده است. با توجه به امکانات موجود در نرم‌افزار می‌توان کدنویسی را در محیطی ساده انجام داد. به این ترتیب که ابتدا حقیقی یا صحیح بودن متغیرها را مشخص و سپس ورودی‌ها (اعم از پارامترها و روابط) را در نظر گرفته می‌شود. (هر سطر با نقطه ویرگول از سطر بعدی جدا می‌شود). در ادامه دستور حداقل‌سازی تابع هدف و قید(ها) نوشته می‌شود و در انتها برنامه اجرا می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

در جدول (۱) نتایج حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی با ضرایب زبری متفاوت کف و شیب‌های جانبی و هزینه پوشش یکسان برای کف و شیب‌های جانبی آورده شده است. در جدول (۲) نتایج حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی با ضرایب زبری متفاوت کف و شیب‌های جانبی و هزینه پوشش متفاوت برای کف و شیب‌های جانبی آورده شده است. به عبارت دیگر تفاوت مدل بهینه‌سازی مربوط به جداول (۱ و ۲)، هزینه پوشش کف و جداره‌ها بوده است. در هر یک از این جداول، نتایج حل مسئله بهینه‌سازی در مقادیر بهینه عرض کف، عمق جریان، شیب‌های جانبی و ارتفاع آزاد به ازای مقادیر مختلف احتمال سرریز و همچنین هزینه ساخت به ازای مقادیر مختلف احتمال سرریز آورده شده است. در ادامه نمودار تغییرات هر یک از متغیرهای بهینه‌سازی شده و همچنین هزینه ساخت به ازای مقادیر مختلف احتمال سرریز ارائه شده و در مورد روند تغییرات بحث شده است.

جدول ۱- نتایج حل مدل بهینه‌سازی با ضرایب زبری متفاوت و هزینه پوشش یکسان

Table 1. Results of solving the optimization model with different roughness coefficients and the same coverage cost

