
فصلنامه راهبردهای فنی در سامانه های آبی

شاپای الکترونیک: ۱۴۴۹-۲۹۸۱

زمستان ۱۴۰۳، دوره ۲، شماره ۴

-
- | | |
|---------|---|
| ۲۸۵-۳۰۳ | بررسی تغییرات روند رد پای آب در محصولات مختلف بخش های اقتصادی ایران
المیرا تاروردی زاده، سید عباس حسینی، زهرا عابدی، محمد صادق علی پور |
| ۳۰۴-۳۱۴ | بهینه سازی مقطع و ارتفاع آزاد کانال های دوزنقه ای براساس حداقل احتمال سرریز و هزینه های خاکبرداری و پوشش
مریم قاسمی خیادانی، علی خوش فطرت، محمد ملکی |
| ۳۱۵-۳۲۷ | پایش سلامت سازه های سدهای بتنی با استفاده از روش های نوین (مطالعه موردی: سد باغان جم)
سیدشهاب امامزاده، مصطفی حیدری |
| ۳۲۸-۳۳۸ | مسئولیت فرهنگی - اجتماعی مصرف کنندگان، ذینفعان و تصمیم گیرندگان آب در بحران کم آبی
مجید رئوفی بروجنی، سیامک کورنگ بهشتی، علی رشید پور |
| ۳۳۹-۳۶۲ | بررسی بهترین روش توسعه کم اثر (LID) برای مدیریت رواناب شهری با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مطالعه موردی: شهر خمینی شهر
کامل رضایی آدریانی، مجید ریاحی سامانی، مسلم غیبی حاجیور |
| ۳۶۳-۳۸۰ | بررسی عملکرد جاذب های آلی، معدنی و ترکیبی در کاهش COD پساب صنایع پتروشیمی: رویکرد مدلسازی سینتیکی
عاطفه براهیمی، مژگان احمدی ندوشن، علی اصغر بسالت پور، میترا عطاآبادی |
-



Comparison of water footprint trends in different products of Iran's economic sectors

Elmira Tarvirdizadeh ¹, Seyed Abbas Hosseini ^{1*}, Zahra Abedi ², Mohammad Sadegh Alipour ³

¹ Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Department of Environmental Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³ Department of Economic Statistics, Statistics Research Institute, Statistics Center of Iran, Tehran, Iran.

Corresponding Author email: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 24 Jan 2025

Revised: 10 Mar 2025

Accepted: 21 Apr 2025

Published: 23 Apr 2025

Extended Abstract

Introduction

Water resource constraints have transformed the economic evaluation of water productivity into a critical issue. Among various metrics, the water footprint (WF) has emerged as one of the most important indicators for assessing water use efficiency from an economic perspective. This study examines changes in Iran's water footprint across agricultural, industrial, and service sectors for the years 2001, 2011, and 2016 using an input-output model. Given Iran's arid and semi-arid climate coupled with unsustainable water consumption patterns, analyzing WF trends is essential for future policymaking. Results indicate that Iran's total WF increased from 94,311.2 million m³ in 2001 to 120,483.3 million m³ in 2016, with the agricultural sector accounting for over 90% of the national WF. Analysis of virtual water trade reveals Iran's status as a net virtual water importer due to higher imports than exports during this period. The Falkenmark index declined from 2,678 m³/capita (2001) to 1,697 m³/capita (2016), while the UN water stress index increased from 53.8% to 88.8%, signaling severe water crisis conditions. These findings underscore the urgent need for sustainable water resource management strategies.

Materials and Methods

This research employed symmetric input-output tables (product-by-product) for 2001, 2011, and 2016 obtained from the Iranian Statistical Center. Sectoral water consumption data for agriculture, industry, and services were collected from the Iran Water Resources Management Company and the Economic Accounts Office. A top-down input-output approach was adopted for WF calculation, where direct water coefficients were derived by dividing sectoral water consumption by production output. The total water requirement matrix was then obtained by multiplying the diagonalized direct water coefficient matrix with the Leontief inverse matrix. Internal WF was calculated by multiplying the water multiplier matrix with the final demand matrix. For imported WF estimation, the study assumed that production technologies of imports were identical to domestic production. Virtual water trade balance was determined by subtracting exported virtual water from imported virtual water. Additionally, two water scarcity indicators were applied: the Falkenmark indicator (renewable water resources per capita) and the UN water stress index (annual withdrawals as percentage of renewable resources). Study limitations included unavailability of post-2016 input-output tables and inconsistencies in water consumption data recording across different institutions.

Results and Discussion

Sectoral WF analysis revealed that agriculture dominated Iran's water consumption, maintaining approximately 94% share in 2001 and 95% in 2016. The agricultural WF grew from 88,579.3 million m³ (2001) to 114,457.4 million m³

(2016), indicating substantial water use intensification. Within industry, chemical and pharmaceutical production accounted for the highest WF, while oil and gas sectors showed declining WF trends. The services sector exhibited maximum WF in electricity, water, and gas utilities. Virtual water trade analysis confirmed Iran's persistent net importer status throughout the study period, with the trade deficit expanding from 698 million m³ (2001) to 7,127.8 million m³ (2016), reflecting growing external water dependence. Agricultural products like wheat and barley constituted major virtual water imports, while fish and fishery products occasionally featured as exports. The Falkenmark index demonstrated consistent decline from 2,678 m³/capita (2001) to 1,697 m³/capita (2016), indicating critical reduction in renewable water availability per capita. Concurrently, the UN water stress index escalated from 53.8% to 88.8%, confirming severe water crisis conditions according to international benchmarks. Comparative analysis with previous studies revealed discrepancies with Tafazzoli (2013) which reported Iran as net virtual water exporter in 2006, potentially attributable to methodological differences or shifting trade patterns. However, the findings aligned with Zarei (2016) which identified Iran as net importer in 2011.

Conclusion

The study findings paint a concerning picture of Iran's water resource status. The simultaneous growth of national WF and decline of renewable water resources necessitates immediate action toward sustainable water management. The agricultural sector, as the dominant water consumer, requires fundamental reforms in cropping patterns and irrigation efficiency. Expanding virtual water imports, while temporarily alleviating domestic pressure, may threaten long-term water and food security by increasing external dependencies. Water productivity improvements in industrial and service sectors must become policy priorities. The critical water scarcity status confirmed by both Falkenmark and UN indicators demands transformative changes in water governance approaches. Policy recommendations include: (1) implementing water-saving agricultural technologies and crop optimization, (2) promoting water-efficient industrial processes, (3) developing sustainable trade policies that consider virtual water flows, and (4) establishing integrated water monitoring systems across all sectors to enhance data reliability for future analyses. This research demonstrates that without urgent interventions, Iran will face severe challenges in maintaining water security. The findings provide crucial evidence for policymakers to develop comprehensive strategies addressing both supply-side and demand-side water management, with particular emphasis on the water-food-energy nexus in national development planning.

Keywords: Input-output analysis, Virtual water, Water footprint, Water trade

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

Elmira Tarvirdizadeh: Writing, Methodology, Investigation & Data Collection, Software, Analysis; **Seyed Abbas Hosseini:** Writing, Editing, Methodology, and Validation; **Zahra Abedi:** Supervision, Methodology, Software, and Data Analysis; **Mohammad Sadegh Alipour:** Supervision, Text Editing, Data Collection & Completion.

Citation: Tarvirdizadeh, E., Hosseini, S. A., Abedi, Z., & Alipour, M. S. (2024). Comparison of water footprint trends in different products of Iran's economic sectors. *Technical Strategies in Water Systems*, 2(4), 285-303.

<https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1197339>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی تغییرات روند ردپای آب در محصولات مختلف بخش های اقتصادی ایران

المیرا تاروردی زاده^۱، سید عباس حسینی^{۱*}، زهرا عابدی^۲، محمد صادق علی پور^۳

۱. دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمدها، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳. دانشکده آمار اقتصاد، مرکز تحقیقات آمار ایران، تهران، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۲/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۵

چکیده

امروزه با محدودیت منابع آب، بررسی اقتصادی بهره‌وری آب از اهمیت بالایی برخوردار است. در این بین ردپای آب یکی از مهم‌ترین مسائلی است که می‌توان آن را از نظر اقتصادی بررسی نمود. لذا پژوهش حاضر تغییرات ردپای آب در ایران را برای سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ با استفاده از مدل اقتصادی داده- ستانده مورد بررسی قرار داده است. این پژوهش، بر اساس مدل داده- ستانده، رویکرد از بالا به پایین به سنجش و بررسی مصرف آب در بخش‌های اقتصادی کشور ایران پرداخته است. برای بررسی تکمیلی از شاخص‌های مختلفی از جمله فالکن مارک و شاخص سازمان ملل در بررسی ردپای آب استفاده شد. نتایج محاسبات ردپای آب نشان داد که مقدار ردپای کل در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ به ترتیب ۹۴۳۱۱/۲، ۱۰۴۶۸۹/۶ و ۱۲۰۴۸۳/۳ میلیون مترمکعب بوده است. در بین بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات، بخش کشاورزی با مقادیر ردپای ۸۸۵۷۹/۳، ۹۸۲۴۳/۶ و ۱۱۴۴۵۷/۴ میلیون مترمکعب برای سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ بیشترین ردپای آب را داشته است. مقایسه مقادیر ردپای آب نشان داد که مقدار ردپای وارداتی از ردپای صادراتی بیشتر بوده است. بررسی تجارت آب مجازی کشور نشان داد ایران به دلیل واردات محصولات بیشتر از صادرات، طی سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۵ واردکننده خالص آب مجازی بوده است. شاخص فالکن مارک برای سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ به ترتیب ۲۶۷۸، ۱۹۴۵ و ۱۶۹۷/۸۱ مترمکعب محاسبه شد. در نهایت شاخص سازمان ملل برای سال‌های مذکور به ترتیب ۵۳/۸، ۷۱/۶ و ۸۸/۸ درصد محاسبه شد، که نشان از ورود ایران به بحران آبی دارد. در حالت کلی نتایج حاکی از وضعیت نگران‌کننده کشور از لحاظ آب و منابع آبی است و نیاز است تا مدیران و مسئولان بخش‌های مختلف کشور اهتمام کامل در توجه به این مهم داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل داده - ستانده، آب مجازی، ردپای آب، تجارت آب

استناد: تاروردی زاده، ا.، حسینی، س. ع.، عابدی، ز. و علی پور، م. ص. (۱۴۰۳). مقایسه روند ردپای آب در محصولات مختلف بخش‌های اقتصادی ایران. راهبردهای فنی در سامانه های آبی، ۲(۴): ۲۸۵-۳۰۳. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1197339>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک اغلب مسئله بحث برانگیزی است، تا حدی که برخی از کارشناسان منابع آب چالش های این بخش را به کمبود فیزیکی آب مرتبط ندانسته و دلیل اصلی را نتیجه سوء مدیریت در این بخش می دانند. در سال های اخیر مفهوم آب مجازی در ترکیب با شاخص ردپای آب، با پیوند طیف وسیعی از بخش های مصرف کننده آب، چارچوب جدیدی با پتانسیل بالا در زمینه مدیریت بهینه منابع و با در نظر داشتن الگوی تولید، مصرف، تبادلات درون مرزی و برون مرزی کالا ارائه نموده اند. لذا کاربردهای شاخص ردپا در سیاست گذاری های بخش آب در سطوح مختلف قابل تعریف و طبقه بندی است.

مفهوم ردپای آب (WF^1) اولین بار توسط هوکسترا^۲ در سال ۲۰۰۲ میلادی مطرح شد که از آن به عنوان ابزاری قوی برای نشان دادن تأثیرات ملت ها بر منابع طبیعی آب، بهره برداری می شود. ردپای آب؛ میزان برداشت انسان از منابع آب شیرین جهان را برآورد می کند (Hoekstra, 2007). ردپای آب نه تنها استفاده مستقیم از آب شیرین توسط مصرف کنندگان بلکه استفاده غیرمستقیم آن را نیز تجزیه و تحلیل می کند. پایداری استفاده از آب را می توان با مقایسه ردپای آب با آب موجود، با در نظر گرفتن الزامات جریان محیطی ارزیابی کرد (Hoekstra et al. 2011). مفهوم آب مجازی نیز ارتباط نزدیکی با مفهوم ردپای آب دارد. در واقع، آب موجود در محصولات و خدمات، به عنوان آب مجازی شناخته می شود (Chapagain & Hoekstra, 2004). مطالعات هوکسترا در سال ۲۰۱۷ نشان داد که ترکیب مصرف آب در داخل کشور با واردات خالص آب مجازی، نشان دهنده مقدار آب مصرفی توسط مردم آن کشور است. مطالعات انجام شده نشان می دهد که ردپای آب به مقدار مصرف (بسته به درآمد ناخالص داخلی)، الگوی مصرف (میزان و ترکیب مصرف فرآورده های کشاورزی و دامی)، اقلیم (شرایط بیولوژیکی رشد و تولید کشاورزی و دام پروری)، میزان تولیدات و واردات کالا و فناوری کشت و بهره وری کشاورزی در استفاده از منابع آب بستگی دارد (Hoekstra, 2017). در سال ۲۰۰۴ متوسط ردپای آب در جهان ۱۶۴۰ مترمکعب در سال به ازای هر نفر و ردپای آب در ایران ۱۲۴۰ مترمکعب در سال به ازای هر نفر بوده است (Chapagain & Hoekstra, 2004). ایالات متحده با ۲۴۸۰ مترمکعب در سال به ازای هر نفر، بیشترین و چین با ۷۰۰ مترمکعب در سال به ازای هر نفر کمترین متوسط ردپای آب در جهان را دارا بوده اند (Chapagain & Hoekstra, 2004). برنامه ریزی کلان بخش منابع آب، بخصوص کشورهایی که با محدودیت منابع آب مواجه هستند، بدون در نظر داشتن مفهوم ردپای آب و آب مجازی و سنجش شاخص ردپای آب (که ارزیابی کمی مربوط به وضع موجود را نشان می دهد)، از جامعیت قابل قبول متناسب با نیازهای امروزی مدیریت و برنامه ریزی منابع آب برخوردار نخواهد بود (Office of Sustainable Development, 2015). در کشوری مانند ایران که با کمبود منابع آب مواجه بوده و اکنون در مرحله بحران آب می باشد، تعیین مقدار حداقل ردپای آب در راستای دستیابی به پایداری در بهره برداری از منابع آب، ضروری می نماید. برای مطالعه ردپای آب، به طور کلی، دو روش موسوم به روش «تولید درخت» و «روش داده-ستانده» وجود دارد. روش تولید درخت به هنگام محاسبه محتوای آب مجازی محصولات، معمولاً با داده های اقلیمی ترکیب می شود (Deng et al., 2016). در مقابل، در رویکرد داده-ستانده از داده های مصرف آب و جداول داده - ستانده برای محاسبه ضریب مستقیم آب و ضریب فزاینده آب برای هر منطقه استفاده می شود. در ادامه می توان مقدار ردپای آب را با ضرب ضریب فزاینده آب در حجم مصرف نهایی در منطقه به دست آورد (Feng et al., 2012; Chen & Chen 2013; Wang et al. 2013; Zhang & Anadon 2014). مدل داده - ستانده، به عنوان یک رویکرد از بالا به پایین، به طور گسترده به عنوان یک ابزار مؤثر برای ارزیابی جریان منابع طبیعی استفاده می شود (Tian et al. 2018). این امر به

¹ Water Footprint² Hoekstra

ویژه در مناطق خشک با سطوح بالای کمبود آب از اهمیت بالایی برخوردار است. مزیت استفاده از رویکرد بالا به پایین در روش داده- ستانده در آن است، که کل زنجیره را در بر می‌گیرد. این دلیل اصلی استفاده از رویکرد بالا به پایین در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی است (Feng et al. 2012). بنابراین، امکان کمی سازی محتوای آب مجازی محصولات و خدمات مختلف در اقتصاد یک منطقه را فراهم می‌کند. این مدل برای ارزیابی تجارت آب در مقیاس منطقه‌ای (Dietzenbacher & Velázquez 2013; Zhang & Anadon 2014; Guo & Shen 2007; Zhang et al. 2010; Dong et al. 2013; Cazcarro et al. 2013) و بین‌المللی (Yu et al. 2010; Chen & Chen 2013; Lenzen et al. 2013 White et al. 2018) صرفاً از نقطه نظر پایداری استفاده شده است.

عمده پژوهش‌های انجام شده در کشور بر برآورد ردپای آب یک یا چند محصول استراتژیک کشاورزی نظیر برنج، گندم، پسته و محصولات مشابه در یک استان یا منطقه متمرکز شده است (Oveisi et al., 2019; Rastegaripour et al., 2021; Mobaraki & Mobaraki, 2021; Bohlolzadeh et al., 2021; Piri & Sarani, 2020; Dehghanpir et al. 2024; Abdollahzadeh Kahrizi et al., 2023;). در پاره‌ای از تحقیقات نیز محققان داخلی تلاش نموده‌اند ردپای آب یک بخش از اقتصاد کشور را با استفاده از رهیافت‌های حسابداری و با بهره‌گیری از جداول داده- ستانده منطقه‌ای یا ملی یک سال مورد مطالعه قرار دهند (Karbasi & Rafiei, 2014; Tafazzoli, 2013; Nasrollahi & Zarei 2018; Najafi et al., 2022).

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود، همواره با مشکلات آبی مواجه بوده است. در کنار این موارد، میزان بارش سالیانه از ۵۰ میلی‌متر برای مناطق جنوب شرقی و مرکزی تا ۱۶۰۰ میلی‌متر در مناطق شمالی متغیر است. همچنین مقدار تبخیر از تشت بین ۱۵۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر است. در مقایسه با میانگین جهانی، ایران حدود یک‌سوم میانگین جهانی بارندگی و تبخیر سالانه را حدود سه برابر میانگین جهانی دارد. همچنین توزیع بارش در مناطق مختلف آن بسیار ناهمگن است و اغلب بارش‌ها در مناطق کوهستانی رخ می‌دهد. علاوه بر این، تطابق زمانی ضعیفی بین دوره‌های بارندگی و فصول تولید کشاورزی در دشت وجود دارد. بنابراین لازم است از طریق ابزارهای مختلف برای جلوگیری از بحران کم‌آبی در ایران اقدام شود (Central Bank of Iran, 2014). از این رو، شناخت ردپای آب در ایران و به‌ویژه تغییرات آن طی بیش از یک دهه، نقش اساسی در تصمیم‌گیری‌هایی دارد که می‌تواند بر مشکلات آب در این کشور فائق آید. لذا در این تحقیق سعی شده است چارچوبی برای محاسبه ردپای آب ملی^۱ (NWF) با استفاده از تحلیل جدول داده-ستانده برای سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ در ایران ارائه شود.

با توجه به چالش‌های موجود در انتشار جداول داده-ستانده و عدم انتشار آن‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه، «رشد تغییرات ردپای ایران» به عنوان یک کشور نیمه خشک هرگز در مطالعات موردی قبلی مورد بحث قرار نگرفته است. این مطالعه به منظور تحلیل منابع و مصارف آب در ایران به عنوان کشوری پرتنش در یک دوره زمانی ۱۵ ساله انجام شده است و نتایج آن نشان دهنده روند تغییرات و نقش مدیریت در بخش منابع آب است. در این تحقیق تلاش شده است؛ روند تغییرات آب تجدیدپذیر استخراج شده از بیلان آب در کنار ردپای محاسبه شده بررسی شود. کمبود آب به دلیل استفاده از بخش قابل توجهی از منابع آبی برای تولید اقتصادی، به عنوان یک موضوع عمده در ایران مطرح شده است. تجزیه و تحلیل کامل مصرف آب در بخش‌های مختلف و تخمین

^۱ National Water Footprint

دقیق ردپای آب با تعیین سهم تجارت آب مجازی نیز مورد توجه است که بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش برای اولین بار با نگاه کلان به ظرفیت زیستی آب کشور تلاش شده است که شکاف آب مورد توجه قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مطالعاتی

کشور ایران در طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۲۶ دقیقه و ۲۲/۷ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۱ دقیقه و ۱۵/۷۹ ثانیه قرار گرفته است. مساحت ایران ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع است و دارای ۳۱ استان است. مطابق برآوردهای انجام شده، ایران در دهه‌های آینده با افزایش ۲/۶ درجه سانتی‌گراد میانگین دما و کاهش ۳۵ درصدی بارندگی مواجه خواهد شد (Auffhammer, 2022). در یک دوره ۴۵ ساله منتهی به سال آبی ۱۳۸۹-۹۰ نسبت به دوره ۴۰ ساله منتهی به سال آبی ۱۳۸۴-۸۵، حجم بارندگی ۴/۹۶ درصد کاهش، حجم تبخیر و تعرق واقعی ۱/۲ درصد افزایش و حجم آب تجدید پذیر تولیدشده در کشور ۱۸/۰۳ درصد کاهش یافته است. این میزان کاهش ناشی از کاهش باران، افزایش دما و تغییر رویکرد در فرایند تهیه بیلان در دوره اخیر نسبت به دوره قبل می‌باشد (Office of Basic Studies of Iranian Water Resources, 2016). بر اساس اطلاعات مربوط به ۱۰۴ ایستگاه باران‌سنجی مبنای وزارت نیرو و استفاده از شبکه تیسن کشوری ایستگاه‌های مذکور، حجم بارش در ۱۵ سال منتهی به سال آبی ۱۳۹۴-۹۵، ۳۶۴/۷ میلیارد مترمکعب می‌باشد. در این دوره میزان تبخیر و تعرق محاسبه نشده است اما با فرض ۷۲/۳ درصد تبخیر و تعرق واقعی (منتج از بیلان منتهی به ۱۳۸۹-۹۰)، حجم آب تجدید پذیر کشور ۱۰۱/۰۲ میلیارد مترمکعب برآورد شده است (Bahrami Mehneh, 2017).

هم‌زمان با رشد جمعیت و کاهش منابع آب تجدید پذیر، روند شاخص سرانه این منابع نیز در دهه‌های اخیر، نشان‌دهنده کاهش منظم آن است، به‌طوری‌که مقدار آن از ۶۹۰۰ مترمکعب در سال ۱۳۳۵ به ۲۱۶۵ مترمکعب در سال ۱۳۷۶، ۱۴۶۲ مترمکعب در سال ۱۳۹۰ و ۱۲۹۴ مترمکعب در سال ۱۳۹۵ رسیده است. همچنین با توجه به جمعیت پیش‌بینی شده برای کشور در افق سال ۱۴۲۰ (حدود ۱۰۶ میلیون نفر، مطالعات بهنگام سازی طرح جامع آب کشور) و با فرض ۱۰۳ میلیارد مترمکعب میزان آب تجدید پذیر درازمدت، میزان سرانه به ۹۷۶ مترمکعب در سال خواهد رسید. به این ترتیب طی حدود ۶۰ سال سرانه آب تجدید پذیر از محدوده نرمال بدون تنش به محدوده تنش آبی و سپس به سمت محدوده کمیابی آب تغییر خواهد کرد.

۲-۲- روش کار

فلوچارت انجام تحقیق در شکل (۱) ارائه شده است. در مرحله اول جدول داده-ستانده برای سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ از پایگاه اینترنتی مرکز آمار ایران^۱ دریافت شد. این تحقیق می‌توانست به نتایج جامع‌تری از مقایسه سال‌ها برسد که به دلیل نبود اطلاعات این مهم میسر نشد. لازم به ذکر است که نویسندگان سعی کرده‌اند از تمامی جداول داده-ستانده موجود برای محاسبات ردپای آب و تجارت آب مجازی استفاده کنند، اما به دلیل مشکلات تولید و انتشار این جداول توسط مرکز آمار ایران و انتشار دیرهنگام آن‌ها، دسترسی به جداول سال‌های اخیر ممکن نبود. جداول داده-ستانده مجموعه کاملی از اساسی‌ترین اطلاعات در مورد اقتصاد یک کشور را ارائه می‌دهد و برای تهیه حساب‌های ملی حیاتی است. مرجع اصلی تهیه این جداول مرکز آمار ایران

^۱ <https://www.amar.org.ir>

می‌باشد. اولین تلاش برای تهیه چنین جداول مربوط به سال ۱۳۸۰ است، بنابراین جداول داده-ستانده قبل از سال ۱۳۸۰ ارائه نشده است، همچنین ایران به دلیل پیچیدگی و زمان بر بودن تولید این جداول، هنوز جدولی را پس از سال ۱۳۹۵ به‌طور رسمی منتشر نکرده است. علاوه بر این، عدم ثبت منظم داده‌های مصرف آب و یافتن داده‌های معتبر به دلیل وجود نهادهای مختلف مدیریت آب، محدودیت‌هایی را برای تحلیل کامل ردپای آب در سال‌های اخیر ایجاد کرده است.

جداول داده - ستانده مورد استفاده در این تحقیق جداول متقارن اقتصاد ایران هستند. داده‌های تکمیلی مصرف آب در دوره مورد مطالعه برای بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات از شرکت مدیریت منابع آب ایران و دفتر حسابداری اقتصادی اخذ شده است. پارامترهایی نظیر ضریب آب، حجم آب مصرفی هر محصول بر حسب میلیون مترمکعب با ضرب کردن ضریب آب در حجم آب مصرفی آن بخش از اقتصاد (مانند مصرف محصولات زراعی از مصرف کل کشاورزی)، ضریب مستقیم آب برای هر محصول محاسبه شد. در مرحله بعد، ردپای آب در محصولات وارداتی و صادراتی محاسبه گردید. سپس در ادامه آب مجازی محاسبه شده در سه سال مذکور مورد محاسبه و تحلیل قرار گرفت. آنچه در شکل (۱) قابل مشاهده است روند انجام این تحقیق را نشان می‌دهد.

شکل ۱- فلوچارت انجام تحقیق حاضر

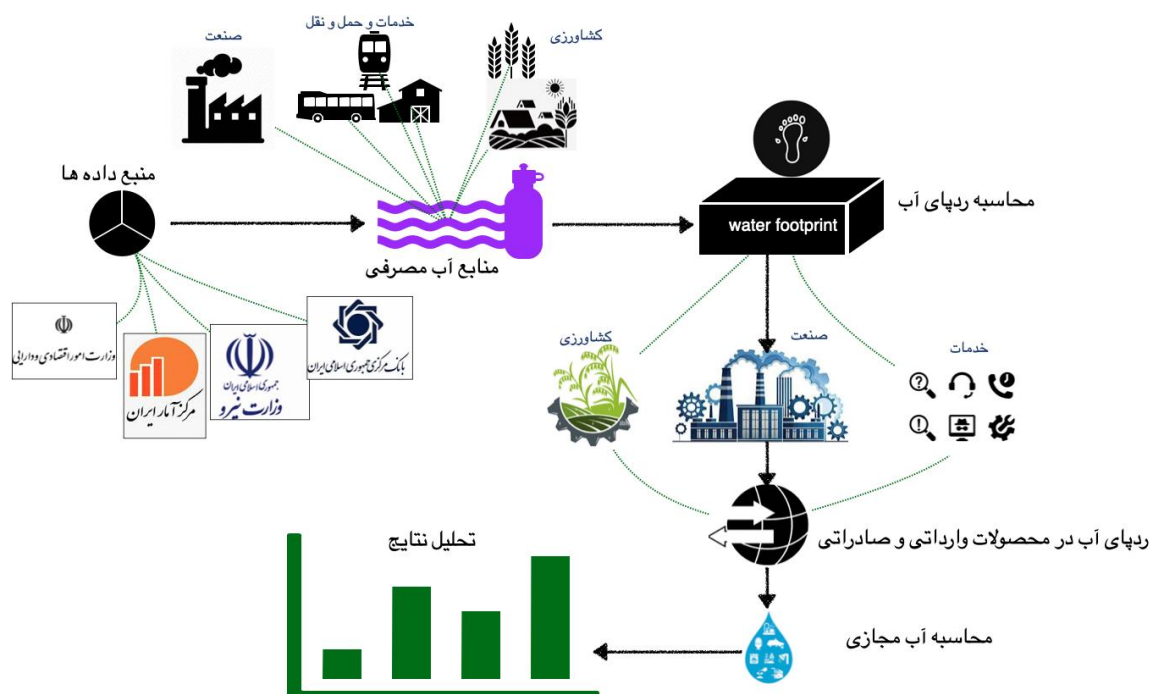


Fig 1. Flowchart of the present research

۲-۲-۱- روابط حاکم بر محاسبه ردپای آب

هدف تحقیق حاضر ارزیابی وضعیت مصرف آب در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران با رویکرد ارزیابی ردپای آب در دوره ۱۵ ساله با مقایسه آن با شاخص‌های فالکن مارک و سازمان ملل متحد است. هوکسترا و هانگ مفهوم ردپای را معرفی کردند که به عنوان

مجموع مصرف آب داخلی و خالص تراز تجاری آب مجازی^۱ VWT^۱ وارد شده به یک کشور تعریف می‌شود (Hoekstra & Hung, 2003). بر اساس این مفهوم، ردپای آب به طور خاص به میزان آب مصرفی اشاره دارد. این شاخص شامل مصرف آب در داخل و خارج از یک کشور است، اما با مصرف نهایی محصولات و خدمات در آن کشور مرتبط است (Hoekstra et al., 2011). شاخص ردپای آب ملی^۲ از دو بخش ردپای آب داخلی (WF_i)^۳ و ردپای آب خارجی (WF_e)^۴ تشکیل شده است. ردپای آب ملی برای یک کشور از رابطه (۱) به دست می‌آید.

ردپای آب ملی برای یک کشور معمولاً با کم کردن مقدار آب مجازی خروجی از کشور (LWF) از کل مصرف آب آن (TWF) به اضافه مقدار آب مجازی ورودی به آن (EWF) محاسبه می‌شود.

به عبارت دیگر؛ ردپای آب مصرفی (DWF) با کم کردن LWF از TWF به دست می‌آید که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$NWF = WF_i + WF_e = (TWF - LWF) + EWF = DWF + EWF \quad (۱)$$

$$DWF = AWF + IWF + SWF - LWF \quad (۲)$$

$$EWF = VWI - VWF_{re-export} \quad (۳)$$

در رابطه (۲)، (AWF) حجم آب مصرفی از منابع داخلی شامل آب مصرفی در ردپای آب کشاورزی، ردپای آب صنعت (IWF) و ردپای آب خدماتی (SWF) منهای آب مجازی خارج شده در قالب صادرات (LWF) است.

EWF به حجم سالانه منابع آب سایر کشورها برای تولید کالا و خدمات برای جمعیت داخلی اشاره دارد. EWF برابر با واردات آب مجازی (VWI) منهای حجم صادرات آب مجازی به سایر کشورها ناشی از صادرات مجدد محصولات وارداتی (VWE_{re-export}) است.

و در نهایت سرانه ردپای آب ملی از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$WF_{pc} = \frac{NWF}{TP} \quad (۴)$$

که در آن NWF ردپای آب ملی، TP^۵ جمعیت کل کشور و WF_{pc} نیز سرانه ردپای آب ملی است.

مقدار جمعیت کشور در سال‌های مورد مطالعه از مرکز آمار ایران اخذ گردیده است.

مقایسه ظرفیت آب تجدید پذیر با ردپای آب ملی (NWF) در سال‌های مورد مطالعه به منظور بررسی بهره‌وری و مدیریت منابع آب تجدیدپذیر انجام شده است. در این تحقیق از دو شاخص فالکن مارک و شاخص تنش آبی سازمان ملل برای ارزیابی برداشت از منابع آبی استفاده شده است. طبقه‌بندی این شاخص در جدول (۱) ارائه شده است.

^۱ Virtual Water Trade

^۲ National WF

^۳ Internal WF

^۴ External WF

^۵ Total Population

جدول ۱- طبقه‌بندی وضعیت منابع آب بر اساس شاخص فالکن مارک و شاخص سازمان ملل (Talebi and Karimi, 2023)

Table 1. Classification of water resources status based on the Falkenmark index (Talebi and Karimi, 2023)

شاخص سازمان ملل		شاخص فالکن مارک	
وضعیت	جمع برداشت (درصد)	وضعیت	سرانه آبی (مترمکعب در سال)
بحران شدید	بیشتر از ۴۰	بدون مشکل	بیش از ۱۷۰۰
بحران متوسط تا شدید	۲۰-۴۰	با مشکل کمبود آب	۱۰۰۰-۱۷۰۰
بحران آب در حد متعادل	۱۰-۲۰	دچار کمبود آب	۵۰۰-۱۰۰۰
بحران کم	کمتر از ۱۰	دچار کمبود شدید آب	کمتر از ۵۰۰

شاخص فالکن مارک برای محاسبه مقدار سرانه در دسترس بودن منابع آب در سطح کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص تنش آبی سازمان ملل، کمبود آب را بر حسب مجموع میزان برداشت سالانه به صورت درصدی از کل منابع آب سالانه معرفی می‌کند.

مطابق جدول (۱) در شاخص فالکن مارک در صورتی که سرانه آب کمتر از ۵۰۰ متر مکعب در سال باشد، بیانگر کمبود شدید آب است. در حالی که بر پایه شاخص سازمان ملل که به صورت درصد بیان می‌شود، اگر بیش از ۴۰ درصد باشد بحرانی شدید کم آبی اتفاق افتاده است.

۲-۲-۲- ردپای آب ملی براساس رویکرد داده - ستانده

جدول داده- ستانده ایران مبادله سالانه کالا و خدمات را در بین بخش‌های مختلف اقتصاد ایران به واحد پولی نشان می‌دهد. به منظور محاسبه شاخص ردپای آب ملی (NWF)، از روش مورد استفاده توسط (Zhao et al., 2009) استفاده شده است. ساختار جدول داده-ستانده متقارن اقتصاد ایران (محصول در محصول) در جدول (۲) به صورت جدول استاندارد ارائه شده است. ردیفی با عنوان مصرف آب و خدمات مربوط (WJ) در جدول (۲) مشاهده می‌شود.

ابتدا جدول متقارن اقتصاد ایران به دو بخش «کشاورزی» و «صنعت و خدمات» تفکیک و میزان آب مصرفی برای هر دو بخش محاسبه گردید. در ادامه پارامترهایی نظیر ضریب آب، حجم آب مصرفی هر محصول بر حسب میلیون مترمکعب با ضرب کردن ضریب آب در حجم آب مصرفی آن بخش از اقتصاد (مانند مصرف محصولات زراعی از مصرف کل کشاورزی)، ضریب مستقیم آب برای هر محصول محاسبه شد. در مرحله بعد ماتریس «ضرایب فزاینده آب» از حاصل ضرب «ماتریس قطری ضرایب مستقیم آب» در «ماتریس فزاینده تولید یا ماتریس معکوس لئونتیف» به دست آمد و از ضرب «ماتریس ضرایب فزاینده آب» در «ماتریس قطری تقاضای داخلی» ماتریس ردپای آب داخلی محاسبه گردید. مقدار ردپای آب هر محصول نیز از جدول متقارن اقتصاد ایران با ضرب کردن «ماتریس ردپای آب داخلی» در «ماتریس واحد» محاسبه شد. محاسبه ردپای آب مجازی وارداتی مطابق رابطه (۵) صورت گرفته است.

$$m_i = \sum_{j=1}^n m_{ij} + m_i^f + m_i^e \quad (5)$$

m_{ij} واردات از بخش i خارج از کشور به بخش j داخلی است، m_i^f واردات از بخش i خارج از کشور برای مصرف داخلی و m_i^e واردات از بخش i خارج از کشور برای استفاده در صادرات مجدد است.

جدول ۲- ساختار جدول داده - ستانده متقارن اقتصاد ایران

Table 2. Structure of the Iran Input – Output table

تولید ناخالص		تقاضای نهایی		استفاده متوسط	خروجی
		صادرات	مصرف داخلی		
x_i	e_i	f_i	x_{ij}	ورودی داخلی	ورودی‌های میانی
m_i	m_i^e	m_i^f	m_{ij}	واردات	
			c_j	مقدار افزوده	
			x_j	ستانده کل	
			w_j	آب و خدمات مربوط	

از آنجایی که واردات به یک کشور معمولاً از کشورها و مناطق مختلف در سراسر جهان با استفاده از فناوری‌های تولید مختلف انجام می‌شود (Wiedmann et al., 2007) و فناوری‌های تولید در کشورهای مختلف متفاوت است، لذا مانع از مدل‌سازی تفاوت‌ها توسط یک مدل داده-ستانده واحد می‌شود، برای حل این مشکل، این فرض پرکاربرد معرفی می‌شود که فرآیند و فناوری ساخت یک محصول وارداتی مشابه فرآیند تولید یک محصول داخلی است. این فرض با مفهوم آب مجازی وارداتی که توسط Renault (2003) تعریف شده بود، مخالف است، وی استدلال کرد که آب مجازی وارداتی با آب مصرف شده واقعی در محل تولید برابری نمی‌کند. با این حال، با پذیرش فرضیه فوق، با واردات محصولات و به تبع آن، واردات آب مجازی که در تولید آن محصول مورد استفاده قرار گرفته است، در مصرف آبی که در تولید داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، صرفه‌جویی می‌شود (Zhao et al., 2009). ردپای آب وارداتی مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$[m_i] = [\beta_{ij}] \hat{m}_{ij} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + [\beta_{ij}] \hat{m}_i^f \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

در این روش و بر اساس ساختار اقتصادی ایران، مقصدی برای صادرات مجدد واردات وجود ندارد. تفاوت میزان آب مجازی وارداتی با مقدار آب مجازی صادراتی نشان‌دهنده تراز تجاری آب مجازی یا خالص تجارت آب مجازی در کشور است. اگر ارزش آب مجازی صادراتی بیشتر از ارزش وارداتی باشد، کسری دارد و بالعکس.

در روابط ۷ و ۸: VWF_i ردپای آب مجازی است که از تفاضل δ_i (ردپای آب مجازی صادراتی) از m_i (ردپای آب مجازی وارداتی) حاصل می‌شود. بدیهی است که از مجموع ردپای آب مجازی بخش‌های مختلف، ردپای آب مجازی ملی ($NVWF^1$) حاصل می‌شود.

$$VWF_i = [m_i] - [\delta_i] \quad (7)$$

$$NVWF = \sum_{i=1}^n VWF_i \quad (8)$$

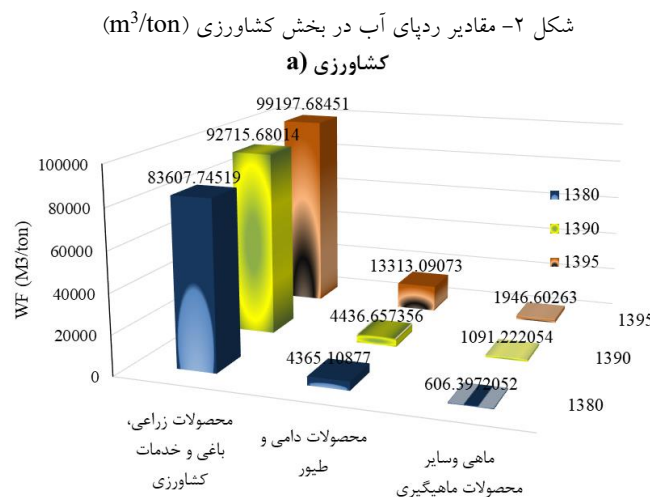
¹ National Virtual Water Footprint

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ردپای آب در بخش‌های مختلف اقتصادی

مقدار ردپای آب حاصل از محاسبات مشروح، برای بخش‌های مختلف اقتصادی در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس این جدول، بخش کشاورزی در سال ۱۳۸۰ با مقدار ردپای $88579/3$ میلیون مترمکعب تقریباً معادل ۹۴ درصد از ردپای کل بخش اقتصادی را به خود اختصاص داده است. در سال ۱۳۸۰، بخش خدمات با مقدار ردپای آب $4465/2$ میلیون مترمکعب، از بخش صنعت، در مصرف آب پیشی گرفته است. در طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ ردپای آب در دو بخش کشاورزی و صنعت به ترتیب $22/6$ و 46 درصد افزایش یافته است، در مقابل، این مقدار برای بخش خدمات، در حدود $18/5$ - درصد کاهش یافته است. نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که ایران به دلیل واردات محصولات، بیشتر از صادرات، طی سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۵ واردکننده خالص آب مجازی بوده است. تراز تجاری آب مجازی طی ۱۵ سال از 698 میلیون مترمکعب به $7127/8$ میلیون مترمکعب افزایش یافته است. در نهایت، سهم ردپای آب مجازی در ردپای آب بخش کشاورزی از $0/54$ درصد به بیش از 6 درصد بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ افزایش یافته است که بالاترین رشد در میان بخش‌ها به شمار می‌رود. با توجه به سهم عمده ردپای بخش کشاورزی در کل ردپای آب کشور، همین سهم از رشد سطح آب مجازی را می‌توان در ردپای کل کشور مشاهده کرد. روند تراز آب تجاری در بخش صنعت از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ به مقدار $2/04$ کاهشی بوده است. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌برداری از آب در بخش‌های مختلف به دلیل رشد جمعیت و اجرای طرح‌های توسعه افزایش یافته است. در مقایسه با سایر بخش‌ها، بخش صنعت بیشترین افزایش بهره‌برداری از آب را داشته است. این نشان‌دهنده میزان افزایش سرانه آب ملی است. لازم به ذکر است که روند کاهشی ردپای آب در بخش خدمات ممکن است اثر منفی بر توسعه پایدار داشته باشد.

در شکل‌های (۲) تا (۴) ردپای آب به تفکیک برای کشاورزی، صنعت و خدمات ارائه شده است. مطابق شکل (۲)، بیشترین مقدار ردپای محصولات کشاورزی، به بخش زراعی، باغی و خدمات کشاورزی اختصاص یافته است. ردپای آب برای محصولات کشاورزی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ افزایش یافته است. در سال ۱۳۹۵، ردپای محصولات زراعی، باغی و خدمات کشاورزی $99197/7$ میلیون مترمکعب بوده است.

Fig 2. Water footprint values in the agricultural sector (m^3/ton)

در بخش صنعت (شکل ۳)، بیشترین ردپای آب در بخش صنعت صرف تولید مواد شیمیایی و دارویی شده است، در مقابل مقدار ردپای آب برای نفت، گاز، محصولات معدنی و فرآورده‌های نفتی طی سال‌های ۱۳۸۰ الی ۱۳۹۵ از ۳۳۸/۴۷ به ۱۳۹/۴۲ میلیون مترمکعب کاهش یافته است.

شکل ۳- مقادیر ردپای آب در بخش صنعت (m^3/ton)

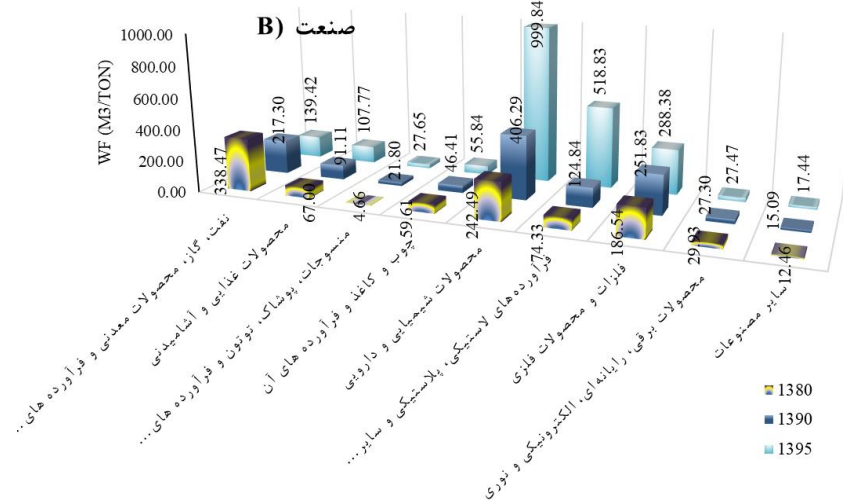


Fig 3. Water footprint values in the industrial sector (m^3/ton)

مطابق شکل (۴) نیز در هر سه دوره مورد بررسی، در بخش خدمات، بیشترین مقدار ردپای آب مربوط به (برق، آب، گاز و خدمات مربوطه) بوده است. مقدار ردپای آب در سال ۱۳۹۰ برای "محصولات برق، آب، گاز، فاضلاب و خدمات مربوط" ۳۴۲۴/۳ میلیون مترمکعب بوده است، که در بین محصولات بخش خدمات بیشترین مقدار بوده است. مقدار ردپای آب برای خدمات " عمده فروشی، خرده فروشی، تعمیر وسایل نقلیه و موتور، تعمیر رایانه و کالاهای شخصی و خانگی" از مقدار ۹۳۸/۹ در سال ۱۳۸۰ به ۴۱۶/۱ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۵ کاهش یافته است.

شکل ۴- مقادیر ردپای آب در بخش خدمات (m^3/ton)

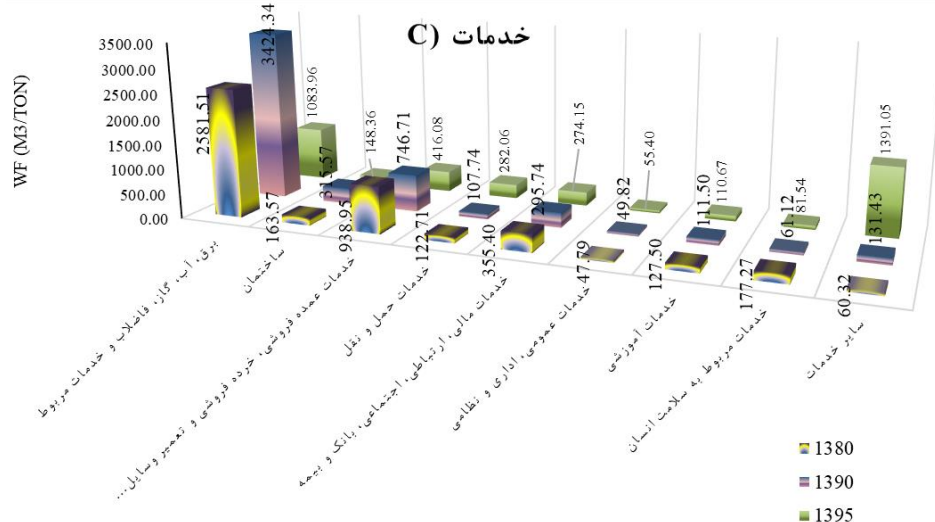


Fig 4. Water footprint values in the services sector (m^3/ton)

جدول ۳- مقادیر ردپای آب در بخش‌های اقتصادی (میلیون مترمکعب)

Table 3. Amounts of water footprint in the agricultural, industrial and service sectors (million cubic meters)

سال	بخش	ردپای تقاضای آب داخلی	ردپای آب صادراتی	ردپای آب وارداتی	ردپای کل	تراز آب مجازی
۱۳۸۰	کشاورزی	۸۸۰۹۶/۵	۷۳۹۴۹/۹	۷۸۷۷/۶	۸۸۵۷۹/۳	۴۸۲/۷
	صنعت	۱۰۵۱/۳	۸۳/۲	۲۱۱	۱۱۷۹/۱	۱۲۷/۸
	خدمات	۴۴۶۵/۲	۱۸۲/۹	۲۷۰/۵	۴۵۵۲/۸	۸۷/۶
	کل	۹۳۶۱۳	۷۶۶۱	۸۳۵۹/۱	۹۴۳۱۱/۲	۶۹۸/۱
۱۳۹۰	کشاورزی	۹۱۶۳۶/۶	۵۴۲۱	۱۲۰۲۸	۹۸۲۴۳/۶	۶۶۰/۷
	صنعت	۱۱۴۹	۱۳۹/۷	۱۹۲/۷	۱۲۰۲	۵۳
	خدمات	۵۱۵۰/۳	۲۴۸	۳۴۱/۶۳	۵۲۴۴	۹۳/۶
	کل	۹۷۹۳۵/۹	۵۸۰۸/۶	۱۲۵۶۲	۱۰۴۶۸۹/۶	۶۷۵۳/۶
۱۳۹۵	کشاورزی	۱۰۷۳۲۸/۸	۵۱۸۱/۱	۱۲۳۰۹/۷	۱۱۴۴۵۷/۴	۷۱۲۸/۵
	صنعت	۲۱۸۴/۷	۳۴۴/۹	۳۴۲/۸	۲۱۸۲/۶	-۲/۰۴
	خدمات	۳۸۴۲	۱۹۵/۷	۱۹۷	۳۸۴۳/۳	۱/۳
	کل	۱۱۳۳۵۵/۵	۵۷۲۱/۷	۱۲۸۴۹/۵	۱۲۰۴۸۳/۳	۷۱۲۷/۸

مقادیر جدول از محاسبات محققین حاصل شده است.

۳-۲- تجارت آب مجازی در بخش‌های مختلف اقتصادی کشور

نتایج تجارت آب مجازی برای محصولات کشاورزی، صنعت و خدمات کشور محاسبه و در شکل‌های (۵) تا (۷) ارائه شده است. بر اساس شکل (۵)، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ تقریباً ۶۵۰۰ میلیون مترمکعب تجارت آب مجازی افزایش داشته است. تجارت آب مجازی برای ماهی و سایر محصولات ماهیگیری در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ به ترتیب ۵۰/۱۵، -۲۸/۷۶ و -۳۵/۳۴ میلیون مترمکعب بوده و نشان از صادرات این محصول دارد. این اعداد نشان می‌دهد که صادرات در سال ۱۳۹۵ نسبت به ۱۳۹۰ افزایش و نسبت به ۱۳۸۰ کاهش یافته است.

شکل ۵- تجارت آب مجازی محصولات کشاورزی کشور (میلیون مترمکعب)

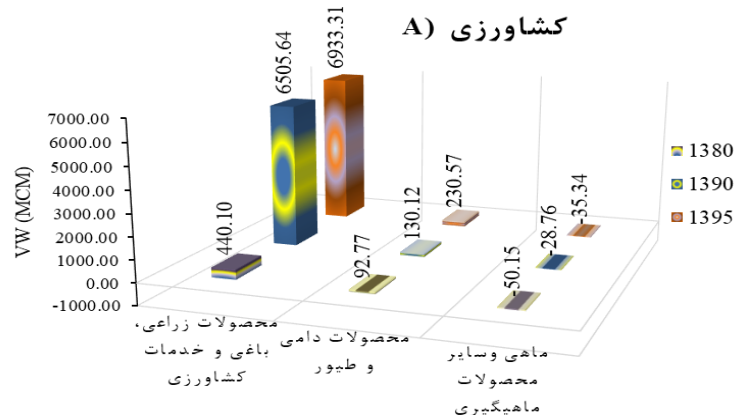
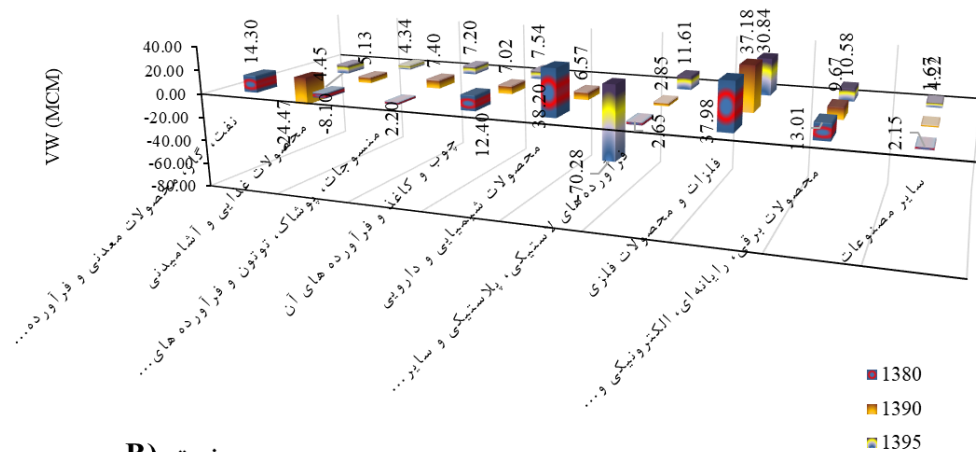


Fig 5. Virtual water trade of agricultural products in the country (million cubic meters)

تجارت آب مجازی در بخش خدمات کمتر از دو بخش کشاورزی و صنعت بوده و تنها در حوضه حمل‌ونقل ایران صادرکننده آب مجازی بوده است. مطابق شکل (۶)، صادرات آب مجازی نفت، گاز و غیره در دو دوره ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ به ترتیب ۲۴/۵- و ۸/۱- میلیون مترمکعب بوده که نسبت به دوره ۱۳۸۰ افزایش چشمگیری داشته است. مطابق شکل (۶)، ایران در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ وارد کننده آب مجازی در بخش محصولات شیمیایی و دارویی بوده است، در مقابل در سال ۱۳۹۵، با مقدار تجارت آب مجازی معادل ۷۰/۲۸- میلیون مترمکعب صادر کننده آن بوده است.

شکل ۶- تجارت آب مجازی صنعت کشور (میلیون مترمکعب)



B) صنعت

Fig 6. Virtual water trade of the country's industry (million cubic meters)

مطابق شکل (۷)، بیشترین تجارت آب مجازی در بخش خدمات طی دو دوره ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ رخ داده که در آن، ایران به ترتیب به مقدار ۴۸/۵ و ۷۸ میلیون مترمکعب تجارت آب مجازی داشته است.

شکل ۷- تجارت آب مجازی بخش خدمات کشور (میلیون مترمکعب)

C) خدمات

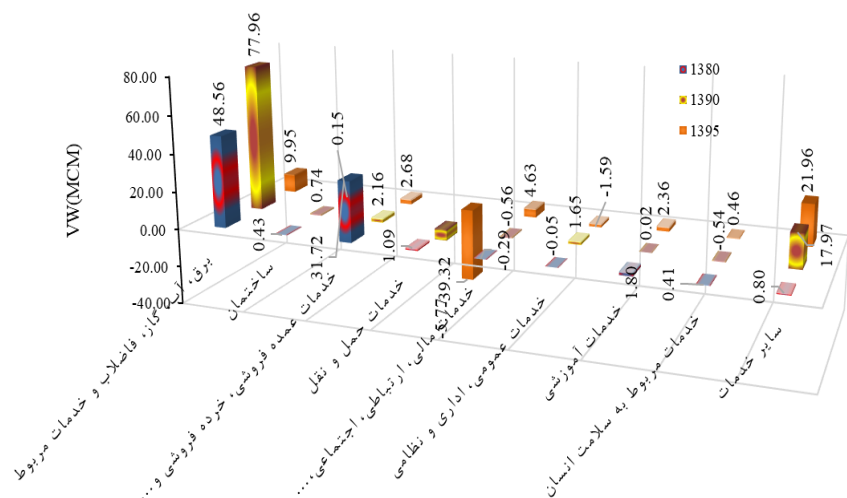


Fig 7. Virtual water trade in the country's services sector (million cubic meters)

۳-۳- مقایسه ظرفیت آب تجدید پذیر و رد پای آب ملی

در جدول (۴) مقادیر شاخص کمبود آب برای ایران محاسبه شده است. بر اساس جدول مذکور، در طی سال‌های ۱۳۸۰ الی ۱۳۹۵، سرانه آب قابل دسترس از ۲۶۸۷ به ۱۶۹۷ مترمکعب کاهش یافته است که نشان‌دهنده سرعت بسیار بالای ورود به منطقه کشورهای دارای تنش آبی است. محاسبات شاخص سازمان ملل نشان می‌دهد که این رقم طی ۱۵ سال از ۵۳/۸ درصد به ۸۸/۸ درصد رسیده است که نشان‌دهنده بحران شدید آب در این مدت است. شاخص فالکن مارک برای سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ به ترتیب ۲۶۷۸، ۱۹۴۵ و ۱۶۹۷/۸۱ مترمکعب بوده که با افزایش جمعیت کشور از ۶۵۲۷۵۶۳۵ نفر در سال ۱۳۸۰ به ۷۹۹۲۶۲۷۰ در سال ۱۳۹۵، سیر نزولی داشته است. در دو سال ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ این مقادیر بیشتر از ۱۷۰۰ بوده که نشان از "بدون مشکل بودن" از لحاظ منابع است. در هر صورت، مقدار این شاخص در سال ۱۳۹۵ در محدوده ۱۷۰۰ مترمکعب بوده که نشانه‌هایی از بحران آب نیز است. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، ایران با مصرف ناپایدار آب مواجه است، به عبارت دیگر مصرف آب در حال افزایش است، درحالی‌که منابع آب تجدید پذیر همواره رو به کاهش بوده است که نشان‌دهنده شرایط بحرانی استفاده ناپایدار از منابع آبی در دهه اخیر است.

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های کمبود آب

Table 4. Values of water shortage indicators

سال	NWF (MCM)	جمعیت	ظرفیت انرژی تجدید پذیر (MCM)	WF _{pc} (m ³)	شاخص فالکن مارک (m ³)	شاخص سازمان ملل (%)
۱۳۸۰	۹۴۳۱۱/۰۹	۶۵۲۷۵۶۳۵	۱۷۵/۴	۱۴۴۰	۲۶۸۷	۵۳/۸
۱۳۹۰	۱۰۴۶۸۹/۵	۷۵۱۴۹۶۶۹	۱۴۶/۲	۱۳۹۳	۱۹۴۵	۷۱/۶
۱۳۹۵	۱۲۰۴۸۳/۳	۷۹۹۲۶۲۷۰	۱۳۵/۷	۱۵۰۷	۱۶۹۷/۸۱	۸۸/۸

مقادیر جدول از محاسبات محققین حاصل شده است.

۳-۴- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیق‌های مشابه

در این پژوهش، تغییرات رد پای آب در ایران برای سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ با استفاده از مدل اقتصادی داده-ستانده بر اساس رویکرد از بالا به پایین بررسی شده است. یافته‌های این مطالعه نشان داد که در بخش‌های مختلف اقتصادی، رد پای آب افزایش یافته است. بر اساس نتایج این تحقیق، مقادیر رد پای ملی آب برای دوره‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ به ترتیب ۸۸۵۷۹/۳، ۹۸۲۴۳/۶ و ۱۱۴۴۵۷/۴ میلیون مترمکعب به دست آمد. این روند نشان می‌دهد که ایران در طول سال‌های مطالعه، واردات آب مجازی داشته است، علاوه بر این، تراز تجاری آب مجازی طی این سال‌ها افزایش یافته است. شایان ذکر است که نتایج این تحقیق در تناقض با نتایج تحقیق (Tafazzoli, 2013) است. (Tafazzoli, 2013) در تحقیق خود از رویکرد داده-ستانده برای این منظور استفاده کرد. مطابق نتایج تحقیق وی، ایران در سال ۱۳۸۵ دارای تراز تجاری آب مجازی (واردات به میزان ۳۳۴۰ میلیون مترمکعب بوده است، که این نشان می‌دهد ایران صادر کننده آب مجازی بوده است. در تحقیق دیگری که توسط (Zarei, 2016) انجام شد، ۲۱/۶ درصد از کل رد پای آب از نوع وارداتی بوده است، هم‌چنین ایران برای سال ۱۳۹۰ حدود ۸۱۱۵ میلیون مترمکعب تجارت آب مجازی داشته است، به عبارتی دیگر، ایران وارد کننده آب مجازی بوده است. هر چند که نتایج تحقیق حاضر تا حدودی با نتایج (Zarei, 2016) همخوانی دارد، اما ناقص بودن اطلاعات و نبود یک مطالعه جامع هم‌چنان نتایج متفاوتی از این تحقیقات گرفته

می‌شود. در هر صورت نبود اطلاعات کافی یا فقدان برخی اطلاعات ضروری همواره از مشکلات محققان بوده است. به عنوان نمونه، در صورتی که اطلاعات برای سال ۱۴۰۰ نیز موجود بود، این تحقیق می‌توانست به نتایج جامع‌تری از مقایسه سال‌ها برسد که به دلیل نبود اطلاعات این مهم میسر نشد. علاوه بر این، عدم ثبت منظم داده‌های مصرف آب و یافتن داده‌های معتبر به دلیل وجود نهادهای مختلف مدیریت آب، محدودیت‌هایی را برای تحلیل کامل ردپای آب در سال‌های اخیر ایجاد کرده است.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر اقدام به تحلیل ردپای آب، تجارت آب مجازی و تبادلات بین بخشی آب مجازی در بخش‌های اقتصادی کشور کرده است. به‌منظور انجام این پژوهش، از جدول داده-ستانده و مقادیر مصرف آب طی سه دوره، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ استفاده شد. برای دستیابی به نتایج قابل قیاس در سال‌های مورد مطالعه، از جداول متقارن اقتصاد ایران (محصول در محصول) استفاده شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که ردپای آب ملی در حال افزایش است درحالی‌که سرانه آب ملی روند کاهشی دارد، به‌طوری‌که ردپای آب ملی در سال ۱۳۹۵ نسبت به ۱۳۸۰ حدود ۲۱٪ رشد داشته است. همچنین، مقایسه مقادیر ردپای آب نشان داد که مقدار ردپای وارداتی از ردپای صادراتی بیشتر است. نتایج بررسی تجارت آب مجازی نیز نشان داد، ایران به دلیل واردات محصولات بیشتر از صادرات، طی سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۵ واردکننده خالص آب مجازی بوده است. در ادامه از دو شاخص فالکن مارک و شاخص تنش آبی سازمان ملل برای ارزیابی برداشت از منابع آب استفاده شد. نتایج شاخص سازمان ملل نشان داد که طی ۱۵ سال مورد بررسی، ایران وارد دوره بحران شدید آبی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که وضعیت آب در ایران بسیار نگران کننده است. بنابراین انجام اقداماتی مانند بهبود کارایی آب، انطباق الگوهای کشت، تغییر رژیم‌های غذایی که آب کمتری مصرف می‌کنند، و ترویج اشکال تجاری که موجب صرفه‌جویی در منابع آب می‌شود، می‌توانند بسیار کمک‌کننده باشد. همچنین استراتژی واردات آب مجازی می‌تواند به عنوان یک راهکار امیدوارکننده برای رفع کمبود آب در کشور مورد توجه سیاست‌گذاران کشور قرار گیرد.

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

المیرا تاروردی زاده: نگارش، روش شناسی، بررسی و جمع‌آوری داده‌ها، نرم افزار، تجزیه و تحلیل. **سید عباس حسینی:** نگارش، ویرایش، روش شناسی و اعتبارسنجی. **زهرا عابدی:** نظارت، روش شناسی و نرم افزار و تجزیه تحلیل و **محمد صادق علی پور:** نظارت، ویرایش متن، جمع‌آوری و تکمیل داده‌ها.

منابع

- Abdollahzadeh Kahrizi, R., Kokabinezhad Moghaddam, A., & Merufinia, E. (2023). Investigating virtual water and agricultural water productivity index in crops of Poldasht Plain. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 54-68. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11090.1100>. (In Persian)
- Auffhammer, M. (2022). Climate adaptive response estimation: Short and long run impacts of climate change on residential electricity and natural gas consumption. *Journal of Environmental Economics and Management*, 114, 102669. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102669>
- Bahrami Mahneh, F. (2017). Modeling virtual water trade in Iran's agricultural sector. PhD Thesis. *Faculty of Agriculture, University of Zabol.*. (In Persian)
- Bohloolzadeh, A., Sabzghabaei, G. R., & Dashti, S. (2021). Ecological water footprints and virtual water for wheat and rice products in khuzestan province in order to manage water resources sustainability. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 15 (2), 329-341. <https://doi.org/20.1001.1.20087942.1400.15.2.9.1> (In Persian)
- Cazcarro, I., Duarte, R. & Sanchez Cholz, J. (2013). Multiregional input–output model for the evaluation of Spanish water flows. *Environmental Science & Technology*, 47 (21), 12275–12283. <https://doi.org/10.1021/es4019964>
- Central Bank of Iran. (2014). Study of international water indicators and the outlook for the global water crisis by 2050. Local report, Tehran, Iran. (In Persian)
- Chapagain, A. K. & Hoekstra, A. Y. (2004). Water footprints of nations. *Unesco-IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands*.
- Chen, Z. M. & Chen, G. (2013). Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade, *Ecological Indicators*, 28, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.07.024>
- Dehghanpir, SH., Bazrafshan, O., Ramezani Etedali, H., Holisaz, A., & Ababaei, B. (2024). Evaluation of water stress index and water poverty in rice production based on the water footprint concept in Iran. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 18-35. <https://doi.org/10.22098/MMWS.2023.12116.1206>. (In Persian)
- Deng, G., Ma, Y. & Li, X. (2016). Regional water footprint evaluation and trend analysis of China-based on interregional input-output model. *Journal of Cleaner Production*. 112, 4674–4682. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.129>
- Dietzenbacher, E. & Velázquez, E. (2007) Analysing Andalusian virtual water trade in an input–output framework, *Regional Studies*, 41 (2), 185–196.
- Dong, H., Geng, Y., Sarkis, J., Fujita, T., Okadera, T. & Xue, B. (2013). Regional water footprint evaluation in China: A case of Liaoning. *Science of the Total Environment*, 442, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.049>
- Feng, K., Siu, Y. L., Guan, D. & Hubacek, K. (2012). Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach, *Applied Geography*, 32(2), 691–701. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.004>
- Guo, S. & Shen, G. Q. (2015). Multiregional input–output model for China's farm land and water use. *Environmental Science & Technology*, 49 (1), 403–414. <https://doi.org/10.1021/es503637f>
- Hoekstra, A. (2007). Human appropriation of natural capital: Comparing ecological footprint and water footprint analysis. Value of Water. *Research Report Series No. 23. UNESCOIHE, Delft, The Netherlands*.
- Hoekstra, A. Y. (2017). Water footprint assessment: Evolvement of a new research field, *Water Resources Management*, 31 (10), 3061– 3081. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Mekonnen, M. M. & Aldaya, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the Global Standard. Earthscan, *London, UK*.
- Hoekstra, A.Y. & Hung, P.Q. (2003). A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade: Virtual Water Trade: Processing's of The International Export Meeting On Virtual Water Trade.

- Karbasi, A.R. & Rafiei Darani, R. (2014). Impact of changes in economic components of final demand on water use in agriculture: Input-output analysis in Khorasan Razavi Province, *Journal of Agricultural Economics and Development*, 22 (85), 37-63. <https://doi.org/10.30490/AEAD.2014.58843>. (In Persian)
- Lenzen, M., Moran, D., Bhaduri, A., Kanemoto, K., Bekchanov, M., Geschke, A. & Foran, B. (2013). International trade of scarce water. *Ecological Economics*, 94, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.018>
- Mobaraki, M. & Mobaraki, M. (2021). Investigation of water footprint, virtual water and water use of three groups of autumn and spring products, vegetables (tomatoes and potatoes), industrial (sugar beet) and fodder (fodder corn) in Isfahan. *Journal of Water Resources Engineering*, 9(1), 89-102. (In Persian)
- Najafi, B., Khodadad Kashi, F., Souri, A. & Mousavi Jahromi, Y. (2022). Identification of water footprint in Iran's foreign trade with the approach of the input-output table-2016, *New Economy and Trade, Institute for Humanities and Cultural Studies (IHCS) Quarterly Journal*, 17(1), 155. <https://doi.org/10.30465/JNET.2022.39821.1837>. (In Persian)
- Nasrollahi, Z., & Zarei, M. (2018). Evaluation of virtual water flows in Iran's economy: Analysing intersectoral water relationships using input-output model, *Economic Modeling*, 2(4), 131-157. <https://doi.org/10.22075/JEM.2018.11103.1013>
- Office of Basic Studies of the Iranian Water ResourcesIran. (2016). (In Persian)
- Office of Sustainable Development, Amirkabir University, Iran. (2015). (In Persian)
- Oveisi, F., Fattahi Ardakani, A. & Fehrest Sani, M. (2019). Investigation of virtual water and ecological footprints of water in wheat fields of Isfahan province, *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 23(1). <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1398.23.1.28.4>. (In Persian)
- Piri, H. & Sarani, R., (2020). Investigation of economic productivity of crop products in sisthan and Baluchestan Province by water footprint approach, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.289567.668325>. (In Persian)
- Rastegaripour, F., Salari, A. & Azizzade, F. (2021). Determination of virtual water indices and ecological footprint of sugar beet water in villages of Torbat Heydarieh city, *Rural Development Strategies*, 8(2), 233-243. <https://doi.org/10.22048/rdsj.2021.271470.1916>. (In Persian)
- Renault, D. (2003). Value of virtual water in food: Principles and virtues. *Hoekstra, AY (Ed.)*.
- Tafazzoli, H. (2013). Measurement of sectoral water footprint in Iran using input-output approach. Master's thesis. *Allameh Tabataba'i University*. (In Persian)
- Talebi, A. & Karimi, Z. (2023). Presentation of management responses regarding the strategy of improving the water resources status of Zayandeh Roud Watershed. *Integrated Watershed Management*, 3(4), 74-91. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iwm.2023.2013798.1110>
- Tian, X., Sarkis, J., Geng, Y., Qian, Y., Gao, C., Bleischwitz, R. & Xu, Y. (2018). Evolution of China's water footprint and virtual water trade: A global trade assessment, *Environment International*, 121, 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.09.011>
- Wang, Z., Huang, K., Yang, S. & Yu, Y. (2013). An input–output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China, *Journal of Cleaner Production*, 42, 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.007>
- White, D. J., Hubacek, K., Feng, K., Sun, L. & Meng, B. (2018). The water-energy-food nexus in East Asia: A tele-connected value chain analysis using inter-regional input-output analysis, *Applied Energy*, 210, 550–567. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.159>
- Wiedmann, T., Lenzen, M., Turner, K. & Barrett, J. (2007). Examining the global environmental impact of regional consumption activities – Part 2: Review of input–output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade, *Ecological Economics*, 61 (1), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.12.003>
- Yu, Y., Hubacek, K., Feng, K. & Guan, D. (2010). Assessing regional and global water footprints for the UK, *Ecological Economics*, 69 (5), 1140–1147. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.12.008>

- Zarei, M. (2016). Measurement and evaluation of water consumption in economic sectors of Iran and Yazd Province. *Yazd University*. (In Persian)
- Zhang, C. & Anadon, L.D. (2014). A multi-regional input–output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China, *Ecological Economics*, 100, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.006>
- Zhang, H., Ma, S., Zhang, X. & Wang, Y. (2010). Analysis of Tianjin virtual water trade based on input-output model. In: 2010 International Conference on System Science and Engineering, *IEEE, New York, NY, USA*. <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2010.5551796>
- Zhao, X., Chen, B. & Yang, Z.F. (2009). National water footprint in an input–output framework—a case study of China 2002. *Ecology Model*, 220, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.09.016>

Research Article



Optimization of the cross-section and free board of trapezoidal channels based on the minimum probability of overflow and excavation and covering costs

Maryam Ghasemi Khiadani¹, Ali Khoshfetrat^{2*}, Mohammad Maleki³

¹ Graduated from Civil Engineering Department, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

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

³ Department of Mathematics, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: khoshfetrat@khuif.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 20 Oct 2024

Revised: 08 Feb 2025

Accepted: 22 Apr 2025

Published: 27 Apr 2025

Extended Abstract

Introduction

In general, the efficiency of water supply channels is usually less than acceptable, one of the reasons for this is the lack of appropriate optimization methods in channel design. The goal of optimizing the channel cross-section is to design the channel in the most favorable hydraulic state with the most economical possible. In channel design, it is also necessary to pay attention to minimizing the possibility of overflowing. In the present study, the goal was to minimize the total costs of excavation and covering along with minimizing the possibility of overflow from the channel for a channel with a trapezoidal cross-section at different discharges. In the following, the effect of changing the discharge on optimizing the channel dimensions has been investigated.

Materials and Method

The effect of flow change on the optimization of channel dimensions has been investigated in addition, minimizing the possibility of overflow is also considered as a goal. Therefore, free board and flow rate are also considered as design variables. Problem formulation leads to nonlinear optimization due to the Manning equation constraint. In single-objective optimization, the feasible set is determined entirely based on the objective function, and for each set of answers, the best answer is determined based on the value of the objective function. In multi-objective optimization problems, there is not only one answer, but a set of optimal answers is obtained according to the objectives of the problem. In this research, the constrained method of multi-objective programming technique is used. In this method, the vector optimization problem is converted into a numerical optimization. The conversion of the vector form to a numerical one is done in such a way that one of the objectives (here, minimizing the construction cost) is considered as the only objective of the model, and the second objective (here, minimizing the overflow probability) is considered as a constraint. As a result, the resulting model is the numerical and deterministic form of the previous vector and stochastic model.

Results and Discussion

The results showed that as the discharge value increases, construction cost increases. Also, the construction cost for all discharges decreases with the increase in the probability of overflow up to a probability of overflow of 0.5 and then increases. In other words, for all discharges, the construction cost is at its minimum when the probability of overflow is 0.5. With increasing discharge, the optimal channel width increased. Also, the optimal width for all discharges decreased with an increase in overflow probability up to a value of 0.5 and then increased. In other words, for all discharges, the optimal width has a minimum value at a probability of overflow equal to 0.5. With the increase in the discharge value, the flow depth increased. Also, the flow depth for all discharges increased with the increase in the probability of overflow up to the value of the probability of overflow equal to 0.5 and then had a decreasing trend. In other words, for all discharges, the flow depth has a maximum value at the probability of overflow equal to 0.5. With the increase in the discharge value, the optimal free height decreased. Also, the optimal free height for all discharges has a decreasing trend with the increase

in the probability of overflow up to the overflow probability value of 0.5 and then has an increasing trend. In other words, for all discharges, the optimal free height has a minimum value at the overflow probability of 0.5.

Conclusion

The results of this study showed that in a trapezoidal channel, if optimization is performed to minimize the cost of channel construction, including the total cost of excavation and channel lining, as well as minimizing the probability of overflow from the channel, with an increase in the discharge amount at a specific (fixed) probability, the width of the channel bottom, the depth of the flow, and the cost of channel construction have increased. In other words, with an increase in the discharge, the dimensions of the channel cross-section have increased, which has brought about higher costs, but with an increase in the optimal depth, the need for free head of the channel has decreased, so with an increase in the flow discharge, the optimal free head has decreased. Also, for all discharges at an overflow probability of 0.5, the cost of channel construction, the optimal width, and the optimal free head have a minimum value, and the flow depth has a maximum value.

Keywords: Channel section design, Nonlinear optimization, Free board, Minimum overflow probability, Excavation and cover costs

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

Maryam Ghasemi Khiadani: Writing – original draft, Methodology, Software, Data analysis; **Ali Khoshfetrat:** Conceptualization, Supervision, Methodology, Text review & editing; **Mohammad Maleki:** Methodology, Problem formulation, Advisory supervision, Manuscript editing.

Citation: 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>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بهینه‌سازی مقطع و ارتفاع آزاد کانال‌های دوزنقه‌ای براساس حداقل احتمال سرریز و هزینه‌های خاکبرداری و پوشش

مریم قاسمی خیادانی^۱، علی خوش فطرت^{۲*}، محمد ملکی^۳

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

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

۳. گروه ریاضی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: khoshfetrat@khuisf.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۲/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

چکیده

در حالت عمومی بازدهی کانال‌های آبرسانی معمولاً کمتر از حد قابل قبول می‌باشد یکی از دلایل آن عدم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مناسب در طراحی کانال‌ها است. هدف از بهینه‌سازی مقطع کانال، طراحی کانال در مطلوب‌ترین حالت هیدرولیکی با اقتصادی‌ترین حالت ممکن است. در طراحی کانال‌ها توجه به حداقل سازی احتمال سرریز نیز ضروری می‌باشد. در تحقیق حاضر، هدف، حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های خاکبرداری و پوشش به همراه حداقل‌سازی احتمال سرریز شدن جریان از کانال برای کانال با مقطع دوزنقه‌ای در دبی‌های مختلف بوده است. در ادامه، تاثیر تغییر دبی بر بهینه‌سازی ابعاد کانال مورد بررسی قرار گرفته است. ارتفاع آزاد و دبی جریان به عنوان متغیر طراحی لحاظ گردیده است. فرمول‌بندی مسئله با توجه به وجود قید برقراری معادله مانینگ، منجر به یک بهینه‌سازی غیرخطی می‌شود که با استفاده از نرم‌افزار ولفرام متمتیکا حل شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دبی، مقدار بهینه عمق و عرض کف افزایش می‌یابد به دنبال آن هزینه‌های ساخت نیز افزایش یافته است ولی با افزایش دبی، ارتفاع آزاد کانال کاهش داشته است.

واژه‌های کلیدی: طراحی مقطع کانال، بهینه‌سازی غیرخطی، ارتفاع آزاد، حداقل احتمال سرریز، هزینه‌های خاکبرداری و پوشش

استناد: قاسمی خیادانی، م.، خوش فطرت، ع.، و ملکی، م. (۱۴۰۳). بهینه‌سازی مقطع و ارتفاع آزاد کانال‌های دوزنقه‌ای براساس حداقل احتمال

سرریز و هزینه‌های خاکبرداری و پوشش. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۲(۴): ۳۱۴-۳۰۴

<https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.783405>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

با افزایش جمعیت، پیشرفت جوامع بشری و گسترش نیازهای انسان و عدم وجود منابع آب شیرین کافی در تمامی نقاط موضوع انتقال آب به یک ضرورت تبدیل شده است. انتقال آب به صورت تحت فشار یا به صورت جریان آزاد انجام می‌شود. در میان روش‌های مختلف انتقال آب، استفاده از نیروی ثقل و به حرکت در آوردن آب به صورت جریان با سطح آزاد به همراه ایجاد کانال‌ها و سازه‌های هیدرولیکی مربوط نظیر سرریزها، دریچه‌ها و غیره از متداول‌ترین و کم هزینه‌ترین روش‌ها در آبرسانی و آبیاری می‌باشد (Pourmoghadam & Valisamani, 2013). طراحی بهینه کانال‌های آبرسانی و آبیاری، یکی از موضوعات مهم در پروژه‌های آبیاری و آبرسانی به شمار می‌رود. این کانال‌ها دارای نقش اساسی در آبیاری زمین‌های کشاورزی و تامین غذا هستند. بخش عظیمی از محصولات غذایی، در بخش کشاورزی وابسته به آبیاری تولید می‌شود. در حالت عمومی، بازده کانال آبیاری کمتر از حد مورد نظر می‌باشد که یکی از دلایل آن عدم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی شبکه کانال می‌باشد. بهینه‌سازی شبکه کانال در دو مقوله جداگانه مورد بررسی خواهد بود که یکی بهینه‌سازی شبکه کانال‌های آبیاری و دیگری بهینه نمودن مقطع کانال موردنظر برای عبور یک دبی مشخص می‌باشد (Jafarinasab, 1999). طراحی بهینه مقطع کانال با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی تابع، موضوعی جالب در میان محققان هیدرولیک و منابع آب می‌باشد (Bhattachaccharjya & Satish, 2008). معمولاً در روش‌های بهینه‌سازی، هزینه احداث متغیر وابسته‌ای است که بهینه می‌شود. این متغیر تابع عمق خاکبرداری، عمق جریان (اختلاف این دو عمق، ارتفاع آزاد است)، عرض کانال، زبری کانال، شیب کانال و هندسه‌ی کانال است. همچنین هزینه احداث سازه کانال شامل هزینه‌های پوشش کانال و خاکبرداری می‌باشد (Guo & Hughes, 1984). (Das, 2000) به مطالعه بر روی بهینه‌سازی هزینه‌ی ساخت کانال با روش ضرایب لاگرانژ پرداخته است. وی کانالی با کمترین هزینه ساخت طراحی کرده است که در آن پارامترهای هندسی کانال دوزنقه‌ای مرکب دارای ارتفاع آزاد محاسبه شده‌اند. (Swamee et al., 2000) به بهینه‌سازی کانال با مقاطع مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای با در نظر گرفتن تلفات نشت به روش بهینه‌سازی غیرخطی پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که مقطع بهینه‌ی کانال دوزنقه‌ای دارای مساحت مقطع و تلفات نشت کم‌تری نسبت به مقاطع مثلثی و مستطیلی بوده است. (Das, 2007) مدل بهینه‌سازی خود را با فرض ثابت نگه داشتن ارتفاع آزاد و معادله جریان یکنواخت با دو تابع هدف به حداقل رسانی قیمت کل کانال دوزنقه‌ای و به حداقل رسانی احتمال سرریز شدن ارائه کرده است. نتایج با استفاده از تئوری لاگرانژ نشان می‌دهد که برای احتمالات کم سرریز شدن، عمق جریان در کانال کم‌تر و عرض کف بزرگ‌تر شده است و همین‌طور زمانی که احتمال سرریز شدن کاهش یافته است، قیمت کل افزایش پیدا کرده است. آنالیزهای مربوط به کانال‌های با زبری مرکب و یکنواخت، توانایی و کارایی مدل را ثابت کرده است. (Muzaffar et al., 2012) مسئله حداقل رسانی مجموع هزینه‌های خاکبرداری و پوشش در شرایط جریان یکنواخت در کانال دوزنقه‌ای گرد گوشه را با تابع هدف غیرخطی حل کردند. (Adarsh & Sahana, 2013) با لحاظ کردن هزینه‌های خاکبرداری، پوشش، هزینه تلفات آب و هزینه تملک در کانال‌های آبیاری پتانسیل رویکرد پیشنهادی (PGSL)¹ برای انجام طراحی جامع کانال‌های آبیاری طی یک بهینه‌سازی خطی را نشان دادند. (Kentli & Mercan, 2014) به بهینه‌سازی مقاطع دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی با دو الگوریتم ژنتیک و روش برنامه نویسی درجه دوم متوالی با لحاظ کردن نفوذ و تبخیر پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم، نتایج دقیق‌تر از تحقیقات قبلی ارائه می‌دهند. (Swamee & Chahar, 2015) به موضوع افت فشار آب و تبخیر آب در کانال‌های مثلثی، مستطیلی، دوزنقه‌ای، سهموی پرداخته‌اند که در آن، بهینه‌سازی کانال‌ها به روش غیرخطی صورت گرفته است. (Han et al., 2019) با توجه به اهمیت شکل و هزینه بهینه‌سازی در طراحی کانال‌های دوزنقه‌ای به جای بهبود سرعت جریان به طراحی کانال‌های دوزنقه‌ای پرداخته‌اند. روش بهینه‌سازی ارائه شده نه تنها هزینه ساخت و ساز را کاهش می‌دهد، بلکه تعمیر و نگهداری را نیز بهبود می‌بخشد. (Lavasani, 2020) مقطع دوزنقه‌ای کانال را بهینه‌سازی کرده است که در آن حداقل کردن هزینه‌های خاکبرداری، پوشش، تبخیر، نفوذ، تملک و

¹ Probabilistic Global Search Lausanne

همچنین حداقل شدن احتمال سرریز به عنوان هدف در نظر گرفته شده است. (Abd-El-Baky, 2023) روش محاسباتی جدیدی برای بهینه‌سازی مقطع کانال دوزنقه‌ای که در آن، زبری جداره‌ها با زبری کف متفاوت باشد، ارائه نمود.