P	z	C	b	Y	Z ₁	Z ₂	F
۰/۰۲۵	۱/۹۶۰۰	۸۷/۸۷۹	۶/۰۳۲	۱/۳۳۵	۰/۲۰۷	۰/۴۲۸	۱/۱۷۶
۰/۰۵۰	۱/۶۴۵۰	۸۴/۲۷۶	۵/۷۲۳	۱/۳۹۵	۰/۲۲۱	۰/۴۶۰	۱/۰۴۱
۰/۰۷۵	۱/۴۳۹۰	۸۱/۸۱۱	۵/۵۰۴	۱/۴۴۱	۰/۲۳۲	۰/۴۸۴	۰/۹۴۵
۰/۱۰۰	۱/۲۸۱۷	۷۹/۸۶۳	۵/۳۲۶	۱/۴۸۰	۰/۲۴۱	۰/۵۰۲	۰/۸۶۸
۰/۱۲۵	۱/۱۵۰۴	۷۸/۱۸۹	۵/۱۷۱	۱/۵۱۶	۰/۲۴۹	۰/۵۱۹	۰/۸۰۰
۰/۱۵۰	۱/۰۳۶۰	۷۶/۶۹۳	۵/۰۳۰	۱/۵۵۰	۰/۲۵۶	۰/۵۳۴	۰/۷۳۸
۰/۱۷۵	۰/۹۳۴۶	۷۵/۳۳۵	۴/۹۰۱	۱/۵۸۲	۰/۲۶۳	۰/۵۴۷	۰/۶۸۱
۰/۲۰۰	۰/۸۴۱۸	۷۴/۰۶۵	۴/۷۷۹	۱/۶۱۴	۰/۲۶۹	۰/۵۶۰	۰/۶۲۶
۰/۲۲۵	۰/۷۵۵۳	۷۲/۸۵۶	۴/۶۶۴	۱/۶۴۵	۰/۲۷۶	۰/۵۷۱	۰/۵۷۳
۰/۲۵۰	۰/۶۷۴۵	۷۱/۷۰۵	۴/۵۵۳	۱/۶۷۶	۰/۲۸۱	۰/۵۸۲	۰/۵۲۲
۰/۲۷۵	۰/۶۱۹۰	۷۰/۹۰۲	۴/۴۷۷	۱/۶۹۹	۰/۲۸۵	۰/۵۹۸	۰/۴۸۵
۰/۳۰۰	۰/۵۲۴۴	۶۹/۵۰۸	۴/۳۴۴	۱/۷۳۸	۰/۲۹۲	۰/۶۰۱	۰/۴۲۰
۰/۳۲۵	۰/۴۵۳۸	۶۸/۴۴۷	۴/۲۴۵	۱/۷۶۹	۰/۲۹۷	۰/۶۱۰	۰/۳۷۰
۰/۳۵۰	۰/۳۸۵۴	۶۷/۴۰۳	۴/۱۴۹	۱/۸۰۰	۰/۳۰۲	۰/۶۱۸	۰/۳۱۹
۰/۳۷۵	۰/۳۱۸۶	۶۶/۳۶۶	۴/۰۵۵	۱/۸۳۱	۰/۳۰۷	۰/۶۲۵	۰/۲۶۸
۰/۴۰۰	۰/۲۵۳۳	۶۵/۳۳۷	۳/۹۶۴	۱/۸۶۳	۰/۳۱۲	۰/۶۳۱	۰/۲۱۷
۰/۴۲۵	۰/۱۸۹۲	۶۴/۳۱۲	۳/۸۷۶	۱/۸۹۴	۰/۳۱۶	۰/۶۳۶	۰/۱۶۴
۰/۴۵۰	۰/۱۲۵۶	۶۳/۲۸۱	۳/۷۹۰	۱/۹۲۶	۰/۳۲۰	۰/۶۴۰	۰/۱۱۱
۰/۴۷۵	۰/۰۶۲۷	۶۲/۲۴۷	۳/۷۰۶	۱/۹۵۹	۰/۳۲۳	۰/۶۴۳	۰/۰۵۶
۰/۵۰۰	۰/۰۱۰۰	۶۱/۳۷۰	۳/۶۳۸	۱/۹۸۶	۰/۳۲۶	۰/۶۴۵	۰/۰۰۹

جدول ۲- نتایج حل مدل با لحاظ کردن هزینه‌های خاکبرداری و پوشش با ضرایب زبری متفاوت و هزینه پوشش متفاوت

Table 2. Results of solving the model considering excavation and cover costs with different roughness coefficients and different cover costs

P	z	C	b	Y	Z ₁	Z ₂	F
۰/۰۲۵	۱/۹۶۰۰	۶۵/۳۹۲	۶/۲۰۹	۱/۳۱۷	۰/۲۴۵	۰/۲۹۱	۱/۱۶۹
۰/۰۵۰	۱/۶۴۵۰	۶۲/۶۶۹	۵/۹۰۹	۱/۳۷۶	۰/۲۶۵	۰/۳۱۲	۱/۰۳۶
۰/۰۷۵	۱/۴۳۹۰	۶۰/۸۰۹	۵/۶۹۶	۱/۴۲۰	۰/۲۸۰	۰/۳۲۷	۰/۹۴۲
۰/۱۰۰	۱/۲۸۱۷	۵۹/۳۴۲	۵/۵۲۳	۱/۴۵۹	۰/۲۹۲	۰/۳۳۹	۰/۸۶۶
۰/۱۲۵	۱/۱۵۰۴	۵۸/۰۸۲	۵/۳۷۱	۱/۴۹۴	۰/۳۰۳	۰/۳۴۹	۰/۸۰۰
۰/۱۵۰	۱/۰۳۶۰	۵۶/۹۵۶	۵/۲۳۴	۱/۵۲۸	۰/۳۱۳	۰/۳۵۹	۰/۷۳۹
۰/۱۷۵	۰/۹۳۴۶	۵۵/۹۳۵	۵/۱۰۷	۱/۵۶۰	۰/۳۲۳	۰/۳۶۷	۰/۶۸۳
۰/۲۰۰	۰/۸۴۱۸	۵۴/۹۸۰	۴/۹۸۸	۱/۵۹۲	۰/۳۳۳	۰/۳۷۵	۰/۶۲۹
۰/۲۲۵	۰/۷۵۵۳	۵۴/۰۷۱	۴/۸۷۴	۱/۶۲۴	۰/۳۴۲	۰/۳۸۲	۰/۵۷۷
۰/۲۵۰	۰/۶۷۴۵	۵۳/۲۰۵	۴/۷۶۴	۱/۶۵۵	۰/۳۵۰	۰/۳۸۹	۰/۵۲۶
۰/۲۷۵	۰/۶۱۹۰	۵۲/۶۰۱	۴/۶۸۸	۱/۶۷۸	۰/۳۵۷	۰/۳۹۳	۰/۴۹۰
۰/۳۰۰	۰/۵۲۴۴	۵۱/۵۵۲	۴/۵۵۵	۱/۷۱۸	۰/۳۶۷	۰/۴۰۱	۰/۴۲۵
۰/۳۲۵	۰/۴۵۳۸	۵۰/۷۵۲	۴/۴۵۵	۱/۷۵۰	۰/۳۷۶	۰/۴۰۶	۰/۳۷۵
۰/۳۵۰	۰/۳۸۵۴	۴۹/۹۶۵	۴/۳۵۶	۱/۷۸۲	۰/۳۸۴	۰/۴۱۱	۰/۳۲۴
۰/۳۷۵	۰/۳۱۸۶	۴۹/۱۸۳	۴/۲۶۰	۱/۸۱۵	۰/۳۹۲	۰/۴۱۵	۰/۲۷۳
۰/۴۰۰	۰/۲۵۳۳	۴۸/۴۰۶	۴/۱۶۶	۱/۸۴۸	۰/۳۹۹	۰/۴۱۹	۰/۲۲۱
۰/۴۲۵	۰/۱۸۹۲	۴۷/۶۳۱	۴/۰۷۴	۱/۸۸۲	۰/۴۰۶	۰/۴۲۲	۰/۱۶۸
۰/۴۵۰	۰/۱۲۵۶	۴۶/۸۵۰	۳/۹۸۳	۱/۹۱۶	۰/۴۱۳	۰/۴۲۵	۰/۱۱۳
۰/۴۷۵	۰/۰۶۲۷	۴۶/۰۶۶	۳/۸۹۵	۱/۹۵۱	۰/۴۱۹	۰/۴۲۷	۰/۰۵۸
۰/۵۰۰	۰/۰۱۰۰	۴۵/۴۰۱	۳/۸۲۲	۱/۹۸۱	۰/۴۲۴	۰/۴۲۸	۰/۰۰۹

شکل (۲) نمودار تغییرات عرض کف کانال به‌ازای مقادیر مختلف احتمال سرریز در دو حالت هزینه پوشش یکسان و متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تفاوت هزینه پوشش کف و جدارها تاثیر چندانی بر عرض بهینه کف کانال ندارد. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش احتمال سرریز، عرض بهینه کف کاهش می‌یابد که با نتایج Das (2007) همخوانی دارد.