در این تحقیق، ضمن در نظر گرفتن حداقل سازی احتمال سرریز جریان، برای اولین بار حداقل سازی هزینه‌های خاکبرداری و پوشش در دبی‌های مختلف در نظر گرفته شده است و تاثیر آن بر ابعاد مقطع کانال و هزینه ساخت آن بررسی خواهد شد. به عبارت دیگر، با بررسی کانال‌ها در دبی‌های مختلف به تاثیر تغییر دبی بر عمق آب، ارتفاع آزاد و عرض کف پرداخته شده است.

۲- روش کار

روابط حاکم و روش حل مسئله

برای تعیین ابعاد بهینه مقطع کانال جهت انتقال دبی مورد نیاز مانند هر مسئله بهینه‌سازی دیگر، اولین گام، مشخص نمودن تابع است. در اینجا فرم کلی مدل مورد نظر به صورت زیر تعریف گردیده است (روابط ۱-۳):

$$\text{Minimizing: } J_1 = c_e A + c_L (P_1 + P_2 + b) \quad (1)$$

$$\text{Minimizing: } J_2 = p(y > y + F) \quad (2)$$

Subject to:

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

که در این مدل، A مساحت کل خاکبرداری شده، c_e هزینه واحد خاکبرداری در سطح زمین، c_L هزینه هر واحد سطح پوشش شده و P_1 و P_2 و b و F در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. $P(Y > Y + F)$ احتمال بیشتر شدن عمق جریان از ارتفاع آزاد کل است.

شکل ۱- مقطع عرضی کانال دوزنقه ای دارای ارتفاع آزاد کل

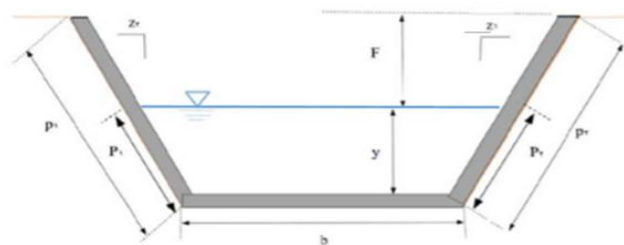


Fig 1. Cross-section of a trapezoidal channel with a total freeboard height

در بهینه‌سازی یک هدفه، مجموعه امکانپذیر به طور کامل بر اساس تابع هدف تعیین می‌شود و برای هر مجموعه جواب داده شده، بهترین جواب براساس مقدار تابع هدف مشخص می‌شود. در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه تنها یک پاسخ وجود ندارد بلکه مجموعه

از جواب‌های بهینه با توجه به اهداف مسئله بدست می‌آید. در این تحقیق 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، حداقل سازی 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. بنابراین، مدل مورد نظر به یک مدل دوهدفه تبدیل می‌شود. تابع اول، تابع حداقل سازی هزینه‌های ساخت کانال و تابع هدف دوم، به حداقل رساندن احتمال سرریز از مقطع کانال در نظر گرفته شده است. همچنین معادله جریان یکنواخت مانینگ به عنوان قید مدل مطرح شده است. به علت احتمالی بودن تابع هدف دوم، این مدل از مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی به شمار می‌آید و مسئله را به یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه‌ای برداری تبدیل کرده است.

با مشتق‌گیری معادله‌ی مانینگ نسبت به متغیرهای تصادفی تاثیر تغییر جریان طراحی محاسبه می‌شود (رابطه ۴):

$$\frac{dQ}{dY} = Q \left[\frac{5}{3} \frac{1}{A} \frac{dA}{dY} - \frac{2}{3} \frac{1}{(n_i^3 p_i)} \frac{d(n_i^3 p_i)}{dY} \right] \quad (4)$$

برای محاسبه تأثیر تغییرات احتمالی در شیب طولی کف کانال بر جریان طراحی، مشتق‌گیری زیر انجام شده است (رابطه ۵):

$$\frac{dQ}{dS_0} = \frac{Q}{2S_0} \quad (5)$$

مشتق زیر برای نشان دادن تأثیر تغییر ضریب زبری مانینگ بر جریان طراحی، محاسبه شده است (رابطه ۶):

$$\frac{dQ}{dn_i} = -Q \left[\frac{2}{3} \frac{1}{(n_i^3 p_i)} \frac{d(n_i^3 p_i)}{dn_i} \right] \quad (6)$$

پس از آن تغییرات عمق نسبت به ضریب زبری مانینگ، شیب طولی کف کانال و دبی، به صورت زیر محاسبه شده است (روابط ۷ تا ۹):

$$\frac{dY}{dQ} = \frac{1}{\frac{dQ}{dY}} \quad (7)$$

$$\frac{dY}{dn_i} = \frac{dY}{dQ} \frac{dQ}{dn_i} = \frac{1}{\frac{dQ}{dY}} \frac{dQ}{dn_i} \quad (8)$$

$$\frac{dY}{dS_0} = \frac{dY}{dQ} \frac{dQ}{dS_0} = \frac{1}{\frac{dQ}{dY}} \frac{dQ}{dS_0} \quad (9)$$

از آنجا که واریانس عمق جریان به واریانس‌های دبی، ضریب زبری مانینگ و شیب طولی کف کانال وابسته است. بنابراین (رابطه ۱۰):

$$\begin{aligned}
S^2_Y &= (dY/dQ)^2 S^2_Q + (dY/(dn_1))^2 S^2_{n_1} + (dY/(dn_2))^2 S^2_{n_2} + (dY/(dn_3))^2 S^2_{n_3} \\
&\quad + (dY/(dS_0))^2 S^2_{S_0} \\
&= \frac{1}{\left(\frac{dQ}{dY}\right)^2} [S^2_Q + (dQ/(dn_1))^2 S^2_{n_1} + (dQ/(dn_2))^2 S^2_{n_2} \\
&\quad + (dQ/(dn_3))^2 S^2_{n_3} + (dQ/(dS_0))^2 S^2_{S_0}]
\end{aligned} \quad (10)$$

با مرتب‌سازی معادله‌ی فوق معادله‌ی زیر حاصل شده‌است (رابطه ۱۱):

$$\frac{dQ}{dY} = \frac{1}{S_Y} [S^2_Q + (dQ/(dn_1))^2 S^2_{n_1} + (dQ/(dn_2))^2 S^2_{n_2} + (dQ/(dn_3))^2 S^2_{n_3} + (dQ/(dS_0))^2 S^2_{S_0}]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

با جایگذاری $\frac{dQ}{dY}$ از معادله‌ی (۴) در معادله‌ی (۱۱) رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (رابطه ۱۲):

$$\begin{aligned}
\frac{1}{3} Q \left[\frac{5}{A} \frac{dA}{dY} - \frac{2}{(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)}{dY} \right] &= \frac{1}{S_Y} [S^2_Q + \\
(-Q)^2 \left[\frac{2}{3} \frac{1}{(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)}{dn_1} \right]^2 S^2_{n_1} &+ (-Q)^2 \left[\frac{2}{3} \frac{1}{(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)}{dn_2} \right]^2 S^2_{n_2} + \\
(-Q)^2 \left[\frac{2}{3} \frac{1}{(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)}{dn_3} \right]^2 S^2_{n_3} &+ S^2_{S_0} \left(\frac{Q}{2S_0} \right)^2 \bigg]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \quad (12)$$

از طرف دوم معادله فاکتور گرفته شده است و معادله به صورت رابطه (۱۳) در آمده است:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{3} Q \left[\frac{5}{A} \frac{dA}{dY} - \frac{2}{(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)}{dY} \right] &= Q \frac{1}{S_Y} \left\{ \frac{S^2_Q}{Q^2} + \frac{4}{9} \left[\frac{1}{(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)}{dn_1} \right]^2 S^2_{n_1} + \frac{4}{9} \left[\frac{1}{(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)}{dn_2} \right]^2 S^2_{n_2} + \frac{4}{9} \left[\frac{1}{(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)}{dn_3} \right]^2 S^2_{n_3} + \right. \\
&\quad \left. \frac{1}{4S_0^2} S^2_{S_0} \right\}^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \quad (13)$$

در اینجا Q از دو طرف معادله ساده شده و معادله‌ی (۱۲) به فرم زیر تبدیل شده است (رابطه ۱۴):

$$\begin{aligned}
\left[\frac{5}{A} \frac{dA}{dY} - \frac{2}{(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)}{dY} \right] &= \frac{3}{S_Y} \left\{ \frac{S^2_Q}{Q^2} + \frac{4}{9(?n_i^{\frac{3}{2}} p_i)^2} \{ S^2_{n_1} \left[\frac{d}{dn_1} (n_1^{\frac{3}{2}} p_1) \right]^2 + S^2_{n_2} \left[\frac{d}{dn_2} (n_2^{\frac{3}{2}} p_2) \right]^2 \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + S^2_{n_3} \left[\frac{d}{dn_3} (n_3^{\frac{3}{2}} p_3) \right]^2 + \frac{1}{4S_0^2} S^2_{S_0} \right\} \right\}^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \quad (14)$$

در نهایت، فرم خلاصه‌ی محدودیت احتمال سرریز بصورت رابطه (۱۵) به دست آمده است:

$$\left[\frac{5}{A} \frac{Da}{dy} - \frac{2}{(?n_i^{\frac{3}{2}}p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}}p_i)}{dy} \right] = \frac{3}{S_Y} \left\{ \frac{S^2 Q}{Q^2} + \frac{1}{(?n_i^{\frac{3}{2}}p_i)^2} ?n_i p_i^2 S^2_{n_i} + \frac{1}{4S_{S_0}^2} S^2_{S_0} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

در محدودیت فوق، S_Y واریانس عمق جریان، S_{n_i} واریانس ضریب زبری مانینگ، S_Q واریانس دبی و S_{S_0} واریانس شیب طولی کف کانال هستند. بنابراین فرم نهایی مدل تک هدفه به صورت زیر در آمده است (روابط ۱۶ تا ۱۸):

$$\text{Minimize: } c_e A + c_L (P_1 + P_2 + b) C = c_e A + c_l (P_1 + P_2 + b) + C_{ws} Y_n F_S + C_{we} T + C_G T \quad (16)$$

$$\text{Subject to:} \quad (17)$$

$$\frac{Q}{\sqrt{S_0}} - \frac{A^{\frac{5}{3}}}{(?n_i^{\frac{3}{2}}p_i)^{\frac{2}{3}}} = 0 \quad (18)$$

$$\left[\frac{5}{A} \frac{dA}{dy} - \frac{2}{(?n_i^{\frac{3}{2}}p_i)} \frac{d(?n_i^{\frac{3}{2}}p_i)}{dy} \right] - \frac{3}{S_Y} \left\{ \frac{S^2 Q}{Q^2} + \frac{1}{(?n_i^{\frac{3}{2}}p_i)^2} ?n_i p_i^2 S^2_{n_i} + \frac{1}{4S_{S_0}^2} S^2_{S_0} \right\}^{\frac{1}{2}} = 0$$

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق، پنج دبی مختلف شامل مقادیر ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۰ مترمکعب بر ثانیه، ضریب زبری مانینگ در جداره نشان داده شده با P_1 ، ۰/۰۳ و در جداره نشان داده شده با P_2 برابر با ۰/۰۲۵ و در کف کانال (نشان داده شده با P_3)، ۰/۰۲ در نظر گرفته شده است (شکل ۱). شیب طولی کف کانال ۰/۰۰۲۵ در نظر گرفته شده است. هدف از این مدل، طراحی بهینه‌ی مقطع عرضی کانالی است که در آن، به هر دو هدف کمینه‌سازی هزینه و احتمال سرریز دست یافته شود. مقادیر عددی متغیرهای این مثال طبق مقاله‌ی (Das, 2007) و مقاله‌ی (Swamee et al., 2000) انتخاب شده‌اند.

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی توسعه یافته در بخش قبل برای کانال دوزنقه‌ای در پنج دبی متفاوت با لحاظ کردن هزینه خاکبرداری و پوشش با مشخصات شرح داده شده در بخش قبل پرداخته شده است. نتایج در قالب نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های ۲ تا ۵ ارائه شده است که در ادامه هر یک از آنها مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در شکل (۲) تغییرات هزینه ساخت کانال که مجموع هزینه‌های خاکبرداری و پوشش است، به عنوان تابعی از احتمال سرریز شدن آب از کانال به ازای مقادیر مختلف دبی موجود در کانال نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار دبی، هزینه ساخت افزایش یافته است. همچنین هزینه ساخت به ازای تمامی دبی‌ها با افزایش احتمال سرریز شدن تا مقدار احتمال سرریز شدن برابر ۰/۵ روند نزولی داشته و پس از آن دارای روند صعودی است به عبارت دیگر، به ازای تمامی دبی‌ها، هزینه ساخت در احتمال سرریز شدن برابر ۰/۵ دارای حداقل مقدار است.

در شکل (۳) تغییرات عرض بهینه مقطع کانال به عنوان تابعی از احتمال سرریز شدن آب از کانال به ازای مقادیر مختلف دبی موجود در کانال نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار دبی، عرض بهینه کانال افزایش یافته است. همچنین عرض بهینه به ازای تمامی دبی‌ها با افزایش احتمال سرریز شدن تا مقدار احتمال سرریز شدن برابر ۰/۵ روند نزولی داشته و

پس از آن دارای روند صعودی است به عبارت دیگر، به ازای تمامی دبی‌ها، عرض بهینه در احتمال سرریز شدن برابر ۰/۵ دارای حداقل مقدار است.

شکل ۲- تغییرات قیمت کانال دوزنقه‌ای با لحاظ کردن به ازای احتمالات سرریز متفاوت در پنج دبی

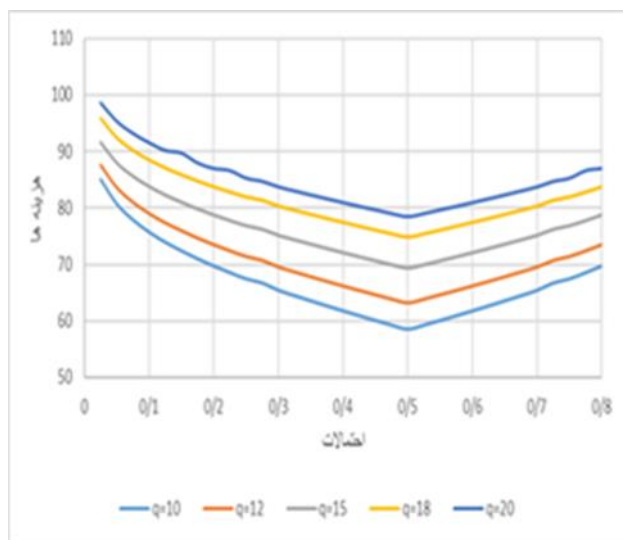


Fig 2. Variation in the cost of a trapezoidal channel considering different overtopping probabilities for five discharge values

شکل ۳- تغییرات عرض کف کانال دوزنقه‌ای به ازای احتمالات سرریز متفاوت در پنج دبی

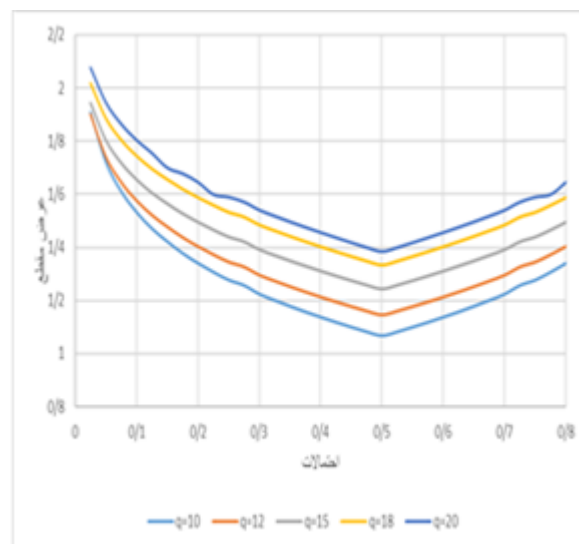


Fig 3. Variation of the trapezoidal channel's bottom width for different overtopping probabilities at five discharge values

شکل ۴- تغییرات عمق کانال دوزنقه‌ای با لحاظ کردن به ازای احتمالات سرریز متفاوت در پنج دبی

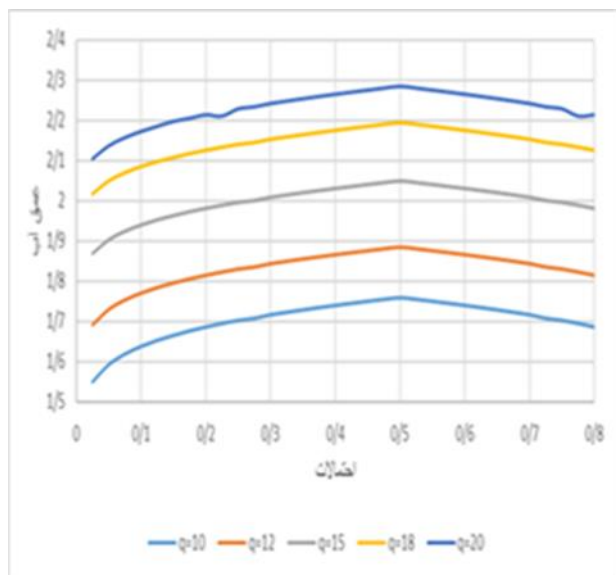


Fig 4. Variation of trapezoidal channel depth considering different overtopping probabilities for five discharge values

شکل ۵- تغییرات ارتفاع آزاد کانال دوزنقه‌ای با لحاظ کردن به ازای احتمالات سرریز متفاوت در پنج دبی

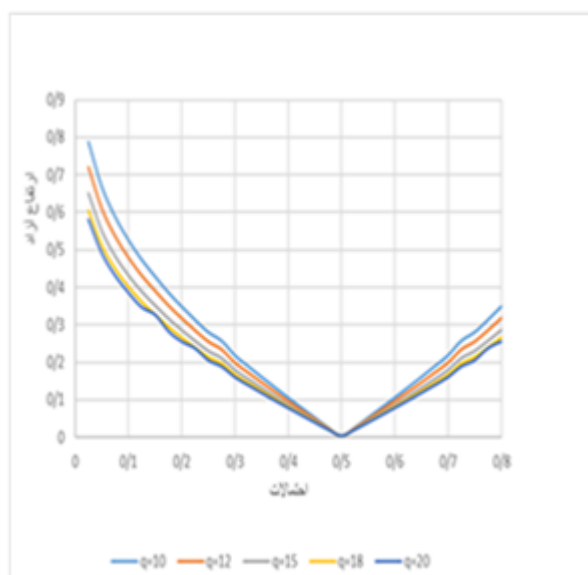


Fig 5. Variation of freeboard height in trapezoidal channel considering different overtopping probabilities for five discharge values

در شکل (۴) تغییرات عمق جریان به عنوان تابعی از احتمال سرریز شدن آب از کانال به ازای مقادیر مختلف دبی موجود در کانال نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار دبی، عمق جریان افزایش یافته است. همچنین عمق جریان به ازای تمامی دبی‌ها با افزایش احتمال سرریز شدن تا مقدار احتمال سرریز شدن برابر ۰/۵ روند صعودی داشته و پس از آن دارای روند نزولی است به عبارت دیگر، به ازای تمامی دبی‌ها، عمق جریان در احتمال سرریز شدن برابر ۰/۵ دارای حداکثر مقدار است.

در شکل (۵) تغییرات ارتفاع آزاد بهینه به عنوان تابعی از احتمال سرریز شدن آب از کانال به ازای مقادیر مختلف دبی موجود در کانال نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار دبی، ارتفاع آزاد بهینه کاهش یافته است. همچنین ارتفاع آزاد بهینه به ازای تمامی دبی‌ها با افزایش احتمال سرریز شدن تا مقدار احتمال سرریز شدن برابر ۰/۵ روند نزولی داشته و پس از آن دارای روند صعودی است به عبارت دیگر، به ازای تمامی دبی‌ها، ارتفاع آزاد بهینه در احتمال سرریز شدن برابر ۰/۵ دارای حداقل مقدار است.

در تحلیل علت افزایش عرض بهینه کانال و عمق جریان با افزایش دبی جریان، می‌توان گفت در صورت افزایش دبی، باید عرض کانال و عمق جریان افزایش یابد تا فضای بزرگتری برای جریان یافتن دبی بیشتر فراهم گردد و در این صورت، بدیهی است که هزینه ساخت کانال افزایش می‌یابد. همچنین در تحلیل علت کاهش ارتفاع آزاد بهینه در صورت افزایش دبی، می‌توان چنین استدلال نمود که چون با افزایش دبی، عمق جریان افزایش می‌یابد و ارتفاع آزاد با عمق جریان رابطه عکس دارد بنابراین با افزایش دبی، ارتفاع آزاد بهینه کاهش می‌یابد.

همان طور که قبلاً بیان شد مقالات (Das, 2007) و (Lavasani, 2020) تنها تحقیقاتی هستند که در آنها مانند این مقاله، هزینه‌های ساخت به همراه احتمال سرریز حداقل سازی شده و نتایج آنها با نتایج این مقاله قابل مقایسه است. نتایج به دست آمده برای تغییرات هزینه، عمق جریان و عرض کف با نتایج این دو تحقیق هماهنگ است. از طرف دیگر در این مقاله ارتفاع آزاد به عنوان یک متغیر در نظر گرفته شده و مقادیر بهینه آن به ازای دبی‌ها و احتمال سرریزهای مختلف به دست آمده است در صورتی که در دو تحقیق ذکر شده، ارتفاع آزاد ثابت در نظر گرفته شده است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داده که در کانال دوزنقه‌ای در صورتی که بهینه‌سازی به منظور کمینه نمودن هزینه ساخت کانال شامل مجموع هزینه‌های خاکبرداری و پوشش کانال و همچنین کمینه نمودن احتمال سرریز شدن جریان از کانال صورت پذیرد، با افزایش مقدار دبی در یک احتمال خاص (ثابت) عرض کف کانال، عمق جریان و هزینه ساخت کانال افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر، با افزایش دبی، ابعاد مقطع کانال بیشتر شده که هزینه‌های بیشتری را به همراه داشته است ولی با افزایش عمق بهینه، نیاز کانال به ارتفاع آزاد کاهش پیدا کرده است بنابراین با افزایش دبی جریان، ارتفاع آزاد بهینه کاهش یافته است. همچنین به ازای تمامی دبی‌ها در احتمال سرریز شدن برابر ۰/۵، هزینه ساخت کانال، عرض بهینه و ارتفاع آزاد بهینه دارای حداقل مقدار و عمق جریان دارای حداکثر مقدار است.

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

مریم قاسمی خيادانی: نگارش متن، روش‌شناسی، نرم افزار، تحلیل داده‌ها. علی خوش فطرت: تعریف موضوع تحقیق، راهنمایی و نظارت، روش‌شناسی، ویرایش متن. محمد ملکی: روش‌شناسی، فرمول بندی مسئله، مشاوره و نظارت، ویرایش متن.

منابع

- Abd-El-Baky, R., (2023). Developed computational methodology for the most effective design of open channel cross sections. *Journal of Civil Engineering and Construction*, 12(4), 205-210. <https://doi.org/10.32732/jceec.2023.12.4.205>
- 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>
- Bhattachacharya R. K. & Satish M. G. (2008). Flooding probability-based optimal design of trapezoidal open channel using freeboard as a design variable. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(3), 405-408. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2008\)134:3\(405\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:3(405))
- 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))
- Guo C.Y. & 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., Easa, S.M. & Gao, X. (2019). General explicit solutions of most economic sections and applications for trapezoidal and parabolic channels. *Journal of Hydrodynamics*, 31, 1034–1042. <https://doi.org/10.1007/s42241-018-0155-x>
- Jafarinasab, M.A. (1999). Optimization of water supply network. Technical Faculty. Kerman Shahid Bahonar University. (In Persian)
- 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)
- Muzaffar, S.Z.S., Atmapoojya, S.L., Agrawal, D.K., & Aquil, M. (2012). Minimizing the total cost of lining and excavation including free board. *International Journal of Innovative Technology and Creative Engineering*, 2(1), 2045-8711.
- Pourmoghadam, M., Valisamani, H. (2013). Optimal design of trapezoidal composite channels using nonlinear optimization. 12th Iran Hydraulic Conference, Karaj, Department of Irrigation and Development Engineering, University of Tehran, Iran Hydraulic Association. (In Persian)
- Swamee, P.K., Chahar B.R. (2015). Minimum water loss canal section. in: design of canals. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. Springer, New Delhi.
- Swamee, P.K., Mishra, G.C. & Chahar, B.R. (2000). Minimum cost design of lined canal section. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 14, 1-12. <https://doi.org/10.1023/A:1008198602337>



Structural health monitoring of concrete dams using modern methods (Case study: Baghan Jam Dam)

Seyed Shahab Emamzadeh^{*1}, Mostafa Heydari²

1 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Kharazmi University, Tehran, Iran.

2 Kangan Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.

Corresponding Author email: shemamzadeh@khu.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 27 Oct 2024

Revised: 08 Jan 2025

Accepted: 29 Apr 2025

Published: 01 May 2025

Extended Abstract

Introduction

Structural Health Monitoring (SHM) has emerged as a critical technology in civil engineering for assessing the performance of vital infrastructure such as concrete dams. Given the importance of dams in water supply networks and the catastrophic consequences of their failure, developing non-destructive and accurate monitoring methods is essential. This study focuses on concrete dams, examining modern SHM techniques and their applications in detecting both visible and hidden structural damage. The discussed methods include modal analysis, neural networks, pattern recognition, Kalman filtering, statistical approaches, and signal processing, each evaluated for their accuracy, advantages, and limitations. The primary objective is to propose solutions for reducing maintenance costs, anticipating potential hazards, and minimizing human and financial losses through intelligent monitoring systems. As a case study, the health monitoring system for the Baghan Jam Roller-Compacted Concrete (RCC) Dam was designed and analyzed.

Materials and Methods

This research first introduced and compared various damage detection methods for concrete dams, including modal analysis, neural networks, pattern recognition, Kalman filtering, statistical methods, and signal processing. Subsequently, as a case study, the SHM system for the Baghan Jam RCC Dam was designed using the finite element method. To assess the site effect, three different soil-layer models (single-layer, two-layer, and three-layer) were examined. Sensor placement criteria were based on von Mises stress (exceeding 1.5 MPa) and displacement (exceeding 1 cm). To evaluate the system's performance under seismic loads, three earthquake records with varying hazard levels—Bam (PGA=0.8), Koina (PGA=0.6), and El Centro (PGA=0.35)—were utilized. Data from these records were extracted from the Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center and imported into ABAQUS software. Dynamic analyses were conducted to identify critical areas and optimize sensor placement.

Results and Discussion

The results demonstrated that the number and location of required sensors depend on seismic hazard intensity. For high hazard levels (PGA>0.7), 18 sensors (8 stress sensors and 10 displacement sensors) were recommended; for moderate levels (0.4<PGA<0.7), 14 sensors (6 stress sensors and 8 displacement sensors); and for low levels (PGA<0.4), 9 sensors (4 stress sensors and 5 displacement sensors). Stress and displacement analyses revealed that areas with high tensile stress and

significant displacement are critical for sensor installation. Comparative evaluation of SHM methods indicated that combining modal analysis with neural networks significantly improves damage detection accuracy. The Hilbert-Huang transform was confirmed as an effective method for identifying instantaneous damage in concrete structures.

Conclusion

This study underscores the importance of continuous monitoring for concrete dams, particularly in seismic-prone regions, and demonstrates that intelligent monitoring systems can enhance safety and extend the service life of critical infrastructure. The findings suggest that optimizing SHM systems by considering seismic hazard levels and stress/displacement criteria can reduce maintenance costs and prevent catastrophic failures. Future research should explore hybrid methods, such as integrating machine learning with wireless sensor networks, to improve monitoring precision and efficiency. Additionally, non-contact techniques like Digital Image Correlation (DIC) and drone-based monitoring could complement traditional sensors.

Keywords: Structural health monitoring (SHM), Concrete Dams, Non-destructive methods, Modal analysis, Smart sensors, Baghan Jam Dam

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

Seyed Shahab Emamzadeh: Writing, Methodology, Investigation & Data Collection, Software, Analysis; **Mostafa Heidari:** Supervision, Text Editing, Data Collection & Completion.

Citation:

Emamzadeh, S. S., & Heydari, M. (2024). Structural health monitoring of concrete dams using modern methods (Case study: Baghan Jam Dam). *Technical Strategies in Water Systems*, 2(4): 315-327.
<https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1122688>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



پایش سلامت سازه‌های سدهای بتنی با استفاده از روش‌های نوین (مطالعه موردی: سد باغان جم)

سیدشهاب امامزاده^{۱*} مصطفی حیدری^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۲. دانشگاه آزاد اسلامی واحد کنگان، بوشهر، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: shemamzadeh@khu.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۲/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

چکیده

این مطالعه به بررسی روش‌های نوین پایش سلامت سازه‌ها (SHM) با تمرکز بر سدهای بتنی پرداخته و کاربرد این روش‌ها را در تشخیص آسیب‌های آشکار و پنهان سازه‌های تحلیل می‌کند. روش‌های مورد بحث شامل تحلیل مودال، شبکه‌های عصبی، تشخیص الگو، فیلتر کالمان، روش‌های آماری و تحلیل سیگنال است که هر یک از منظر دقت، مزایا و محدودیت‌ها ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب این روش‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، پیش‌آگاهی از مخاطرات و کاهش تلفات جانی و مالی منجر شود. به عنوان مطالعه موردی، سیستم پایش سلامت سد بتن غلتکی باغان جم با استفاده از روش اجزای محدود طراحی شده است. برای تحلیل اثر ساختگاه، سه مدل مختلف با لایه‌بندی خاک (تک‌لایه، دو لایه و سه لایه) بررسی شد. معیارهای نصب حسگرها بر اساس تنش فون مایسز (بیش از ۱/۵ مگاپاسکال) و جابجایی (بیش از ۱ سانتیمتر) تعیین گردید. نتایج برای سه سطح خطر لرزه‌ای (زیاد، متوسط و کم) نشان داد که تعداد حسگرهای مورد نیاز متناسب با شدت خطر: سطح خطر زیاد: (۱۸ حسگر $PGA > 0.7$)، سطح خطر متوسط: (۱۴ حسگر $0.4 < PGA < 0.7$)، سطح خطر کم: (۹ حسگر $PGA < 0.4$)، جابجایی سنج و ۱۰ جابجایی سنج، سطح خطر متوسط: (۶ تنش سنج و ۸ جابجایی سنج)، سطح خطر کم: (۴ تنش سنج و ۵ جابجایی سنج) تغییر می‌کنند. این پژوهش بر اهمیت پایش مستمر سدها به‌ویژه در مناطق لرزه‌خیز تأکید دارد و نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های هوشمند پایش می‌تواند به بهبود ایمنی و افزایش عمر مفید سازه‌های حیاتی کمک شایانی نماید.

واژه‌های کلیدی: پایش سلامت سازه، سدهای بتنی، روش‌های غیرمخرب، تحلیل مودال، سنسورهای هوشمند، سد باغان جم

استناد: امامزاده، س. ش. و حیدری، م. (۱۴۰۳). پایش سلامت سازه‌های سدهای بتنی با استفاده از روش‌های نوین (مطالعه موردی سد باغان جم). راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۲(۴): ۳۱۵-۳۲۷. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1122688>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

پایش سلامتی سازه به فرآیند اجرای یک استراتژی تشخیص آسیب برای زیرساخت‌های مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا اطلاق می‌گردد. در دهه‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی به منظور بهبود، ابداع روش‌ها و ابزارهای جدید پایش سلامتی سازه صورت پذیرفته است و کشورهای توسعه‌یافته سالانه بودجه‌های کلانی را برای تجهیز زیرساخت‌های مهم شهری خود به ابزارهای پایش سلامت سازه در نظر می‌گیرند. دیدگاه آن‌ها چنین است که استفاده از این ابزارها منجر به پیش‌آگاهی از بروز آسیب، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و کاهش تلفات انسانی شود. روش‌های مختلفی جهت شناسایی، موقعیت‌یابی و توصیف آسیب‌های سازه‌ای وجود دارند. روش‌های پایش سازه به طور مشخص از دو تئوری در زمینه‌ی پردازش سیگنال و دینامیک سازه بهره می‌گیرند که در این میان پردازش سیگنال نقش مهمی را ایفا می‌کند (Balageas et al., 2010). پایش سلامت سازه‌ها براساس دو رویکرد تشخیص و پیش‌بینی استوار است. بخش مهم و قابل پیشرفت در این حوزه همان پیش‌بینی است؛ زیرا رویکرد تشخیص، عمدتاً به همان روش‌های ارزیابی غیرمخرب می‌پردازد. معمولاً ابزارهای متنوعی به منظور پایش وضعیت سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به حسگرهای پیزوالکتریک، حسگرهای فیبر نوری و استفاده از مواد هوشمند اشاره کرد. تاکنون تحقیقات فراوانی در این زمینه صورت گرفته است به عنوان مثال: (Hill et al., 1987) در مورد میزان تأثیر بکارگیری سیستم پایش در پیشگیری و پیش‌آگاهی مخاطرات آتی و هزینه‌های محتمل تعمیر و نگهداری آینده و کاهش تلفات جانی و مالی احتمالی بحث کرد.

(Doebbling et al., 1996) از تغییرات مشخصات ارتعاشی سیستم‌های مکانیکی و سازه‌ای برای تشخیص خرابی استفاده نمود. (Raufi & Bahar, 2010) از روش هیلبرت-هوانگ برای تشخیص آسیب‌های لحظه‌ای یک قاب خمشی سه طبقه استفاده نمود. وی نشان داد که دوران گره‌های قاب بهترین گزینه برای تجزیه و تحلیل تشخیص آسیب هستند. (Zarafshan & Ansari, 2013) برای مدل‌سازی یک پل از نرم‌افزار اجزای محدود انسیس استفاده کردند. سنسورهایی بر روی بال زیرین تیر نصب شده بود. ایشان سناریوهای مختلفی را مورد ارزیابی قرار دادند. تعداد سناریوهای مورد مطالعه پنج نوع پل بود که طول عرشه آن‌ها از ۹/۳ متر تا ۲۱/۹۴ متر متغیر بود. درصد امواج ورودی جهت تحلیل برای همه فرآیندها ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. با مقایسه نتایج مطالعه تئوری و آزمایشگاهی ایشان می‌توان بیان نمود که تبدیل هیلبرت روش مناسب با پاسخ‌های بهینه برای تعیین خسارت سازه است.

(Robbe et al., 2017) مطالعه تطبیقی بین تحلیل المان محدود و داده‌های لرزه‌نگاری واقعی از سدهای بتنی را ارائه دادند. نتایج نشان داد که مدل‌سازی دقیق اندرکنش سد-پی-مخزن می‌تواند خطای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی را تا ۲۵٪ کاهش دهد. (Oliveira & Alegre, 2019) سیستم‌های پایش سلامت سدهای پرتغال را در کتابی با موضوع پایش لرزه‌ای سازه‌ها بررسی کردند. آن‌ها بر اهمیت ادغام داده‌های لرزه‌نگاری با پارامترهای ساختاری برای تشخیص آسیب تأکید نمودند. این مطالعه پایه‌ای برای توسعه سیستم‌های پایش پیشرفته در سدهای اروپایی شد.

(Oliveira et al., 2022) نوآوری‌های نظری و محاسباتی در پایش سدهای بزرگ ارائه دادند. سیستم پیشنهادی آن‌ها ترکیبی از حسگرهای لرزه‌ای و ساختاری بود که کاهش ۳۰٪ در هزینه‌های نگهداری را محقق می‌ساخت.

(Ma et al., 2023) مدیریت ایمنی سدها با استفاده از سیستم‌های پایش هوشمند را بررسی کردند. پژوهش آن‌ها نشان داد که ادغام داده‌های حسگرها با مدل‌های دیجیتال می‌تواند دقت پیش‌بینی خطر را تا ۴۰٪ افزایش دهد.

در اکثر پژوهش‌ها روش ارائه شده مبتنی بر پاسخ آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی سازه واقعی است که بر اساس پاسخ اندازه‌گیری شده، می‌توان تشخیص خرابی را با اطمینان قابل قبولی انجام داد. در این روش، برای اجرای پایش نیاز به اطلاعات کاملی از سازه نیست و با اطلاعات محدودی، می‌توان تشخیص خرابی را انجام داد (Huang et al., 2003).

یکی از دارایی‌های مهم در شبکه‌های آبرسانی، سدها هستند که حفاظت از آن‌ها از اولویت بالایی نسبت به سایر اجزای شبکه برخوردار است (Sheykhal et al., 2020). امروزه مدیریت و کنترل ایمنی سدهای بزرگ به طور کلی مبتنی بر پایش خودکار سلامت لرزه‌ای و سازه‌ای (SSH^{۱۲}) با استفاده از آخرین فناوری اندازه‌گیری، جمع‌آوری و انتقال خودکار داده‌ها است (Oliveira & Alegre, 2020). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که یک سد بتنی در طول عمر خود تحت بارگذاری‌های زیادی مانند زلزله، طوفان، سیل، انفجار قرار می‌گیرد (Emamzadeh, 2022)، لذا وجود یک سیستم نظارت ممتد برای ارزیابی عملکرد سازه‌ی سد و تخمین عمر مفید باقیمانده، ضروری به نظر می‌رسد. وجود چنین سیستمی در سدها به‌ویژه در سدهای مهم، منجر به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری معمول و اطمینان از عملکرد مناسب سازه سد در حوادث حادی مانند زلزله و همچنین کاهش تلفات انسانی خواهد شد. مطالعات جدید نشان‌دهنده حرکت به سمت سیستم‌های هوشمند و خودکار پایش سلامت سازه‌ها هستند که از هوش مصنوعی، فناوری‌های بی‌سیم و پردازش پیشرفته سیگنال برای دستیابی به دقت و قابلیت اطمینان بالاتر در ارزیابی آسیب‌های سازه‌ای استفاده می‌کنند. هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی روش‌های پایش سلامت سدهای بتنی است. در این مطالعه پس از روش اجزای محدود و تحلیل تنش، سامانه پایش برای یک سد بتنی به عنوان نمونه طراحی گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی شیوه‌های تشخیص آسیب

روش‌های تشخیص آسیب را می‌توان به دو نوع موضعی و جامع تقسیم کرد. در روش‌های تشخیص آسیب موضعی مکان تقریبی آسیب شناسایی شده و سازه به صورت موضعی تحلیل می‌شود. برخلاف روش‌های موضعی، روش‌های جامع نیازی به دانستن حدود آسیب ندارند. این روش‌ها با پایدن تغییرات در خصوصیات لرزه‌ای سازه به تشخیص آسیب و شدت آن می‌پردازند. تغییر در مشخصات دینامیکی سازه می‌تواند ناشی از وقوع آسیب باشد؛ چرا که این مشخصات تابعی از خصوصیات فیزیکی سازه مثل جرم میرایی و سختی هستند (Sohn et al., 2003). روش‌های گوناگونی برای تشخیص آسیب بر پایه اندازه‌گیری مشخصات دینامیکی سازه به وجود آمده است. این روش‌ها را می‌توان بر پایه نوع داده‌ای که از سازه جمع‌آوری می‌شود و یا پارامتری که اندازه‌گیری می‌شود و یا روشی که به آن تشخیص صورت می‌گیرد، طبقه‌بندی کرد. به عنوان مثال می‌توان به روش‌های پایش تغییرات در پارامترهای مودال، روش بروزرسانی ماتریس، روش‌های بر پایه‌ی شبکه‌های عصبی، روش‌های تشخیص الگو بر پایه فیلتر کالمان، روش آماری و روش پردازش سیگنال اشاره نمود. جدول (۱) خلاصه‌ای از روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها را نشان می‌دهد.

۲-۱-۱- روش‌های مبتنی بر تحلیل مودال

¹² Seismic and Structural Health Monitoring

پارامترهای مودال در یک سازه شامل فرکانس‌های طبیعی، شکل مود و نسبت میرایی هستند. چون پارامترهای مودال نسبت به تغییرات در سازه حساس هستند، می‌توان آنالیز مودال را یکی از روش‌های مبتنی بر ارتعاشات برای پایش سلامت سازه در نظر گرفت. از روش‌های به دست آوردن پارامترهای مودال مانند فرکانس‌های طبیعی، پاسخ فرکانسی و برای یک سازه پیچیده می‌توان از روش آنالیز مودال بهره گرفت. مشکلات استفاده از روش‌های عددی مانند روش رانگ‌کوتا این است که این روش پاسخ ارتعاشی سامانه را به صورت عددی حل می‌کند و جواب معادله به صورت کلی به دست می‌آید و اگر هرکدام از پارامترهای معادله تغییر کند، باید معادلات از ابتدا حل شوند. روش آنالیز مودال تا حدی این مشکل را برطرف کرده است. در آنالیز مودال، از معادلات ارتعاشی با اعمال تغییراتی، یک دستگاه معادله دیفرانسیل قطری بدست می‌آید که مقادیر ویژه این دستگاه، همان فرکانس‌های طبیعی هستند. از مقایسه فرکانس‌های حاصل با فرکانس‌های طبیعی سازه سالم می‌توان عمر سازه را تشخیص داد (Quek et al., 2003).

۲-۱-۲- روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی

در سال‌های اخیر علاقه فزاینده‌ای به استفاده از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی میزان و مکان آسیب در ساختارهای پیچیده وجود داشته است. به دلیل ظرفیت بالای شبکه‌های عصبی در تشخیص دقیق الگوها، توانایی یادگیری و مدل‌سازی غیرخطی می‌توان از این روش برای پایش سلامتی سدها به صورت گوناگون بهره برد (Doebling et al., 1996).

۲-۱-۳- روش‌های مبتنی بر تشخیص الگو

وجود آسیب در سازه موجب تغییر مشخصات مودال شده که خود موجب تغییر در الگوی پاسخ سازه می‌شود. با بررسی این الگو می‌توان به زمان، مکان و شدت آسیب پی برد. (Hou et al., 2004) موفق به تشخیص آسیب در سازه و پایش اغتشاشات در پاسخ دینامیکی شدند. هدف این روش این بود که نشان داده شود وقوع آسیب، موجب وقوع نقطه تکیه در پاسخ سازه می‌شود و آن را می‌توان در تبدیل ویولت پاسخ مشاهده نمود (Quek et al., 2003). روش دیگری در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس آمریکا بر پایه روش‌های آماری نیز پیشنهاد شده است. این روش شامل چهارچوب آماری تشخیص الگو است که از ارزیابی سازه و به دست آوردن پاسخ سازه و تشخیص پارامترهای حساس به آسیب تشکیل یافته است.

۲-۱-۴- روش‌های مبتنی بر فیلتر کالمان

روش فیلتر کالمان برپایه مدل استوار است و از یک الگوریتم بهینه تحلیل داده بازگشتی جهت تخمین پارامترهای لازم برای تشخیص آسیب استفاده می‌کند. متغیرهای مورد نیاز برای تشخیص آسیب همچون جرم و سختی و میرایی را نمی‌توان به صورت مستقیم اندازه‌گیری کرد و بنابراین پاسخ تغییر مکان، سرعت و یا شتاب سازه در عمل اندازه‌گیری می‌شوند. روش کالمان به صورت معادله حرکت، مقادیر پارامتری سازه را به پاسخ اندازه‌گیری شده مربوط می‌کند. این روش مقادیر پارامترهای سازه را با استفاده از مدل دینامیکی و اندازه‌گیری گذشته تخمین زده و آنگاه این مقادیر را ضمن مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی بهینه می‌کند.

۲-۱-۵- روش آماری

این روش برپایه روش بیزین پایه‌گذاری شده است. برتری مهم این روش در حالت‌هایی آشکار می‌شود که مقادیر ناکافی اندازه‌گیری وجود دارد. جهت حل مشکل عدم اطمینان‌ها، (Katafygiotis & Beck, 1995) یک چهارچوب آماری بر این اساس جهت تشخیص و پایش سلامتی سازه‌ها تعریف کرده‌اند. این روش آماری جهت حل مسائل مربوطه به عدم اطمینان‌های ناشی از نتایج ناکافی آزمایش، مشکلات مدل‌سازی، عدم حساسیت‌های پارامترهای مدال به تغییرات سختی و داده‌های ناکافی به علت کمبود حسگر و داده همراه با نوین توسعه یافت (Ismail et al., 2011).

۲-۱-۶- روش تحلیل سیگنال

از پاسخی که با استفاده از حسگرهای نصب شده روی سازه بدست آمده است، نمی‌توان مستقیماً جهت تشخیص آسیب استفاده نمود و نیاز است که این پاسخ مورد تحلیل و بررسی بیشتر قرار گیرد؛ لذا معمولاً سیگنال به حوزه دیگری تبدیل می‌شود تا خصوصیات آن آشکارتر شود. روش‌های مشهور در این کار تبدیل فوری، تبدیل ویولت و تبدیل هیلبرت هوانگ است (جدول ۲). این روش‌ها به‌طور گسترده در پایش سلامت سازه‌ها (SHM) برای استخراج ویژگی‌های آسیب از داده‌های حسگرها استفاده می‌شوند. انتخاب روش بستگی به نوع سازه، ماهیت آسیب، و دقت مورد نیاز دارد.

۲-۲- طراحی سامانه پایش سد باغان جم

سد باغان جم در ۱۲ کیلومتری غرب شهر انارستان در شهرستان جم استان بوشهر واقع شده است. این سد از نوع بتن غلطکی RCC بوده و ارتفاع سد از بستر ۵۴ متر - طول تاج ۳۱۱ متر - عرض تاج ۷/۵ متر است. برای بررسی اثر ساختمانگاه سه مدل ساخته شده است. در مدل اول خاک زیر سد همگن است و بصورت تک لایه در نظر گرفته می‌شود. در مدل دوم خاک زیر سد دو لایه بوده و لایه رویی سخت‌تر از لایه زیرین است. در مدل سوم سه لایه در نظر گرفته شده است که لایه‌های زیرین مقاومت بیشتری نسبت به لایه‌های رویی دارند. برای حل معادلات اندرکنشی به روش اجزای محدود، سیستم سد-پی-مخزن با اجزای چهارضلعی چهار گرهی کرنش صفحه‌ای گسسته‌سازی شده‌اند (شکل ۱ و ۲). عمق پی حدود سه برابر ارتفاع سد و برابر ۱۵۰ متر، مرزهای بینهایت در خاک نیز در فاصله حدوداً سه برابر ارتفاع سد و برابر ۱۵۰ متر از پنجه و پاشنه سد در نظر گرفته شدند. بتن مصرفی در سد باغان دارای چگالی ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول الاستیسیته ۳۱ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ در نظر گرفته شد. چگالی خاک بستر سد ۱۶۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته آن ۱ گیگاپاسکال و ضریب پواسون آن ۰/۳ فرض شد و از مدل خرابی پلاستیک استفاده گردید.

سه رکورد مولفه مختلف با PGAهای متفاوت برای ارزیابی موقعیت سنسورها در نظر گرفته شد. این سه رکورد را می‌توان مربوط به سه سطح خطر دانست بطوریکه $PGA > 0.7$ خطر زیاد، $0.4 < PGA < 0.7$ خطر متوسط و $PGA < 0.4$ خطر کم در نظر گرفته شد. برای این منظور سه رکورد ثبت شده در ایستگاه بم ۲۰۰۳ و زلزله کویتا ۱۹۷۶ و زلزله السترو، برای ساختمانگاه سد باغان مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شدند. اطلاعات این رکوردها از سایت مرکز مطالعات مهندسی زلزله (PEER) استخراج و در نرم‌افزار آباکوس وارد شد. در خصوص انتخاب رکوردها نیز نکاتی مثل مشهور بودن رکورد، استفاده از آن‌ها در مطالعات قبلی، داشتن شدت قابل توجه و ... مد نظر بوده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها

Table 1. Summary of damage detection methods in structures

روش تشخیص آسیب	مبنای روش	مزایا	معایب/محدودیت‌ها
روش‌های مبتنی بر تحلیل مودال	تغییر در فرکانس‌های طبیعی، شکل مود و نسبت میرایی	عدم نیاز به مدل دقیق اولیه، قابلیت تشخیص تغییرات کلی در سازه	حساسیت کم به آسیب‌های موضعی، تأثیرپذیری از شرایط محیطی و نویز
روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی	یادگیری الگوهای غیرخطی و ارتباط بین پاسخ سازه و آسیب	توانایی مدل‌سازی پیچیده، تشخیص دقیق الگوهای آسیب	نیاز به داده‌های آموزشی زیاد، پیچیدگی محاسباتی
روش‌های مبتنی بر تشخیص الگو	شناسایی تغییرات در الگوی پاسخ سازه (مانند نقاط تکیه در تبدیل وولت)	تشخیص همزمان زمان، مکان و شدت آسیب	وابستگی به دقت حسگرها، حساسیت به نویز
روش‌های مبتنی بر فیلتر کالمان	تخمین بهینه پارامترهای سازه (جرم، سختی، میرایی) با استفاده از پارامترها، مناسب برای سیستم‌های داده‌های اندازه‌گیری شده	قابلیت به‌روزرسانی آنلاین	نیاز به مدل دقیق اولیه، پیچیدگی در پیاده‌سازی برای سازه‌های بزرگ
روش‌های آماری (بیزین)	تحلیل عدم قطعیت‌ها در داده‌های ناکافی یا پرنویز	انعطاف‌پذیری در شرایط عدم قطعیت، ترکیب اطلاعات پیشین و پسین	نیاز به محاسبات پیچیده، وابستگی به مدل آماری انتخابی
روش‌های تحلیل سیگنال	تبدیل سیگنال‌های پاسخ سازه (تبدیل فوریه، وولت، هیلبرت-هوانگ)	آشکارسازی ویژگی‌های پنهان آسیب در سیگنال‌ها	وابستگی به نوع تبدیل مورد استفاده، حساسیت به نویز و تعداد حسگرها

جدول ۲- خلاصه‌ای از روش‌های تحلیل سیگنال
Table 2. Summary of signal analysis methods

روش	حوزه تحلیل	نقاط قوت	نقاط ضعف
تبدیل فوریه	فقط فرکانس	ساده و سریع	از دست دادن اطلاعات زمانی
تبدیل وولت	زمان-فرکانس	تشخیص آسیب‌های موضعی	انتخاب تابع وولت مناسب چالش‌برانگیز
هیلبرت-هوانگ	زمان-فرکانس-میرایی	مناسب برای سیستم‌های غیرخطی	پیچیدگی محاسباتی

شکل ۲- نمودار تنش کششی و کرنش بتن

شکل ۱- نمودار تنش کرنش فشاری بتن

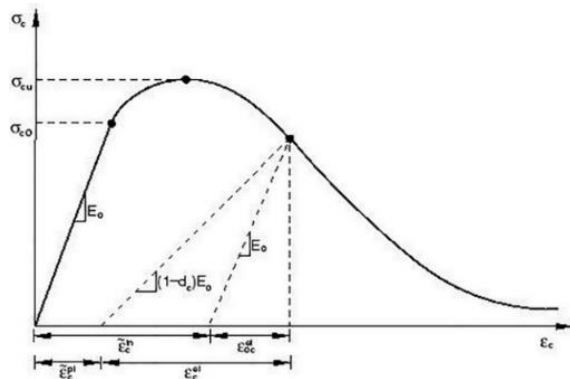


Fig 1. Concrete compressive stress-strain diagram

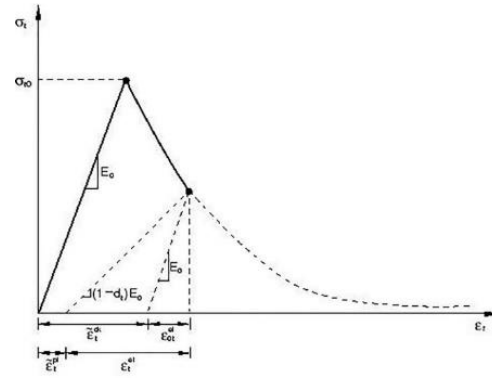


Fig 2. Concrete tensile stress and strain diagram

شکل ۳- نمودار شتاب زلزله (مولفه طولی)

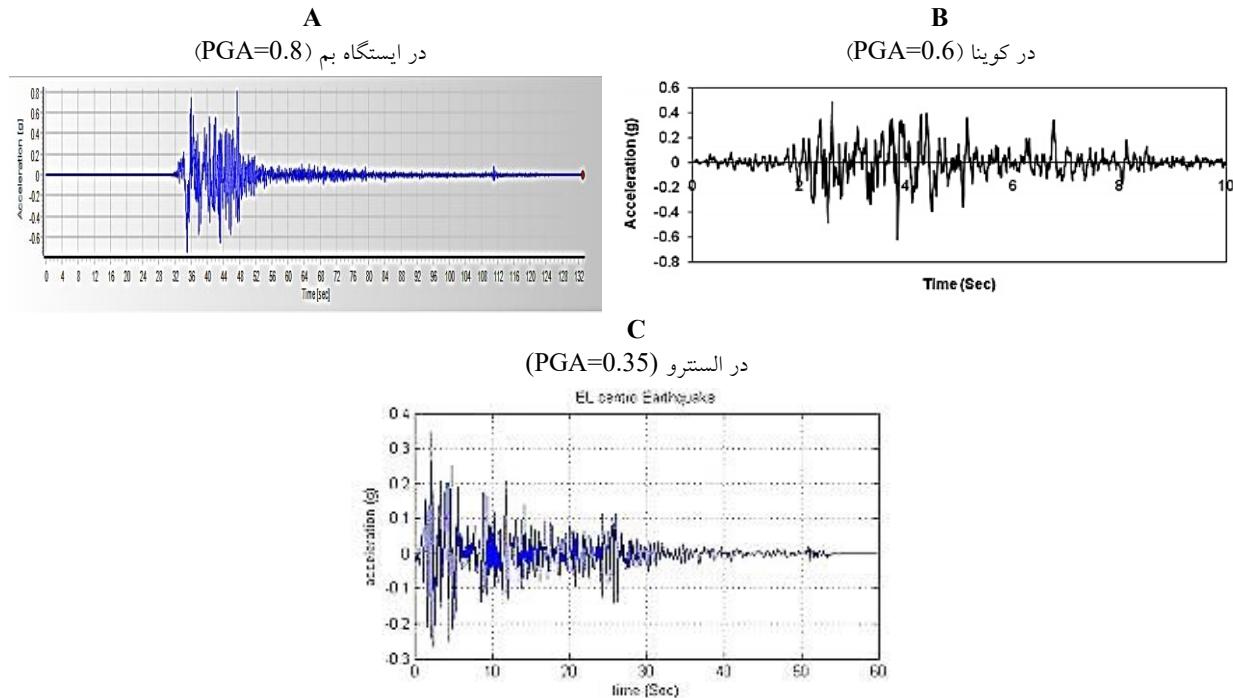


Fig 3. Earthquake acceleration diagram (longitudinal component). A: at Bam station (PGA=0.8); B at Koina (PGA=0.6); C: at Elcentro (PGA=0.35)

۳- نتایج و بحث

سه سطح خطر لرزه‌ای برای ساختگاه سد در نظر گرفته شده است. پس از تحلیل تنش، در مناطقی که تنش فون مایسز بیش از ۱/۵ مگاپاسکال باشد، سنسور قرار داده می‌شود. همچنین برای جابجایی بیش از ۱ سانتی‌متر نیز سنسور کرنش سنج قرار داده می‌شود.

۳-۱- مدل اول (زلزله بم) - سطح خطر زیاد

در این مدل، طبق شکل (۴) پوش کانتور تنش فون مایسز و جابجایی بدنه سد ترسیم گردید و با توجه به نقاط حساس که احتمال ترک‌خوردگی وجود دارد و در جاهایی که تنش کششی بالاتر از ۱/۵ MPa بود نصب ۸ کرنش‌سنج به علت احتمال ترک‌خوردگی

پیشنهاد شد. همچنین در نقاطی که جابجایی مخالف صفر بود نصب ۱۰ کرنش سنج نیز پیشنهاد گردید که در مجموع ۱۸ کرنش سنج پیشنهاد گردید.

شکل ۴- موقعیت سنسورها

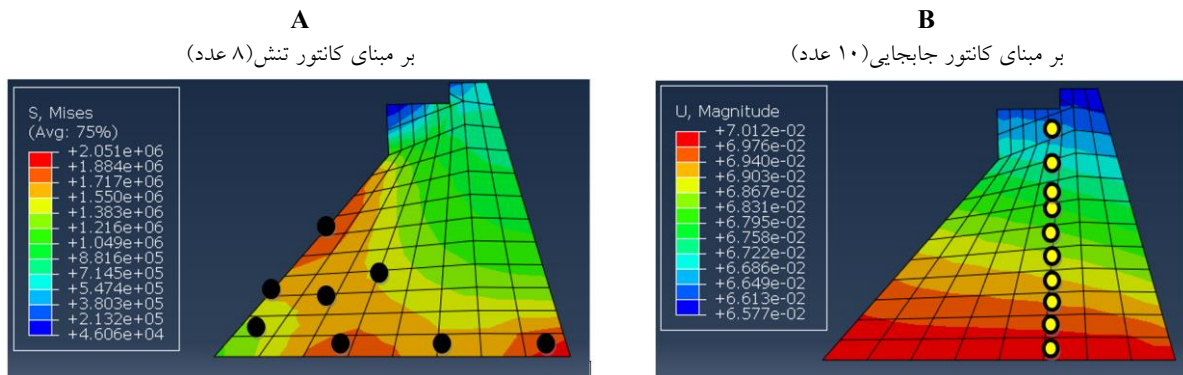


Fig 4. Sensor positions based on the stress contour (A); based on displacement contour (B)

۲-۳- مدل دوم (زلزله کوینا) - سطح خطر متوسط

در این مدل طبق شکل (۵) پوش کانتور تنش فون مایسز و جابجایی بدنه سد ترسیم گردید و با توجه به نقاط حساس که احتمال ترک خوردگی وجود دارد و در جاهایی که تنش کششی بالاتر از $1/5 \text{ MPa}$ بود نصب ۶ کرنش سنج به علت احتمال ترک خوردگی پیشنهاد شد. همچنین در نقاطی که جابجایی مخالف صفر بود نصب ۸ کرنش سنج نیز پیشنهاد گردید که در مجموع ۱۴ کرنش سنج پیشنهاد گردید.

شکل ۵- موقعیت سنسورها

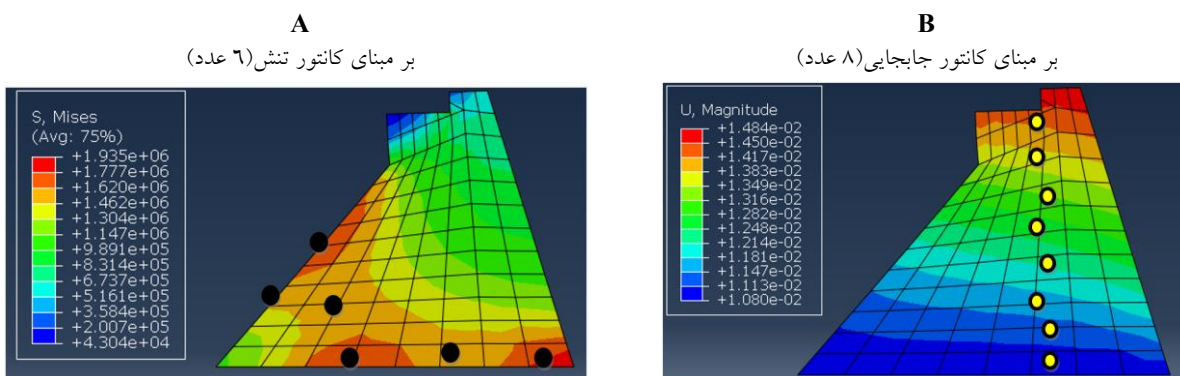


Fig 5. Sensor position based on the stress contour (A); based on displacement contour (B)

۳-۳- مدل سوم (زلزله السترو)

در این مدل طبق شکل (۶) پوش کانتور تنش فون مایسز و جابجایی بدنه سد ترسیم گردید و با توجه به نقاط حساس که احتمال ترک خوردگی وجود دارد و تنش کششی بالاتر از $1/5 \text{ MPa}$ بود نصب چهار کرنش سنج پیشنهاد شد. همچنین در نقاطی که جابجایی مخالف صفر بود نصب پنج کرنش سنج نیز پیشنهاد گردید که در مجموع ۹ کرنش سنج پیشنهاد گردید.

شکل ۶- موقعیت سنسورها

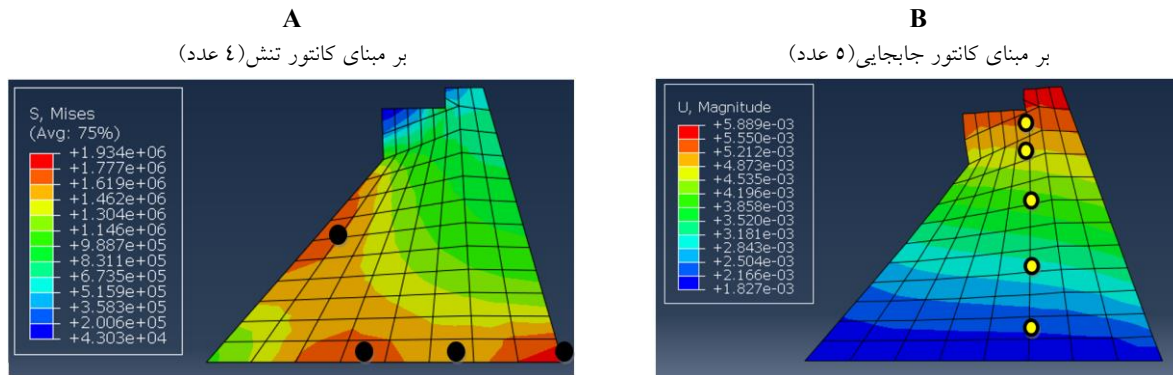


Fig 6. Sensor position based on the stress contour (A); based on displacement contour (B)

با توجه به اختلاف نتایج بین رکوردهای زلزله بر سدهای بتنی انجام یک تحلیل دینامیکی ضروری بود. در این تحقیق اثر رکورد پیرامون بدنه سد بررسی شد و مشاهده گردید که با افزایش حداکثر شتاب دینامیکی یعنی شتاب ماکزیمم رکورد و جابجایی نقاط مختلف آن افزایش می‌یابد و تعداد سنسورهای مورد نیاز نیز برحسب سطح خطر تغییر می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش آشنا نمودن جامعه مهندسين کشور با برخی از روش‌های مختلف پایش سلامتی سازه‌ها به ویژه سدها بوده است. در این تحقیق پس از معرفی روش‌های پایش، از روش اجزای محدود برای پایش سلامت یک سد بتنی استفاده شد. با توجه به نتایج مطالعه حاضر موارد زیر در طراحی سیستم پایش سدهای بتنی پیشنهاد می‌گردد:

ابتدا یک تحلیل تنش تحت اثر بارهای لرزه‌ای انجام شود و در نقاط بحرانی سنسورهای جابجایی سنج قرار داده شود.

یک معیار تنش برای قرار دادن سنسورها تعریف شود. برای مثال در این مطالعه اگر تنش کششی بیش از $1/5$ مگاپاسکال باشد قرار دادن یک سنسور به دلیل احتمال وقوع ترک پیشنهاد می‌گردد.

طبق نتایج این تحقیق برحسب سطح خطر حداقل ۴ و حداکثر ۱۴ سنسور جابجایی سنج در کل بدنه سد بتنی پیشنهاد شد.

موقعیت سنسورها را می‌توان بر مبنای کانتورهای تنش و یا کانتور جابجایی در بدنه سد مشخص نمود و هر جایی که جابجایی مخالف صفر باشد و یا تنش‌ها از مقدار مجاز بتن فراتر رود، کرنش سنج پیشنهاد نمود.

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

سید شهاب امامزاده: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها، نرم‌افزار، تحلیل. **مصطفی حیدری**: راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Balageas, D., Fritzen, C. P., & Güemes, A. (Eds.). (2010). Structural health monitoring (Vol. 90). John Wiley & Sons.
- Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Technical Report No. LA-13070-MS. <https://doi.org/30.10.2172/249299>.
- Emamzadeh, S. (2022). Dynamics behavior investigation of concrete gravity dams by deep underwater explosion method. Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant, 8 (31), 29-40.
- Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C., & Kawasaki, B. S. (1978). Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. Applied physics letters, 32(10), 647-647.
- Hou, Z., Hera, A., & Noori, M. (2004). A stochastic model for localized disturbances and its applications. Probabilistic engineering mechanics, 19(3), 211-218.
- Huang, N. E., Wu, M. L. C., Long, S. R., Shen, S. S., Qu, W., Gloersen, P., & Fan, K. L. (2003). A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 459(2037), 2317-2345. <https://doi.org/10.1098/rspa.2003.1123>
- Ismail, Z., Ong, A. Z. C., & Rahman, A. G. A. (2011). Crack damage detection of reinforced concrete beams using local stiffness indicator. Scientific Research and Essays, 6(34), 6798-6803. <https://doi.org/10.5897/SRE11.040>
- Katafygiotis, L. S., & Beck, J. L. (1995). A very efficient moment calculation method for uncertain linear dynamic systems. Probabilistic engineering mechanics, 10(2), 117-128. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(95\)00005-](https://doi.org/10.1016/0266-8920(95)00005-)
- Ma, C., Xu, X., Yang, J., & Cheng, L. (2023). Safety monitoring and management of reservoir and dams. *Water*, 15(6), 1078. <https://doi.org/10.3390/w15061078>
- Oliveira, S., & Alegre, A. (2019). Seismic and structural health monitoring of dams in Portugal. *Seismic structural health monitoring: from theory to successful applications*, 87-113.
- Oliveira, S., & Alegre, A. (2020). Seismic and structural health monitoring of Cabril dam. Software development for informed management. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 10(5), 913-925. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00425-0>
- Oliveira, S., Alegre, A., Carvalho, E., Mendes, P., & Proença, J. (2022). Seismic and structural health monitoring systems for large dams: theoretical, computational and practical innovations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(9), 4483-4512. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01392-1>
- Quek, S. T., Tua, P. S., & Wang, Q. (2003). Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert–Huang transform of real signals. Smart materials and structures, 12(3), 447. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/12/3/316>

- Raufi, F., & Bahar, O. (2010). Damage Detection in 3-Story Moment Frame Building by Wavelet Analysis. In 14th European conference on Earthquake Eng. Ohrid. Macedonia.
- Robbe, E., Kashiwayanagi, M., & Yamane, Y. (2017). Seismic analyses of concrete dam, comparison between finite-element analyses and seismic records. In *16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile*.
- Sheykhali, M., Asadollahfardi, G., & Emamzadeh, S. S. (2020). Evaluation of the vulnerability of water supply facilities using the AHP and RAMCAP combined methods. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(5), 1205-1220. <https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15289.5873>. (In Persian)
- Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R., & Czarnecki, J. J. (2003). A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. Los Alamos National Laboratory, USA, 1(16), 10-12989.
- Zarafshan, A., & Ansari, F. (2013, June). Damage index matrix: A novel damage identification method using Hilbert-Huang transformation. In *Topics in Modal Analysis, Volume 7: Proceedings of the 31st IMAC, A Conference on Structural Dynamics*, 2013 (pp. 439-450). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6585-0_42



Social-cultural responsibility of consumers, stakeholders and decision makers of water in water shortage crisis

Majid Raoufi Borojeni ¹, Siamak Koorang Beheshti ^{2*}, Ali Rashidpoor ¹

¹ Department of Culture & Communication, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

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

Corresponding Author email: Sk.beheshti@khuif.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 11 Jan 2025

Revised: 26 Feb 2025

Accepted: 30 Apr 2025

Published: 07 May 2025

Extended Abstract

Introduction

Water scarcity has emerged as one of the most complex global challenges, significantly impacting human life and ecosystems. While previous research has predominantly focused on technical and economic dimensions, the neglect of socio-cultural aspects as a key factor in sustainable water management remains evident. This study aims to explore the socio-cultural responsibility of water stakeholders (consumers, policymakers, and other beneficiaries) and develop a comprehensive model for crisis management. The research is based on the premise that sustainable solutions to water crises require a deep understanding of the cultural layers influencing water-related behaviors. By integrating two key concepts—social responsibility (with cognitive, emotional, and functional dimensions) and cultural responsibility (comprising values, beliefs, and behavioral habits)—this study presents a novel framework for analyzing this phenomenon.

Materials and Methods

This qualitative study employs Braun and Clarke's (2006) thematic analysis method. A purposive sampling technique was used, involving 14 informed stakeholders in the water sector (including academics, farmers, industry professionals, and policymakers). Data were collected through semi-structured interviews and analyzed in six stages: initial coding, extraction of basic and organizing themes, and identification of overarching themes. Validity was ensured using Lincoln and Guba's criteria (participant review, independent coder agreement, and rich description). Responsibility was examined at two levels: social (cognitive awareness, emotional commitment, and functional participation) and cultural (values, beliefs, and habitual practices).

Results and Discussion

Data analysis revealed 43 meaningful units and 11 core themes, categorized into three overarching dimensions: Values: Water literacy, technical-communication skills, and informational transparency were identified as prerequisites for responsibility. Beliefs: Realism, future-oriented thinking, and respect for laws emerged as cognitive-emotional foundations for responsible action. Habitual Practices: Creativity, result-oriented actions, and collective participation were highlighted as key behavioral indicators. Findings suggest that effective crisis management depends on the dynamic interaction of these dimensions at individual, organizational, and societal levels. The proposed model emphasizes transforming "water responsibility" into a cultural norm.



Conclusion

This study demonstrates that addressing water scarcity requires simultaneous attention to technical and socio-cultural dimensions. Practical recommendations include: Educational: Integrating water literacy and communication skills into curricula. Cultural: Promoting water conservation as an ethical value through media. Governance: Reforming decision-making structures via stakeholder participation and transparency. Economic: Developing water-efficient industries and modern agriculture.

Keywords: Sociocultural responsibility, Water scarcity crisis, Theme analysis, Water literacy, Participatory water management

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

Majid Raoufi Borojeni: Writing - original draft, Methodology, Data collection & analysis. **Siamak Koorang Beheshti:** Writing - review & editing, Methodology, Validation. **Ali Rashidpoor:** Supervision, Methodology, Data analysis, Text revision, Data curation.

Citation: Raoufi Borojeni, M., Koorang Beheshti, S., & Rashidpoor, A. (2024). Social-cultural responsibility of consumers, stakeholders and decision makers of water in water shortage crisis. *Technical Strategies in Water Systems*, 2(4), 328-338. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1196264>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



مسئولیت فرهنگی - اجتماعی مصرف‌کنندگان، ذینفعان و تصمیم‌گیرندگان آب در بحران کم آبی

مجید رئوفی بروجنی^۱، سیامک کورنگ بهشتی^{۲*}، علی رشید پور^۱

۱. گروه فرهنگ و ارتباطات، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

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

ایمیل نویسنده مسئول: Sk.beheshti@khuisf.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۲/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲

چکیده

با توجه به تداوم بحران کم‌آبی و پیامدهای گسترده آن بر جوامع انسانی و اکوسیستم‌ها، این پژوهش با هدف واکاوی ابعاد فرهنگی-اجتماعی مسئولیت‌پذیری ذینفعان آب (مصرف‌کنندگان، تصمیم‌گیران و ذینفعان) طراحی شده است. مطالعه حاضر بر این فرض استوار است که حل پایدار بحران آب مستلزم درک عمیق لایه‌های فرهنگی مؤثر بر رفتارهای آبی است. این تحقیق با رویکرد کیفی و با استفاده از روش تحلیل مضمون انجام شده است. با نمونه‌گیری نظری، ۱۴ مشارکت‌کننده آگاه و دغدغه‌مند در حوزه آب انتخاب شدند. داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته عمیق جمع‌آوری و با پیروی از روش ۶ مرحله‌ای براون و کلارک تحلیل شدند. جهت تضمین اعتبار یافته‌ها، از معیارهای لینکولن و گوبا شامل بازبینی مشارکت‌کنندگان و کدگذاری توسط دو پژوهشگر مستقل استفاده شد. تحلیل داده‌ها منجر به استخراج دو سازه اصلی شامل مسئولیت اجتماعی در سه بُعد شناختی (آگاهی از پیامدهای مصرف)، عاطفی (دغدغه‌مندی نسبت به نسل‌های آینده) و عملکردی (مشارکت فعال در مدیریت آب) و مسئولیت فرهنگی در سه بعد ارزش‌ها (سواد آبی، مهارت‌ها، صداقت اطلاعاتی)، باورها (قانون مداری، واقع‌بینی، آینده‌نگری) و عادت‌واره‌ها (خلاقیت، نتیجه‌گرایی، جمع‌گرایی، ریسک‌پذیری) شد. این ابعاد در قالب یک مدل پارادایمی تلفیق شدند که نشان‌دهنده تعامل پویای عوامل فرهنگی-اجتماعی در مدیریت بحران آب است. یافته‌ها مؤید آن است که حل بحران کم‌آبی مستلزم توجه همزمان به ابعاد فنی و فرهنگی-اجتماعی است. مدل پیشنهادی می‌تواند مبنایی برای طراحی برنامه‌های آموزشی و سیاست‌گذاری‌های مشارکتی در مدیریت آب باشد. این پژوهش بر ضرورت تبدیل "مسئولیت آبی" به یک هنجار فرهنگی تأکید دارد.

واژگان کلیدی: مسئولیت فرهنگی-اجتماعی، بحران کم‌آبی، تحلیل مضمون، سواد آبی، مدیریت مشارکتی آب

استناد: رئوفی بروجنی، م.، کورنگ بهشتی، س. و رشیدپور، ع. (۱۴۰۳). مسئولیت فرهنگی-اجتماعی مصرف‌کنندگان، ذینفعان و تصمیم‌گیرندگان

آب در بحران کم آبی. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۲(۴): ۳۳۸-۳۲۸. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1196264>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

در عصر حاضر، بحران کم‌آبی به عنوان یکی از پیچیده‌ترین چالش‌های جهانی، ابعاد مختلف حیات انسانی و محیط زیست را تحت تأثیر قرار داده است. این در حالی است که بیشتر پژوهش‌های پیشین در این حوزه بر جنبه‌های فنی و اقتصادی متمرکز بوده‌اند و غفلت از ابعاد فرهنگی- اجتماعی به عنوان عاملی کلیدی در مدیریت پایدار این بحران محسوس است (Raoufi et al., 2024). از سوی دیگر اهمیت مفهوم مسئولیت‌پذیری به عنوان موضوعی قابل ملاحظه در بحث، تفسیر، نظریه‌پردازی و تحقیق در دهه‌های اخیر همواره مورد توجه قرار گرفته است. مسئولیت فرهنگی، که ترکیبی از دو مفهوم فرهنگ و مسئولیت است را می‌توان در ارتباط با مراقبت از نسل‌های کنونی و آینده، احترام به فرهنگ افراد و حفظ یکپارچگی آن دانست (Ashtarian & Khaleghipour, 2020). این مفهوم در مقایسه با سایر مفاهیم مسئولیت‌پذیری، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است (Ardalan et al., 2015). این پژوهش با توجه به این پیش فرض که مسئولیت‌پذیری فرهنگی- اجتماعی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در تعدیل اثرات بحران کم‌آبی ایفا کند، به بررسی این مقوله می‌پردازد. مطالعه حاضر بر مبنای تلفیق دو مفهوم کلیدی مسئولیت اجتماعی و «مسئولیت فرهنگی استوار است. مسئولیت اجتماعی با ابعاد سه‌گانه شناختی (آگاهی)، عاطفی (تعهد) و عملکردی (مشارکت) و مسئولیت فرهنگی با مؤلفه‌های ارزش‌ها، باورها و عادت‌واره‌ها، چارچوب تحلیلی پژوهش را تشکیل می‌دهند. این پژوهش از نظریه‌های صاحب‌نظرانی چون (Berman, 1997; Perkins 1984; Miller, 1983) در زمینه ابعاد سه‌گانه مسئولیت اجتماعی شامل میزان و نحوه آگاهی افراد، ایجاد انگیزه و ایجاد مهارت‌های اجتماعی برای عمل به مسئولیت‌های اجتماعی (Farshadfar & Shojaei, 2023)، نظریه (Swidler, 1986) در زمینه تأثیر فرهنگ بر کنش‌های اجتماعی از طریق شکل دادن به مجموعه‌ای از عادات، مهارت‌ها و سبک‌هایی که افراد از آن‌ها استراتژی‌های کنش را می‌سازند و دیدگاه‌های (Ganescu & Gangone, 2017) در خصوص فرهنگ سازمانی مسئولیت‌پذیر، به دنبال توسعه مدلی بومی برای مسئولیت‌پذیری فرهنگی- اجتماعی در بحران کم‌آبی، الهام گرفته است. (Mirmohammadi et al., 2016) به شناسایی عوامل اجتماعی- فرهنگی موثر بر مسئولیت‌پذیری پرداختند. یافته‌ها نشان داد چهارمؤلفه نگرش دینی، فرانوگرایی، رسانه و اعتماد اجتماعی بر مسئولیت‌پذیری افراد تأثیر گذارند. (Ganescu & Gangone, 2017) با باز تعریف مفهوم فرهنگ سازمانی، مسئولیت‌پذیری اجتماعی را به عنوان عاملی هماهنگ‌کننده بین سازمان و ذینفعان برای افزایش عملکرد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی دانسته است. (Sulaymonov, 2020) به شناسایی همبستگی بین مسئولیت اجتماعی شرکت و فرهنگ پرداخت. یافته‌ها حاکی از آن بود که مسئولیت اجتماعی یک هنجار ناگفته برای احترام به خود و تمایل به دستیابی به نتایج عالی شرکت‌ها است. (Ashtarian & Khaleghipour, 2020) مؤلفه‌های مسئولیت فرهنگی را در سه سطح سازمان، جامعه هدف و سطح جامعه بین‌الملل تعریف و تشریح کردند و در نتیجه‌گیری خود به مؤلفه‌های مهم در هر سطح از جمله رشد سواد فرهنگی، خلاقیت، احترام به ارزش‌ها، تنوع فرهنگی، اعتماد، ارتباطات میان فرهنگی و ترویج فرهنگ صلح و دوستی اشاره کردند. همچنین آنان به طراحی الگوی مسئولیت فرهنگی شرکت‌ها در سیاست‌گذاری شهری پرداختند. یافته‌ها به تأثیرات شگرف نوع فعالیت شرکت‌های تجاری در زندگی فرهنگی افراد اشاره دارند. (Kadkhodaei et al., 2021) مؤثرترین راهکارهای فرهنگ‌سازی مصرف آب در کلان‌شهرها را شناسایی کردند. یافته‌ها نشان داد ترکیب آموزش شهروندی و تبلیغات رسانه‌ای می‌تواند تا ۳۵٪ مصرف را کاهش دهد. این مطالعه بر اهمیت آموزش مستمر و تکرار پیام‌های فرهنگی به عنوان عوامل کلیدی در تغییر رفتار مصرف تأکید دارد.

(Aryabkina et al., 2024) رابطه آموزش فرهنگی اجتماعی با مسئولیت اجتماعی در جوانان را بررسی کردند. یافته‌ها بر تغییرات مثبت قابل توجه در سطوح مسئولیت اجتماعی در اثر اجرای برنامه‌های آموزشی تاکید دارند.

(Stahl et al., 2024) با تحلیل رابطه فرهنگ و مسئولیت اجتماعی، زمینه فرهنگی موجود در سازمان را به عنوان یک عامل اصلی تأثیرگذار بر استراتژی‌ها و شیوه‌های مسئولیت اجتماعی و پایداری شرکت دانستند و به نقش مهم و مثبت عامل زمینه فرهنگی بر تمایل اعضای سازمان به مشارکت در رفتارهای مسئولانه تاکید کردند.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده، در زمینه موضوعاتی همچون نقش عوامل فرهنگی در مسئولیت‌پذیری اجتماعی نسبت به بحران کم‌آبی، ارائه رویکردی تلفیقی در بررسی مسئولیت‌پذیری توامان ابعاد اجتماعی و ابعاد فرهنگی و ارائه راهکارهای عملی برای نهاده‌سازی مسئولیت‌پذیری فرهنگی-اجتماعی در سطوح مختلف فردی، سازمانی و جامعه‌ای تحقیقات کمتری انجام شده است. لذا هدف از انجام این پژوهش پس از واکاوی مؤلفه‌های فرهنگی مؤثر بر مسئولیت‌پذیری اجتماعی در بحران کم‌آبی، طراحی مدلی مفهومی برای تبیین رابطه بین مسئولیت فرهنگی و اجتماعی در مدیریت بحران آب و ارائه راهکارهای عملیاتی جهت تقویت مسئولیت‌پذیری فرهنگی-اجتماعی در مواجهه با بحران کم‌آبی است در واقع این پژوهش در پی پاسخ به این پرسش هاست که مؤلفه‌های کلیدی مسئولیت فرهنگی مؤثر بر مدیریت بحران کم‌آبی کدامند؟ چگونه می‌توان مسئولیت‌پذیری اجتماعی را از طریق مکانیسم‌های فرهنگی تقویت کرد؟ و الگوی بهینه برای نهاده‌سازی مسئولیت فرهنگی-اجتماعی در بحران کم‌آبی چیست؟

۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه با رویکرد کیفی و با استفاده از روش تحلیل مضمون (Braun & Clarke, 2006) انجام شده است. پژوهش حاضر از منظر پارادایمی در چارچوب تفسیری، از منظر رویکرد کیفی، از منظر هدف اکتشافی و از منظر منطق استقرایی-استفهامی طراحی شده است. تحلیل مضمون به عنوان یکی از روش‌های بنیادین و کارآمد تحلیل داده‌های کیفی در این پژوهش به کار گرفته شده است. نمونه‌گیری به صورت هدفمند و با معیارهای مشخص انجام شد. شرکت‌کنندگان شامل ۱۴ نفر از افراد صاحب نظر و ذی‌نفع در حوزه آب بودند که دو ویژگی مشترک داشتند: ۱) علاقه‌مندی و دغدغه‌مندی نسبت به مسائل کم‌آبی، ۲) برخورداری از اطلاعات، تجربه یا دانش تخصصی در این حوزه.