شکل ۲- تغییرات عرض کف کانال به‌ازای احتمالات سرریز متفاوت

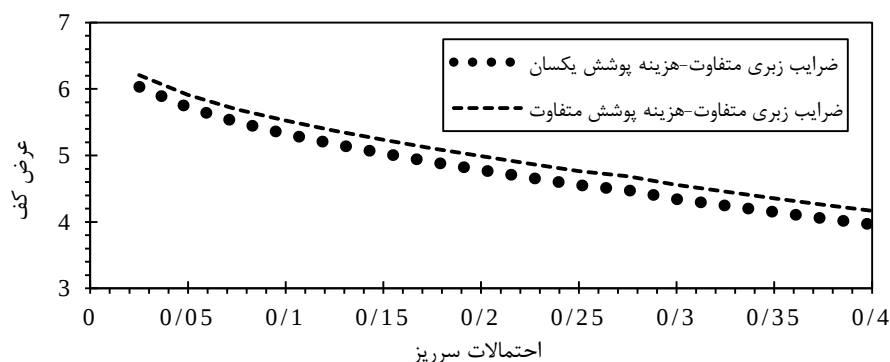


Fig. 2. Changes in channel bottom width for different weir probabilities

شکل (۳) نمودار تغییرات عمق جریان به‌ازای مقادیر مختلف احتمال سرریز در دو حالت هزینه پوشش یکسان و متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تفاوت هزینه پوشش کف و جدارها تاثیری بر عمق جریان ندارد. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش احتمال سرریز، عمق جریان افزایش می‌یابد که با نتایج Das (2007) همخوانی دارد.

شکل ۳- تغییرات عمق جریان به‌ازای احتمالات سرریز متفاوت

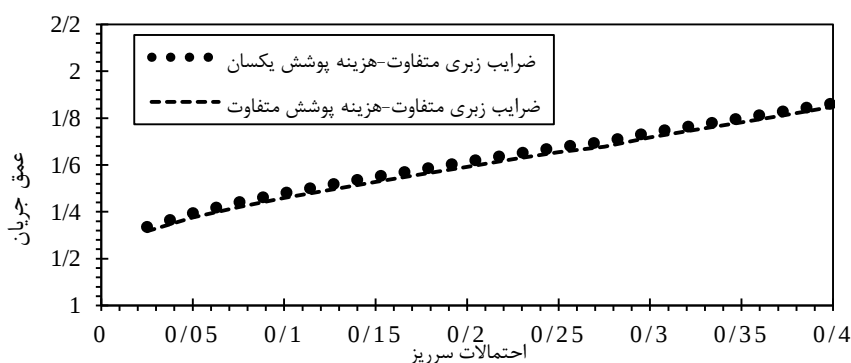


Fig. 3. Flow depth changes for different weir probabilities

شکل (۴) نمودار تغییرات ارتفاع آزاد به‌ازای مقادیر مختلف احتمال سرریز در دو حالت هزینه پوشش یکسان و متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تفاوت هزینه پوشش کف و جدارها تاثیری بر ارتفاع آزاد ندارد. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش احتمال سرریز، ارتفاع آزاد کاهش می‌یابد که با نتایج Das (2007) همخوانی دارد.

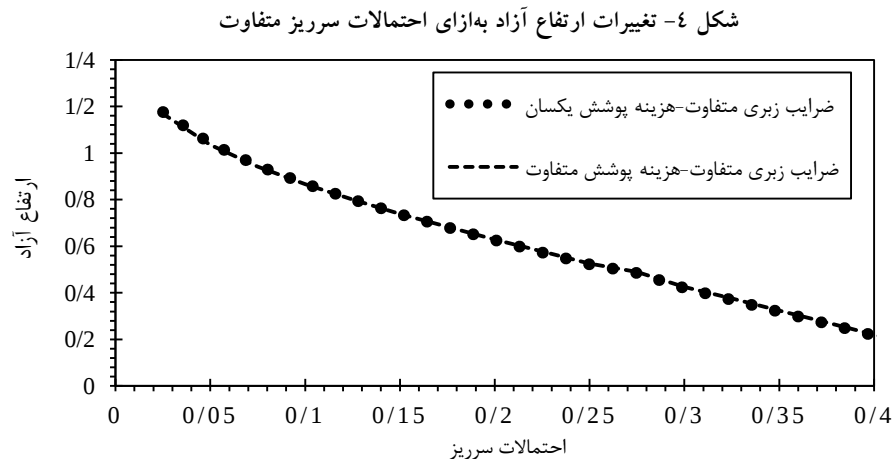
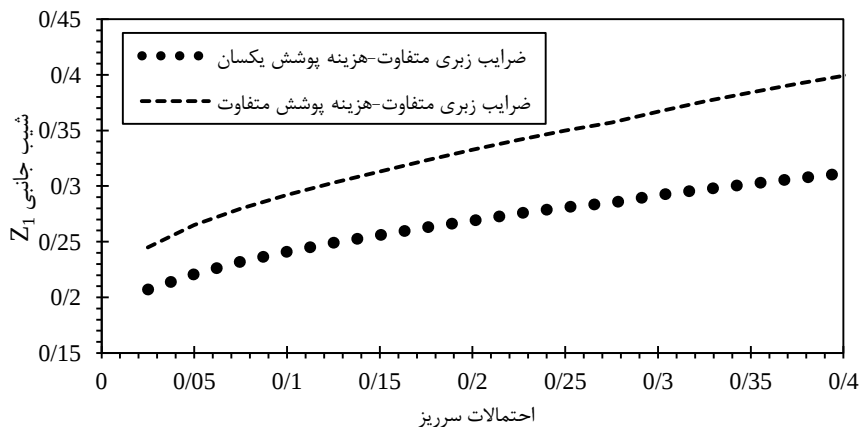


Fig. 4. Changes in free height for different weir probabilities

شکل (۵) نمودار تغییرات شیب جانبی Z_1 به‌ازای مقادیر مختلف احتمال سرریز در دو حالت هزینه پوشش یکسان و متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تفاوت هزینه پوشش کف و جداره‌ها تأثیر قابل توجهی بر شیب جانبی دارد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش احتمال سرریز، در هر دو حالت، شیب جانبی افزایش می‌یابد و با نتایج (Das (2007 همخوانی خوبی دارد. در حالتی که هزینه پوشش متفاوت بوده، مقدار شیب جانبی Z_1 نسبت به حالت هزینه پوشش یکسان، بیشتر بوده که علت آن، بیشتر بودن هزینه پوشش در دیواره جانبی است که شیب آن Z_1 است؛ زیرا با افزایش شیب، مساحت پوشش کاهش می‌یابد و در نتیجه هزینه پوشش کاهش می‌یابد.

شکل ۵- تغییرات شیب جانبی Z_1 به‌ازای احتمالات سرریز متفاوتFig. 5. Changes in lateral slope Z_1 for different weir probabilities

شکل (۶) نمودار تغییرات شیب جانبی Z_2 به‌ازای مقادیر مختلف احتمال سرریز در دو حالت هزینه پوشش یکسان و متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تفاوت هزینه پوشش کف و جداره‌ها تأثیر قابل توجهی بر شیب جانبی دارد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش احتمال سرریز، در هر دو حالت، شیب جانبی افزایش می‌یابد و با نتایج (Das (2007 همخوانی خوبی نشان می‌دهد. در حالتی که هزینه پوشش متفاوت بوده، مقدار شیب جانبی Z_2 نسبت به حالت هزینه پوشش

یکسان، کمتر بوده است که علت آن، کمتر بودن هزینه پوشش در دیواره جانبی است که شیب آن Z_2 بوده است؛ زیرا با کاهش شیب، مساحت پوشش افزایش می‌یابد و در نتیجه به دلیل کمتر بودن هزینه پوشش در این دیواره، هزینه کل پوشش کاهش می‌یابد.