نمونه‌ها شامل اساتید دانشگاه، کارشناسان آموزش و روانشناسی اجتماعی، دانشجویان رشته‌های گردشگری، روانشناسی و جامعه‌شناسی، کشاورزان (مصرف‌کنندگان)، کارشناسان صنایع آب‌بر، کسبه مرتبط با تفریحات آبی (ذینفعان) و مسئولان سازمان آب و شهرداری (تصمیم‌گیرندگان) بودند.

داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته عمیق جمع‌آوری شدند. مسئولیت‌پذیری مصرف‌کنندگان، ذینفعان و تصمیم‌گیرندگان آب در سطح فردی و گروهی مورد پرسش قرار گرفت. پس از انجام ۱۱ مصاحبه، اشباع نظری حاصل شد و برای اطمینان، ۳ مصاحبه دیگر نیز انجام گرفت. تحلیل داده‌ها بر اساس روش ۶ مرحله‌ای (Braun & Clarke, 2006) انجام شد که شامل ۱- آشنایی با داده‌ها؛ مطالعه مکرر و عمیق مصاحبه‌ها، ۲- کدگذاری اولیه: شناسایی ۹۸ داده اولیه، ۳- تولید مضامین: استخراج ۴۳ واحد معنادار، ۱۱ مضمون پایه و ۱۱ مضمون سازمان‌دهنده، ۴- بازبینی مضامین: اطمینان از تناسب مضامین با داده‌ها، ۵- تعریف و نام‌گذاری مضامین: شناسایی ۳ مضمون فراگیر، و ۶- گزارش‌نویسی: ارائه تحلیل نهایی بود. مسئولیت‌پذیری در دو سطح مورد بررسی قرار گرفت: مسئولیت اجتماعی در سه بعد شناختی، عاطفی و عملکردی بر اساس نظریات (Berman, 1997; Perkins, 1984; Miller, 1983) و مسئولیت

فرهنگی در سه بعد ارزش‌ها، باورها و عادت‌واره‌ها. برای تأمین اعتبار پژوهش از معیارهای چهارگانه (Lincoln & Guba, 1985) استفاده شد که شامل ۱- اعتبارپذیری: بازگشت نتایج به مصاحبه‌شوندگان برای تأیید، ۲- تأییدپذیری: بررسی نتایج توسط دو نفر از اساتید و یک دانشجوی دکتری، ۳- قابلیت اطمینان: توافق ۸۲ درصدی بین دو کدگذار مستقل و ۴- انتقال‌پذیری: ارائه توصیف غنی از فرآیند تحقیق بود. ملاحظات اخلاقی شامل اخذ رضایت آگاهانه از مشارکت‌کنندگان، حفظ محرمانگی اطلاعات، امکان خروج از مطالعه در هر مرحله، و بازخورد نتایج به مشارکت‌کنندگان رعایت گردید. این روش‌شناسی با ارائه چارچوب نظام‌مند و دقیق، امکان کشف و تحلیل عمیق ابعاد فرهنگی- اجتماعی مسئولیت‌پذیری در بحران کم‌آبی را فراهم کرده است.

۳- نتایج و بحث

تحلیل داده‌های کیفی در این پژوهش منجر به استخراج ۴۳ واحد معنادر، ۱۱ مضمون پایه و ۱۱ مضمون سازمان‌دهنده شد که در قالب سه مضمون فراگیر زیر دسته‌بندی شدند: ۱- بعد ارزش‌ها شامل سواد آبی (ارتقای دانش تخصصی و عمومی)، مهارت‌های ارتباطی و فنی، و صداقت در انتقال اطلاعات، ۲- بعد باورها شامل احترام به قانون و هنجارهای اجتماعی، واقع‌بینی و پذیرش شرایط بحران، تعلق خاطر به آینده، و درک متقابل و اعتماد اجتماعی و ۳- بعد عادت‌واره‌ها شامل خلاقیت در مدیریت منابع، نتیجه‌گرایی و عمل‌محوری، جمع‌گرایی و مشارکت‌جویی، و ریسک‌پذیری و نوآوری بود.

در بعد ارزش‌ها، یافته‌ها نشان داد ارتقای سواد آبی از طریق آموزش‌های رسمی و غیررسمی، توسعه مهارت‌های ارتباطی و شفافیت اطلاعاتی، پیش‌نیازهای اساسی برای مسئولیت‌پذیری اجتماعی محسوب می‌شوند. مصاحبه‌کنندگان به سطح سواد آبی و مهارت‌های ارتباطی اشاره کردند. این نتایج با مطالعات (Kadkhodaei et al., 2021; Aryabkina et al., 2024) که بر نقش محوری آموزش در افزایش مسئولیت‌پذیری تأکید دارند، همسو است.

در بعد باورها، تحلیل مصاحبه‌ها نشان داد تغییر نگرش از انکار به پذیرش واقعیت‌های بحران، تقویت حس تعلق جمعی و اعتماد متقابل بین ذی‌نفعان، بسترهای شناختی و عاطفی لازم برای اقدام مسئولانه را فراهم می‌کند. این یافته با تحقیق (et al., 2016) Mirmohammadi در مورد نقش اعتماد اجتماعی در مسئولیت‌پذیری همخوانی دارد.

در بعد عادت‌واره‌ها، مشارکت‌جویی، عمل‌گرایی و نوآوری به عنوان شاخص‌های رفتاری مسئولیت‌پذیری شناسایی شدند. این نتایج تأییدکننده یافته‌های (Ashtarian & Khaleghipour, 2020) در مورد تأثیر نهادها بر شکل‌گیری عادات فرهنگی است. جدول (۱) مفاهیم و مولفه‌های استخراج شده را نشان می‌دهد.

بر اساس جدول (۱) می‌توان به مدل مفهومی مطابق شکل (۱) دست یافت. مدل ارائه‌شده نشان می‌دهد مسئولیت فرهنگی- اجتماعی در بحران کم‌آبی حاصل تعامل پویای سه‌گانه «ارزش‌ها- باورها- عادت‌واره‌ها» است که در سه سطح فردی، سازمانی و اجتماعی عمل می‌کنند.

جدول ۱- ابعاد و مولفه‌های مسئولیت‌پذیری فرهنگی- اجتماعی در بحران کم آبی

Table 1. Dimensions and components of socio-cultural responsibility in water scarcity crisis

واحد‌های معنادار	مقوله پایه	مقوله سازمان دهنده	مقوله فراگیر	هدف
ارتقای سطح سواد آبی مردم و مسئولین، و ذینفعان آب از طریق آموزش‌های تخصصی، عمومی و رسانه‌ها انجام پژوهش‌های علمی و تدوین مقالات و ثبت وقایع موجود در مورد ابعاد کم آبی برگزاری همایش‌های علمی داخلی و بین‌المللی و انتقال دانش و تجربه	داشتن سواد آبی به عنوان یک ارزش رفتاری در جامعه	ارتقاء سطح سواد عمومی آب	بعد ارزش‌ها (شناختی)	مسئولیت فرهنگی - اجتماعی در بحران کم آبی
ارتقا سطح مهارت‌های ارتباطی شهروندان برای ایجاد ارتباط سازنده مرتبط با مشکلات کم آبی با یکدیگر و دوری از اختلافات از طریق آموزش تخصصی و عمومی و رسانه‌ها ارتقاء سطح مهارت‌های فنی افراد و گروه‌ها در جهت استفاده از روش‌های صرفه جویانه منابع آبی از طریق آموزش تخصصی و عمومی و رسانه‌ها	داشتن مهارت‌ها برای کنترل مصرف آب به عنوان یک ارزش در جامعه	ارتقاء سطح مهارت‌های عمومی		
توسعه رسانه‌ها برای آگاهی رسانی از طریق تولید محتواهای خبری، آموزشی، علمی و هنری مرتبط با بحران کم آبی توسعه فضای گفتگو و تسهیل جریان ارتباطی بین شهروندان، ذینفعان آب و مسئولین	داشتن شفافیت و صداقت در انتقال اطلاعات	توسعه فرهنگ ارتباطات		
پذیرش شرایط بحران و ایجاد شرایط ذهنی مثبت در مواجهه با آن پذیرش استمرار خشکسالی و تبعات آن پذیرش نقش موثر تک تک افراد جامعه، در تغییر شرایط بحران کم آبی تغییر نگاه مردم به شرایط آبی گذشته و الگوی مصرف آب تغییر در دیدگاه ذینفعان آب در بهره برداری از آب تغییر در دیدگاه مسئولین در تصمیم‌گیری‌ها متناسب با شرایط کم آبی	داشتن نگاه واقع بینانه و حس امیدواری	تغییر مثبت در نگرش عمومی	بعد باورها (عاطفی)	
احساس مسئولیت شهروندان در جهت تقبل هزینه‌های مادی و غیرمادی، اصلاح روش‌ها و عادات مصرف آب احساس مسئولیت برای تقبل هزینه‌های اقدامات اصلاحی ساختاری، بخش خدمات عمومی و بیمارستان‌ها برای به حداقل رساندن هدر رفت آب احساس مسئولیت در کشاورزان و صاحبان صنایع در استفاده قانونی از منابع موجود آب احساس مسئولیت شرکت‌ها و تقبل هزینه اقدامات ساختاری در صنایع برای به حداقل رساندن هدر رفت آب	داشتن حس تعلق خاطر به آینده	تقویت حس مسئولیت اجتماعی		

واحد‌های معنادار	مقوله پایه	مقوله سازمان دهنده	مقوله فراگیر	هدف
جلوگیری از برداشت‌های بی‌رویه بالا دستی رودخانه شناسایی و برخورد با چاه‌های غیرمجاز جلوگیری از روش‌های سنتی کشاورزی و کاشت محصولات آب‌بر جلوگیری از روند مهاجرت و بارگذاری‌های جدید جمعیتی جلوگیری از ایجاد صنایع آب‌بر جدید مطالبه‌گری قانونی مداوم شهروندان و ذینفعان آب از مسئولین در جهت ممانعت از عادی شدن و فراموش شدن مشکلات به وجود آمده	احترام به قوانین مدنی و عرفی از طریق اقدامات قانونی و پیشگیرانه	توسعه فرهنگ قانون‌مداری		
تمرکز بر تصفیه و بازیابی فاضلاب شهرها برای صنایع آب‌بر تجدید نظر در مورد نوع و حجم فضای سبز شهری هدایت و ذخیره سازی آب‌های حاصل از بارندگی	تشویق و ترویج خلاقیت و نوآوری	توسعه فرهنگ صرفه‌جویی و باز یافت	بعد عادت‌واره‌ها (عملکردی)	
به کارگیری عملی تحقیقات علمی انجام شده در زمینه کم آبی اقدامات عملی و هماهنگ دستگاه‌های اجرایی موازی و پرهیز از شعار زدگی	تمرکز بر نتیجه به جای فرایند (نتیجه‌گرایی)	عملگرایی و پرهیز از شعار زدگی		
ایجاد سازمان‌های مردم نهاد برای پیگیری مسائل آب شهر حمایت مسئولین از سازمان‌های مردم نهاد ایجاد گروه‌ها و کمپین‌های مجازی در جهت جلب همکاری عمومی مردم، ذینفعان آب و مسئولین مشارکت شهروندان، ذینفعان و فعالان محیط زیست در تصمیم‌گیری‌های آبی به کارگیری نظرات اساتید و نخبگان در حوزه آب در تصمیم‌گیری‌های آبی مشارکت بین بخشی سازمان‌های مرتبط با آب در تصمیم‌گیری	ایجاد ساز و کار همکاری جمعی (جمع‌گرایی)	توسعه فرهنگ مشارکت		
توسعه صنایع غیرآب‌بر توسعه صنایع دستی و هنری توسعه گردشگری توسعه کشاورزی مدرن	ریسک پذیر بودن	توسعه کار آفرینی و اشتغال		

شکل ۱- مدل مفهومی مسئولیت فرهنگی- اجتماعی در بحران کم آبی

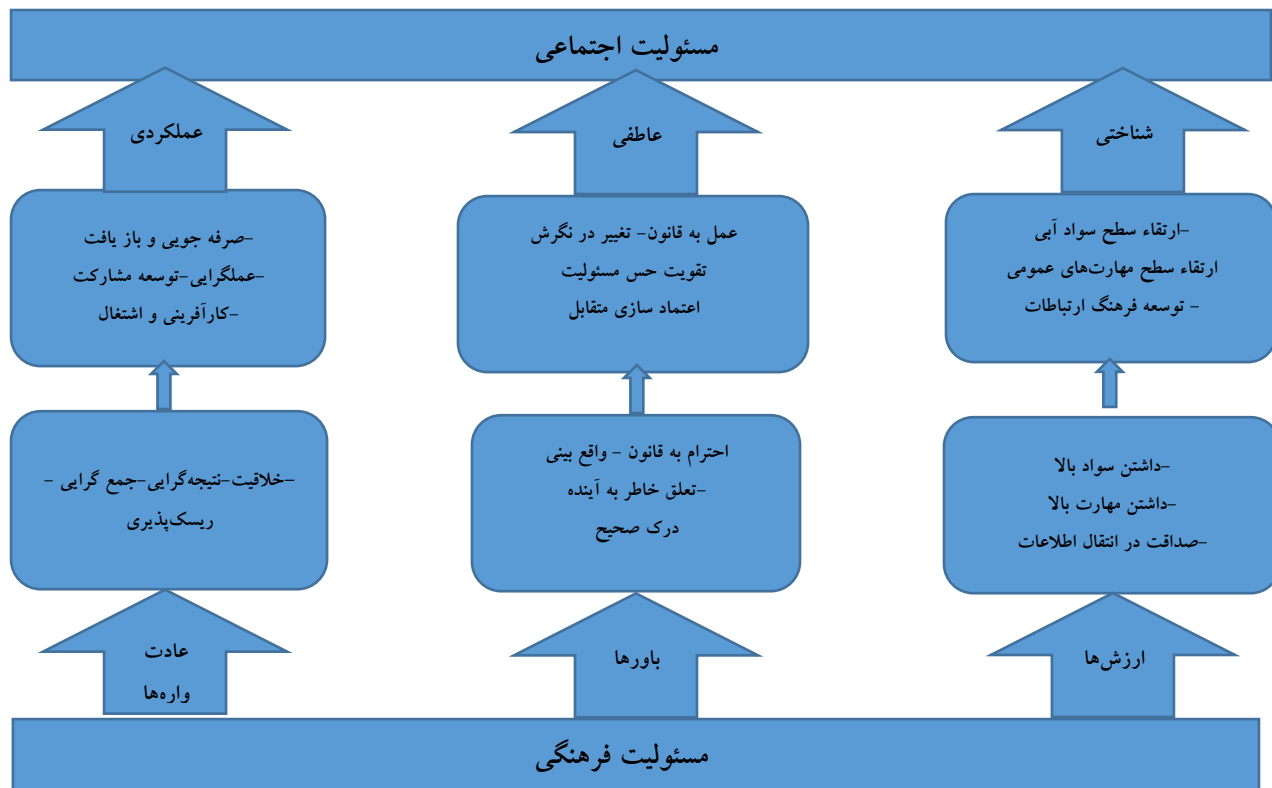


Fig 1. Framework for socio-cultural water responsibility in scarcity conditions

از پیامدهای نظری و عملی این پژوهش می‌توان به توسعه چارچوب نظری مسئولیت فرهنگی- اجتماعی در مدیریت بحران، ارائه الگویی برای برنامه‌ریزی آموزشی و فرهنگی، و طراحی راهکارهای مشارکتی برای مدیریت پایدار منابع آب اشاره نمود. این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز مواجه بوده است که شامل: محدودیت جغرافیایی نمونه‌گیری، ذهنی بودن برخی از شاخص‌های کیفی، نیاز به مطالعات طولی برای سنجش پایداری اثرات، می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر اقدام به تحلیل مسئولیت فرهنگی- اجتماعی ذینفعان آب در بحران کم‌آبی در قالب یک مطالعه کیفی با رویکرد تحلیل مضمون نموده است این مطالعه نشان می‌دهد که مدیریت موفق بحران کم‌آبی مستلزم توجه همزمان به ابعاد فنی و فرهنگی- اجتماعی است. در واکاوی ابعاد فرهنگی- اجتماعی مسئولیت‌پذیری به عنوان نمونه‌ای از آنهاست که می‌تواند در زمینه‌های مختلف مورد بررسی و توسعه قرار گیرد. در این پژوهش، مفاهیم و مقوله‌های استخراج شده در سه بعد مسئولیت اجتماعی شامل بعد شناختی، عاطفی و عملکردی بر اساس نظریات برمن، ریزارد و میلر و پرکینز و سه بعد مسئولیت فرهنگی شامل بعد ارزش‌ها، باورها، و عادت واره‌ها دسته بندی شدند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مسئولیت فرهنگی- اجتماعی در بحران کم‌آبی حاصل تعامل پویای سه گانه «ارزش‌ها- باورها- عادت واره‌ها» است که در سه سطح فردی، سازمانی و اجتماعی عمل می‌کنند. در توصیف این نتایج، بعد ارزش‌ها مبنایی برای شروع حرکت مسئولانه اجتماعی است. داشتن سواد و مهارت بالا و همچنین صداقت در انتقال اطلاعات به عنوان ارزش‌های غالب یک جامعه می‌تواند جامعه را به سمت افزایش سطح سواد عمومی آب، افزایش سطح مهارت‌های عمومی و

نیز توسعه فرهنگ ارتباطی به عنوان اقدامات اساسی برای ایفای مسئولیت اجتماعی افراد و گروه‌ها در قبال بحران کم آبی سوق دهد. در بعد باورها می‌توان این چنین نتیجه‌گیری کرد که در سایه ایجاد باورهای جدید می‌توان باعث تغییر در نگرش افراد، تقویت حس مسئولیت و اعتمادسازی متقابل در راستای ایفای نقش مسئولیت اجتماعی گردید. همچنین در بعد عادت واره‌ها، خلاقیت، نتیجه‌گرایی، جمع‌گرایی و ریسک‌پذیری، عاداتی است که در صورت نهادینه شدن، موجب اقداماتی چون صرفه‌جویی و بازیافت، عملگرایی، توسعه فرهنگ مشارکت، و کارآفرینی و اشتغال می‌گردد. بدین منظور موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد:

برنامه‌های آموزشی و پژوهشی: شامل گنجاندن سرفصل‌های آموزشی مهارت‌های ارتباطی در مراکز آموزشی، سازمان‌ها و شرکت‌ها، گنجاندن سرفصل‌های آموزشی روش‌های نوین صرفه‌جویی و استفاده بهینه از منابع آبی در مراکز آموزشی و سازمان‌ها و حمایت از انجام تحقیقات و مطالعات در زمینه‌های مختلف بحران کم آبی توسط پژوهشگران.

احیای ارزش‌های فرهنگی مرتبط با آب: ترویج روش‌های نوین صرفه‌جویی و استفاده بهینه از منابع آبی به عنوان باور اخلاقی حاکم بر جامعه مبتنی بر حس تعلق خاطر به آیندگان و باور پذیرکردن آن به عنوان یک ارزش برای جامعه دچار بحران کم آبی توسط نخبگان جامعه از طریق رسانه‌ها و شبکه‌های اجتماعی.

همکاری دولت و سایر بخش‌ها: حمایت از صنعت گردشگری و توجه به توسعه زیرساخت‌های آن، برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه فضاهای گردشگری شهری، تقویت زیرساخت‌های گردشگری، حمایت از صنایع دستی و هنری از طریق ایجاد تسهیلات، آموزش، تبلیغات و بازاریابی، حمایت از روش‌های کشاورزی مدرن از طریق ایجاد تسهیلات، آموزش، تبلیغات و بازاریابی.

تغییر در نحوه حکمرانی آب: اصلاح ساختار تصمیم‌گیری و حکمرانی آب از طریق ایجاد ساز و کار همکاری جمعی و مشارکت عمومی، پرهیز از هرگونه پنهان کاری در مورد ابعاد مختلف خشکسالی و اطلاع‌رسانی مداوم و موثر بحران از طریق رسانه‌ها، ترویج رفتار مسئولانه در قبال مصرف منابع آبی در ادارات، شرکت‌ها، مراکز آموزشی و سطح جامعه، همچنین تقویت سرمایه اجتماعی و اعتماد عمومی از طریق پرهیز از شعار زدگی و موازی کاری دستگاه‌های اجرایی.

پیشنهاد‌های پژوهشی آینده می‌تواند شامل بررسی تطبیقی بین‌فرهنگی، سنجش کمی اثرات برنامه‌های فرهنگ‌سازی و طراحی مداخله‌های آموزشی مبتنی بر یافته‌های حاضر باشد.

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

مجید رئوفی بروجنی: نگارش، روش‌شناسی، بررسی و جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل. سیامک کورنگ بهشتی: نگارش، ویرایش، روش‌شناسی و اعتبارسنجی. علی رشید پور: نظارت، روش‌شناسی و تجزیه تحلیل ویرایش متن، جمع‌آوری و تکمیل داده‌ها.

منابع

- Ardalan, M. R., Ghanbari, S., Beheshti Rad, R., & Navidi, P. (2015). The effect of social capital and social responsibility on organizational commitment; Case study: Staff of Razi University, Kermanshah. *Educational Measurement and Evaluation Studies*, 5(10), 109-132. (In Persian)
- Aryabkina, I., Spiridonova, A., Belonogova, L., & Kazakova, L. (2024). Sociocultural education as a key to fostering social responsibility in modern youth. *Amazonia Investiga*, 13(78), 113-123. <https://doi.org/10.34069/AI/2024.78.06.10>
- Ashtarian, K., & Khaleghipour, B. (2020). Designing a model of corporate cultural responsibility in urban policy making. *Iranian Journal of Public Policy*, 6(3), 145-167. <https://doi.org/10.22059/jppolicy.2020.79522>. (In Persian)
- Berman, S. (1997). Children's social consciousness and the development of social responsibility. State University of New York Press.
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Farshadfar, A., & Shojaei, M. S. (2023). The components of social responsibility based on Islamic sources. *Cultural Psychology*, 7(1), 1-20. <https://doi.org/10.30487/jcp.2023.345032.1425>. (In Persian)
- Ganescu, C., & Gangone, A. (2017). A model of socially responsible organizational culture. *Studia Universitatis Vasile Goldiş Arad. Seria Ştiinţe Economice*, 27(2), 45-59.
- Kadkhodaei, M., Jaefarzadeh, M. R., & Abbasi, A. (2021). Ranking of cultural methods for optimal domestic water consumption in metropolitan cities using the integrated grey-AHP and Grey-TOPSIS Model. *Journal of Water and Wastewater*, 32(1), 27-40. <https://doi.org/10.22093/wwj.2020.222682.2998>. (In Persian)
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). Sage. Newbury Park.
- Miller John P. (1983). The educational spectrum. Orientions to curriculum. Longman Inc. New York pp: 4-35, 183-184
- Mirmohammadi, M. S., Haghighatian, M., & Jahanbakhsh, E. (2016). A study on socio-cultural factors affecting the youth responsibility in Tehran. *Strategic Studies on Youth and Sports*, 15(34), 151-16. (In Persian)
- Perkins, D. N. (1984). The Mind Best work Ambridge, MA: Harvard University Press
- Raoufi Borojeni, M., Koorang Beheshti, S., & Rashidpoor, A. (2024). Paradigmatic pattern of cultural resilience in zayandehrud water shortage crisis. *Journal of Water and Sustainable Development*, 11(1), 61-72. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i1.2312-1289>. (In Persian)
- Stahl, G. K., Sully de Luque, M., & Miska, C. (2024). 690 Culture and corporate social responsibility and sustainability. In *The Oxford Handbook of Cross-Cultural Organizational Behavior* (pp. 690-717). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190085384.013.27>
- Sulaymonov, A. (2020). Correlation between corporate social responsibility and culture. *Modern Economy*, 11(8), 1432-1440. <https://doi.org/10.4236/me.2020.118101>
- Swidler, A. (1986). Culture in action: Symbols and strategies. *American Sociological Review*, 273-286. <https://doi.org/10.2307/2095521>

Research Article



Investigating the best low-Impact Development (LID) method for urban runoff management using Analytical Hierarchy Process (AHP) (Case study: Khomeinishahr)

Kamel Rezaei Adriani¹, Majid Riahi Samani^{2*}, Moslem Gheibi Hajivar¹

¹ Department of Civil Engineering, Ti.C., Islamic Azad University, Tiran, Iran.

² Department of Civil Engineering, Kho.C., Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

Corresponding Author email: majidriahisamani@iau.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 11 Feb 2025

Revised: 06 Apr 2025

Accepted: 10 May 2025

Published: 18 May 2025

Extended Abstract

Introduction

Urban floods, due to their severe economic, social, and environmental consequences, pose a critical challenge for municipal management. In arid and semi-arid regions like Khomeinishahr, rapid urbanization has increased impervious surfaces, exacerbated runoff and reducing groundwater recharge. Low Impact Development (LID) techniques have emerged as innovative solutions to restore natural hydrological cycles and mitigate flood risks. These methods emphasize infiltration, retention, and reuse of stormwater, while concurrently improving air quality, mitigating urban heat islands, and enhancing green cover. However, selecting optimal LID strategies depends on multifaceted factors, including climatic conditions, hydrological properties, economic constraints, and social acceptability. This study employs the Analytical Hierarchy Process (AHP) to prioritize LID techniques for urban runoff management in Khomeinishahr, offering a data-driven framework to address flood vulnerabilities.

Materials and Methods

This research integrates literature review and expert surveys to evaluate LID strategies against 14 key criteria (e.g., climate, slope, cost, space availability, land use). Data were collected through questionnaires administered to 30 domain experts and analysis of regional hydrological reports. The assessed LID techniques included green roofs, infiltration trenches, constructed wetlands, bioswales, permeable pavements, and bioretention systems. The AHP-based decision-making process involved:

Hierarchy Construction: Defining the goal (optimal LID selection), criteria, and alternatives.

Pairwise Comparisons: Assigning relative weights to criteria and alternatives using a 1–9 scale.

Weight Calculation: Synthesizing local and global weights via the Expert Choice software.

Sensitivity Analysis: Testing result robustness against criterion weight variations.

Modeling accounted for region-specific constraints, such as high urban density, limited land availability, and a hot, dry climate.

Results and Discussion

The AHP analysis identified green roofs (weight: 14.5%) as the most effective solution, given their multifunctional benefits: runoff volume reduction (up to 80%), urban cooling, air pollution mitigation, and energy savings. Infiltration trenches (12.3%) were recommended citywide, while constructed wetlands (10.1%) were prioritized for southern agricultural zones.

Key Influential Criteria: Climate (19.9% weight): Adaptation to high temperatures and erratic rainfall; Cost-Space Efficiency (15.2%): Green roofs' feasibility in dense urban fabric; Pollution/Temperature Reduction (12%): Green roofs' role in particulate capture and heat island mitigation.

Implementation Challenges: Public Awareness: Citizen engagement for rooftop greening initiatives; Structural Costs: Upfront expenses and technical requirements (e.g., load-bearing capacity); Spatial Limitations: Narrow streets hindering trench deployment.

Comparative studies (e.g., Izanloo and Bardi Sheikh's work in Bojnourd and Uda's Sydney case) corroborated the preference for infiltration-based systems. A multifunctional approach (e.g., hybrid green roof-wetland systems) is proposed for similar regions.

Conclusion

This study demonstrates the efficacy of AHP in prioritizing LID strategies for Khomeinishahr's runoff management. Green roofs, complemented by infiltration trenches and wetlands, offer a holistic solution to flood risks while delivering co-benefits. Municipal authorities should incentivize public participation and integrate these techniques into urban planning frameworks.

Keywords: Low Impact Development (LID), Urban runoff management, Analytical Hierarchy Process (AHP), Green roofs, Khomeinishahr

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

Kamel Rezaei Adriani: Writing, Methodology, Investigation & Data Collection, Software, Analysis; **Majid Riahi Samani:** Supervision, Writing, Editing, Methodology, and Validation; **Muslim Ghaibi Hajivor:** Supervision, Methodology, Software, and Data Analysis.

Citation: Rezaei Adriani, K., Riahi Samani, M., & Ghaibi Hajivor, M. (2024). Investigating the best low-impact development (LID) method for urban runoff management using analytical hierarchy process (AHP): Case study of Khomeinishahr. *Technical Strategies in Water Systems*, 2(4), 339-362. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1203763>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



مجله راهبردهای فنی در سامانه های آبی

<https://sanad.iau.ir/journal/tsws>

شاپا الکترونیکی: ۱۴۴۹-۲۹۸۱

زمستان ۱۴۰۳، دوره دو، شماره ۴،



بررسی بهترین روش توسعه کم اثر (LID) برای مدیریت رواناب شهری با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (مطالعه موردی: شهر خمینی شهر)

کامل رضایی آدریانی^۱، مجید ریاحی سامانی^{۲*}، مسلم غیبی حاجیور^۱

۱. گروه مهندسی عمران، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی، تیران، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: majidriahisamani@iau.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۲/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

چکیده

امروزه آشنایی با خطرات سیلاب‌های شهری به دلیل آثار زیانباری که ایجاد می‌کند، چگونگی ارزیابی و مقابله با آن از اهمیت بسیاری در سیستم‌های مدیریت شهری برخوردار است. آثار نامطلوب وقوع سیلاب در مناطق شهری را از نظر شدت خسارات وارد شده می‌توان با خسارات ناشی از طوفان، خشکسالی، زمین‌لرزه و رانش زمین مقایسه کرد. در سال‌های اخیر روش‌های توسعه کم اثر (LID) به عنوان روشی شناخته شده، بهترین و مقرون به صرفه‌ترین راه حل را در مدیریت و کاهش اثرات منفی سیلاب شهری ارائه نموده است. هر چندکه ظهور ابزارهای توسعه کم اثر در مدیریت آب‌های سطحی و حفظ کیفیت آن بسیار موثر است، ولی جانمایی، اجرا و بهره‌برداری بهینه این روش‌ها به شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی، اقتصادی و ... منطقه بستگی دارد. هدف از این مقاله استفاده از روش (AHP) در انتخاب بهترین روش توسعه کم اثر در مدیریت رواناب شهری خمینی شهر است. در این راستا چهارده معیار از میان کلیه معیارها و گزینه‌های موجود در انتخاب بهترین روش توسعه کم اثر توسط سی کارشناس خبره، گزینش شد و پس از انجام مقایسه‌های زوجی بین معیارها و گزینه‌ها، بر اساس نظرات ارائه شده، نتایج حاصل از مقایسه‌ها به ساختار تحلیل سلسله مراتبی تبدیل شد. نتایج حاصل از این تحقیق با مدلسازی در نرم‌افزار تحلیل سلسله مراتبی (Expert Choice) نشان داد روش بام سبز و ترانشه نفوذ در شهر خمینی شهر آثار مطلوبی در دفع، کنترل و استفاده از رواناب‌ها دارند. طبق نتایج نرم‌افزار روش بام سبز در حوضه شمالی و شمال شهر با توجه به وجود بیشترین ساخت و ساز و سطح اشغال بهترین گزینه معرفی شد. ترانشه نفوذ در تمام شهر خمینی شهر باید در دستور کار قرار گیرد و تالاب مصنوعی در حوضه جنوب شهر به علت وجود باغ‌ها و اراضی کشاورزی بهترین گزینه معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: توسعه کم اثر (LID)، مدیریت رواناب شهری، تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، بام‌های سبز، خمینی شهر

استناد: رضایی آدریانی، ک، ریاحی سامانی، م، و غیبی حاجیور، م. (۱۴۰۳). بررسی بهترین روش توسعه کم اثر (LID) برای مدیریت رواناب شهری با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) مطالعه موردی: شهر خمینی شهر. راهبردهای فنی در سیستم‌های آبی، ۲(۴)، ۳۳۹-۳۶۲.

<https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1203763>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

توسعه شهرها تغییرات قابل توجهی به فرایند چرخه هیدرولوژی وارد کرده است و به طور خاص باعث افزایش سطوح نفوذ ناپذیر، تشدید سیلاب‌ها، افزایش آلودگی در قسمت‌های پایاب، کاهش جریان پایه و کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی شده است (Shuster et al., 2005). در نتیجه این تغییرات، بهره‌گیری از سیستم هیدرولیک شهری در کنترل سیلاب‌ها مستلزم توجه خاصی به ساختار شهری است (Putnam, 1972). همچنین این موضوع لزوم استفاده از سیستم‌های نوین با حداقل اثرات تخریبی و افزایش بهره‌وری را ضروری ساخته است (Jia et al., 2013). در روش‌های نوین کنترل سیلاب‌های شهری، سعی بر نگهداشت بدون تأثیرگذاری مخرب سیلاب به جای دفع سریع آن می‌باشد. در این روش‌ها علاوه بر تغذیه آب‌های زیرزمینی، صدمات ناشی از سیلاب در مناطق پایین دست و هزینه‌های کنترل سیلاب با استفاده از نگهداری، ذخیره و نفوذ آب به زمین تا حد زیادی کاهش می‌یابد. یکی از روش‌های مدیریت رواناب شهری روش توسعه کم اثر است. روش‌های توسعه کم اثر مجموعه روش‌هایی است که در مناطق در حال توسعه با کمترین اثرات منفی بر این مناطق استفاده می‌شوند در حالیکه این روش برای حفظ یا بازگرداندن شرایط هیدرولوژیکی طبیعی یک حوضه آبریز و بهبود محیط زیست در آن حوضه است. روش توسعه کم اثر اولین بار در منطقه پرنس جرج ماریلند^۱ در اوایل سال ۱۹۹۰ آغاز شد و به سرعت در حال رشد است. روش‌های توسعه کم اثر برای حل مشکل رواناب‌های ایجاد شده در مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی حومه شهر پرنس جرج، جهت محافظت از منابع طبیعی گسترش پیدا کردند. این روش‌ها بر مدیریت سیلاب در منبع از طریق استفاده از فنون برنامه‌ریزی که به عنوان تکنیک‌های غیرسازه‌ای و یا کنترل‌های میکرواسکیل که به عنوان تکنیک‌های سازه‌ای شناخته می‌شوند، بنا گشتند تا در سراسر منطقه به منظور حفظ شرایط هیدرولوژیکی آن پخش گردند و این بر خلاف دیدگاه‌های رایج و سنتی است که معمولاً رواناب را به حوضچه‌های بزرگ که در مناطق زهکشی قرار گرفته‌اند انتقال می‌دهد. مهمترین اهداف کنترل رواناب در روش توسعه کم اثر شامل حداقل رساندن اختلال در شبکه زهکشی، حفظ و به‌وجود آوردن مناظر طبیعی، کاهش پوشش‌های نفوذناپذیر، افزایش ذخیره آب، تسهیل زهکشی و ایجاد فرصت برای نفوذ می‌باشد. از جمله مزایای این روش می‌توان به موثر بودن، اقتصادی بودن، انعطاف پذیری، افزودن ارزش به مناظر، دستیابی به اهداف چندمنظوره و پیروی از یک رویکرد سیستماتیک اشاره نمود. از جمله روش‌های توسعه کم اثر می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

روسازی‌های نفوذپذیر: روکش‌های نفوذپذیر را می‌توان به جای انواع سطوح نفوذناپذیر شهری به‌ویژه برای روکش پیاده‌روها و پارکینگ‌ها به‌کار برد. روکش‌های نفوذپذیر اجازه می‌دهند تا رواناب از طریق آنها زهکشی شود و به مخزن سنگی و لایه‌های زیرین خاک نفوذ یابد و یا موقت نگهداشته شود.

بام سبز: یک سیستم سقف گیاهی بسیار سبک همراه با مواد ضد آب، قابلیت زهکشی و رشد گیاهی متوسط با گیاهان مخصوص به خود است. مزایای این روش کاهش هزینه، تهویه مطبوع، طول عمر بالاتر، کاهش رواناب سطحی و قابلیت عرضه در بازار است. باغچه‌های نگهداشت آب باران: با استفاده از باغچه‌های نگهداشت آب باران به جای باغچه‌های معمولی می‌توان از طریق نفوذ دادن بهتر آب به درون خاک و تصفیه همزمان آن منجر به کاهش اوج و حجم رواناب شد. این باغچه‌ها به عنوان مخازنی جهت جمع‌آوری، فیلتر و نفوذ آلودگی رواناب، نشست و فیلتر شدن آلاینده‌ها می‌باشند (Madden et al., 2009).

فیلترهای نواری: پوشش‌هایی معمولاً از جنس گیاه هستند که رواناب سطحی قبل از ورود به کانال اصلی از آنها عبور کرده و سپس وارد کانال می‌شود. مزایای استفاده از این فیلترها کاهش خطر سیلاب، کاهش آلودگی آب، زیباسازی منطقه و کنترل فرسایش می‌باشد (Madden et al. 2009).

¹ Prince George's County, Maryland

جوی باغچه‌ها: کانال‌های باریک کم عمقی هستند که برای جلوگیری از فرسایش، تسهیل نفوذ آب به درون خاک علف کاری شده و حذف رسوب و مواد معلق استفاده می‌شوند. جوی باغچه‌ها نفوذ رواناب در خاک را افزایش داده و در نتیجه موجب کاهش بخش قابل ملاحظه‌ای از آلودگی‌های رواناب نیز می‌گردند (Madden et al. 2009).

ترانشه نفوذ: برای زهکشی رواناب خروجی از اماکن و محوطه‌هایی چون پارکینگ‌ها به عنوان جایگزین جوی بتنی یا در جوار جوی‌ها توصیه می‌شوند، ترانشه نفوذ، یک ترانشه طویل و کم عرض است که درون آن با ذرات درشت دانه و قطعات سنگ پر می‌شود و معمولاً مجرای خروجی ندارد. آب ورودی به این سیستم در فضای خالی مابین ذرات درشت دانه موقت ذخیره می‌شود و به تدریج از کف و دیوارها به درون خاک اطراف ترانشه نفوذ می‌کند (Madden et al. 2009).

تالاب مصنوعی: از سرعت رواناب کاسته و زمان لازم برای رسوب‌گذاری، نفوذ آب و جذب بیولوژیک آلاینده‌ها را فراهم می‌کند. این تالاب‌ها برای دریافت و تصفیه رواناب شهری یا رواناب‌های آمیخته به فاضلاب خام شهر گزینه بسیار مناسبی به شمار می‌روند و در واقع یکی از انواع تاسیسات پیشنهادی برای بهبود شرایط زیست محیطی و کاهش خطرات استفاده از رواناب‌های آلوده در اراضی مزروعی جنوب کلان شهرها هستند (Mohammadi et al., 2022).

سیستم‌های ماند بیولوژیک: راهکاری برای کنترل کیفیت و کمیت آب است که از ویژگی‌های شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی گیاهان، میکروب‌ها و خاک جهت حذف آلاینده‌ها از رواناب سیلاب استفاده می‌کند. تجهیزات ماند زیستی گودرفتگی‌های سطحی کم عمقی هستند که شامل لایه سطحی زیستی، لایه خاک ماسه‌ای و لایه نگهداشت هستند (Mohammadi et al., 2022).

بشکه‌های بارانی: یکی از روش‌های کم هزینه و موثر توسعه کم اثر هستند که به آسانی قابلیت اجرا و نگهداری دارند. این روش برای مکان‌های مسکونی و تجاری قابلیت کاربری دارند. کاربرد اصلی بشکه‌های بارانی در هنگام بارش باران است که رواناب ناشی از باران را از پشت بام‌ها جمع‌آوری نموده و در زمان مورد نیاز به عنوان مثال جهت آبیاری باغچه‌ها دوباره از این آب استفاده خواهد شد (Mohammadi et al., 2022). جهت تعیین بهترین روش توسعه کم اثر برای مدیریت رواناب شهری می‌توان از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده کرد. AHP یک روش جامع و قدرتمند برای تصمیم‌گیری دقیق با استفاده از اطلاعات تجربی و یا قضاوت‌های شخصی هر تصمیم‌گیرنده است. تحلیل سلسله مراتبی با فراهم آوردن یک ساختار برای سازماندهی و ارزیابی اهمیت معیارهای متفاوت و ارجحیت گزینه‌ها برای تصمیم‌گیرندگان، فرایند تصمیم‌گیری را آسان می‌کند (Ghodsipour, 2004). مطالعات مشابهی در زمینه انتخاب روش‌های توسعه کم اثر انجام شده است که در ذیل به چند مورد اشاره می‌شود:

(Izanloo & Bardi Sheikh, 2018) سناریوهای مدیریت رواناب سطحی در بجنورد را با روش‌های وزن‌دهی ارزیابی کردند. شش گزینه (سیستم نگهداشت زیستی، ترانشه نفوذ، آسفالت نفوذپذیر، پیاده‌رو نفوذپذیر، بام سبز و مخازن باران) بر اساس معیارهای هیدرولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد ترانشه نفوذ (با تأکید بر معیار اجتماعی)، مخازن باران (با معیار اقتصادی) و بام سبز (با معیار هیدرولوژیکی) اولویت دارند. (Nazari et al., 2021) اثربخشی روش‌های توسعه کم‌اثر مانند بام سبز، مخازن باران و معابر نفوذپذیر را در تهران بررسی کردند. نتایج حاکی از کاهش ۷۲ درصد حجم رواناب بود. Rostami et al., (2021) با روش AHP نشان دادند که در حوضه‌های ارغوان و کلانار، شکل حوضه بیشترین تأثیر و شیب کمترین نقش را در سیل‌خیزی دارد. با توجه به وضعیت جغرافیایی شهر خمینی‌شهر و محصور بودن آن، این شهر از لحاظ توسعه شهری با کمبود زمین مواجه گردیده است و جمعیت زیاد، این شهر را دومین شهر پرتراکم در کشور نموده است. از این لحاظ اکثر مناطق شهر سطح نفوذ

ناپذیری برای رواناب‌های حاصل از نزولات جوی دارند و در هنگام بارندگی‌ها به ویژه در چند سال اخیر این رواناب‌ها باعث سیلاب و تخریب در سطح شهر شده‌اند. در این تحقیق به ارائه بهترین روش توسعه کم اثر (LID) جهت مدیریت رواناب شهری با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی در شهر خمینی‌شهر پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مطالعاتی

شهر خمینی‌شهر با مساحت ۱۷۵ کیلومترمربع و جمعیت ۳۱۹۷۲۷ نفر در پنج کیلومتری شمال‌غربی کلان شهر اصفهان واقع شده است. این شهر از شمال به شهرستان برخوار و میمه، از شرق و شمال شرقی به شهرستان اصفهان، از شمال‌غربی و غرب به شهرستان نجف آباد و از جنوب و جنوب‌غربی به شهرستان فلاورجان و رودخانه زاینده‌رود محدود می‌شود. نواحی شمال و شمال‌غربی آن کوه‌های محمودآباد با ارتفاع ۲۴۷۳ متر و سرچاه با ارتفاع ۲۲۵۰ متر و کوه صالح با ارتفاع ۲۵۱۱ متر فراگرفته و نواحی جنوبی و شرقی آن را دشت همواری پوشانده است (Riahi Samani et al., 2014).

در شمال شهرستان ارتفاعات سید محمد و پلارت با ارتفاع ۲۴۵۰ متر (محمودآباد)، زیبایی خاصی به منطقه بخشیده است. پارک ملی و پناهگاه حیات وحش قمیشلو در منطقه گذار آهو واقع در این شهرستان، یکی از جاذبه‌ها و ذخایر زیست محیطی این شهر به شمار می‌آید. ارتفاع شهرستان از سطح دریا، حدود ۱۵۹۵ تا ۱۶۰۲ متر است و بنابراین در حدود ۱۸ متر از شهر اصفهان مرتفع‌تر است. موقعیت جغرافیایی شهرستان خمینی شهر "۳۱°۴۵' طول شرقی و "۴۱°۰۰' عرض شمالی است. این شهرستان دارای آب و هوای نیمه‌خشک و با زمستان‌های نسبتاً سرد می‌باشد و حداکثر دمای مطلق در تیرماه ۴۰ درجه سانتی‌گراد و حداقل دمای مطلق در دی ماه ۲۰- درجه سانتی‌گراد و میانگین آن بین ۱۰ الی ۱۶ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. با نزدیک شدن به طرف جنوب شهر و به دلیل نزدیکی به رودخانه زاینده‌رود، دمای هوا متعادل‌تر می‌شود. متوسط بارندگی سالیانه شهرستان بین ۱۱۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر است. بیشترین میزان بارندگی در فصول زمستان و بهار رخ می‌دهد. در این ناحیه شاخه‌های از زاینده‌رود به صورت مادی و کانال‌های آبرسانی مورد استفاده قرار گرفته است. به علاوه تاکنون هفت رشته قنات، ۱۳۰ حلقه چاه عمیق و ۶۰ حلقه چاه نیمه‌عمیق، در خمینی‌شهر حفر شده است. در حال حاضر، از نظر بافت شهری این شهر به دو قسمت بافت قدیمی و بافت جدید تقسیم می‌شود. بافت جدید در حال گسترش است و شهرک اقماری منظریه و منازل مسکن مهر نیز از نوع همین بافت محسوب می‌شوند. بافت قدیمی خمینی‌شهر از جنوب این شهر، تا بافت جدید شهری ادامه دارد. در این بافت ساختمان‌های نسبتاً قدیمی و بعضی از ساختمان‌های جدید مشاهده می‌شود. این بافت از سه محله ورنوسفاداران، خوزان، فروشان تشکیل شده است. این شهر از نظر تراکم جمعیت دومین رتبه را در کشور داراست و پس از شهر تهران قرار می‌گیرد (Riahi Samani et al., 2014).

۲-۲- معرفی عوامل تاثیرگذار بر انتخاب بهترین روش توسعه کم اثر

برای شناسایی عوامل موثر بر انتخاب روش توسعه کم اثر، تحقیقات نسبتاً جامعی، مشتمل بر مطالعه متون علمی نگاشته شده در این زمینه و نظرسنجی از سی مدیر شهری خبره صورت گرفت. در این بررسی سعی شد متون اصلی و مرجع در زمینه روش‌های توسعه

کم اثر مدنظر قرار گرفته و عوامل موثر آنها استخراج گردد. پس از انجام تحقیقات، در نهایت ۱۴ فاکتور پس از تلفیق و جمع بندی به عنوان عوامل تاثیرگذار شناسایی شدند.

۲-۲-۱- اقلیم

اقلیم به شدت در انتخاب روش‌های توسعه کم اثر^۱ (LID) برای هر پروژه اثرگذار می‌باشد. روش‌های LID اغلب در مناطق با اقلیم‌های معتدل و مرطوب استفاده می‌شود و معمولاً دانش محدودی در رابطه با عملکرد آن در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک وجود دارد. تالاب مصنوعی، جوی باغچه‌ها و سیستم ماند بیولوژیکی، کاربرد محدودی در اقلیم‌های خشک با فصول طولانی دارند. گیاهان بهتر است متناسب با اقلیم و رژیم هیدرولوژی منطقه باشند چرا که برای مثال در اقلیم‌های گرم، دوره رشد گیاهان بیشتر می‌باشد و همچنین میکروب‌های همزی، رشد مواد مغذی به وسیله گیاهان را افزایش می‌دهند (Podolsky, 2012). نرخ نفوذ در اقلیم‌های سرد به دلیل یخ‌زدگی در خاک می‌تواند کاهش محسوسی داشته باشد.

۲-۲-۲- شیب

شیب عبارت از زاویه ای است که سطح زمین با یک سطح افقی فرضی می‌سازد و یا در واقع نسبت اختلاف ارتفاع بین دو نقطه در طبیعت به فاصله افقی بین آن دو را شیب گویند. شیب حوضه آبریز در واکنش هیدرولوژیکی حوضه بسیار مؤثر است. به عبارت دیگر با دانستن شیب حوضه اطلاعات مفیدی در زمینه حرکت آب، قدرت و میزان فرسایش، نحوه حمل رسوب، میزان نفوذ، شدت سیلاب‌ها و حجم رواناب به دست می‌آید. به عنوان مثال سرعت جریان‌های سطحی بطور مستقیم به شیب بستگی دارد. افزایش سرعت آب باعث افزایش نیروی جنبشی آن و در نتیجه افزایش قدرت تخریب و حمل آن می‌شود. همچنین میزان نفوذ آب در خاک با میزان شیب کاهش می‌یابد و در نهایت حجم سیلاب و جریان‌های سطحی مستقیماً به شیب حوضه بستگی دارد (Caraco & Claytor, 1997).

۲-۲-۳- گروه هیدرولوژی خاک

طبق آزمایش‌های شرکت آب منطقه‌ای در خصوص میزان نفوذ پذیری آب در خاک در محدوده مطالعاتی و با اطلاعات به دست آمده از آنها میزان سرعت نفوذ بین ۳۲ تا ۰/۰۰۰۲۴ متفاوت است. با توجه به جدول تعیین گروه هیدرولوژی خاک‌ها این منطقه در گروه خاک C با تولید رواناب نسبتاً زیاد قرار می‌گیرد. زیست‌ماندها و روسازی نفوذپذیر که زهکش زیرزمینی ندارند برای گروه هیدرولوژی C مناسب نمی‌باشند. با توجه به اینکه حوضه مطالعاتی در مناطقی نیز در گروه D قرار دارد می‌توان گفت که ترانشه نفوذ نیز علاوه بر زیست‌ماندها و روسازی نفوذپذیر مناسب نیستند. در خاک‌های ماسه‌ای، سیستم‌های نفوذ به عنوان تکنیک مدیریت رواناب در مناطق خشک مناسب می‌باشند و می‌توانند به آب‌های زیرزمینی اضافه گردند و چرخه‌های آب و نگهداری آن را بهینه کنند (Caraco & Claytor, 1997). بنابراین مخازن باران و بام سبز از این نظر بیشترین امتیاز را کسب کردند.

۲-۲-۴- سطح آب زیرزمینی

¹ Low-Impact Development

با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی در شهر خمینی‌شهر از ۸۰ متر در شمال شهر تا ۲۰ متر در جنوب شهر متفاوت است و با توجه به حساسیت روش‌های توسعه کم اثر به آب‌های زیرزمینی تا حد فاصل نهایتاً ۲ متر، این پارامتر تأثیر چندانی در انتخاب روش مناسب در منطقه مطالعاتی ندارد.

۲-۵- کاهش حجم

با توجه به میزان بارش سالانه در شهر خمینی‌شهر، کاهش حجم تأثیر قابل توجهی ندارد، اما طراحی بارش در آن باید مورد بررسی قرار گیرد. زیست‌ماندها با اهداف نفوذ، روسازی نفوذپذیر و حوضه‌های نفوذ روش‌های برتر برای این معیار هستند. بام سبز و زیست‌ماندها با هدف تصفیه، تأثیر پایینی در این زمینه دارند.

۲-۶- کاهش جریان پیک

در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل هیدروگراف تیزی که دارند، این گزینه اهمیت بالاتری پیدا خواهد کرد. روش‌هایی مثل زیست‌ماندها، روسازی نفوذپذیر، بام سبز و تالاب مصنوعی تأثیر زیادی دارند. جوی باغچه‌ها، فیلتر نواری و تکنیک‌های ذخیره، استفاده مجدد و ترانше‌های نفوذ تأثیر کمی در این مورد دارند.

۲-۷- تغذیه آب زیرزمینی

در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، پوشش‌های نفوذناپذیر و سیستم‌های انتقال مهندسی از میزان بارش ورودی به سفره‌های آب زیرزمینی می‌کاهد. تکنیک‌های سبزی که میزان سطوح نفوذناپذیر را کاهش می‌دهند و نفوذ پذیری را چند برابر می‌کنند، موجب افزایش جریان به آب‌های زیرزمینی نیز می‌گردند. مقدار آب زیرزمینی در خمینی‌شهر رو به کاهش بوده و تراز آن در اکثر مناطق کم گردیده است. با افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش نیاز به محصولات کشاورزی و منابع آبی برای مصارف شرب و صنعتی، روند کاهشی ادامه دارد. بنابراین باید اقداماتی در زمینه افزایش سطح آب زیرزمینی در خمینی‌شهر انجام شود. استفاده از تکنیک‌های LID می‌تواند اقدام مناسبی در این زمینه باشد. روش زیست‌ماندها و روسازی نفوذپذیر بهترین روش موثر و بام سبز و تالاب مصنوعی پایین‌ترین اثر را دارند.

۲-۸- نگهداری آب (تغذیه و استفاده مجدد)

با توجه به مشکلات و کمبود آب در منطقه خمینی‌شهر، استفاده از تکنیک‌هایی که موجب حفظ آب باران گردد تا حد قابل توجهی مفید می‌باشد. زیست‌ماندها، روسازی نفوذپذیر، ذخیره و استفاده مجدد، فیلتر نواری، جوی باغچه‌های گیاهکاری شده و ترانше نفوذ همگی با طراحی مناسب، قابلیت نگهداری آب را دارا هستند. بام سبز و تالاب‌های مصنوعی توانایی چندانی در این زمینه ندارند. یکی از موارد تأثیرگذار در این قسمت قیمت آب است که پیش‌بینی می‌گردد با واقعی‌سازی قیمت آب، نیاز هر چه بیشتر به نگهداری آب و استفاده مجدد آن، ضروری گردد.

۲-۹- کاهش دما

با توجه به گرمای هوا در محدوده مطالعاتی، این معیار می‌تواند تاثیرگذار باشد، هر چند با توجه با اینکه اکثر بارش‌های این منطقه در فصل سرد اتفاق می‌افتد تا حدودی این تاثیر کاهش می‌یابد. زیست‌ماندها، بام سبز، فیلتر نواری و جوی باغچه گیاهکاری شده می‌توانند در این زمینه مفید باشند و سایر روش‌ها تاثیر چندانی ندارند (Uda et al., 2013).

۲-۲-۱۰- کاهش آلودگی هوا

با توجه به اینکه خمینی شهر نزدیک به کلان شهر اصفهان است و در سال‌های اخیر شاخص آلودگی هوا در این شهر به ۱۵۴ رسیده است، حتی در بعضی مواقع از شهر اصفهان هم سبقت گرفته است نیازمند اقداماتی برای جلوگیری از آلودگی هوا می‌باشد. روش‌های زیست‌ماند، بام سبز و جوی باغچه گیاهکاری شده در این زمینه تاثیرگذار هستند (Uda et al., 2013).

۲-۲-۱۱- نگهداری

از میان روش‌های معرفی شده روسازی نفوذپذیر و بام سبز نیاز به نگهداری بالایی دارند، در حالیکه زیست‌ماند، سیستم‌های نگهداری و استفاده مجدد، جوی باغچه گیاهکاری شده، ترانشه نفوذ احتیاج کمتری به نگهداری دارند. سایر موارد امتیاز تقریباً متوسطی دارند که البته با توجه به اقلیم و شرایط طراحی میزان نگهداری و بازرسی از آنها می‌تواند متفاوت باشد و باید به استانداردهای موجود در این زمینه مراجعه شود.

۲-۲-۱۲- کاربری زمین

کاربری زمین یکی از پارامترهای مهم در اجرای مناسب روش‌ها می‌باشد. جوی باغچه‌ها و روسازی نفوذپذیر در مناطق حساس شهری و مناطق بازسازی شده محدود می‌گردند و استفاده از زیست‌ماندها و فیلترهای نواری گیاهی در مناطق حساس شهری و صنعتی توصیه نمی‌گردد. بام سبز در اکثر مناطق مسکونی و آموزشی و ترانشه نفوذ در مناطق صنعتی و جاده‌ها مفید نیستند. با توجه به اینکه محدوده مطالعاتی در مرکز شهر می‌باشد استفاده از زیست‌ماندها، فیلترنواری، جوی باغچه‌ها و روسازی نفوذپذیر با محدودیت‌هایی همراه می‌گردند. بام سبز با توجه به اینکه اکثر بافت حوضه مسکونی است، از این نظر کارایی متوسطی دارد.

۲-۲-۱۳- موانع اجتماعی

با توجه به اینکه روش‌های LID در ایران کم سابقه هستند. ایجاد فرهنگ‌سازی مناسب در این زمینه ضروری است. لذا کلیه پارامترها به دلیل عدم اجرای قبلی و سابقه تاریخی دارای امتیاز یکسانی هستند.

۲-۲-۱۴- هزینه

هزینه ساخت و اجرای هر یک از روش‌ها با توجه به بودجه موجود یکی دیگر از عوامل دخیل در پارامترهای تصمیم‌گیری می‌باشد. هر یک از نه روش معرفی شده طبق تحقیقات (Uda et al., 2013) در دانشگاه تورنتو هزینه اجرای آن بر مترمربع محاسبه گردیده است. هر یک از روش‌ها طبق هزینه تمام شده امتیازدهی شده‌اند، از آنجا که کمترین هزینه در اجرا بالاترین اولویت را دارد جوی باغچه‌ای با کمترین هزینه بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده است (Uda et al., 2013).

۲-۲-۱۵- فضای موجود

خمینی‌شهر بعد از تهران دومین شهر پرتراکم است. از لحاظ زمین دارای کمبود می‌باشد و قیمت زمین در این شهر بالا است. لذا باید برای اجرای تکنیک موثر این پارامتر را در نظر گرفت، در روش‌هایی چون مخازن آب باران و بام سبز با توجه به عدم استفاده از زمین‌های شهری، فضای کمتری استفاده می‌گردد و بقیه روش‌ها امتیاز یکسانی دارند.

۳- روش کار

۳-۱- معرفی روش سلسله مراتبی

روش AHP بر اساس تحلیل مغز انسان جهت حل مسائل پیچیده و فازی استفاده می‌شود. اولین بار توسط محقق بنام «توماس ال ساعتی» در دهه ۱۹۷۰ پیشنهاد گردید (Ghodsipour, 2004). فرایند تحلیل سلسله مراتبی با تجزیه‌ی مسائل مشکل و پیچیده آنها را به شکلی ساده تبدیل کرده و به حل آنها می‌پردازد. این روش کاربردهای فراوانی در مسائل اقتصادی و اجتماعی پیدا کرده است و در سال‌های اخیر در امور مدیریتی نیز به کار رفته است. برای حل یک مسئله یا تصمیم گام‌های ذیل باید برداشته شود:

- مشخص نمودن هدف، معیارها و گزینه‌ها
 - تعیین ارتباط اجزا و تشکیل ساختار سلسله مراتبی
 - محاسبه وزن هر یک از معیارها در ارتباط با هدف و وزن گزینه‌ها در ارتباط با معیارها (وزن نسبی)
 - محاسبه وزن نهایی هر یک از گزینه‌ها در ارتباط با هدف به کمک ضرب زنجیره وزن‌ها از گزینه تا هدف
 - رتبه‌بندی معیارها و گزینه‌ها در ارتباط با هدف
- فرایند سلسله مراتبی یک نمایش گرافیکی از مسئله پیچیده‌ی واقعی است که در راس آن هدف کلی مسئله و در سطوح بعدی معیارها و گزینه‌ها قرار دارند. سلسله مراتب این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است.
- محاسبه وزن در فرایند تحلیل سلسله مراتبی در دو قسمت جداگانه وزن نسبی و وزن نهایی مورد بحث قرار می‌گیرد. وزن نسبی از ماتریس مقایسه زوجی بدست می‌آید در حالیکه وزن مطلق رتبه‌ی نهایی هر گزینه است که از تلفیق وزن‌های نسبی محاسبه می‌گردد. در فرایند تحلیل سلسله مراتبی ابتدا عناصر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می‌گردد سپس با استفاده از این ماتریس وزن نسبی عناصر محاسبه می‌گردد. بطور کلی، یک ماتریس مقایسه زوجی به صورت زیر نشان داده می‌شود که در آن aij ترجیح عنصر i ام به عنصر j ام است که با توجه به مقدار aij ها وزن عناصر یعنی w_i ها بدست می‌آید. هر ماتریس مقایسه زوجی ممکن است سازگار و یا ناسازگار باشد. در حالتی که این ماتریس سازگار باشد محاسبه وزن (w_i) ساده بوده و از نرمالیزه کردن عناصر هر ستون به دست می‌آید. در این تحقیق برای تعیین اهمیت نسبی از آیین نامه‌های روش توسعه کم اثر که توسط ارتش امریکا تنظیم گردیده است استفاده شد تا ماتریس مقایسات زوجی به دست آید. بدین منظور از پرسشنامه‌های که توسط متخصصین در این زمینه تکمیل شده است، استفاده گردید. نتایج حاصل از جمع‌بندی پرسشنامه‌ها (۳۳ پرسشنامه) و آیین‌نامه‌های تکمیلی به منظور شناسایی انتخاب بهترین روش توسعه کم اثر توسط سی مدیر خبره مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و طبق جدول (۱) ارجحیت عددی به گزینه‌ها داده شد و ماتریس مقایسات زوجی تهیه گردید. از نرم افزار Expert Choice جهت تصمیم‌گیری چند معیاره بر اساس روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی استفاده گردید. این نرم افزار اولین بار توسط توماس ال ساعتی یکی از بنیان‌گذاران Expert Choice در دانشگاه پنسیلوانیا مطرح شد (Nikmardan, 2017).

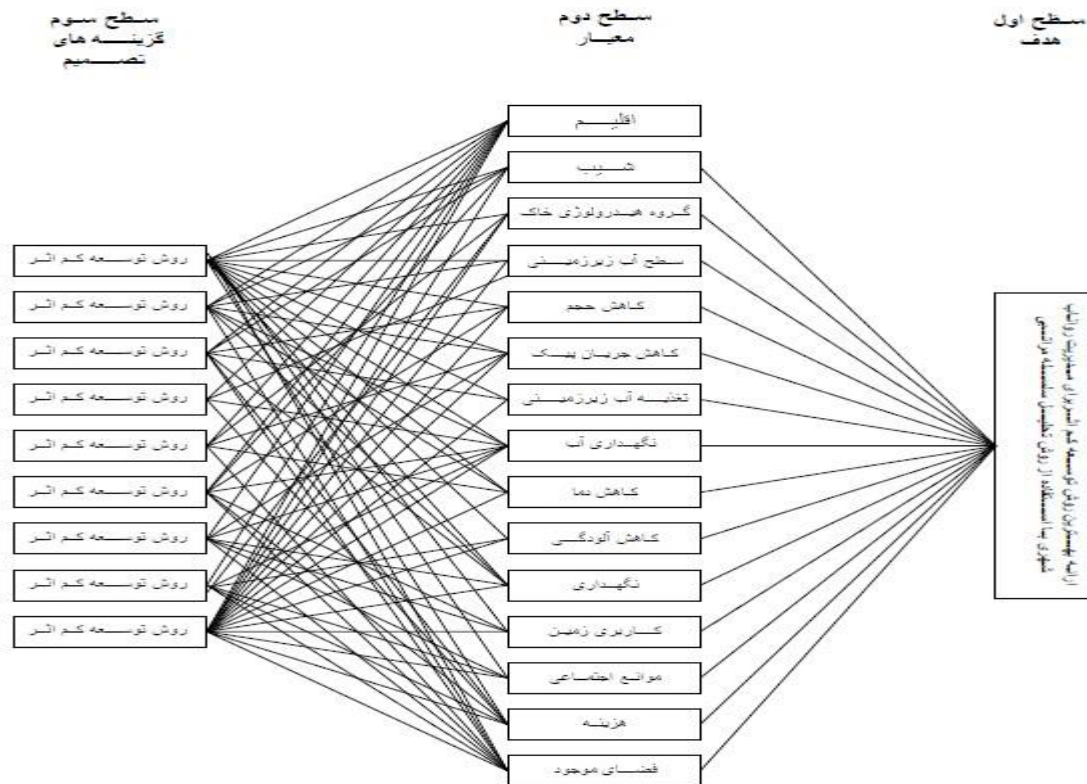


Fig 1. Hierarchical structure

جدول ۱- ارجحیت فرایند تحلیل سلسله مراتبی (Ghodsipour, 2004)

Table 1. Priority of the analytic hierarchy process (AHP)

مقدار عددی	ترجیحات
۹	کاملاً مرجح، یا کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر
۷	ترجیح با اهمیت و مطلوبیت خیلی قوی
۵	ترجیح با اهمیت و مطلوبیت قوی
۳	کمی مرجح، یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر
۱	ترجیح با اهمیت و مطلوبیت یکسان
۲ و ۴ و ۶ و ۸	ترجیحات بین فواصل فوق

۴-۱- بررسی زوجی معیارهای مختلف

با مقایسه‌های زوجی بین عناصر تصمیم امتیازات عددی که نشان‌دهنده ارجحیت یا اهمیت بین دو عنصر تصمیم است، مشخص گردید. برای انجام این کار معمولاً از مقایسه گزینه‌ها با شاخص‌های i ام نسبت به گزینه‌ها یا شاخص‌های j ام استفاده می‌شود که در جداول (۱ تا ۱۴ پیوست مقاله) نحوه ارزش‌گذاری شاخص‌ها نسبت به هم نشان داده شده است.

۴-۲- مقایسه زوجی معیارها

در ماتریس مقایسه زوجی معیارها نسبت به هم، اولویت اول به معیار اقلیم، الویت دوم با توجه به شرایط اقتصادی منطقه به معیار هزینه و اولویت سوم به فضای موجود با توجه به تراکم بالای منطقه تعلق گرفت. سایر اولویت‌ها در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- ماتریس مقایسه زوجی برای معیارها

Table 2. Pairwise comparison matrix for criteria

معیار	اقلیم	فضای موجود	هزینه	موانع اجتماعی	کاربری زمین	نگهداری	کاهش آلودگی	کاهش دما	نگهداری آب	تغذیه آب	زیرزمینی	کاهش پیک	کاهش حجم	کاهش جریان پیک	تغذیه آب	زیرزمینی	نگهداری آب	کاهش دما	کاهش آلودگی	نگهداری	کاربری زمین	موانع اجتماعی	فضای موجود	هزینه
اقلیم	۱	۱/۶	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
فضای موجود	۱/۶	۱	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
هزینه	۱/۶	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
موانع اجتماعی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاربری زمین	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
نگهداری	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاهش آلودگی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاهش دما	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
نگهداری آب	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
تغذیه آب	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
زیرزمینی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاهش پیک	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاهش حجم	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاهش جریان پیک	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
تغذیه آب	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
زیرزمینی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
نگهداری آب	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاهش دما	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاهش آلودگی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
نگهداری	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاربری زمین	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
موانع اجتماعی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
فضای موجود	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
هزینه	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

۴-۳- نتایج تصمیم‌گیری چند معیاره به کمک نرم‌افزار Expert Choice

در این مرحله پس از ساخت مدل در برنامه Expert Choice، مقایسه زوجی و محاسبه وزن‌های نسبی گزینه‌ها و معیارها، وزن نهایی هر گزینه محاسبه گردید. بدین منظور از عمل تلفیق در نرم‌افزار Expert Choice استفاده گردید. وزن نهایی بدین ترتیب به دست می‌آید که ابتدا برای هر معیار، وزن گزینه‌ها بر وزن بزرگترین آنها تقسیم می‌گردد سپس عدد حاصل در وزن معیار مربوط ضرب می‌شود. با جمع مقادیر حاصل برای هر یک از گزینه‌ها، مقدار عددی به هر گزینه تخصیص می‌یابد. بعد از محاسبه وزن هر یک از گزینه‌ها نسبت به کلیه معیارها، وزن معیارها مشخص می‌شود به عبارت دیگر سهم هر یک از معیارها در تعیین بهترین گزینه مشخص گردید که مهمترین معیار اقلیم با وزن نسبی ۱۹/۹ درصد و بهترین گزینه بام سبز با وزن نسبی ۱۴/۵ درصد بود. جزئیات محاسبات در اشکال (۲ و ۳) آمده است. طبق نتایج نرم‌افزار و ورود ماتریس‌های مقایسات زوجی، وزن معیارها بدست آمد و اولویت‌بندی شاخص‌ها به کمک نرم‌افزار تعیین شد. طبق نتایج نرم‌افزار تکنیک بام سبز در حوضه شمالی و شمال شهر با توجه به وجود بیشترین ساخت و ساز و سطح اشغال بهترین گزینه معرفی شد. ترانше نفوذ در کلیه سطوح خمینی شهر باید در دستور کار قرار گیرد و تالاب مصنوعی در حوضه جنوب شهر به علت وجود باغ‌ها و اراضی کشاورزی بهترین گزینه است. از آنجا که روش بام سبز بیش‌ترین وزن را به خود اختصاص داد بهتر است مدیران شهری در محدوده مورد مطالعه از این روش نهایت استفاده را نمایند از آنجا که جایگاه ساخت بام سبز بر روی بام‌های مسکونی و اداری می‌باشد باید در این خصوص فرهنگ‌سازی زیادی نمود تا شهروندان این روش را بر روی بام‌ای خود اجرا نمایند. اجرای این روش علاوه بر کاهش حجم رواناب باعث کاهش آلودگی و ایجاد زیباسازی فضای شهری می‌گردد. بام‌های سبز به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در مدیریت آب و کاهش اثرات منفی رواناب شهر خمینی شهر می‌تواند مطرح گردد. این بام‌ها علاوه بر ایجاد فضاهای سبز، به بهبود کیفیت محیط زیست کمک می‌کنند. بام‌های سبز می‌توانند تا ۸۰ درصد از آب باران را جذب و نگهداری کنند و بنابراین به کاهش حجم و سرعت رواناب کمک می‌کنند. همچنین با تصفیه طبیعی آب باران، بام‌های سبز می‌توانند به کاهش آلودگی‌های ناشی از رواناب کمک کنند. با اجرای بام سبز، این بام‌ها می‌توانند به کاهش دما در محیط شهری کمک کنند و اثر جزیره گرمایی را کاهش دهند همچنین به زیبایی و جذابیت ساختمان‌ها و محیط شهری، حفظ تنوع زیستی به عنوان زیستگاه‌هایی برای پرندگان و حشرات مفید و کاهش هزینه‌های انرژی کمک کنند. استفاده از بام سبز در شهر خمینی شهر مشکلات و چالش‌هایی هم به دنبال خواهد داشت. نصب و راه‌اندازی بام‌های سبز معمولاً هزینه‌های بالایی دارد که می‌تواند برای برخی از مالکین ساختمان‌ها مشکل ساز باشد. بام‌های سبز نیاز به نگهداری منظم شامل آبیاری، هرس و کنترل آفات دارند که می‌تواند هزینه‌بر باشد. بام‌های سبز به دلیل وجود خاک و گیاهان، وزن بیشتری به ساختمان‌ها اضافه می‌کنند که ممکن است نیاز به تقویت سازه داشته باشد. برخی از ساختمان‌ها ممکن است به دلیل طراحی یا ساختار خود نتوانند بام‌های سبز را به راحتی پیاده‌سازی کنند. در صورتی که سیستم‌های زهکشی به درستی طراحی نشوند، ممکن است آب جمع شود و باعث آسیب به ساختمان شود. مطالعه (Izanloo & Bardi Sheikh, 2018) به ارزیابی سناریوهای مدیریت رواناب سطحی در بجنورد با استفاده از روش‌های وزن‌دهی پرداخت. پژوهشگران شش گزینه مدیریتی شامل سیستم نگهداشت زیستی، ترانше نفوذ، آسفالت نفوذپذیر، پیاده‌رو نفوذپذیر، بام سبز و مخازن جمع‌آوری آب باران را بر اساس سه معیار هیدرولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها نشان داد که ترانше نفوذ با تأکید بر معیار اجتماعی، مخازن آب باران با در نظر گرفتن معیار اقتصادی و بام سبز با تمرکز بر معیار هیدرولوژیکی به عنوان گزینه‌های برتر شناسایی شدند. این نتایج با یافته‌های پژوهش حاضر که به بررسی راهکارهای مدیریت رواناب در خمینی شهر می‌پردازد، همسویی قابل توجهی دارد و مؤید کارایی این روش‌ها در شرایط مشابه است.

(Nazari et al., 2021) به بررسی و مدل‌سازی روش‌های توسعه کم اثر در ناحیه ۱ منطقه ۱۱ تهران پرداختند. نتایج نشان داد که روش‌های بام سبز، مخازن باران، معابر نفوذپذیر و جوی باغچه‌ها می‌تواند تا ۷۲ درصد حجم رواناب را کاهش دهد. نتایج تحقیق

ذکر شده با تحقیق جاری همراستا می‌باشد. در مطالعات خارج از کشور نیز (Liu et al., 2022) به مطالعه‌ای تحت عنوان شناسایی مناطق بالقوه و اولویت‌دار در مقیاس شهر برای مقاوم‌سازی بام‌های سبز و ارزیابی اثربخشی کاهش رواناب آنها در پهنه‌های کاربردی شهری پرداختند نتایج نشان داد که میانگین کاهش رواناب حدود ۷۰ درصد قابل حصول می‌باشد. ایجاد بام‌سبز علاوه بر کاهش رواناب می‌تواند بر کیفیت هوا و کاهش دما و همچنین مصرف انرژی نیز اثرگذار باشد. در تحقیق (Fleck et al., 2022) به مطالعه‌ای تحت عنوان بام‌های سبز شهری برای مدیریت ریزاقلیم‌های پشت بام (مطالعه موردی سیدنی استرالیا) پرداختند و بیان داشتند که به طور متوسط بام‌های سبز شهری باعث ایجاد ۸ درجه سانتی‌گراد کاهش دما می‌شوند. بر مبنای تحقیقات ذکر شده بام سبز در شهر خمینی‌شهر می‌تواند علاوه بر کاهش رواناب، کاهش دما نیز به دنبال داشته باشد. (Ebadi & Ahyaie, 2011) مطالعه‌ای تحت عنوان آنالیز حرارتی مدل ساختمان مجهز به سقف سبز و مدیریت بهینه‌سازی انرژی انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با به‌کارگیری سقف سبز مصرف سالیانه انرژی الکتریکی در شهرهای تهران، تبریز و بندر عباس کاهش خواهد داشت. با توجه به مقادیر بدست آمده استفاده از سقف سبز در مناطق گرمسیر (بندر عباس) نسبت به مناطق سردسیر (تبریز) کارایی بیشتری دارد. همچنین آزمون‌های حساسیت سنجی نشان داده است که مصرف انرژی ساختمان به تغییرات پارامترهای ضخامت خاک و تراکم گیاهی ساختار سقف سبز وابسته است به طوری که هرچه ضخامت خاک مورد استفاده بیشتر باشد عایق حرارتی بهتری است و هرچقدر تراکم گیاهی بکار رفته بالاتر باشد قدرت بیشتری در ممانعت از تابش اشعه‌های خورشیدی دارد. (Mohammadi et al., 2015) ارزش اقتصادی کاهش آلایندگی‌های هوا توسط سقف‌های سبز در شهر تهران را برآورد کردند. ارزش اقتصادی جذب آلایندگی‌های هوا به کل شهر با در نظر گرفتن ساختمان‌های مسکونی و برای کل عمر سقف سبز (۵۰ سال) تعمیم داده شد. طبق نتایج تحقیق ارزش عملکرد تصفیه‌ی آلایندگی‌های هوای مورد بررسی در طی ۵۰ سال و در حالتی که تمام سقف‌های ساختمان‌های مسکونی شهر تهران سبز شوند، ۱۱۳۷۳ میلیارد ریال برآورد شد. بر مبنای تحقیقات ذکر شده بام سبز توانایی کاهش مصرف الکتریسیته و صرفه جویی مالی هم خواهد داشت. با توجه به همه موارد اشاره شده در مجموع تکنیک بام سبز در شهر خمینی‌شهر با توجه به دلایل ذیل به عنوان بهترین روش انتخاب گردید:

با توجه به اقلیم گرم و خشک منطقه بام سبز باعث کاهش دما و ایجاد فضای سبز زیاد می‌گردد. از آنجا که شهر خمینی‌شهر دارای تراکم بالا می‌باشد و کمبود زمین برای اجرای روش‌های LID وجود دارد پس بهترین مکان برای اجرا زمین‌های دارای ساخت و ساز است.

با توجه به مشکلات اقتصادی شهرداری‌ها جهت اجرای این روش، می‌توان شهروندان را بصورت مشارکتی تشویق به اجرا نمود. با توجه به کمبود فضای سبز در اقلیم‌های گرم و خشک به دلیل کمبود آب، می‌توان از این روش جهت ایجاد فضای سبز استفاده نمود.

با توجه به ایجاد مشکلات ترافیکی و آلودگی وسایل نقلیه جهت رفتن به پارک‌ها و فضای سبز برای اوقات فراغت، می‌توان با ایجاد بام سبز از تردد زیاد وسایل نقلیه جلوگیری کرد.

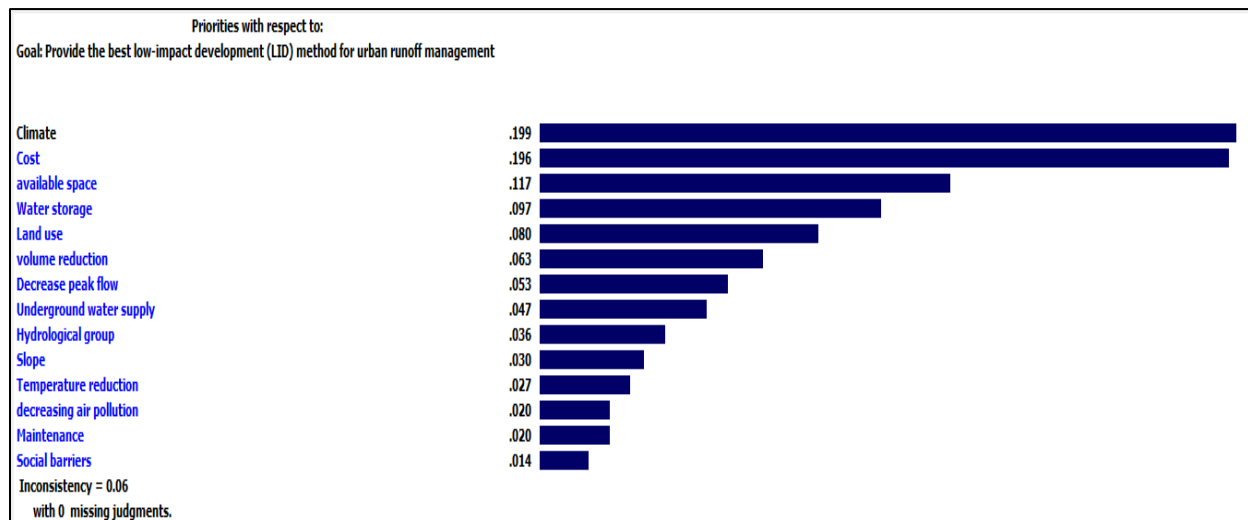


Fig 2. Determining relative priority of criteria

شکل ۳- وزن گزینه‌ها

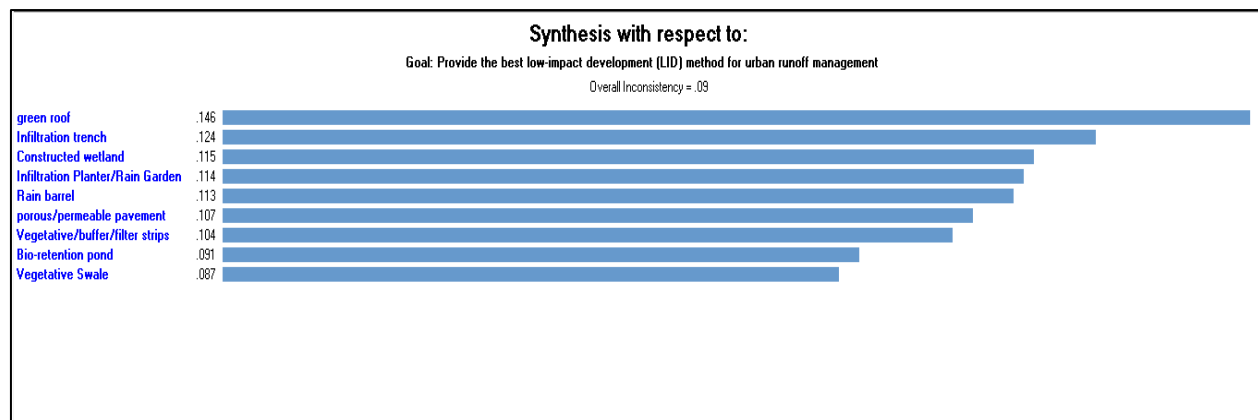


Fig 3. Option weights

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به ارائه بهترین روش توسعه کم اثر برای مدیریت رواناب شهری با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی در شهر خمینی شهر پرداخته شد. در سال‌های اخیر روش‌های توسعه کم اثر به عنوان روش‌هایی شناخته شده، بهترین و مقرون به صرفه‌ترین راه حل‌ها را در مدیریت و کاهش اثرات منفی سیلاب شهری ارائه نموده‌اند. هر چند که ظهور ابزارهای توسعه کم اثر در مدیریت آب‌های سطحی و حفظ کیفیت آن بسیار موثر است، ولی جانمایی، اجرا و بهره‌برداری بهینه این روش‌ها به شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی، اقتصادی و ... منطقه بستگی دارد. در این مقاله از روش AHP در انتخاب بهترین روش توسعه کم اثر در مدیریت رواناب شهری خمینی شهر استفاده شد. در این راستا معیارها و گزینه‌های موجود در انتخاب بهترین روش توسعه کم اثر توسط سی کارشناس خبره، تعیین شد و پس از انجام مقایسه‌های زوجی بین معیارها و گزینه‌ها، بر اساس نظرات ارائه شده، نتایج حاصل از مقایسه‌ها به ساختار تحلیل سلسله مراتبی تبدیل شد. نتایج حاصل از این تحقیق با مدلسازی در نرم افزار Expert Choice نشان داد به ترتیب روش بام سبز و ترانشه نفوذ در شهر خمینی شهر بهترین گزینه‌ها در دفع، کنترل و استفاده از رواناب‌ها هستند. طبق نتایج نرم افزار روش بام سبز در حوضه شمالی و شمال شهر با توجه به وجود بیشترین ساخت و ساز و سطح اشغال بهترین گزینه معرفی شد. ترانشه نفوذ

در تمام شهر خمینی‌شهر باید در دستور کار قرار گیرد و تالاب مصنوعی در حوضه جنوب شهر به علت وجود باغ‌ها و اراضی کشاورزی بهترین گزینه است. بام سبز علاوه بر کنترل سیلاب در شهر خمینی‌شهر به عنوان روشی جهت کاهش دما، کاهش مصرف الکتریسیته و صرفه‌جویی در هزینه‌ها مطرح 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

کامل رضایی آدریانی: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها، نرم‌افزار، تحلیل داده‌ها. مجید ریاحی سامانی: نظارت، نگارش، ویرایش، روش‌شناسی و اعتبارسنجی. مسلم غیبی حاجیور: نظارت، روش‌شناسی، نرم‌افزار و تحلیل داده‌ها.