شکل ۶- تغییرات شیب جانبی Z_2 به‌ازای احتمالات سرریز متفاوت

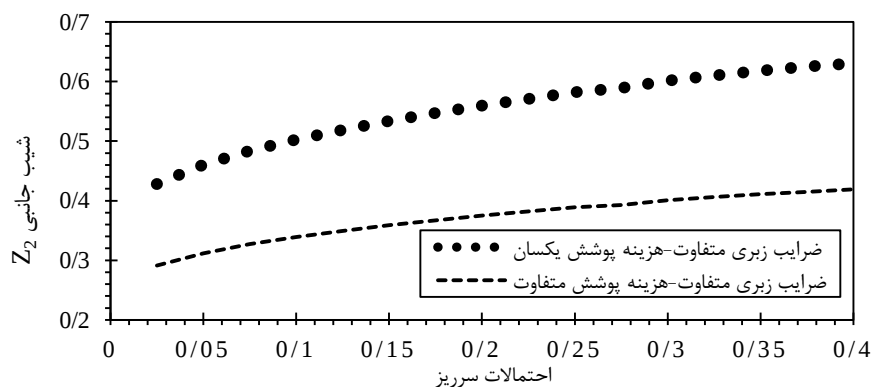


Fig. 6. Changes in lateral slope Z_2 for different weir probabilities

شکل (۷) نمودار تغییرات هزینه ساخت کانال (مجموع هزینه‌های خاکبرداری و پوشش) به‌ازای مقادیر مختلف احتمال سرریز در دو حالت هزینه پوشش یکسان و متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود تفاوت هزینه پوشش کف و جداره‌ها تاثیر قابل توجهی بر شیب جانبی دارد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش احتمال سرریز، در هر دو حالت، هزینه ساخت کانال کاهش می‌یابد که با نتایج Das (2007) همخوانی متناسبی دارد. در حالتی که هزینه پوشش متفاوت بوده، هزینه ساخت کانال کمتر بوده است که علت آن، هزینه‌های پوشش انتخاب شده برای شیب‌های جانبی در حالت هزینه پوشش متفاوت بوده که کمتر از هزینه‌های پوشش شیب‌های جانبی در حالت پوشش یکسان بوده است؛ بنابراین نمی‌توان نتیجه کلی از آن گرفت.

شکل ۷- تغییرات مقادیر هزینه ساخت به‌ازای احتمالات سرریز متفاوت

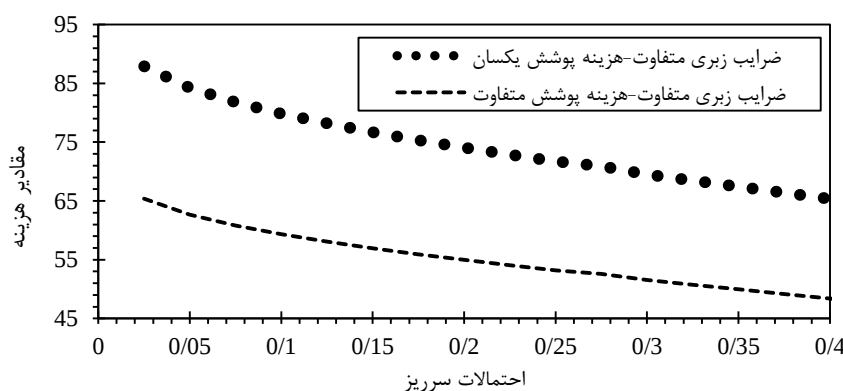


Fig. 7. Changes in construction cost values for different weir probabilities

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش احتمال سرریز، عرض بهینه کاهش و عمق جریان افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر هرچه کانال باریک‌تر و عمیق‌تر باشد، احتمال سرریز از آن بیشتر می‌شود و بالعکس هرچه کانال عریض‌تر و کم عمق‌تر باشد، احتمال سرریز شدن آن کمتر می‌شود که این موضوع با نتایج تحقیقات گذشته همخوانی متناسبی دارد. همچنین نتایج نشان داده که

با افزایش احتمال سرریز، ارتفاع آزاد کاهش می‌یابد که کاملاً منطقی است؛ زیرا هر چه ارتفاع آزاد بیشتر باشد، احتمال سرریز شدن کانال کمتر می‌گردد. نتایج حاصله در مورد شیب جانبی بهینه نشان داده که در دیواره جانبی که دارای هزینه پوشش بیشتری بوده، شیب جانبی بهینه بیشتر شده و بالعکس. به عبارت دیگر تفاوت در هزینه پوشش طرفین کانال باعث تفاوت در شیب جانبی بهینه طرفین کانال می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش احتمال سرریز، هزینه ساخت کانال کاهش می‌یابد و علت آن، این است که برای کاهش احتمال سرریز، طبق نتایج به دست آمده باید ارتفاع آزاد بیشتری در نظر گرفته شود که این موضوع در نتیجه هزینه ساخت بیشتر می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