منابع

- Caraco, D., & Claytor, R. A. (1997). *Stormwater BMP Design: Supplement for Cold Climates*. Ellicott City, MD, USA: US Environmental Protection Agency.
- Ebadi, M., & Ahyaie, M. (2011). Thermal analysis of green roof building models and energy optimization management. *Journal of Mechanical Engineering, Energy Conversion*, 2(3), 1-12. (In Persian)
- Fleck, R., Gill, R. L., Saadeh, S., Pettit, T., Wooster, E., Torpy, F., & Irga, P. (2022). Urban green roofs to manage rooftop microclimates: A case study from Sydney, Australia. *Building and Environment*, 209, 108673. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108673>
- Ghodsipour, S. H. (2004). *Analytic hierarchy process (AHP)*. Amirkabir University of Technology Press. (In Persian)
- Izanloo, R., & Bardi Sheikh, V. (2018). Prioritizing urban runoff management scenarios using TOPSIS method under different weighting approaches (Case study: Neyshabur urban watershed). *Journal of Water and Wastewater*, 29(1), 15-26. (In Persian)
- Jia, H., Yao, H., & Yu, S. L. (2013). Advances in LID BMPs research and practice for urban runoff control in China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 7, 709-720. <https://doi.org/10.1007/s11783-013-0557-5>
- Liu, W., Qian, Y., Yao, L., Feng, Q., Engel, B. A., Chen, W., & Yu, T. (2022). Identifying city-scale potential and priority areas for retrofitting green roofs and assessing their runoff reduction effectiveness in urban functional zones. *Journal of Cleaner Production*, 332, 130064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130064>
- Madden, A., Kelley, S., & Harris, L. (2009). *Low impact development approaches handbook*. Clean Water Services.
- Mohammadi, A., Mirkarimi, H., & Mohammadzadeh, M. (2015). Estimating the economic value of air pollutant reduction by green roofs: Case study of Tehran. *Proceedings of the 3rd National Conference on Environmental and Agricultural Research of Iran*, Gorgan, Iran. (In Persian)
- Mohammadi, M., Hesami Kermani, M. R., & Akbari, R. (2022). A review of surface runoff control methods. *Proceedings of the 18th National Conference on Urban Planning, Architecture, Civil Engineering and Environment*. (In Persian)
- Nazari, A., Rouzbahani, A., & Hashemi Shahdani, S. M. (2021). Urban runoff management with an optimization approach to low impact development methods and integration of SWMM and SUSTAIN models. *Journal of Water and Wastewater*, 32(4), 126-151. (In Persian)
- Nikmardan, A. (2017). *Introduction to Expert Choice software*. Jahad Daneshgahi (Amirkabir University of Technology). (In Persian)

Podolsky, L. (2012). Barriers to low impact development. *Local Government Commission for the Southern California Stormwater Monitoring Coalition, Sacramento, CA.*

Putnam, A. L. (1972). *Effect of urban development on floods in the Piedmont Province of North Carolina* (No. 72-304). US Geological Survey.

Riahi Samani, M., Bagheri, S., & Kabiri Samani, A. (2014). Evaluation of urban runoff management system (Case study: Khomeinishahr County). *Proceedings of the First National Conference on Architecture, Civil Engineering and Urban Environment*, Hamadan, Iran. (In Persian)

Rostami, F., Tavakoli, M., Rostami, N., & Ebrahimi, H. (2021). Evaluation of flood potential in watersheds using analytical hierarchy process (Case study: Ilam city watershed). *Comprehensive Watershed Management*, 1(1), 1-16. <https://doi.org/10.22034/iwm.2021.247934>. (In Persian)

Shuster, W. D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E., & Smith, D. R. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2(4), 263-275. <https://doi.org/10.1080/15730620500386529>

Uda, M., Van Seters, T., Graham, C., & Rocha, L. (2013). Evaluation of life cycle costs for low impact development stormwater management practices. *Sustainable Technologies Evaluation Program, Toronto and Region Conservation Authority.*

پیوست: جداول ۱ تا ۱۴ ماتریس مقایسه زوجی معیارهای مختلف

جدول ۱- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار اقلیم

اقلیم	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۵	۳	۱	۱	۳	۱	۱	$\frac{1}{5}$
بام سبز	$\frac{1}{5}$	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{9}$
باغچه ها یا مخازن نکه داشت	$\frac{1}{3}$	۳	۱	۳	۳	۱	۳	۳	۷
نوار فیلتری گیاهکاری	۱	۵	$\frac{1}{3}$	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۵
جوی باغچه ها	۱	۵	$\frac{1}{3}$	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۵
ترانشه نفوذ	$\frac{1}{3}$	۳	۱	۳	۳	۱	۳	۳	۵
تالاب مصنوعی	۱	۵	$\frac{1}{3}$	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۵
سیستم های ماند بیولوژیک	۱	۵	$\frac{1}{3}$	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۵
بشکه های بارانی	۵	۹	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	۱

جدول ۲- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار شیب

شبیه	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۱
بام سبز	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۱
باغچه ها یا مخازن	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۱
نوار فیلتری گیاهکاری	۳	۳	۳	۱	۳	۱	۳	۳	۳
جوی باغچه ها	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۱
ترانشه نفوذ	۳	۳	۳	۱	۳	۱	۳	۳	۳
تالاب مصنوعی	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۱
سیستم های ماند بیولوژیک	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۱
بشکه های بارانی	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱	۱

جدول ۳- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار گروه هیدرولوژی

گروه هیدرولوژی	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۳	۳	$\frac{1}{3}$	۳	۳	۳	۱	$\frac{1}{7}$
بام سبز	$\frac{1}{3}$	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$
باغچه ها یا مخازن نکه داشت	$\frac{1}{3}$	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$
نوار فیلتری گیاهکاری	۳	۵	۵	۱	۵	۵	۵	۳	$\frac{1}{5}$
جوی باغچه ها	$\frac{1}{3}$	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$
ترانشه نفوذ	$\frac{1}{3}$	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$
تالاب مصنوعی	$\frac{1}{3}$	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$
سیستم های ماند بیولوژیک	۱	۳	۳	$\frac{1}{3}$	۳	۳	۳	۱	$\frac{1}{7}$
بشکه های بارانی	۷	۹	۹	۵	۹	۹	۹	۷	۱

جدول ۴- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار کاهش حجم

کاهش حجم	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$
بام سبز	۷	۱	۲	۳	۲	۷	۷	۷	۵
باغچه ها یا مخازن نگه داشت	۶	$\frac{1}{2}$	۱	۲	۱	۶	۶	۶	۴
نوار فیلتری گیاهکاری	۳	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	۱	$\frac{1}{3}$	۵	۵	۵	۳
جوی باغچه ها	۶	$\frac{1}{2}$	۱	۳	۱	۶	۶	۶	۴
ترانشه نفوذ	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$
تالاب مصنوعی	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$
سیستم های ماند بیولوژیک	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{3}$
بشکه های بارانی	۳	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	۳	۳	۳	۱

جدول ۵- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار کاهش جریان پیک

کاهش جریان پیک	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	۱	۱	$\frac{1}{8}$
بام سبز	۱	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	۱	۱	$\frac{1}{8}$
باغچه ها یا مخازن نگه داشت زیستی	۷	۷	۱	۱	۱	۱	۶	۶	$\frac{1}{2}$
نوار فیلتری گیاهکاری	۷	۷	۱	۱	۱	۱	۶	۶	$\frac{1}{2}$
جوی باغچه ها	۷	۷	۱	۱	۱	۱	۶	۶	$\frac{1}{2}$
ترانشه نفوذ	۷	۷	۱	۱	۱	۱	۶	۶	$\frac{1}{2}$
تالاب مصنوعی	۱	۱	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	۱	۱	$\frac{1}{7}$
سیستم های ماند بیولوژیک	۱	۱	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	۱	۱	$\frac{1}{7}$
بشکه های بارانی	۸	۸	۲	۲	۲	۲	۷	۷	۱

جدول ۶- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار تغذیه آب زیرزمینی

تغذیه آب زیرزمینی	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{4}$	۱	۱	$\frac{1}{4}$
بام سبز	۷	۱	۵	۲	۱	۳	۷	۷	۱
باغچه ها یا مخازن	۳	$\frac{1}{5}$	۱	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	۳	۳	$\frac{1}{5}$
نوار فیلتری گیاهکاری	۶	$\frac{1}{2}$	۴	۱	$\frac{1}{2}$	۲	۶	۶	$\frac{1}{2}$
جوی باغچه ها	۷	۱	۵	۲	۱	۳	۷	۷	۱
ترانشه نفوذ	۴	$\frac{1}{3}$	۳	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	۱	۴	۴	$\frac{1}{3}$
تالاب مصنوعی	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{4}$	۱	۱	$\frac{1}{7}$
سیستم های ماند بیولوژیک	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{4}$	۱	۱	$\frac{1}{7}$
بشکه های بارانی	۴	۱	۵	۲	۱	۳	۷	۷	۱

جدول ۷- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار نگهداری آب

نگهداری آب	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	$\frac{1}{7}$	۱	۱	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۳
بام سبز	۷	۱	۶	۶	۶	۶	۲	۶	۹
باغچه ها یا مخازن نگه داشت زیستی	۱	$\frac{1}{6}$	۱	۱	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۳
نوار فیلتری گیاهکاری	۱	$\frac{1}{6}$	۱	۱	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۳
جوی باغچه ها	۱	$\frac{1}{6}$	۱	۱	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۳
ترانشه نفوذ	۱	$\frac{1}{6}$	۱	۱	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۳
تالاب مصنوعی	۵	$\frac{1}{2}$	۵	۵	۵	۱	۱	۵	۷
سیستم های ماند بیولوژیک	۱	$\frac{1}{6}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۱	۲
بشکه های بارانی	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{2}$	۳	۱

جدول ۸- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار کاهش دما

کاهش دما	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۵	۱	۵	۵	۱	۱	۵	۱
بام سبز	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	۱	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$
باغچه ها یا مخازن نگه داشت زیستی	۱	۵	۱	۵	۵	۱	۱	۵	۱
نوار فیلتری گیاهکاری	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	۱	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$
جوی باغچه ها	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	۱	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$
ترانشه نفوذ	۱	۵	۱	۵	۵	۱	۱	۵	۱
تالاب مصنوعی	۱	۵	۱	۵	۵	۱	۱	۵	۱
سیستم های ماند بیولوژیک	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	۱	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$
بشکه های بارانی	۱	۵	۱	۵	۵	۱	۱	۵	۱

جدول ۹- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار کاهش آلودگی هوا

کاهش آلودگی هوا	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۵	۱	۱	۵	۱	۱	۵	۱
بام سبز	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$
باغچه ها یا مخازن نگه داشت زیستی	۱	۵	۱	۱	۵	۱	۱	۵	۱
نوار فیلتری گیاهکاری	۱	۵	۱	۱	۵	۱	۱	۵	۱
جوی باغچه ها	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$
ترانشه نفوذ	۱	۵	۱	۱	۵	۱	۱	۵	۱
تالاب مصنوعی	۱	۵	۱	۱	۵	۱	۱	۵	۱
سیستم های ماند بیولوژیک	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۵}$	۱	$\frac{۱}{۵}$
بشکه های بارانی	۱	۵	۱	۱	۵	۱	۱	۵	۱

جدول ۱۰- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار فضای موجود

فضای موجود	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹
بام سبز	$\frac{1}{9}$	۱	۱	۱	۹	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	۱
باغچه ها یا مخازن نگه داشت زیستی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹
نوار فیلتری گیاهکاری	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹
جوی باغچه ها	۱	$\frac{1}{9}$	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹
ترانشه نفوذ	۱	۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹
تالاب مصنوعی	۱	۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹
سیستم های ماند بیولوژیک	۱	۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹
بشکه های بارانی	$\frac{1}{9}$	۱	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	۱

جدول ۱۱- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار نگهداری

نگهداری	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$
بام سبز	۱	۱	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$
باغچه ها یا مخازن نگه داشت	۷	۷	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
نوار فیلتری گیاهکاری	۷	۷	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
جوی باغچه ها	۵	۵	۳	۳	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱
ترانشه نفوذ	۵	۵	۳	۳	۱	۱	$\frac{1}{3}$	۱	۱
تالاب مصنوعی	۷	۷	۱	۱	۳	۳	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
سیستم های ماند بیولوژیک	۵	۵	۳	۳	۱	۱	۳	۱	۱
بشکه های بارانی	۵	۵	۳	۳	۱	۱	۳	۱	۱

جدول ۱۲- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار موانع اجتماعی

موانع اجتماعی	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$
بام سبز	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$
باغچه ها یا مخازن	۳	۳	۱	۱	$\frac{1}{5}$	۱	۱	۱	$\frac{1}{8}$
نوار فیلتری گیاهکاری	۳	۳	۱	۱	۵	۱	۱	۱	۸
جوی باغچه ها	۲	۲	۵	$\frac{1}{5}$	۱	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$
ترانشه نفوذ	۳	۳	۱	۱	۵	۱	۱	۱	$\frac{1}{8}$
تالاب مصنوعی	۳	۳	۱	۱	۵	۱	۱	۱	$\frac{1}{8}$
سیستم های ماند بیولوژیک	۳	۳	۱	۱	۵	۱	۱	۱	$\frac{1}{8}$
بشکه های بارانی	۵	۵	۸	$\frac{1}{8}$	۳	۸	۸	۸	۱

جدول ۱۳- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار کاربری زمین

کاربری زمین	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	۲	۱	$\frac{1}{2}$	۱	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$
بام سبز	$\frac{1}{2}$	۱	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	۳
باغچه ها یا مخازن نکه داشت زیستی	۱	۲	۱	$\frac{1}{2}$	۱	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$
نوار فیلتری گیاهکاری	۲	۳	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۶
جوی باغچه ها	۱	۲	۱	$\frac{1}{2}$	۱	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$
ترانشه نفوذ	۲	۳	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۶
تالاب مصنوعی	۲	۳	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۶
سیستم های ماند بیولوژیک	۲	۳	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۶
بشکه های بارانی	۵	$\frac{1}{3}$	۵	$\frac{1}{6}$	۵	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	۱

جدول ۱۴- ماتریس مقایسه زوجی برای معیار هزینه

هزینه	روکش نفوذ ناپذیر	بام سبز	باغچه ها یا مخازن	نوار فیلتری گیاهکاری	جوی باغچه ها	ترانشه نفوذ	تالاب مصنوعی	سیستم های ماند بیولوژیک	بشکه های بارانی
روکش نفوذ ناپذیر	۱	$\frac{1}{3}$	۲	۳	۴	۲	۲	۲	۲
بام سبز	۳	۱	۳	۴	۵	۳	۳	۳	۳
باغچه ها یا مخازن نگه داشت	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	۱	۲	۳	۱	۱	۱	۱
نوار فیلتری گیاهکاری	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	۱	۲	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
جوی باغچه ها	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
ترانشه نفوذ	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	۱	۲	۳	۱	۱	۱	۱
تالاب مصنوعی	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	۱	۲	۳	۱	۱	۱	۱
سیستم های ماند بیولوژیک	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	۱	۲	۳	۱	۱	۱	۱
بشکه های بارانی	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	۱	۲	۳	۱	۱	۱	۱

Research Article



Evaluation of organic, inorganic, and hybrid adsorbents for COD reduction in petrochemical wastewater: A kinetic modeling approach

Atefeh Barahimi¹, Mozhgan Ahmadi Nadoushan^{1,2*}, Aliasghar Besalatpour³, Mitra Ataabadi⁴

¹ Department of Environmental Sciences, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Waste and Wastewater Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

³ Inter 3 GmbH - Institut für Ressourcenmanagement, Berlin, Germany.

⁴ Department of Soil Sciences, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: m.ahmadi@khuisf.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 10 Mar 2025

Revised: 10 May 2025

Accepted: 24 May 2025

Published: 28 May 2025

Extended Abstract

Introduction

Petrochemical industries represent one of the primary sources of industrial wastewater, containing complex and hazardous compounds such as aromatic hydrocarbons, phenols, and heavy metals, with chemical oxygen demand (COD) typically ranging from 500 to 74,800 mg/L. These pollutants not only pose a severe threat to aquatic ecosystems but also render conventional treatment methods like sedimentation and filtration ineffective. In recent years, adsorption has emerged as a promising technique due to its operational cost-effectiveness, flexibility, and environmental compatibility. However, selecting an appropriate adsorbent based on wastewater physicochemical characteristics and operational conditions remains a critical challenge. This study aims to evaluate the performance of organic (pomegranate peel-derived activated carbon), inorganic (nanosilica), and hybrid adsorbents in reducing COD from petrochemical wastewater, coupled with kinetic modeling of the adsorption process.

Materials and Methods

In this study, organic adsorbents were prepared from pomegranate peels activated with 98% sulfuric acid, while inorganic adsorbents (nanosilica, $\geq 99.3\%$ purity) were procured from Merck. The hybrid adsorbent was synthesized at a 1:1 ratio of organic to inorganic components. Adsorbent characteristics were determined using BET and EDX analyses, revealing specific surface areas of 748 m²/g for the organic adsorbent and 140 m²/g for the nanosilica. Batch adsorption experiments were conducted at laboratory scale with adsorbent doses of 2 and 4 g/L, contact times of 20, 40, and 60 minutes, and neutral pH (7.0). Key parameters including COD, turbidity, nitrate, sulfide, TSS, and TDS were measured following ASTM standard methods. Data were analyzed using SAS software and ANOVA. Three kinetic models—pseudo-first-order, pseudo-second-order, and Elovich—were employed to elucidate the adsorption mechanism.

Results and Discussion

The hybrid adsorbent CA4 demonstrated superior performance with 48% COD removal efficiency, attributed to the synergistic effects of the organic component (high adsorption capacity) and inorganic component (structural stability). Increasing contact time from 20 to 60 minutes enhanced removal efficiency by 1.5-fold. The pseudo-first-order kinetic model ($R^2 = 0.94$) exhibited the best fit with experimental data, suggesting a physiochemical adsorption mechanism. pH studies revealed neutral conditions (pH 7) as optimal due to minimized ionic competition and adsorbent stability, while

acidic (H_3O^+ competition) and alkaline (OH^- electrostatic repulsion) environments reduced efficiency. EDX analysis confirmed the critical roles of silicon (22.8%) in the inorganic adsorbent and carbon (72.3%) in the organic adsorbent. Comparative analysis indicated that the hybrid CA4, despite its low production cost, achieved comparable performance to commercial activated carbon.

Conclusion

This study highlights the hybrid adsorbent CA4 as a viable solution for petrochemical wastewater treatment, achieving 48% COD removal under optimized conditions (pH 7, 60 minutes, 4 g/L). The use of waste-derived materials (pomegranate peels) significantly reduced production costs, while the adsorbent retained 80% of its initial efficiency after five regeneration cycles, underscoring its economic feasibility for industrial applications. Limitations include variability in adsorbent physicochemical properties and the need for comprehensive economic-environmental assessments. Future research should focus on nanostructural optimization, temperature/salinity effects, and functional group modifications to enhance performance. Integrating CA4 with advanced processes like Fenton oxidation could further improve compliance with discharge standards.

Keywords: Petrochemical wastewater, COD, Hybrid adsorbent, Adsorption kinetics, Elovich 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

Atefeh Barahimi: Investigation & Data Collection, Methodology, Software, Analysis, Writing; **Mozhgan Ahmadi Nadoushan:** Methodology, Supervision, Writing, Editing; **Aliasghar Besalatpour:** Validation, Supervision, Editing; **Mitra Ataabadi:** Analysis, Editing.

Citation: Barahimi, A., Ahmadi Nadoushan, M., Besalatpour, A., & Ataabadi, M. (2024). Evaluation of organic, inorganic, and hybrid adsorbents for COD reduction in petrochemical wastewater: A kinetic modeling approach. *Technical Strategies in Water Systems*, 2(4), 363-380. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1200740>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی عملکرد جاذب‌های آلی، معدنی و ترکیبی در کاهش COD پساب صنایع پتروشیمی: رویکرد مدلسازی سینتیکی

عاطفه براهیمی^۱، مژگان احمدی ندوشن^{۱*}، علی اصغر بسالت‌پور^۲، میترا عطاآبادی^۴

۱. گروه محیط زیست، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲. مرکز تحقیقات پسماند و پساب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۳. موسسه مدیریت منابع Inter 3، برلین، آلمان.

۴. گروه خاک، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: m.ahmadi@khuif.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۳/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰

چکیده

کاهش شاخص اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) در پساب صنایع پتروشیمی به دلیل وجود ترکیبات سمی و مقاوم به تجزیه زیستی، یکی از چالش‌های اساسی در تصفیه پایدار پساب‌های صنعتی محسوب می‌شود. در این مطالعه، کارایی سه جاذب آلی (کربن فعال مشتق‌شده از پوست انار)، معدنی (نانوسیلیکا) و ترکیبی (ترکیب هر دو) در حذف COD با استفاده از روش جذب ناپیوسته در مقیاس آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای عملیاتی شامل دوز جاذب (۴ گرم بر لیتر)، زمان تماس (۶۰ دقیقه) و pH (خنثی) بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که جاذب ترکیبی در شرایط بهینه با راندمان حذف ۴۸ درصد COD، عملکرد بهتری نسبت به جاذب‌های منفرد دارد. همچنین، داده‌های سینتیکی جذب با مدل شبه‌مرتبه اول $R^2 = 0.94$ بهتر تطابق داشتند که حاکی از مکانیسم جذب فیزیکوشیمیایی است. با توجه به سازگاری جاذب ترکیبی با مدل ایزوترم ایلوویچ و راندمان قابل‌توجه آن، این جاذب می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر و امیدوارکننده در تصفیه پساب‌های پیچیده پتروشیمی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پساب پتروشیمی، COD، جاذب ترکیبی، سینتیک جذب، مدل ایلوویچ

استناد: براهیمی، ع.، احمدی ندوشن، م.، بسالت‌پور، ع. و عطاآبادی، م. (۱۴۰۳). بررسی عملکرد جاذب‌های آلی، معدنی و ترکیبی در کاهش COD پساب صنایع پتروشیمی: رویکرد مدلسازی سینتیکی. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۲(۴): ۳۶۳-۳۸۰.

<https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1200740>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

فاضلاب صنایع پتروشیمی حاوی ترکیبات پیچیده و خطرناکی از جمله هیدروکربن‌های آروماتیک، فنول‌ها، فلزات سنگین (نظیر آرسنیک و سرب)، آمونیاک و ترکیبات آلی مقاوم به تجزیه زیستی مانند BTEX^۱ می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد که میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD^۲) در این فاضلاب‌ها بسته به نوع فرآیندهای تولید و شرایط جغرافیایی، دامنه گسترده‌ای از ۵۰۰ تا ۷۴,۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر را در بر می‌گیرد. به عنوان نمونه، در چین و کشورهای حاشیه خلیج فارس، مقادیر COD تا ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است (Kato & Kansha, 2024). حال آنکه در برخی نمونه‌های جمع‌آوری شده از منطقه دوحه قطر، این مقدار به ۷۴,۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیز رسیده است (Lawan et al., 2023). در ایران، اندازه‌گیری‌های انجام شده در مجتمع پتروشیمی بوعلی سینا نشان‌دهنده غلظت COD حدود ۷۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است که ۱/۷۵ برابر حد مجاز استانداردهای محیط‌زیستی است (Kato & Kansha, 2024).

وجود ترکیباتی نظیر سولفیدها، ترکیبات آلی فرار (VOCs^۳) و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، کارایی روش‌های سنتی تصفیه مانند ته‌نشینی و فیلتراسیون را به شدت کاهش می‌دهد (Kato & Kansha, 2024). به ویژه آنکه فاضلاب‌های حاصل از عملیات حفاری نفت و گاز می‌توانند دارای شوری تا ۳۰۰,۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر باشند که این امر فرآیند تصفیه را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد (Kato & Kansha, 2024). ترکیباتی مانند بنزن و فنول نه تنها تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های آبی محسوب می‌شوند، بلکه نفوذ آنها به منابع آب زیرزمینی می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری بر سلامت انسان داشته باشد (Dusa et al., 2020).

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای کاهش COD در فاضلاب‌های پتروشیمی توسعه یافته است. فرآیند الکترو-فتون با تولید مداوم رادیکال‌های هیدروکسیل (•OH) قادر است بازده حذف COD را تا ۸۴/۳ درصد افزایش دهد و در مقایسه با روش فتون معمولی، از کارایی اقتصادی بالاتری برخوردار است. برآوردها نشان می‌دهد هزینه عملیاتی این روش حدود ۲/۰۶۳ دلار به ازای هر مترمکعب فاضلاب می‌باشد (Omar et al., 2024). از سوی دیگر، استفاده از فتوکاتالیست‌های نانویی مانند نانوذرات TiO₂ دوپ شده با نیتروژن (N-TiO₂) تحت تابش نور مرئی، می‌تواند تا ۹۶ درصد کاهش COD را در فاضلاب‌های حاوی هیدروکربن‌های آروماتیک به همراه داشته باشد (Barati et al., 2023). روش‌های هیبریدی نظیر ترکیب بیوراکتورهای غشایی با انعقاد شیمیایی نیز قادرند همزمان COD و فلزات سنگین را با بازدهی ۸۰-۷۰ درصد حذف نمایند، اگرچه مشکلاتی مانند گرفتگی غشاها و هزینه‌های بالای نگهداری از محدودیت‌های اصلی این فناوری به شمار می‌آیند (Mutegoa, 2024). سیستم‌های تخلیه صفر مایع (ZLD^۴) نیز با بهره‌گیری از فرآیندهای تبخیر و تبلور، قادرند غلظت COD را به کمتر از ۱۲۵ میلی‌گرم بر لیتر (مطابق با استانداردهای اتحادیه اروپا) کاهش دهند (Lawan et al., 2023). با این وجود، روش‌های مذکور با چالش‌های متعددی روبرو هستند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱) هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و عملیاتی (به ویژه در مورد روش‌های اکسیداسیون پیشرفته (AOPs^۵)) که به دلیل مصرف انرژی و مواد شیمیایی مانند پراکسید هیدروژن برای صنایع بزرگ مقرون به صرفه نیستند (Elmobarak et al., 2021).
- ۲) تولید حجم بالای لجن (در روش‌هایی مانند انعقاد شیمیایی و فتون) که نیازمند مدیریت ویژه پسماندهای تولیدی هستند (Mutegoa, 2024).
- ۳) حساسیت به شرایط عملیاتی (به ویژه در سیستم‌های بیولوژیکی که عملکرد آنها شدیداً تحت تأثیر پارامترهایی مانند دما، pH و غلظت مواد سمی قرار دارد (Kato & Kansha, 2024)).

^۱ Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes

^۲ Chemical Oxygen Demand

^۳ Volatile Organic Compounds

^۴ Zero Liquid Discharge

^۵ Advanced Oxidation Processes

در این میان، جذب سطحی به عنوان یک روش کارآمد و مقرون به صرفه برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی شناخته می‌شود که به دلیل مزایایی همچون هزینه عملیاتی پایین، سازگاری زیست‌محیطی و انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم‌ها، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. این فناوری قادر است طیف وسیعی از آلاینده‌ها شامل فلزات سنگین (مانند سرب و کادمیوم)، ترکیبات آلی نظیر BTEX و رنگ‌زاهای محیط آبی حذف نماید. مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از جاذب‌های پیشرفته مانند کربن فعال با سطح ویژه بالا (تا $1500 \text{ m}^2/\text{g}$) و نانولوله‌های کربنی (CNTs^1) به دلیل ساختار متخلخل و امکان اصلاح شیمیایی، می‌تواند بازده حذف آلاینده‌ها را تا ۹۵ درصد افزایش دهد (Das et al., 2018; Patel, 2019). جاذب‌های مورد استفاده در تصفیه فاضلاب به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

۱) جاذب‌های طبیعی: شامل موادی مانند کربن فعال تولید شده از پسماندهای کشاورزی (نظیر پوست نارگیل یا هسته آووکادو) که به دلیل در دسترس بودن و هزینه پایین، گزینه مناسبی برای حذف فلزات سنگین مانند سرب محسوب می‌شوند (Das et al., 2018) و زئولیت‌ها که با توجه به ساختار متخلخل و قابلیت تبادل یونی بالا، در جذب انتخابی یون‌های فلزی مانند مس و نیکل عملکرد مطلوبی دارند (Patel, 2019).

۲) جاذب‌های مصنوعی: شامل نانولوله‌های کربنی عامل‌دار شده با گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل یا سولفونات که ظرفیت جذب ترکیبات آلی مقاوم مانند فنول‌ها را تا ۹۴/۵۴ درصد افزایش می‌دهند (Das et al., 2018) و رزین‌های پلیمری نظیر پلی‌استایرن سولفون شده که در جذب یون‌های فلزی از فاضلاب‌های صنعتی کاربرد گسترده‌ای دارند (Patel, 2019). مزایای کلیدی روش جذب سطحی عبارتند از:

مصرف انرژی پایین در مقایسه با فرآیندهای شیمیایی مانند اکسیداسیون پیشرفته. امکان احیاء و استفاده مجدد از برخی جاذب‌ها (مانند نانولوله‌های کربنی) که موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. قابلیت طراحی جاذب‌های اختصاصی با گروه‌های عاملی ویژه برای جذب انتخابی آلاینده‌های هدف. مرور مطالعات انجام شده در پایگاه‌های معتبر علمی مانند الزویر و اشپرینگر نشان می‌دهد که اگرچه جاذب‌های نوین در مقیاس آزمایشگاهی نتایج امیدبخشی داشته‌اند، اما چالش‌هایی نظیر هزینه تولید بالا، پیچیدگی فرآیند بازیافت و تأثیرپذیری از ماتریکس پیچیده فاضلاب‌های صنعتی، مانع از کاربرد گسترده آنها شده است. این امر لزوم انجام پژوهش‌های بیشتر در زمینه بهینه‌سازی هزینه‌ها، ارزیابی سمیت زیستی و توسعه روش‌های کارآمد برای مقیاس‌پذیری صنعتی را آشکار می‌سازد.

در این راستا، پژوهش حاضر عملکرد سه نوع جاذب آلی (کربن فعال تولید شده از پوست انار)، معدنی (نانوسیلیکا) و ترکیبی در حذف COD و سایر پارامترهای کیفی فاضلاب پتروشیمی بررسی کرد. آزمایش‌ها به صورت ناپیوسته و در مقیاس آزمایشگاهی با در نظر گرفتن متغیرهای عملیاتی شامل دوز جاذب (۲ و ۴ گرم بر لیتر) و زمان تماس (۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه) در سه تکرار انجام شدند. سپس با استفاده از روش تحلیل چندمعیاره (MCA^2)، شرایط بهینه برای حذف COD، نیترات، سولفید، کدورت، کل جامدات محلول (TDS^3) و کل جامدات معلق (TSS^4) تعیین شد. نوآوری اصلی این پژوهش در بررسی همزمان جاذب‌های آلی، معدنی و ترکیبی برای کاهش توأمان چندین پارامتر کیفی فاضلاب پتروشیمی است که در مطالعات داخلی کمتر به آن پرداخته شده است. همچنین، ارائه مدل سینتیکی دقیق برای فرآیند جذب از دیگر جنبه‌های نوآورانه این تحقیق محسوب می‌شود. پیش‌بینی می‌شود نتایج این مطالعه بتواند گامی مؤثر در جهت توسعه روش‌های کارآمد و مقرون به صرفه برای تصفیه فاضلاب‌های پیچیده صنایع پتروشیمی باشد.

¹ Carbon NanoTubes² Multi Criteria Analysis³ Total Dissolved Solids⁴ Total Suspended Solids

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه جاذب‌ها

در این پژوهش از مواد شیمیایی با گرید آزمایشگاهی و درصد خلوص بالا از برندهای معتبر (مرک آلمان و سیگما آلدریچ) استفاده شد. برای تهیه جاذب‌های طبیعی، نمونه‌های پوست انار پس از دو مرحله شستشو با آب مقطر و خشک شدن در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، به صورت پودر درآمده و برای سنتز جاذب‌ها مورد استفاده قرار گرفتند (Zarroug et al., 2017). نمونه فاضلاب مورد مطالعه از واحد تصفیه خانه مجتمع پتروشیمی اصفهان جمع‌آوری شد.

۲-۲- سنتز جاذب‌ها

۲-۲-۱- جاذب آلی (کربن فعال پوست انار)

۵۰۰ گرم پودر پوست انار با اسید سولفوریک ۹۸ درصد به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط تیمار شد. پس از خنثی‌سازی با سدیم بی‌کربنات ۱ درصد و شستشو با آب مقطر تا رسیدن به $\text{pH}=6$ ، نمونه در آون ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شد (Gol et al., 2019).

۲-۲-۲- جاذب معدنی (نانوسیلیکا)

نانوسیلیکا با خلوص $\leq 99/3\%$ درصد از شرکت مرک (شماره کاتالوگ ۸۰۴۸۷۵) تهیه شد. مشخصات نانوسیلیکا با آنالیز TEM^۱ تأیید گردید که مورفولوژی ذرات به شکل کروی و با اندازه ۱۵-۲۰ نانومتر بود.

۲-۲-۳- جاذب ترکیبی

جاذب‌های ترکیبی با نسبت ۱:۱ از جاذب‌های آلی و معدنی تهیه شدند (Alexander et al., 2022). مشخصات جاذب‌های مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات جاذب‌های مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of the studied adsorbents

نماد جاذب	نوع جاذب	دوز مصرفی (g/L)
Control	شاهد	-
OA2	آلی	۲
OA4	آلی	۴
MA2	معدنی	۲
MA4	معدنی	۴
CA2	ترکیبی	۲
CA4	ترکیبی	۴

^۱ Transmission Electron Microscopy

۳-۲- آنالیز جاذب‌ها

خواص فیزیکی و شیمیایی جاذب‌ها با استفاده از آنالیزهای BET^۱ (اندازه‌گیری سطح ویژه و تخلخل جاذب‌ها) و EDX^۲ (شناسایی عناصر شیمیایی موجود در جاذب) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد:

جاذب معدنی: سطح ویژه ۱۴۰ m²/g و حجم حفرات ۵۶ cm³/g

جاذب آلی: سطح ویژه ۷۴۸ m²/g و حجم حفرات ۸۷ cm³/g

ترکیب عنصری جاذب‌ها با آنالیز EDX تأیید شد (Alem et al., 2017; Joseph et al., 2017). جدول (۲) نتایج آنالیز EDX عناصر کلیدی موجود در ساختار جاذب‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج آنالیز EDX عناصر کلیدی موجود در ساختار جاذب‌ها

Table 2. Results of EDX analysis of key elements in the adsorbents' structure

عنصر	نقش عملکردی	جاذب آلی %	جاذب معدنی %
کربن (C)	ایجاد ساختار متخلخل و گروه‌های عاملی	۷۲/۳	۱۸/۵
اکسیژن (O)	تشکیل پیوندهای هیدروکسیل و اکسیدی	۲۳/۱	۵۴/۷
سیلیس (Si)	پایداری ساختاری در جاذب معدنی	۱/۵	۲۲/۸
گوگرد (S)	بهبود گزینش‌پذیری برای فلزات سنگین	۲/۱	۳

نتایج جدول (۲) نشان داد که حضور سیلیس (Si) در جاذب معدنی (۲۲/۸ درصد) نشان‌دهنده پایه سیلیکاتی این ماده است. غلظت بالای کربن (C) در جاذب آلی (۷۲/۳ درصد) تأییدکننده ساختار کربنی فعال شده است. وجود گوگرد (S) در هر دو جاذب، امکان تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین (مانند کروم و سرب) را افزایش می‌دهد.

۳-۲- روش‌های آزمایشگاهی

۳-۲-۱- آزمایش‌های جذب ناپیوسته

نمونه‌های فاضلاب با دوزهای مختلف جاذب (۲ و ۴ گرم بر لیتر) در زمان‌های تماس ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه با سرعت همزدن ۱۵۰ rpm مورد بررسی قرار گرفتند (El-Naas et al., 2010). تمام آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد.

۳-۲-۲- آنالیز نمونه‌ها

پارامترهای COD، کدورت، نیتрат، سولفید، TSS و TDS مطابق با روش‌های استاندارد ASTM^۳ اندازه‌گیری شدند:

COD با اسپکتروفتومتر مدل X-500 (ASTM D1252)

کدورت با توربیدومتر (روش استاندارد نفلومتری)

^۱ Brunauer-Emmett-Teller

^۲ Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy

^۳ American Society for Testing and Materials

۲-۵- آنالیزهای آماری و مدلسازی

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ و روش ANOVA در سطح معناداری ۵ درصد تحلیل شدند.

در این مطالعه از سه مدل سینتیکی، شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و مدل سینتیکی ایلوویچ استفاده شد. فرم خطی معادله سینتیکی شبه مرتبه اول از رابطه (۱) بدست می‌آید (Revellame et al., 2020).

$$\log(q_e - q_t) = \log q_1 - \frac{k_1}{2.303} t \quad \text{مدل شبه مرتبه اول (معادله ۱)}$$

فرم خطی معادله سینتیکی شبه مرتبه دوم از رابطه (۲) بدست می‌آید (Tran et al., 2020).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_2^2} + \frac{t}{q_2} \quad \text{مدل شبه مرتبه دوم (معادله ۲)}$$

که در آنها q_2 و q_t (mg/g) به ترتیب میزان جذب آلاینده به ازای واحد جرم جاذب در زمان مشخص و میزان جذب آلاینده به ازای واحد جرم جاذب در تعادل برای مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم، t (min) زمان، k_1 (min^{-1}) و k_2 ($\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) به ترتیب ثابت‌های مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم هستند. به تازگی مدل سینتیکی جدیدی با نام ایلوویچ استفاده می‌شود، این مدل عموماً زمانی استفاده می‌شود که توسط یک جاذب جامد، آلاینده‌هایی از محلول آبی جذب می‌شوند به ویژه هنگامی که نرخ جذب در اثر افزایش پوشش سطح جاذب با گذشت زمان، کاهش می‌یابد (Zahri et al., 2017). همچنین این مدل فرض می‌کند که سطح جذب موثر بر روی جاذب دارای انرژی‌های ناهمگن می‌باشد و نیروهایی علاوه بر نیروهای واندروالس در فرآیند جذب مشارکت دارد (Peng et al., 2021). رابطه مدل سینتیکی ایلوویچ به صورت رابطه (۳) است.

$$\frac{dq_t}{dt} = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot q_t) \quad \text{مدل شبه مرتبه سوم (معادله ۳)}$$

برای مدل سینتیکی ایلوویچ برخی از محققان فرض کردند که $\left(\frac{1}{\alpha\beta}\right) \gg t$ برقرار است، آنها همچنین شرایط مرزی را به صورت $q_t = 0$ هنگامی که $t = 0$ و $q_t = q_t$ هنگامی که $t = t$ فرض کردند و پس از انتگرال‌گیری از رابطه (۳) رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$q_t = \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \ln(\alpha\beta) + \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \ln(t) \quad (۴)$$

در مدل ایلوویچ (معادله ۳ و ۴) مورد بررسی قرار گرفتند (Abualnaja et al., 2021; Revellame et al., 2020).

۲-۶- محاسبات

راندمان حذف (%) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{راندمان (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

C_0 غلظت اولیه آلاینده

C_t غلظت آلاینده در زمان

ظرفیت جذب (mg/g) با فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{m}$$

که در آن:

C_0 غلظت اولیه آلاینده (mg/L)

C_t غلظت آلاینده در زمان (mg/L)

V: حجم نمونه (L)

m: جرم جاذب (g)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تجزیه واریانس متغیرهای COD، نیترات، سولفات و کدورت

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) مندرج در جدول (۳)، تفاوت‌های معنی‌دار آماری ($p < 0.01$) بین تیمارهای جاذب‌های مختلف از نظر کارایی کاهش COD مشاهده شد. همچنین، بازه‌های زمانی تماس تأثیر بسیار معنی‌داری ($p < 0.01$) بر عملکرد حذف COD نشان دادند. جالب توجه اینکه اثر متقابل معنی‌داری ($p < 0.01$) بین دو عامل نوع جاذب و زمان تماس مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی این دو متغیر بر کارایی حذف COD می‌باشد.

جدول ۳- تجزیه واریانس متغیرهای COD، نیترات، سولفات و کدورت

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) for COD, nitrate, sulfate, and turbidity variables

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
COD	نیترات	سولفات	کدورت		
۳۸۶۹۳/۴**	۳۰۸/۰۸۴**	۴/۴۷۸**	۷۳۹/۷۲۹**	۶	تیمار
۳۸۹۸۵/۰**	۴۷۶/۰۲۸**	۱/۱/۲۲۲**	۲۲۷/۴۸۱**	۲	زمان
۶۲۷/۲**	۸/۸۲۹**	۰/۱۲۲**	۰/۸۹۳**	۱۲	تیمار * زمان
۰/۵	۰/۰۹۷	۰/۰۱۸	۰/۰۲۴	۵۷	خطا
۰/۲۳	۰/۵۴	۲/۸۵	۰/۲۲		ضریب تغییرات (%)

*: معنی دار در سطح احتمال یک درصد

این نتایج نشان می‌دهد که برای دستیابی به حداکثر کارایی در تصفیه پساب، باید هم نوع جاذب و هم زمان تماس بهینه شوند. اثر متقابل این دو عامل به‌ویژه برای حذف COD از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۳-۲- نتایج تاثیر تیمارهای جاذب بر کاهش COD

بر اساس داده‌های ارائه شده در شکل (۱) که مقایسه میانگین اثر تیمارهای جاذب را بر کاهش COD نشان می‌دهد، جاذب ترکیبی CA4 به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) بیشترین کاهش در غلظت COD را در مقایسه با سایر تیمارها موجب شد. تیمار شاهد به عنوان گروه کنترل، بالاترین میزان COD را حفظ نمود که این تفاوت با تمامی تیمارهای دیگر از لحاظ آماری معنی‌دار بود. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که عملکرد سایر جاذب‌های مورد بررسی از نظر کاهش COD در محدوده‌ای بین تیمار شاهد و جاذب ترکیبی CA4 قرار دارد. برتری عملکرد جاذب ترکیبی را می‌توان به اثر سینرژیک بین ویژگی‌های جاذب‌های آلی و معدنی نسبت داد. این یافته با نتایج مطالعه (Sakhile et al., 2022) که گزارش نمودند جاذب‌های ترکیبی در حذف آلاینده‌های پتروشیمی عملکرد بهتری دارند، همخوانی دارد. مطابق با یافته‌های (Kastali et al., 2021)، بخش معدنی جاذب‌های ترکیبی مسئول اصلی حذف کدورت و سولفات می‌باشد. این موضوع می‌تواند توجیهی برای عملکرد مطلوب جاذب ترکیبی مورد استفاده در این مطالعه در حذف این پارامترها باشد.

شکل ۱- مقایسه میانگین تیمارهای جاذب از نظر کاهش COD

(حروف غیرمشابه نشان دهنده تفاوت معنی‌دار آماری در سطح ۵ درصد آزمون ANOVA می‌باشند)

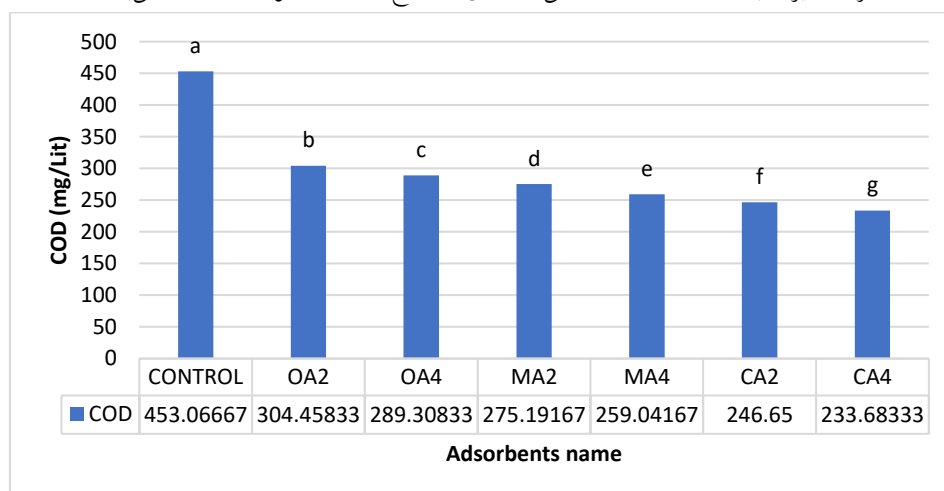


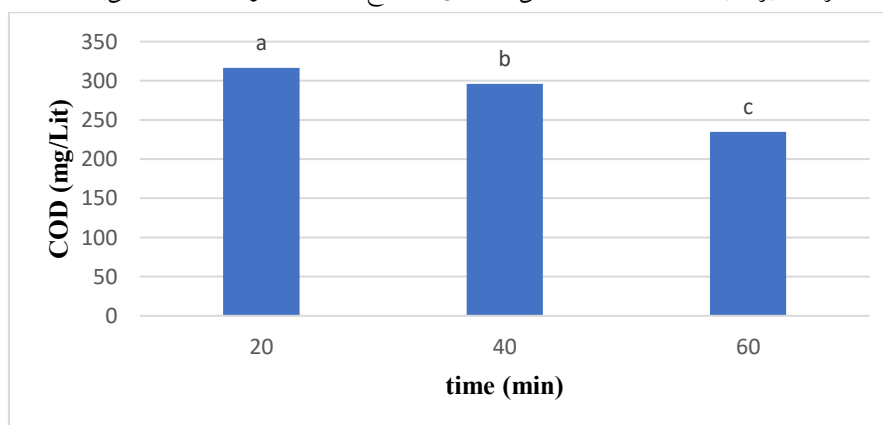
Fig 1. Comparison of the mean of adsorbent treatments regarding COD reduction (dissimilar letters indicate statistically significant differences at 5% level using ANOVA test)

۳-۳- نتایج تاثیر زمان بر کاهش COD

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲)، مقایسه زمان‌های تماس مختلف نشان داد که تیمار ۲۰ دقیقه‌ای بیشترین میانگین غلظت COD و تیمار ۶۰ دقیقه‌ای کمترین مقدار COD را داشتند. این نتایج حاکی از آن است که مدت زمان تماس ۶۰ دقیقه مؤثرترین کاهش در سطح COD را ایجاد می‌کند. مقایسه بازدهی در زمان‌های مختلف تماس نشان داد که بازدهی حذف در تیمار ۶۰ دقیقه‌ای حدود ۱/۵ برابر بیشتر از تیمار ۲۰ دقیقه‌ای است. این یافته توجیه فنی مناسبی برای افزایش زمان جذب تا ۶۰ دقیقه ارائه می‌دهد. فرآیند جذب وابسته به زمان از الگوی مشخصی پیروی می‌کند که در آن سایت‌های فعال سطح جاذب به تدریج اشباع شده و منجر به کاهش ظرفیت جذب در زمان‌های طولانی‌تر می‌شود. این پدیده به وضوح در مطالعه ما مشاهده شد، جایی که اگرچه بازدهی حذف با افزایش زمان از ۲۰ به ۶۰ دقیقه بهبود یافت، اما این افزایش با شیب کمتری اتفاق افتاد. نتایج مشابهی در مطالعات (Mohammed et al., 2011; Rasheed et al., 2011; Brito et al., 2019) که تاثیر جاذب‌های مختلف بر تصفیه پساب‌های پتروشیمی را تحقیق کرده‌اند نیز گزارش شده است.

شکل ۲- مقایسه میانگین زمان‌های مختلف از نظر متغیر COD

(حروف غیرمشابه نشان دهند تفاوت معنی‌دار آماری در سطح ۵ درصد آزمون ANOVA می‌باشند)

Fig 2. Comparison of mean COD values across different contact times (dissimilar letters indicate statistically significant differences at $p < 0.05$ according to ANOVA)

۳-۴- نتایج تاثیر pH بر کاهش COD

نتایج ارائه شده در شکل (۳) نشان داد که کاهش COD در pH های مختلف از تفاوت آماری معنی‌داری برخوردار است ($p < 0.05$). بیشترین کارایی حذف در محیط خنثی ($pH = 7$) مشاهده شد، در حالی که کمترین میزان جذب در محیط اسیدی ($pH = 3$) اتفاق افتاد. همچنین در شکل (۳)، نتایج کاهش COD در مقادیر مختلف pH (۳، ۷ و ۱۱) تنها برای جاذب ترکیبی بهینه‌شده ارائه شده است.

شکل ۳- مقایسه میانگین pH های مختلف از نظر متغیر COD
(حروف غیرمشابه نشان دهند تفاوت معنی‌دار آماری در سطح ۵ درصد آزمون ANOVA می‌باشند)

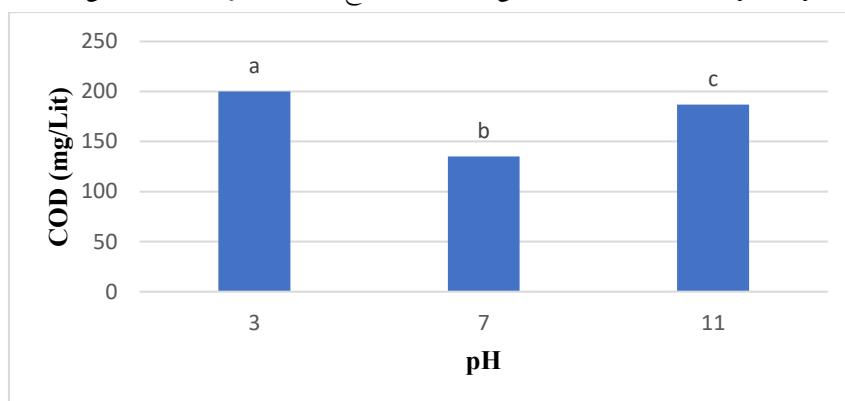


Fig 3. Comparison of mean COD values at different pH levels
(dissimilar letters indicate statistically significant differences at $p < 0.05$ by ANOVA)

این بررسی نشان داد که تغییرات pH تأثیر قابل توجهی بر کارایی جذب دارد. تغییرات pH می‌تواند از طریق مکانیسم‌های مختلفی از جمله تغییر بار سطحی جاذب، رقابت یونی و تغییر شکل شیمیایی آلاینده‌ها، راندمان جذب را تحت تأثیر قرار دهد. در این بخش، عوامل کاهش راندمان جذب در pH های غیربهینه و راهکارهای بهبود آن مورد بررسی قرار می‌گیرد: رقابت یونی: در محیط‌های اسیدی، یون‌های H_3O^+ با مولکول‌های آلاینده برای اشغال سایت‌های فعال جاذب رقابت می‌کنند. این رقابت منجر به کاهش جذب گونه‌های هدف می‌شود. در مقابل، در محیط‌های قلیایی، یون‌های OH^- با ایجاد دافعه الکترواستاتیک، مانع جذب مؤثر آلاینده‌های آلی می‌گردند (Almadani, 2023; Domingues et al., 2025).

تغییر بار سطحی جاذب: بار سطحی جاذب به شدت تحت تأثیر pH محیط قرار دارد: در pH های پایین، بار سطحی مثبت جاذب می‌تواند باعث دافعه الکترواستاتیک آلاینده‌های کاتیونی شود. در pH های بالا، بار منفی سطح جاذب، برهمکنش با آلاینده‌های آنیونی را کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، کربن فعال در pH خنثی (≈ 7) بیشترین جذب را نشان می‌دهد، در حالی که در pH های شدیداً اسیدی یا قلیایی، راندمان آن کاهش می‌یابد (Meng et al., 2018).

تغییر شکل شیمیایی آلاینده‌ها: pH محیط می‌تواند گونه‌های شیمیایی آلاینده‌ها را تغییر دهد. برای مثال: ترکیبات فنولی در pH قلیایی به شکل آنیونی درمی‌آیند که جذب آنها بر روی جاذب‌های با بار منفی را دشوار می‌سازد. در pH اسیدی، برخی فلزات سنگین به شکل کاتیونی قابل جذب هستند، در حالی که در pH بالا به هیدروکسیدهای نامحلول تبدیل می‌شوند (Heydari Orojloou et al., 2022).

پایداری جاذب در pH های شدید: برخی جاذب‌ها (مانند نانوکامپوزیت‌های پلیمری یا اکسیدهای فلزی) در pH های بسیار اسیدی یا قلیایی دچار تخریب ساختاری می‌شوند. این مسئله به ویژه در مورد جاذب‌های مبتنی بر کیتوزان یا برخی اکسیدهای فلزی مشاهده شده است (Heydari Orojloou et al., 2022).

به طور کلی، محیط‌های خنثی به دلیل عدم مزاحمت یونی، حفظ پایداری جاذب و سازگاری مطلوب بارهای سطحی، مطلوب‌ترین شرایط را برای جذب آلاینده‌ها فراهم می‌کنند. انتخاب جاذب مناسب (مانند کربن فعال، نانوکامپوزیت‌ها یا اکسیدهای فلزی) و کنترل دقیق pH می‌تواند به بهبود راندمان فرآیند جذب منجر شود. مطالعات نشان می‌دهند که بهینه‌سازی pH نه تنها کارایی جذب را افزایش می‌دهد، بلکه از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه است (Almadani, 2023; Meng et al., 2018).

۳-۵- نتایج مدل‌های سینتیکی

تمامی مدل‌های سینتیکی مورد استفاده در این بخش برای تمامی نمونه جاذب‌های معدنی، آلی و ترکیبی با دز ۴ g/Lit مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج مدلسازی سینتیکی با استفاده از مدل سینتیکی شبه مرتبه اول با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده در شکل (۴)، قابل مشاهده است.

شکل ۴- نمودار مدل سینتیکی شبه مرتبه اول

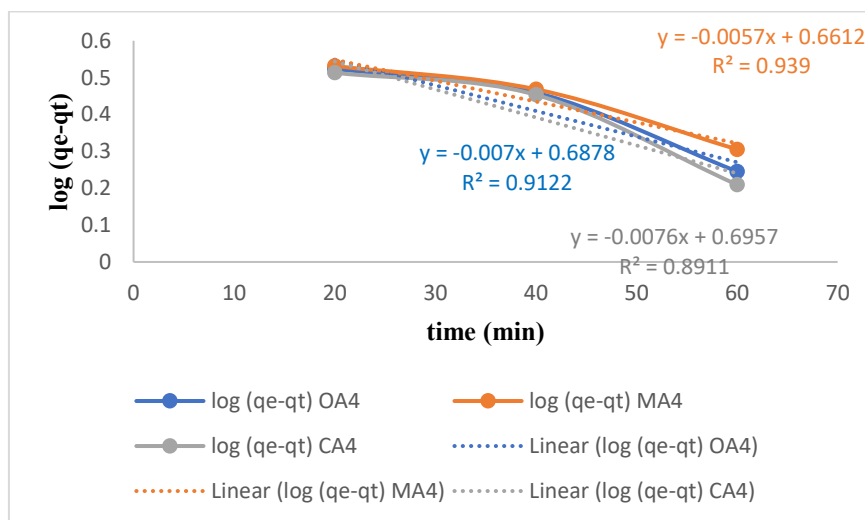


Fig 4. Pseudo-first-order kinetic model plot

نتایج مدل سینتیکی شبه مرتبه اول نشان می‌دهد که ضریب همخوانی در محدوده مناسبی است. نتایج محاسباتی مدل سینتیکی شبه مرتبه اول در جدول (۴)، نشان داد که بهترین همخوانی برای جاذب معدنی می‌باشد و در مقابل کمترین همخوانی برای جاذب ترکیبی است.

جدول ۴- نتایج محاسباتی مدل سینتیکی شبه مرتبه اول

Table 4 - Calculated results of the pseudo-first-order kinetic model

مقدار			پارامتر
CA4	MA4	OA4	
۰/۸۹	۰/۹۴	۰/۹۱	R^2
۴/۹۶	۴/۵۸	۴/۸۷	q_1
۰/۰۱۸	۰/۰۱۳	۰/۰۱۶	K_1

نتیجه نمودارهای ترسیم شده برای مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم برای ماده جاذب تهیه شده در این مطالعه در شکل (۵)، آورده شده است.

شکل ۵- نمودار مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم

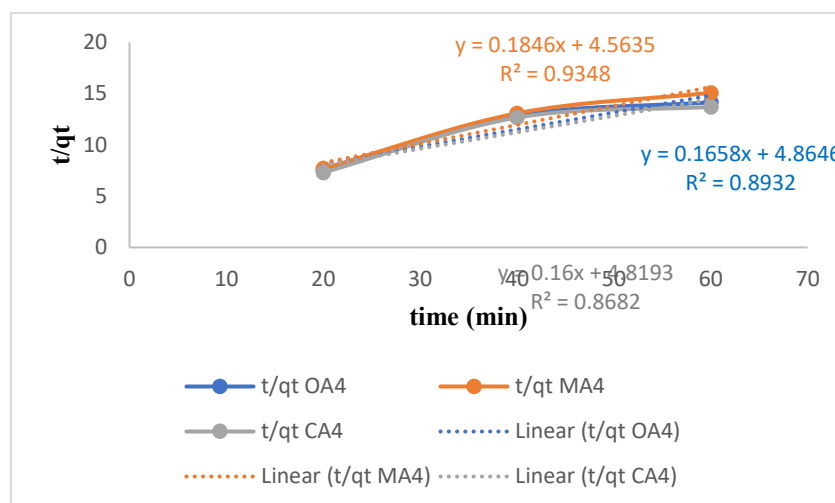


Fig 5. Pseudo-second-order kinetic model plot

با توجه به شکل (۵)، مشخص است که داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی سینتیکی با استفاده از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم دارای ضریب همبستگی بسیار مناسبی است، البته این ضریب همبستگی در مقایسه با مدل سینتیکی شبه مرتبه اول در سطح پایین‌تری است، بنابراین نتایج تجربی این مطالعه تطابق بهتری با مدل سینتیکی شبه مرتبه اول دارد. در جدول (۵) نتایج محاسباتی مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم آورده شده است.

جدول ۵- نتایج محاسباتی مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم

Table 5. Calculated parameters of the pseudo-second-order kinetic model

مقدار			پارامتر
CA4	MA4	OA4	
۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۸۹	R^2
۶/۲۵	۵/۴۲	۶/۰۳	q_2
۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵۷	K_2

نتایج مدل سینتیکی ایلوویچ در شکل (۶) آورده شده است.

با توجه به نمودارهای (۴-۶) می‌توان دریافت که مدل سینتیکی ایلوویچ نسبت به مدل شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم ضریب همخوانی پایین‌تری دارد. اما نتایج این مدل نیز سطح قابل قبولی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که نرخ جذب در اثر افزایش پوشش سطح جاذب با گذشت زمان، کاهش می‌یابد. نتایج محاسباتی مدل سینتیکی ایلوویچ در جدول (۶)، آورده شده است.

شکل ۶- نمودار مدل سینتیکی ایلوویچ

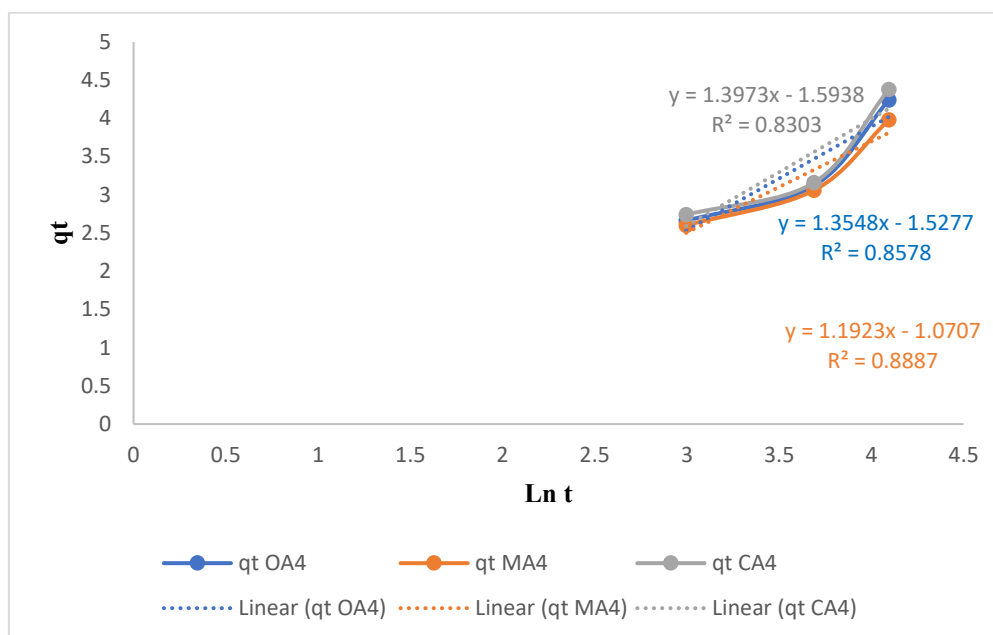


Fig 6. Elovich kinetic model plot

جدول ۶- نتایج محاسباتی مدل سینتیکی ایلوویچ

Table 6. Calculated parameters of the Elovich kinetic model

مقدار			پارامتر
CA4	MA4	OA4	
۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۸۶	R^2
۰/۴۴	۰/۴۸۵	۰/۴۳۹	α
۰/۷۲	۰/۸۳۹	۰/۷۳۸	β

مطالعات سینتیکی جذب سطحی اطلاعات ارزشمندی در مورد مکانیسم و سرعت فرآیند جذب ارائه می‌دهند (Salarian et al., 2014). در این پژوهش، مدل سینتیکی شبه مرتبه اول همخوانی قابل توجهی با داده‌های تجربی نشان داد که بیانگر مناسب بودن این مدل برای توصیف سینتیک جذب سطحی می‌باشد. اگرچه مدل شبه مرتبه دوم نیز تطابق نسبتاً خوبی داشت، اما نتایج نشان داد که مدل شبه مرتبه اول بهتر می‌تواند برهمکنش‌های سینتیکی و شیمیایی بین جاذب و جذب‌شونده را توجیه کند. این یافته با نتایج مطالعه (Niknejad et al., 2021) که در آن نیز مدل شبه مرتبه اول تطابق بهتری با داده‌های تجربی نشان داد، همخوانی دارد. چنین نتایجی حاکی از آن است که هنگامی که داده‌های تجربی با مدل شبه مرتبه اول همخوانی خوبی داشته باشند، مکانیسم جذب به ظرفیت جاذب وابسته است (Mohseni et al., 2021).

در مطالعه اخیر (Omar et al., 2023) سه مدل سینتیکی شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و مدل ایلوویچ برای بررسی جذب آلاینده‌های نفتی با استفاده از جاذب مشتق شده از پوست گندم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل شبه مرتبه اول بهترین تطابق را با داده‌های آزمایشگاهی دارد که می‌تواند نشان‌دهنده غالب بودن مکانیسم جذب فیزیکی در این سیستم باشد. نتایج عملکرد جذب نشان داد در شرایط بهینه ($pH=7$ ، زمان تماس ۶۰ دقیقه و دوز جاذب ۴ گرم بر لیتر)، بازدهی حذف COD به ۴۸ درصد رسید (جدول ۷). افزایش زمان تماس از ۲۰ به ۶۰ دقیقه منجر به بهبود ۱/۵ برابری بازدهی جذب شد.

هرچند این بازدهی در مقایسه با جاذب‌های متداول در صنعت تصفیه فاضلاب در حد متوسط تا قابل قبول ارزیابی می‌شود، اما کارایی نهایی به عواملی مانند نوع و غلظت آلاینده، هزینه‌های عملیاتی و شرایط اجرای فرآیند وابسته است. بررسی سینتیک جذب نشان می‌دهد که مدل شبه مرتبه اول می‌تواند به‌عنوان مدل مناسب برای توصیف مکانیسم جذب در این سیستم پیشنهاد شود. این یافته‌ها می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های تصفیه مبتنی بر جذب سطحی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۷- مقایسه عملکرد جاذب‌های مختلف در کاهش COD و شرایط بهینه عملیات

Table 7. Comparison of different adsorbents' COD removal efficiency and optimal operational conditions"

شرایط بهینه	راندمان کاهش COD (%)	نوع جاذب
pH=6-8، زمان ۹۰-۱۲۰ دقیقه	۳۰-۴۵	ژئولیت طبیعی
pH=5، دوز ۲-۳ گرم/لیتر	۵۵-۷۵	پلیمرهای فعال‌سازی شده
pH=3-5، زمان ۳۰-۶۰ دقیقه	۶۰-۸۰	کربن فعال تجاری
pH=7، زمان ۶۰ دقیقه، دوز ۴ گرم/لیتر	۴۸	جاذب ترکیبی

۳-۶- ملاحظات کلیدی در ارزیابی عملکرد جاذب‌های ترکیبی

۳-۶-۱- ملاحظات اقتصادی-عملیاتی: جاذب‌های ترکیبی با راندمان ۴۸ درصد اگرچه در مقایسه با پلیمرهای فعال‌سازی شده (۵۵-۷۵ درصد) عملکرد کمتری دارند، اما از مزایای قابل توجهی برخوردارند. این مزایا شامل هزینه تولید پایین‌تر، امکان بازیابی بهتر و سهولت بیشتر در فرآیند ساخت می‌شود. از سوی دیگر، ژئولیت‌های طبیعی با وجود راندمان نسبتاً پایین‌تر (۳۰-۴۵ درصد)، از لحاظ پایداری محیط زیستی و دوام عملیاتی مزیت قابل توجهی دارند.

۳-۶-۲- تأثیر شرایط عملیاتی: دستیابی به راندمان ۴۸ درصد در pH خنثی و زمان تماس کوتاه (۶۰ دقیقه) برای صنایع پتروشیمی حائز اهمیت است. این شرایط منجر به کاهش مصرف انرژی و سادگی اجرای فرآیند می‌شود که از لحاظ عملیاتی و اقتصادی بسیار مطلوب است.

۳-۶-۳- جایگاه فناوری: عملکرد ۴۸ درصد این جاذب در مقایسه با برخی جاذب‌های متداول (مانند ژئولیت‌ها) قابل قبول ارزیابی می‌شود، اما در مقایسه با پلیمرهای پیشرفته یا کربن‌های فعال تجاری نیاز به بهبود دارد. با این حال، با توجه به مزایای متعدد از جمله هزینه تولید پایین، سادگی اجرا، سازگاری با مدل سینتیکی ایلوویچ و ملاحظات محیط زیستی، این جاذب می‌تواند به عنوان گزینه‌ای اقتصادی-محیط‌زیستی برای کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار گیرد. این ویژگی‌ها به ویژه برای صنایعی که به دنبال تعادل بین کارایی، هزینه و ملاحظات محیط‌زیستی هستند، بسیار ارزشمند است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که جاذب ترکیبی CA4 در شرایط اسیدیته خنثی (pH=7) با راندمان ۴۸ درصد در کاهش COD، عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. تطابق مناسب داده‌های تجربی با مدل سینتیکی شبه مرتبه اول حاکی از توانایی بالای این جاذب در جذب آلاینده‌های آلی می‌باشد. این یافته با مطالعات انجام شده بر روی کربن فعال که در محیط‌های خنثی عملکرد بهتری دارند، همخوانی دارد. کاهش راندمان در pH اسیدی عمدتاً ناشی از رقابت یون‌های H_3O^+ با مولکول‌های آلاینده برای اشغال سایت‌های فعال جاذب می‌باشد. جاذب CA4 با دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد، گزینه‌ای امیدبخش برای کاربردهای صنعتی در حذف آلاینده‌ها محسوب می‌شود. از مهم‌ترین مزایای این جاذب می‌توان به قابلیت استفاده در مقیاس نیمه صنعتی با

هزینه تولید پایین اشاره کرد که به دلیل استفاده از مواد اولیه ضایعاتی امکان‌پذیر شده است. این جاذب در شرایط بهینه قادر است تا ۹۰ درصد COD را حذف کند که نشان‌دهنده کارایی بالای آن است. همچنین، قابلیت ترکیب با فرآیند فنتون در pH اسیدی امکان حذف ترکیبات سمی و مقاوم را فراهم می‌آورد. از دیگر مزیت‌های CA4، پایداری قابل توجه آن در چرخه‌های مکرر استفاده است به طوری که پس از ۵ چرخه، ۸۰ درصد از کارایی اولیه خود را حفظ می‌کند.

برای بهبود بیشتر عملکرد این جاذب، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده بر بهینه‌سازی ساختار جاذب با فناوری نانو متمرکز شوند تا سطح مؤثر و ظرفیت جذب افزایش یابد. همچنین، بررسی تأثیر پارامترهای محیطی مانند دما و شوری بر عملکرد جاذب می‌تواند به درک بهتر رفتار آن در شرایط عملیاتی مختلف کمک کند. علاوه بر این، توسعه جاذب‌های اصلاح شده با گروه‌های عاملی جدید می‌تواند راهکاری برای بهبود انتخاب‌پذیری و کارایی در حذف آلاینده‌های خاص باشد. این تحقیقات می‌توانند زمینه را برای توسعه نسل جدیدی از جاذب‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه هموار کنند.

این پژوهش با وجود دستاوردهای ارزشمند، با چندین محدودیت اساسی روبرو بوده است که لازم است در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرند. نخستین چالش، تفاوت در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی جاذب‌های مختلف است که می‌تواند قابلیت تکرارپذیری نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. از سوی دیگر، شرایط کنترل شده آزمایشگاهی ممکن است نتواند به طور کامل شرایط پیچیده محیط‌های عملیاتی را شبیه‌سازی کند. مدل‌های سینتیکی مورد استفاده در این مطالعه، با وجود کارایی نسبی، از برخی پیچیدگی‌های موجود در سیستم‌های واقعی صرف‌نظر کرده‌اند. همچنین چالش‌های مقیاس‌پذیری این فناوری از مقیاس آزمایشگاهی به صنعتی نیازمند بررسی‌های عمیق‌تر و جامع‌تری می‌باشد. از دیگر محدودیت‌های مهم، نیاز به ارزیابی دقیق‌تر جنبه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی این فناوری است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که جاذب CA4 علی‌رغم پتانسیل بالای کاربردی در صنعت، نیازمند انجام مطالعات تکمیلی در محیط‌های نیمه‌صنعتی و توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر برای شبیه‌سازی شرایط واقعی می‌باشد. به نظر می‌رسد ترکیب این جاذب با سایر فرآیندهای تصفیه پیشرفته می‌تواند راهکار مؤثری برای دستیابی به استانداردهای کیفی تخلیه پساب ارائه نماید. این رویکرد یکپارچه می‌تواند بر بسیاری از محدودیت‌های موجود فائق آید.

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

عاطفه براهیمی: بررسی و جمع‌آوری داده‌ها، روش‌شناسی، نرم‌افزار و تجزیه و تحلیل، نگارش. **مژگان احمدی ندوشن:** روش‌شناسی، نظارت، نگارش و بازبینی متن. **علی اصغر بسالت‌پور:** اعتبارسنجی، نظارت، بازبینی متن. **میترا عطا آبادی:** تجزیه و تحلیل، ویرایش متن.

منابع

Abualnaja, K. M., Alprol, A. E., Ashour, M., & Mansour, A. T. (2021). Influencing multi-walled carbon nanotubes for the removal of Ismate Violet 2R dye from wastewater: Isotherm, kinetics, and thermodynamic studies. *Applied Sciences*, 11(11), 4786. <https://doi.org/10.3390/app11114786>

Alem, M., Tarlani, A., & Aghabozorg, H. (2017). Synthesis of nanostructured alumina with ultrahigh pore volume for pH-dependent release of curcumin. *RSC Advances*, 7(62), 38935-38944. <https://doi.org/10.1039/C7RA03231E>

- Alexander, J., Ibrahim, M., Nuhu, S., & Anietie, A. (2022). Preparation of activated carbon adsorbent from coconut husk for the adsorption of lead (II) ions from aqueous solution. *Nigerian Journal of Tropical Engineering*, 16(1). <https://doi.org/10.59081/njte.16.1.001>
- Almadani, M. (2023). Adsorption process modeling to reduce COD by activated carbon for wastewater treatment. *Chemosphere*, 339, 139691. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139691>
- Barati, G.-S., Borghei, S. M., Jalilzadeh Yengejeh, R., & Takdastan, A. (2023). Removal of COD and TOC from petroleum synthetic wastewater containing cyclic aromatic hydrocarbons using the photo-Fenton process by the Box-Behnken method. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 11(2), 72-81. <https://doi.org/10.34172/jaehr.2023.09>
- Brito, J., Bessegato, G. G., Souza, P. S., Viana, T. R., Oliveira, D. P., Martinez-Huitle, C. A., & Zandoni, M. V. B. (2019). Combination of photoelectrocatalysis and ozonation as a good strategy for organics oxidation and decreased toxicity in oil-produced water. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(5), H3231-H3238. <https://doi.org/10.1149/2.0331905jes>
- Das, R., Das Tuhi, S., & Zaidi, S. M. J. (2018). Adsorption. In R. Das (Ed.), *Carbon nanotubes for clean water* (pp. 85-106). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95603-9_4
- Domingues, E., Lincho, J., Fernandes, M. J., Gomes, J., & Martins, R. C. (2025). Low-cost materials for swine wastewater treatment using adsorption and Fenton's process. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(16), 10519-10529. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29677-1>
- Dusa, R. M., Antonio Liebminger, L., & Lahnsteiner, J. (2020). Water management in oil refining and petrochemical production. In J. Lahnsteiner (Ed.), *Handbook of water and used water purification* (pp. 1-43). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23081-4_1
- El-Naas, M. H., Al-Zuhair, S., & Alhaija, M. A. (2010). Reduction of COD in refinery wastewater through adsorption on date-pit activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1), 750-757. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.002>
- Elmobarak, W. F., Hameed, B. H., Almomani, F., & Abdullah, A. Z. (2021). A review on the treatment of petroleum refinery wastewater using advanced oxidation processes. *Catalysts*, 11(7), 782. <https://doi.org/10.3390/catal11070782>
- Gol, N. H., Danesh, M. F., & Hoseini, S. (2019). Investigating the potential of activated carbon produced from pomegranate peel as an adsorbent of dyes and divalent and trivalent metals in liquid environments. *Iranian Food Science and Industry Research Journal*, 15(2), 369-380. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v15i4.68925>. (In Persian)
- Heydari Orojloo, S., Rastegarzadeh, S., & Zargar, B. (2022). Experimental and modeling analyses of COD removal from industrial wastewater using the TiO₂-chitosan nanocomposites. *Scientific Reports*, 12(1), 11088. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15387-0>
- Joseph, C. G., Quek, K. Y., Daud, W. M. A. W., & Moh, P. Y. (2017). Physical activation of oil palm empty fruit bunch via CO₂ activation gas for CO₂ adsorption. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 206, 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/206/1/012003>
- Kastali, M., Mouhir, L., Chatoui, M., Souabi, S., & Abdelkader, A. (2021). Removal of turbidity and sludge production from industrial process wastewater treatment by a rejection of steel rich in FeCl₃ (SIWW). *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(6), 13359-13376. <https://doi.org/10.33263/BRIAC115.1335913376>
- Kato, S., & Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(39), 51064-51097. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>
- Lawan, M. S., Kumar, R., Rashid, J., & Barakat, M. A. E.-F. (2023). Recent advancements in the treatment of petroleum refinery wastewater. *Water*, 15(20), 3676. <https://doi.org/10.3390/w15203676>
- Meng, X., Wu, J., Kang, J., Gao, J., Liu, R., Gao, Y., ... Hu, Y. (2018). Comparison of the reduction of chemical oxygen demand in wastewater from mineral processing using the coagulation-flocculation, adsorption and Fenton processes. *Minerals Engineering*, 128, 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.09.009>
- Mohammed, S. J., Faisal, I. S., & Alwan, M. J. (2011). Oily wastewater treatment using expanded beds of activated carbon and zeolite. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.31699/IJCPE.2011.1.1>
- Mohseni, F., Akbarzade, N., & Kondori, T. (2021). Investigating the kinetics and isotherm of the surface adsorption process of nickel oxide nanoparticles in the removal of food coloring from industrial wastewater [In Persian]. *Journal of Applied Chemistry*, 16(58), 333-348. <https://doi.org/10.22075/chem.2020.19771.1799>

- Mutegoa, E. (2024). Efficient techniques and practices for wastewater treatment: An update. *Discover Water*, 4(1), 69. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00131-8>
- Niknejad, H., Esrafil, A., Kermani, M., & Farzadkia, M. (2021). Kinetic and equilibrium models for adsorption of 2,4 DNP compound on chemically modified waste sludge. *Journal of Environmental Health Engineering*, 8(2), 130-141. <https://doi.org/10.52547/jehe.8.2.130>
- Omar, B., Abdelgalil, S., Fakhry, H., Tamer, T., & El-Sonbati, M. (2023). Wheat husk-based sorbent as an economical solution for removal of oil spills from sea water. *Scientific Reports*, 13, 12345. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29035-8>
- Omar, B. M., Zyadah, M. A., Ali, M. Y., & El-Sonbati, M. A. (2024). Pre-treatment of composite industrial wastewater by Fenton and electro-Fenton oxidation processes. *Scientific Reports*, 14(1), 27906. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78846-w>
- Patel, H. (2019). Fixed-bed column adsorption study: A comprehensive review. *Applied Water Science*, 9(3), 45. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7>
- Peng, D., Li, H., Li, W.-J., & Zheng, L. (2021). Biosorbent with superhydrophobicity and superoleophilicity for spilled oil removal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209, 111803. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111803>
- Rasheed, Q. J., Kannaiyan, P., & Muthukumar, K. (2011). Treatment of petroleum refinery wastewater by ultrasound-dispersed nanoscale zero-valent iron particles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(5), 1138-1142. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.03.015>
- Revellame, E. D., Fortela, D. L., Sharp, W., Hernandez, R., & Zappi, M. E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>
- Sakhile, K., Sarkar, J., Gupta, P., & Feroz, S. (2022). Removal of major pollutants from petroleum wastewater by adsorption with activated carbon derived from date seed in an inverse fluidized bed. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07109-5>
- Salarian, P., Makkari, F., Saleh, M., & Khalilpor, M. (2014). Investigation of linear and non-linear methods of quasi-quadratic kinetics model in the surface adsorption of cobalt (II) from aqueous solutions. *Journal of Water and Wastewater*, 25(1), 1-12. (In Persian)
- Tran, H. V., Hoang, L. T., & Huynh, C. D. (2020). An investigation on kinetic and thermodynamic parameters of methylene blue adsorption onto graphene-based nanocomposite. *Chemical Physics*, 535, 110793. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2020.110793>
- Zahri, N. A. M., Jamil, S. N. A. M., Abdullah, L. C., Jia Huey, S., Yaw, T. C. S., Mobarekeh, M. N., & Rapeia, N. S. M. (2017). Equilibrium and kinetic behavior on cadmium and lead removal by using synthetic polymer. *Journal of Water Process Engineering*, 17, 277-289. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.04.013>
- Zarroug, M., Foo, K. Y., Souissi, S., & Ouederni, A. (2017). Preparation of pomegranate peels derived activated carbons by chemical and physio-chemical activation for the successive treatment of hazardous actaminophen. *International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Journal*, 12 (3), 45-56.

Technical Strategies in Water Systems

Winter 2024, Volume2, issue 4

e-ISSN: 2981-1449

Comparison of water footprint trends in different products of Iran's economic sectors	285-303
Elmira Tarvirdizadeh, Seyed Abbas Hosseini, Zahra Abedi, Mohammad Sadegh Alipour	
Optimization of the cross-section and free board of trapezoidal channels based on the minimum probability of overflow and excavation and covering costs	304-314
Maryam Ghasemi Khiadani, Ali Khoshfetrat, Mohammad Maleki	
Structural health monitoring of concrete dams using modern methods (Case study: Baghan Jam Dam)	315-327
Seyed Shahab Emamzadeh, Mostafa Heydari	
Social-cultural responsibility of consumers, stakeholders and decision makers of water in water shortage crisis	328-338
Majid Raoufi Borojeni, Siamak Koorang Beheshti, Ali Rashidpoor	
Investigating the best low-Impact Development (LID) method for urban runoff management using Analytical Hierarchy Process (AHP) (Case study: Khomeinishahr)	339-362
Kamel Rezaei Adriani, Majid Riahi Samani, Moslem Gheibi Hajivar	
Evaluation of organic, inorganic, and hybrid adsorbents for COD reduction in petrochemical wastewater: A kinetic modeling approach	363-380
Atefeh Barahimi, Mozhgan Ahmadi Nadoushan, Aliasghar Besalatpour, Mitra Ataabadi	