فریناز سادات میرلوحی: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها و نرم‌افزار، تحلیل، راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Adarsh, S., Sahana, A.S. (2013). Minimum Cost Design of Irrigation Canals Using Probabilistic Global Search Lausanne. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 38, 2631-2637. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0493-x>
- Anwar A. A., Clarke D. (2005). Design of hydraulically efficient power-law channels with free board *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131:560-563. Applications (IJERA). 1:1317-1322.
- Bhattacccharjya R. K. and Satish M. G. (2007). Optimal design of stable trapezoidal channel section using hybrid optimization techniques *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133:323329.
- Das A. (2000). Optimal channel cross section with composite roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 126:68-71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:1\(68\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:1(68))
- Das A. (2007). Flooding probability constrained optimal design of trapezoidal channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133:53-60. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(53))
- Ghasemi Khiadani, M., Khoshfetrat, A., & Maleki, M. (2024). Optimization of the cross-section and free board of trapezoidal channels based on the minimum probability of overflow and excavation and covering costs. *Technical Strategies in Water Systems*, 2(4), 304-314. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.783405>
- Ghazaw Y. M. (2011). Design and analysis of a canal section for minimum water loss. *Alexandria Engineering Journal*. 50:337-344
- Guo C.Y. and Hughes C. (1984). Optimal channel cross section with freeboard. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 110:304-314. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1984\)110:3\(304\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1984)110:3(304))
- Han Y. C., Easa S. M. (2018). Exact Solution of optimum hydraulic power-law section with general exponent parameter [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineer*.
- Hussein A. (2008). Simplified Design of hydraulically efficient power-law channels with freeboard. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 134:380-386.
- Kentli, A., & Mercan, O. (2014). Application of Different Algorithms to Optimal Design of Canal Sections. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(4). [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)70092-6](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)70092-6)

- Lavasani.E. (2020). Trapezoidal open channel cross section optimization by considering the total free height as a design variable and in terms of excavation, coating, evaporation, infiltration and acquisition costs. Master Thesis, Faculty of Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University. (In Persian)
- Loganathan G.V. (1991). Optimal design of parabolic canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 117:716-735.
- Roshanghar, K., Talat-Ahari, S., & Noori, A. (2014). Influence of Restricted Hydraulic Parameters on Optimal Design of open Channels Sections. *Water and Soil Science*, 24(2), 171-182.
- Swamee, P. K., Mishra, G. C., & Chahar, B. R. (2000a). Design of minimum seepage loss canal sections. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(1), 28-32.
- Swamee, P. K., Mishra, G. C., & Chahar, B. R. (2000b). Comprehensive Design of Minimum Cost Irrigation Canal Sections. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126(5), 322-327.

Technical Strategies in Water Systems

Spring 2025, Volume3, issue 1

e-ISSN: 2981-1449

Evaluating unconventional water resources for sustainable water supply: Advantages, limitations and implementation strategies Farida Iraj, Payam Najafi	1-20
Monitoring morphological changes of the Karun River shoreline using multi-temporal satellite imagery (Case study: Ahvaz city, 2006-2016) Mohammad Sardavii, Mohammad Ebrahim Afifi	21-35
Investigation of flow over a crump weir in free and submerged flow conditions Mohammadhasan Hashemi F., Ali Khoshfetrat, Elham Izadinia, Ehsan Delavari	36-56
Numerical modeling to investigate the effect of the presence or absence of a free surface on the flow around the cylindrical pier Mehdi Esmaeilzadeh Fereydani, Yasin Aghaee-Shalmani	57-71
Assessment of water quality deterioration trends in Zayandeh Rud River using the SIAQUA-IPH model Mohammad Reza Fadaei Tehrani, Mozhgan Mirzaei	72-86
Optimization of a composite trapezoidal channel cross section with non-uniform lining material Farinaz Sadat Mirlohi	87-100
